

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

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

**Studio dei muoni cosmici con l'esperimento
XENONnT ai Laboratori Nazionali del
Gran Sasso**

Relatore:

Dott. Marco Selvi

Correlatore:

Dott. Pietro Di Gangi

Presentata da:

Elena Bonali

Anno Accademico 2023/2024

Abstract

La materia ordinaria contribuisce per circa il 15% alla materia totale dell'Universo: la restante frazione è attribuita alla Materia Oscura, la quale non interagisce elettromagneticamente, ma solo gravitazionalmente e, secondo vari modelli, debolmente. Uno dei candidati per la Materia Oscura sono le WIMP (Weakly Interacting Massive Particle), particelle previste dalle teorie supersimmetriche, le cui interazioni con la materia ordinaria sono caratterizzate da piccole sezioni d'urto, che si cerca di rivelare in esperimenti di rivelazione diretta con grandi masse bersaglio e bassi livelli di rumore di fondo.

L'esperimento XENONnT presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso è l'attuale rivelatore del progetto XENON, uno dei più sensibili al mondo per la ricerca diretta delle WIMP. Il suo obiettivo è la rivelazione dei segnali di luce e carica rilasciati dalla collisione delle WIMP con i nuclei di Xenon contenuti in una Dual-Phase Time Projection Chamber. Esso ha ottenuto un limite di superiore per la sezione d'urto di 2.58×10^{-47} cm² per le interazioni indipendenti dallo spin di una WIMP di massa 28 GeV/c². Per raggiungere tali risultati è fondamentale la riduzione del rumore di fondo causato dai raggi cosmici e dai neutroni radiogenici, grazie ai sistemi Muon e Neutron Veto.

Questo lavoro di tesi si concentra sul fondo provocato dai raggi cosmici tramite lo studio degli eventi registrati dal Muon Veto che rivelano il passaggio di un muone. In particolare si è approfondito il contributo dei segnali di AfterPulse (AP), i quali, a seconda dell'abbondanza con cui si manifestano, generano tre popolazioni di eventi muone di durata temporale crescente e occorrenze pari al 91.0%, 8.5%, 0.5% del totale. Esaminando la distribuzione degli hitlet della prima popolazione si nota infatti, dopo un primo segnale corrispondente al passaggio del muone, un picco intorno a 400 ns dovuto agli AP generati dagli ioni H⁺. Nella seconda, si osserva un altro picco a 1900 ns provocato dagli ioni He⁺ e nella terza due ulteriori picchi a 4700 ns e 6700 ns, il primo dovuto a ioni compresi tra O⁺, CH₄⁺, N₂⁺, O₂⁺, Ar⁺ e il secondo allo ione CO₂⁺. Inoltre, si è individuato a 128 ns il tempo che discrimina all'interno di un evento gli hitlet generati dall'arrivo del muone da quelli provocati dagli AP, la cui area nelle tre popolazioni rappresenta l'8.6%, 8% e 14.9% del totale. Infine, studiando la molteplicità con cui ogni fotomoltiplicatore partecipa agli AP, si è osservato che alcuni di essi sono più predisposti a generare questo fenomeno. Nonostante ciò, nessun fotomoltiplicatore presenta comportamenti anomali, tali da essere esclusi dall'analisi dati.

Indice

Introduzione	4
1 La Materia Oscura	6
1.1 Evidenze sperimentali	6
1.1.1 Coma Cluster	7
1.1.2 Curve di rotazione delle galassie	7
1.1.3 Lensing gravitazionale	8
1.1.4 Bullet Cluster	10
1.1.5 Cosmic Microwave Background	10
1.2 Natura della Materia Oscura	12
1.2.1 Materia Oscura barionica	13
1.2.2 Materia Oscura non barionica	13
1.2.3 Alternative alla Materia Oscura: Modified Newtonian Dynamics (MOND)	15
1.3 Metodi per la rivelazione della Materia Oscura	16
1.3.1 Rivelazione diretta	17
1.3.2 Rivelazione indiretta	19
1.3.3 Ricerca negli acceleratori di particelle	19
2 Il Progetto XENON	21
2.1 La Time Projection Chamber e lo Xenon	24
2.1.1 Proprietà dello Xenon liquido	24
2.1.2 Principio di funzionamento della TPC	25
2.2 Rumore di fondo in XENONnT	27
2.2.1 ER background	28
2.2.2 NR background	29
2.2.3 Alcune strategie di mitigazione del rumore di fondo	30
2.3 Il sistema Muon Veto	30
2.3.1 Descrizione del Muon Veto	30
2.3.2 Effetto Cherenkov	32
2.4 Il sistema Neutron Veto	33

2.4.1	Descrizione del Neutron Veto	33
2.4.2	Cattura neutronica e rivelazione del segnale	34
2.5	Fotomoltiplicatori	35
2.5.1	Principio di funzionamento	35
2.5.2	Rumore di fondo	36
3	Studio degli eventi rivelati dal Muon Veto	38
3.1	Raccolta dei dati sperimentali	39
3.1.1	Acquisizione dei dati	40
3.1.2	Elaborazione dei dati	40
3.2	Selezione degli eventi nel Muon Veto	41
3.3	Contributo degli AfterPulse all'interno degli eventi muone	43
3.3.1	Definizione delle popolazioni di AfterPulse	44
3.3.2	Contributo in area degli AfterPulse	48
3.3.3	Molteplicità dei PMT nei segnale di AfterPulse	51
	Conclusioni	53

Introduzione

La materia ordinaria, costituita nella maggior parte da protoni, neutroni ed elettroni, compone solamente il 5% della massa e dell'energia del nostro Universo. Modelli teorici ed esperimenti condotti negli ultimi decenni hanno infatti mostrato che la restante frazione è composta per il 27% da Materia Oscura e per il 68% da Energia Oscura. Le principali prove dell'esistenza della Materia Oscura provengono da osservazioni astrofisiche e cosmologiche: anomalie delle curve di rotazione della galassie a spirale, stime delle masse degli oggetti cosmici effettuate tramite lensing gravitazionale, la peculiare distribuzione della massa all'interno del Bullet Cluster e le anisotropie della radiazione cosmica di fondo. Da queste osservazioni emergono alcune fondamentali caratteristiche che la Materia Oscura deve possedere, quali la stabilità su scale di tempi cosmologici e la possibilità di interagire solo gravitazionalmente o tramite la forza debole.

Nel Capitolo 1 di questa tesi, insieme alle principali evidenze sperimentali a supporto dell'esistenza della Materia Oscura, si discutono i possibili candidati. Tra di essi le WIMP (Weakly Interacting Massive Particles), una classe di particelle supersimmetriche presenti fin dalle prime fasi dell'Universo, si configurano come l'ipotesi più accreditata. Altri studi sostengono l'esistenza della Materia Oscura sotto forma di MACHO (Massive Compact Halo Objects), neutrini fossili o assioni. Per le sue proprietà sopra indicate, la probabilità di osservare l'interazione della Materia Oscura con quella ordinaria è molto bassa e di conseguenza i processi che la contraddistinguono sono caratterizzati da un piccola sezione d'urto. I metodi con cui si indaga la natura particellare della Materia Oscura si possono distinguere in tre gruppi: la ricerca diretta, quella indiretta e la produzione negli acceleratori. La prima categoria di esperimenti si propone di rivelare l'energia rilasciata dalla collisione delle WIMP con dei nuclei bersaglio; data la rarità degli eventi attesi, si cerca il più possibile di aumentare l'esposizione dell'esperimento e di sopprimere il rumore di fondo, utilizzando rivelatori molto massivi realizzati con materiali ultra-puri e situati in ambienti a bassa radioattività come i laboratori sotterranei. Gli esperimenti di ricerca indiretta tentano invece di osservare i prodotti di annichilazione o decadimento della Materia Oscura. Infine, negli acceleratori si cerca di rivelare la presenza delle WIMP prodotte durante la collisione di particelle di materia ordinaria.

Nel Capitolo 2 si descrive il progetto XENON, uno dei più all'avanguardia nell'ambito della ricerca diretta delle WIMP, situato presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso

(LNGS) a partire dal 2005. L'esperimento ricerca la collisione di una particella di Materia Oscura con i nuclei di Xenon contenuto in forma liquida e gassosa all'interno di una Dual-Phase Time Projection Chamber. Dal 2021 è in funzione il rivelatore XENONnT, il quale ha ottenuto un limite superiore per la sezione d'urto WIMP-nucleone pari a $2.58 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ per le interazioni indipendenti dallo spin per una WIMP di massa pari a $28 \text{ GeV}/c^2$ [1]. A tale scopo è risultato fondamentale l'utilizzo dei due sistemi di veto: il Muon Veto e il Neutron Veto, progettati per ridurre significativamente il background provocato dai raggi cosmici e dai neutroni radiogenici.

Nel Capitolo 3 si è concentrata l'attenzione sul fondo causato dai raggi cosmici tramite lo studio degli eventi registrati dal Muon Veto relativi al passaggio di un muone. All'interno di essi si è approfondito il contributo dei segnali di AfterPulse, i quali costituiscono una componente del rumore di fondo dei fotomoltiplicatori utilizzati nell'esperimento, dispositivi in grado di trasformare i segnali di luce in segnali elettrici processabili. I differenti tempi di comparsa dei segnali di AfterPulse hanno portato a una distinzione di tre diverse popolazioni di eventi che rivelano l'arrivo di un muone. Si sono inoltre caratterizzati i tempi, le probabilità di arrivo degli AfterPulse e le molecole residue nei fotomoltiplicatori responsabili della loro generazione. Infine, è stato determinato il loro contributo in area all'interno degli eventi muone e analizzato come la loro presenza coinvolga diversamente gli 84 fotomoltiplicatori del Muon Veto.

Capitolo 1

La Materia Oscura

La materia ordinaria descritta dal Modello Standard delle particelle contribuisce per circa il 15% alla materia totale dell'Universo. La frazione restante è costituita da Materia Oscura, la cui natura è una delle questioni aperte più discusse nella fisica degli ultimi decenni. L'esistenza della Materia Oscura è supportata da numerose osservazioni, a partire da scale galattiche fino ad arrivare a scale cosmologiche; ma il vero interrogativo risiede nel comprenderne la natura. Tra i modelli proposti spicca quello di una Materia Oscura fredda (CDM) composta da WIMP (Weakly Interacting Massive Particles), particelle massive debolmente interagenti previste da teorie che superano il Modello Standard. Molti esperimenti sono in corso con lo scopo di osservare la Materia Oscura sotto l'una o l'altra natura. In questo primo capitolo vengono descritte le principali prove della sua esistenza, le ipotesi più accreditate riguardo la sua natura e i diversi approcci sperimentali per rivelarla.

1.1 Evidenze sperimentali

Evidenze per l'esistenza della Materia Oscura provengono da un ampio range di scale astronomiche: da pochi kpc (la dimensione tipica di una piccola galassia), a pochi Mpc (la dimensione degli ammassi di galassie), fino essenzialmente alla dimensione dell'Universo osservabile, pari a circa 30 Gpc. Tipicamente, l'attenzione si concentra su tre principali evidenze: le osservazioni di singole galassie (discusse nella sezione 1.1.2), di ammassi di galassie (sezioni 1.1.1, 1.1.3 e 1.1.4) e della radiazione cosmica di fondo (CMB, sezione 1.1.5). Queste osservazioni non hanno però la stessa rilevanza: le prime due sono intuitive e basate sulla fisica classica, tuttavia non sono le più utilizzate per misure quantitative. La terza prova invece, basata sul modello cosmologico standard, costituisce l'evidenza più significativa di Materia Oscura e lo strumento più preciso per descriverne le proprietà. Tutte le prove discendono dagli effetti gravitazionali che produce la Materia Oscura e non ci sono tuttora evidenze basate su altre interazioni [2].

Storicamente, la prima evidenza sperimentale risale al 1933, anno in cui Fritz Zwicky notò, osservando la dispersione delle velocità delle galassie all'interno del Coma Cluster, che risultava necessaria l'esistenza di ulteriore materia, non visibile, per spiegarne la dinamica gravitazionale. Ad essa si susseguono, in ordine cronologico, prove basate sulle osservazioni delle curve di rotazione di galassie a spirale, del fenomeno di lensing gravitazionale, dell'emissione di raggi X proveniente da ammassi di galassie e, infine, su osservazioni del CMB.

1.1.1 Coma Cluster

Gli ammassi di galassie sono tra i più grandi sistemi legati gravitazionalmente all'interno dell'Universo. Essi contengono centinaia di migliaia di galassie e si estendono per alcuni Mpc; ciò li rende dei buoni modelli per studiare l'Universo "medio".

Nel 1933, l'astronomo svizzero Fritz Zwicky si concentrò sullo studio del movimento delle galassie all'interno del Coma Cluster, contenente un migliaio di galassie e distante circa 99 Mpc dalla Terra. A partire dalla misura dell'effetto Doppler dello spettro di emissione delle galassie, egli riuscì a calcolarne la dispersione delle velocità e, di conseguenza, la loro energia cinetica. Nell'ipotesi che la materia dell'ammasso fosse distribuita uniformemente nello spazio all'interno di una sfera, Zwicky applicò a questi risultati il teorema del Viriale ($\langle K \rangle = -\frac{1}{2}\langle V \rangle$), il quale mette in relazione l'energia cinetica media $\langle K \rangle$ con l'energia potenziale gravitazionale media $\langle V \rangle$. Trovò in questo modo una stima della massa totale dell'ammasso pari a $4.5 \times 10^{13} M_{\odot}$ (masse solari), un esito sorprendente, dato che il valore della massa di materia luminosa risultava circa ~ 400 volte minore. Il risultato portò Zwicky a ipotizzare l'esistenza della "Materia Oscura", la quale contribuisce ad aumentare la massa totale dell'ammasso ma non la sua luminosità [3]. Oggi si stima che in un ammasso generico la massa delle stelle nelle galassie rappresenti l'1-2% della massa totale, mentre il gas intergalattico, la cui radiazione nello spettro X non era osservabile ai tempi di Zwicky, componga il 5-15%; il resto della massa si attribuisce alla Materia Oscura.

L'ipotesi di Zwicky non fu largamente accettata dalla comunità scientifica fino a quarant'anni più tardi, quando si diffusero ulteriori prove sperimentali a favore dell'esistenza della Materia Oscura.

1.1.2 Curve di rotazione delle galassie

Un'ulteriore prova a favore dell'esistenza della Materia Oscura si affermò alla fine degli anni '70 dalle anomalie emerse dagli studi di Vera Rubin e dei suoi collaboratori sull'andamento delle curve di rotazione delle galassie a spirale. Esse ruotano attorno al loro asse verticale e, misurando l'effetto Doppler delle linee di emissione atomiche, è possibile determinare la velocità circolare delle stelle e di altri traccianti (ad esempio nubi di idrogeno e maser) come una funzione della loro distanza dal centro galattico, ottenendo una

curva di rotazione. Partendo da essa, è possibile dedurre la distribuzione della massa all'interno di una galassia eguagliando la forza centrifuga all'attrazione gravitazionale. Assumendo una simmetria sferica, si ottiene una semplice relazione tra la velocità circolare $v(r)$ di una massa (ad esempio una stella) e la massa $\mathcal{M}(r)$ contenuta all'interno di un raggio r :

$$m \frac{v(r)^2}{r} = \frac{Gm\mathcal{M}(r)}{r^2} \rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{G\mathcal{M}(r)}{r}} \quad (1.1)$$

dove G è la costante di gravitazione universale. In questo tipo di galassie, la maggior parte della massa visibile è concentrata in un denso bulge sferico al centro e nei bracci del disco. A raggi abbastanza grandi, perciò, tutta la massa visibile è contenuta nell'orbita e può essere sostituita nell'equazione 1.1 con una costante \mathcal{M} . La velocità dovrà quindi diminuire con l'allontanarsi dal centro galattico seguendo l'andamento kepleriano:

$$v(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (1.2)$$

Il gruppo di Vera Rubin riscontrò la prima anomalia nella Galassia di Andromeda (M13), per la quale tracciò circa 70 nubi di idrogeno utilizzando la riga di emissione dell'idrogeno neutro a $\lambda = 21$ cm [4]. Essi trovarono un andamento piatto della curva di rotazione fino circa 22 kpc. Questo risultato fu confermato da ulteriori osservazioni su circa 60 galassie per le quali vennero analizzati spettri sia in banda radio, sia ottica. In tutti i casi, si trovarono curve di rotazione piatte fino a 50 kpc o più, come mostrato in un esempio in Figura 1.1.

Tale anomalia fu velocemente interpretata come un'evidenza di "massa mancante" e il problema della Materia Oscura acquisì maggiore importanza. Anche oggi, con centinaia di galassie a spirale osservate, l'andamento piatto delle curve di rotazione rimane probabilmente l'evidenza più intuitiva e convincente a favore della Materia Oscura.

1.1.3 Lensing gravitazionale

Un'ulteriore evidenza sperimentale dell'esistenza della Materia Oscura proviene dal lensing gravitazionale. Le origini teoriche del fenomeno si trovano nella Relatività Generale di Albert Einstein, la quale afferma che un corpo dotato di massa deforma la struttura dello spazio-tempo circostante. Il percorso dei fotoni da una sorgente all'osservatore segue la geometria dello spazio-tempo e viene perciò deviato dalla sua traiettoria originale quando è presente un oggetto massivo. L'immagine della sorgente risulta perciò distorta.

Quando l'oggetto massivo e la sorgente luminosa si trovano sulla stessa linea di vista dell'osservatore, si osserva la formazione degli anelli di Einstein, anelli luminosi in cui al centro si osserva l'oggetto che provoca la distorsione, detto lente gravitazionale. Il perfetto allineamento è un caso limite e ciò che si osserva in generale sono "archi" o anelli di Einstein parziali. In queste circostanze si parla di lensing forte; una schematizzazione

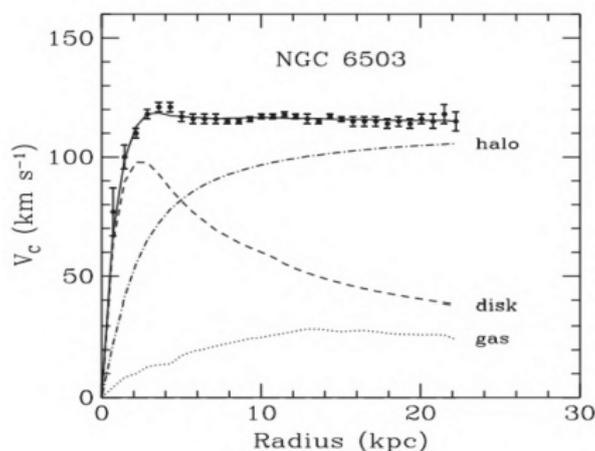


Figura 1.1: Curva di rotazione delle stelle nella galassia NGC 6503 [5]. I punti rappresentano le velocità misurate, le quali mostrano, dopo una crescita iniziale, un andamento costante. La linea tratteggiata mostra l'andamento kepleriano atteso per le componenti visibili, la linea puntinata quello del gas e la linea tratto-punto è il contributo ipotetico che potrebbe giustificare i dati osservati.

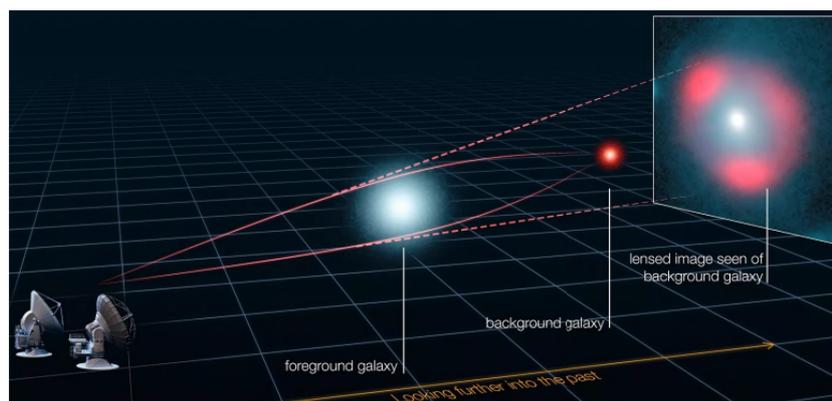


Figura 1.2: Schematizzazione del lensing gravitazionale forte. L'allineamento tra l'osservatore, la galassia lente e la sorgente di luce si traduce, nell'immagine risultante, in un anello luminoso che circonda la galassia lente.

di questo fenomeno è presente in Figura 1.2. Nel caso, invece, in cui i fotoni passino lontano dal centro della lente e quindi l'allineamento non sia ottimale, si parla di lensing gravitazionale debole o microlensing. In questo caso, la distorsione della sorgente è minore, quasi impercettibile, e non si osservano immagini multiple.

Il lensing gravitazionale è uno strumento valido per stimare la distribuzione della massa degli oggetti che fungono da lenti, quali galassie o ammassi. Le masse stimate con questo procedimento risultano molto maggiori di quelle calcolate a partire dalla materia

visibile, risultato che suggerisce che tale discrepanza possa essere attribuita alla presenza di Materia Oscura in percentuale maggiore rispetto alla materia ordinaria.

1.1.4 Bullet Cluster

Ad oggi, una delle evidenze più spettacolari della presenza di Materia Oscura per le scale di lunghezza degli ammassi di galassie viene dalle osservazioni di una coppia di ammassi in collisione, nota come Bullet Cluster (1E0657-558), posizionata a 3.7 Gyr dalla Terra. La maggior parte della massa barionica dell'ammasso è nella forma di gas caldo intergalattico, la cui distribuzione può essere tracciata tramite l'emissione di raggi X. La distribuzione della massa totale può essere invece misurata in modo indipendente con la tecnica del lensing gravitazionale debole.

In precedenza ognuno dei due ammassi era un sistema distinto, mentre 150 milioni di anni fa i due oggetti andarono incontro a collisione. Un urto di questo tipo produce effetti diversi sulla materia delle galassie e sul gas intergalattico: le prime non interagiscono e non si scontrano data l'elevata distanza una dall'altra (circa un Mpc). Al contrario, gli ammassi gassosi subiscono un forte urto, a causa dell'elevata sezione d'urto, il quale porta a un notevole aumento delle temperature e all'emissione di raggi X, osservata nel caso del Bullet Cluster dal telescopio orbitale CHANDRA nel 2004. Confrontando la distribuzione di massa luminosa ricavata dall'emissione di raggi X e la distribuzione di massa totale stimata tramite l'effetto del lensing gravitazionale, si nota una discrepanza: la regione in cui è presente la maggior quantità di massa non risulta quella del gas intergalattico.

Ciò è spiegabile assumendo l'esistenza di Materia Oscura, la quale, producendo collisioni trascurabili con se stessa e la materia barionica, attraversa indisturbata entrambe. Questo spiega la separazione della componente visibile e Oscura, come è possibile osservare in Figura 1.3. Questa caratteristica rappresenta la peculiarità di questo sistema di ammassi e risulta una delle prove più convincenti dell'esistenza della Materia Oscura, in quanto non può essere spiegata da alterazioni della legge di gravità prevista dalla Relatività Generale.

1.1.5 Cosmic Microwave Background

Su scala cosmologica, il Cosmic Microwave Background (CMB), radiazione residua che risale alle fasi iniziali dell'Universo, fornisce indizi e intuizioni significative riguardo l'esistenza e il ruolo della Materia Oscura nell'Universo. Per migliaia di anni a seguito del Big Bang, l'Universo si è trovato in uno stato di plasma così denso e caldo da essere opaco alla radiazione. In questa epoca (Epoca della Radiazione), la radiazione era in equilibrio termico con la materia, a causa dei continui urti che subiva con gli elettroni, e produceva uno spettro identico a quello di un corpo nero alla stessa temperatura della materia. La materia barionica era prevalentemente ionizzata a causa dell'elevata energia

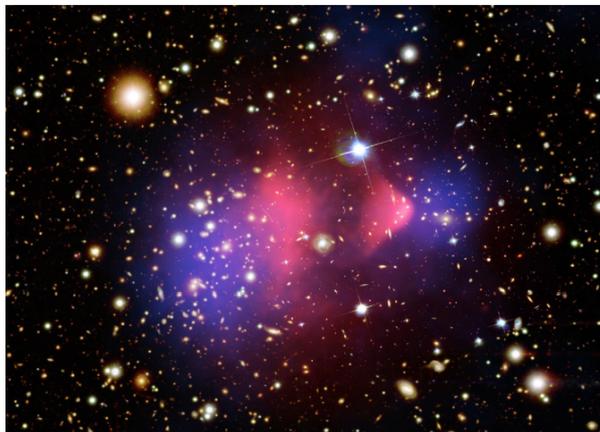


Figura 1.3: Immagine del Bullet Cluster (1E0657-558) osservato con telescopio ottico Hubble. Vi è sovrapposta in rosa l'immagine dei raggi X realizzata dal telescopio CHANDRA, la quale mostra la distribuzione del gas caldo intergalattico presente negli ammassi che hanno subito la collisione e che costituisce la maggior parte della massa ordinaria. Sono rappresentate in blu le regioni di distribuzione della massa totale ricostruita tramite microlensing [6].

dei fotoni, i quali impedivano agli elettroni di combinarsi con i nuclei presenti (Deuterio ^2H , Elio He e alcune tracce di Litio Li). Con la progressiva espansione e raffreddamento dell'Universo, si giunge all'Epoca della Ricombinazione: gli elettroni sono in grado di legarsi ai nuclei dal momento che l'interazione tra fotoni e materia diventa trascurabile. I fotoni possono viaggiare liberamente e l'Universo diventa trasparente alla radiazione, la quale perde progressivamente energia mantenendo lo spettro di corpo nero. Questa radiazione raffreddata non è altro che il CMB, osservato per la prima volta dal telescopio COBE (COsmic Background Explorer) che ne ha mostrato lo spettro di corpo nero con temperatura di 2.726 K [7].

Misurazioni precise del CMB, tra cui quella della sonda Planck dell'Agenzia spaziale ESA [8], hanno dimostrato l'esistenza di deviazioni di temperatura dal valore medio dell'ordine di 10^{-5} K. Queste sono la chiave per capire la composizione e l'evoluzione del cosmo. La collaborazione Planck [9] ha mappato con grande precisione queste anisotropie di temperatura, attribuite a perturbazioni della densità nelle prime fasi dell'Universo, che costituiscono una delle maggiori prove dell'esistenza della Materia Oscura. Le fluttuazioni del CMB si possono studiare con uno sviluppo in armoniche sferiche $Y_{lm}(\theta, \phi)$ delle variazioni relative di temperatura:

$$\frac{\delta T(\theta, \phi)}{T} = \sum_{\ell=2}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi) \quad (1.3)$$

Dall'equazione 1.3 si possono calcolare importanti parametri cosmologici, come la curvatura dell'Universo e la sua composizione. La collaborazione Planck ha calcolato

stime accurate di questi parametri ottenendo i seguenti valori per la densità di materia oscura e barionica:

$$\Omega_{DM}h^2 = 0.120 \pm 0.001 \quad \Omega_b h^2 = 0.0224 \pm 0.0001 \quad (1.4)$$

da cui emerge che nel nostro Universo la materia oscura è cinque volte più abbondante di quella barionica. La densità di materia totale risulta pari a $\Omega_m h^2 = 0.315 \pm 0.007$, mentre il rimanente 68.5% dell'Universo è costituito dall'Energia Oscura, introdotta per spiegare l'espansione accelerata dell'Universo. Il modello cosmologico che rispecchia questi dati con un elevato grado di accuratezza è il Λ - Cold Dark Matter (Λ CDM) secondo il quale l'evoluzione dell'Universo è dominata dalla Materia Oscura fredda piuttosto che da quella calda.

1.2 Natura della Materia Oscura

Quale sia la natura della Materia Oscura è un quesito tutt'ora aperto e oggetto di intenso dibattito scientifico. Nel corso degli ultimi decenni, sono stati proposti vari candidati con caratteristiche diverse tra loro. Ci sono tuttavia alcune proprietà comuni che questi devono soddisfare, indicate dalle osservazioni astrofisiche e cosmologiche. La Materia Oscura:

- deve possedere una massa e avere una abbondanza tale da essere in accordo con la densità di materia misurata;
- deve essere stabile su tempi cosmologici, poichè era presente nelle prime fasi dell'Universo e non è ancora scomparsa;
- non deve interagire (o farlo in modo trascurabile) attraverso interazione elettromagnetica e forte con se stessa e con la materia ordinaria.

L'ampio panorama a cui appartengono i vari candidati consiste in particelle e oggetti astrofisici la cui massa varia su oltre 90 ordini di grandezza, da 10^{-21} eV fino a 10^{37} kg. I diversi candidati possono essere suddivisi in due categorie principali: Materia Oscura barionica, costituita da corpi astrofisici non luminosi e massivi, e Materia Oscura non barionica, costituita da particelle che in base alle loro caratteristiche possono appartenere alla Hot Dark Matter (HDM) o Cold Dark Matter (CDM). Un'illustrazione dei principali candidati di Materia Oscura in funzione della loro massa è presente in figura 1.4.

All'interno di questo quadro incerto si sono diffuse alcune teorie che prevedono di risolvere i fenomeni gravitazionali osservati senza introdurre ulteriori masse, ma modificando alcune teorie precedenti, come nel caso della dinamica newtoniana per la teoria MOND.

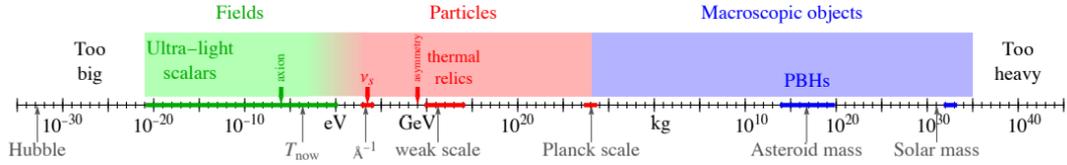


Figura 1.4: Illustrazione dei principali candidati di Materia Oscura in funzione della loro massa. Le estremità delle aree colorate corrispondono ai limiti di massa inferiore e superiore. L'ampio range può essere suddiviso in tre principali regioni qualitativamente differenti: i campi, le particelle e gli oggetti macroscopici; anche se dalla Teoria Quantistica dei Campi i primi due sono fondamentalmente gli stessi oggetti [2].

1.2.1 Materia Oscura barionica

La Materia Oscura può essere composta da Massive Astrophysical Compact Halo Objects (MACHO), ad esempio pianeti, stelle di neutroni, buchi neri, nane brune. Questi oggetti non emettono luce e quindi soddisfano la definizione di Materia Oscura. Sono composti da materia barionica e la loro origine non risale alle prime età dell'Universo, elemento che rende impossibile il loro legame con la CMB discusso nella sezione 1.1.5. L'ipotesi che la Materia Oscura sia composta solo da materia barionica è perciò da scartare. Questa affermazione è supportata anche dalla quantità insufficiente di MACHO osservata nell'Universo circostante (in particolare nella Via Lattea e nei suoi dintorni) da alcuni esperimenti tramite la tecnica del microlensing. Nel 2000, la Collaborazione MACHO ha pubblicato i risultati di 5.7 anni di ricerche su un campione di 11.9 milioni di stelle appartenenti alla Grande Nube di Magellano, dalle quali emergono 13-17 eventi di microlensing [10]. Nel 2007, inoltre, l'esperimento EROS-2 ha reso noti i risultati dell'osservazione di 33×10^6 stelle nelle Nubi di Magellano, nei quali si osserva un solo evento di microlensing [11]. Alla luce di ciò, risulta necessaria la ricerca di ulteriori candidati di Materia Oscura composti di materia non barionica.

1.2.2 Materia Oscura non barionica

Esistono due modelli principali in cui è possibile suddividere le ipotesi di materia oscura non barionica: quello di Materia Oscura fredda (CDM) e Materia Oscura calda (HDM). La prima è composta da particelle più pesanti che si muovono lentamente rispetto alla velocità della luce, la seconda da particelle più leggere che si muovono con velocità relativistiche. Approcciarsi all'uno o all'altro modello varia sensibilmente lo scenario della formazione delle prime strutture dell'Universo e della loro evoluzione. Il modello della CDM porta a considerare un andamento di tipo bottom-up per evoluzione dell'Universo, per il quale si sarebbero formate prima le strutture più piccole e meno massive e poi costruite le più grandi per aggregazione delle prime; il modello HDM prevede invece un

andamento top-down, in cui le strutture più piccole si sarebbero formate a partire da quelle più grandi. Ad oggi, è la prima ipotesi ad essere quella più accreditata e compatibile con gli studi fatti dagli esperimenti COBE e WMAP, al contrario di quello che emerge per la seconda. Tuttavia, nessuna delle due risulta completamente soddisfacente: il modello CDM sembra essere consistente con le osservazioni su scale molto grandi, ma non funziona altrettanto bene sulle scale delle singole galassie. Si è arrivati perciò a pensare ad un modello ibrido, composto dall'una e dall'altra ipotesi.

Nelle prossime pagine sono descritti i principali candidati della Materia Oscura non barionica, appartenenti sia al Modello Standard, sia a teorie alternative che lo superano, come la Supersimmetria (SUSY).

Neutrini Fossili

I neutrini costituiscono i candidati più ovvi di Materia Oscura all'interno del Modello Standard, in quanto sono le uniche particelle stabili, elettricamente neutre e debolmente interagenti. Data la loro massa estremamente piccola, viaggiano a velocità relativistiche e rientrano perciò nell'ipotesi di HDM. Si ritiene che pochi istanti dopo il Big-Bang sia stato prodotto un enorme numero di neutrini di ogni sapore, che sono sopravvissuti fino ad oggi diminuendo via via la loro energia a causa dell'espansione dell'Universo; è a questi neutrini, detti fossili, che si fa riferimento in merito alla Materia Oscura. Emergono però due principali difficoltà che portano ad attancatonare l'idea che i neutrini fossili possano costituire la maggior parte della Materia Oscura nell'Universo. In primo luogo, come spiegato precedentemente, il modello HDM presuppone una formazione top-down dell'Universo, non conforme alle osservazioni. Inoltre, la massa del neutrino è troppo piccola per giustificare la densità di Materia Oscura prevista. Il parametro di densità è dato dalla formula [12]:

$$\Omega_\nu h^2 = \frac{\sum_i m_i}{93.14 eV} \quad (1.5)$$

dove $\sum_i m_i$ rappresenta la somma delle masse dei tre sapori del neutrino, il cui valore è vincolato da $\sum_i m_i < 0.12$ eV [9]. Con questo limite superiore, l'equazione precedente si può riscrivere come $\Omega_\nu h^2 < 0.0013$, dalla quale risulta un parametro di densità per i neutrini fossili che costituisce circa l'1% della densità di Materia Oscura prevista dall'equazione 1.4.

Assioni

Gli assioni sono particelle introdotte teoricamente da R. Peccei e H. Quinn nel 1977 per risolvere il problema della violazione della simmetria CP dell'interazione forte. Questa rottura, prevista teoricamente, ma mai stata osservata sperimentalmente, comporterebbe la comparsa di un dipolo elettrico sul neutrone. Secondo Peccei e Quinn, un assione verrebbe prodotto ogni volta che questa simmetria si rompe spontaneamente. La loro teoria prevede perciò l'introduzione di una nuova particella con massa molto piccola, spin nullo, non relativistica, che interagisce solo gravitazionalmente e con vita media maggiore

di quella dell'Universo. Gli assioni, prodotti in gran numero già nei primi istanti dopo il Big Bang, sarebbero quindi in grado di spiegare la massa mancante dell'Universo [13]. Il loro contributo alla densità, previsto dalla teoria, è pari a

$$\Omega_a = \left(\frac{5 \times 10^{-6}}{m_a}\right)^{1.2} \quad (1.6)$$

dove m_a è la massa dell'assione; questo risulta rilevante solo se m_a varia tra i 10^{-3} e i 10^{-5} eV. Sperimentalmente si cerca di osservare gli assioni tramite l'effetto "Primakoff", per il quale ci si aspetta che gli assioni si convertano in fotoni sotto l'effetto di un campo elettromagnetico molto intenso. Ancora nessun esperimento ha mai avuto successo nel rivelare eventi di questo tipo.

WIMP

I candidati più promettenti sono però rappresentati dalle WIMP (Weakly Interactive Massive Particles): particelle stabili, debolmente interagenti e aventi una massa compresa tra i GeV e i TeV. Esse rientrano nell'ambito delle teorie supersimmetriche, la cui ipotesi principale prevede, per ogni particella, l'esistenza di una partner con spin che differisce di $\frac{1}{2}$; ad ogni fermione e bosone corrisponde quindi un bosone e un fermione di uguale massa. Si suppone che le WIMP fossero presenti fin dalle prime fasi di vita dell'Universo, inizialmente in equilibrio con il plasma, e che in seguito, a causa dell'espansione e del raffreddamento, si siano disaccoppiate fino a raggiungere la densità di Materia Oscura attuale. Il candidato più accreditato tra le WIMP è il neutralino χ [14], la particella più leggera tra quelle supersimmetriche. Il motivo della stabilità di una particella così massiva risiede nella conservazione della R-parità, definita come:

$$R = (-1)^{3B+L+S} \quad (1.7)$$

dove B, L, S sono il numero barionico, leptonico e di spin. Ogni particella del Modello Standard ha R-parità uguale a +1, mentre la R-parità del partner supersimmetrico è -1. In virtù di questa conservazione ed essendo la particella supersimmetrica più leggera, il neutralino non va incontro a decadimento.

1.2.3 Alternative alla Materia Oscura: Modified Newtonian Dynamics (MOND)

L'andamento inatteso delle curve di rotazione delle galassie a spirale, discusso nella sezione 1.1.2, può essere spiegato non solo assumendo l'esistenza di una massa di Materia Oscura, ma anche introducendo una modifica alla seconda legge di Newton. È ciò che suggerisce M. Milgrom nel 1982 proponendo la prima teoria di gravità modificata, detta MOND. Milgrom postula che, al di sotto un'accelerazione critica a^* pari a $(1.2 \pm 0.1) \times 10^{10}$ m/s², la nota legge di Newton $F = ma$ si trasformi in $F = m \frac{a^2}{a^*}$, dove

la dipendenza quadratica è stata scelta dal momento che le curve di rotazione diventano piatte ad accelerazioni inferiori di a^* .

L'applicazione di questa legge ad alcuni ammassi globulari di stelle non porta però a risultati altrettanto soddisfacenti ed, estendendo le analisi agli ammassi di galassie, emerge che MOND può solo parzialmente spiegare la massa mancante negli ammassi. Il problema è inoltre esacerbato dalle osservazioni del Bullet Cluster (sezione 1.1.4), così come dalle osservazioni di altre collisioni tra ammassi di galassie, oggetti in cui qualsiasi sostanza responsabile della Materia Oscura è separata spazialmente dalla materia visibile. La Materia Oscura non è quindi semplicemente legata alla distribuzione della materia ordinaria, contrariamente alle ipotesi di MOND. Infine, queste teorie falliscono nello spiegare le evidenze più importanti per la Materia Oscura, le quali si trovano nelle osservazioni della CMB e nella formazione delle strutture [2]. Oltre a ciò, un altro grosso limite delle teorie MOND risiede nel loro essere non relativistiche. Nel 2004 Jacob Bekenstein è riuscito a formularne un'estensione relativistica, detta TeVeS (Tensor-Vector-Scalar gravity), che risolve molti problemi concettuali. Un'ulteriore confutazione di questi modelli viene però dall'osservazione delle onde gravitazionali, avvenuta per la prima volta nel 2015, la quale si configura come un'importante conferma della Relatività Generale [15].

1.3 Metodi per la rivelazione della Materia Oscura

Ad ora le prove dell'esistenza della Materia Oscura sono basate su osservazioni indirette che provano unicamente il suo accoppiamento gravitazionale, ma per comprendere che cosa sia è essenziale osservare come essa interagisce con particelle note. Per farlo esistono tre principali vie di investigazione, schematizzate in figura 1.5: la rivelazione diretta, quella indiretta e la ricerca negli acceleratori.

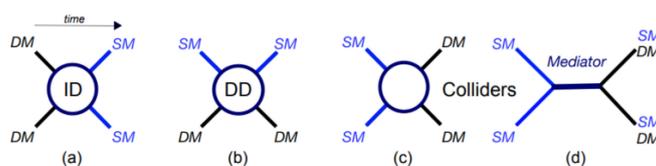


Figura 1.5: Illustrazione schematica delle interazioni che coinvolgono la Materia Oscura e relativi metodi di rivelazione. DM sta per Dark Matter, cioè Materia Oscura, mentre con SM si indica una particella del Modello Standard. La figura (a) mostra l'annichilazione di particelle di DM con conseguente creazione di SM, interazione ricercata negli esperimenti di rivelazione indiretta (ID). La figura (b) mostra lo scatter tra DM e SM, la cui osservazione è prevista tramite esperimenti di rivelazione diretta (DD). La figura (c) mostra la produzione di DM per annichilazione di SM, prevista negli acceleratori (colliders). La figura (d) mostra la produzione di DM che avviene tramite una particella mediatrice tra Materia Oscura e materia ordinaria; anche l'osservazione di questo processo è previsto negli acceleratori [16].

1.3.1 Rivelazione diretta

L'idea che le WIMP potessero essere rivelate attraverso la loro collisione con nuclei bersaglio in esperimenti terrestri è nata da Goodman e Witter nel 1985 [17]. La sezione d'urto prevista per queste collisioni è molto piccola, perciò in questi esperimenti si cerca di diminuire il più possibile il rumore di fondo, costituito dalla radioattività naturale dell'ambiente circostante, dei materiali e soprattutto dai raggi cosmici. Per facilitare questo processo si tende a porre questi esperimenti sottoterra. Dato il rate molto piccolo di questi eventi, si cerca inoltre di aumentare l'esposizione dell'esperimento, la durata della raccolta dei dati e le dimensioni del bersaglio, costituito da nuclei. Come conseguenza della collisione con la Materia Oscura, il nucleo che ha subito il rinculo deposita energia nel mezzo in cui si trova. Ciò può accadere attraverso tre processi: l'emissione di luce tramite scintillazione da parte del nucleo durante la sua diseccitazione, la ionizzazione dell'atomo in cui si trova con la conseguente creazione di cariche libere e la produzione di calore. I rivelatori finora utilizzati a seconda delle loro caratteristiche sono in grado di osservare contemporaneamente al più due dei tre segnali, come mostrato in figura 1.6. Per esempio, utilizzando bolometri criogenici dotati di lettura di carica si riesce a rivelare fononi e il segnale di ionizzazione; con bolometri scintillanti si rivelano segnali di scintillazione e fononi; infine, con le Time Projection Chamber (TPC) a doppia fase liquido-solido si riesce a registrare sia segnali di scintillazione che di carica elettrica. La rivelazione combinata di due segnali è fondamentale per distinguere gli eventi d'interesse da quelli di background.

Lo scattering che avviene tra particelle di Materia Oscura e nuclei è principalmente di tipo elastico e il segnale atteso è quello del trasferimento di quantità di moto ai nuclei e il loro conseguente rinculo. Il rate di scattering differenziale per unità di energia E_R e massa del bersaglio è [19]:

$$\frac{dR}{dE_R} = \frac{\rho}{m_\chi m_N} \int_{v_{\min}}^{\infty} v f(v) \frac{d\sigma}{dE_R} dv \quad (1.8)$$

dove ρ è la densità di Materia Oscura nell'alone galattico della Via Lattea, pari a 0.3 GeV/cm^3 , m_χ e m_N sono le masse della particella di Materia Oscura e del nucleo, v è la velocità della particella di Materia Oscura, v_{\min} è la velocità minima della Materia Oscura perché avvenga un rinculo nucleare di energia E_R , $f(v)$ è la distribuzione di velocità delle particelle di Materia Oscura e σ è la sezione d'urto della collisione. Le WIMP sono non relativistiche, perciò, utilizzando le leggi della meccanica Newtoniana, l'energia di rinculo risulta:

$$E_R = \frac{\mu_N^2 v^2}{m_N} (1 - \cos \theta) \quad (1.9)$$

dove $\mu_N = \frac{m_\chi m_N}{m_\chi + m_N}$ è la massa ridotta del sistema particella-bersaglio e θ è l'angolo di

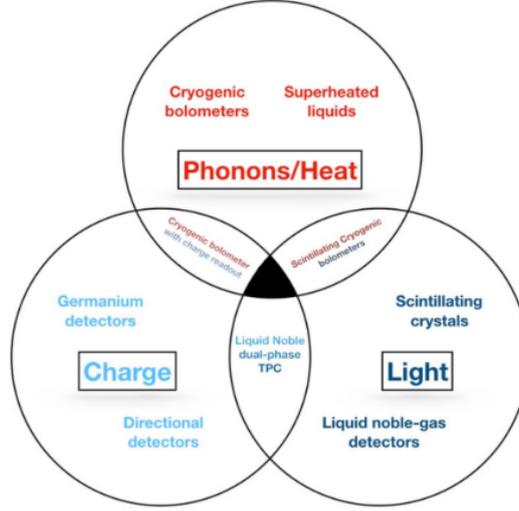


Figura 1.6: Illustrazione dei tre possibili segnali generati dalla collisione di WIMP e nuclei di materia ordinaria. Sono riportate le principali tecnologie capaci di rivelare uno o più segnali contemporaneamente. L'intersezione nera mostra come non esista ancora un rivelatore in grado di rivelarli tutte e tre [18].

scattering. Per $\theta=\pi$ si ha la massima energia di rinculo:

$$E_{max} = \frac{2\mu_N^2 v^2}{m_N} \quad (1.10)$$

La sezione d'urto di scattering si può suddividere in due componenti, la prima corrispondente alle interazioni indipendenti dallo spin (SI) e la seconda a quelle dipendenti dallo spin (SD) [20]:

$$\frac{d\sigma}{dE_R}(v) = \frac{1}{E_{max}(v)} [\sigma_{SI} F_{SI}^2(E_R)] + \sigma_{SD} F_{SD}^2(E_R) \quad (1.11)$$

dove F_{SI} e F_{SD} sono fattori di forma che esprimono la perdita di coerenza dello scattering dovuta a effetti quantistici, i quali crescono con l'aumentare della quantità di moto. Le interazioni SI forniscono i rate attesi maggiori; la loro sezione d'urto è legata a quella tra WIMP e nucleone $\sigma_{nucleon}^{SI}$:

$$\sigma_{SI} = \sigma_{nucleon}^{SI} \frac{\mu_N^2}{\mu_{nucleon}^2} A^2 \quad (1.12)$$

dove $\mu_{nucleon}$ è la massa ridotta del sistema WIMP-nucleone e A il numero di massa del nucleo. La dipendenza dal quadrato del numero di massa sottolinea l'importanza di utilizzare nuclei bersaglio pesanti, come ad esempio lo Xenon.

1.3.2 Rivelazione indiretta

Ci si aspetta che, a causa della loro massa, le WIMP possano essere intrappolate in un alone galattico, nelle stelle o all'interno di pianeti, come la Terra. Esse determinano in queste zone un aumento della densità di Materia Oscura che porta a una maggiore probabilità di annichilazione o decadimento in prodotti quali neutrini, raggi γ , positroni, antiprotoni o antinuclei. Gli esperimenti di rivelazione indiretta di Materia Oscura si basano proprio sulla ricerca di eccessi di flussi dei suoi prodotti di annichilazione o decadimento.

Se quest'ultimi hanno luogo all'interno delle zone più dense dell'alone galattico, ciò che si produce in maggior quantità sono positroni, antiprotoni e raggi γ . I raggi γ , scontrandosi con l'atmosfera, producono sciami di particelle che riescono ad essere rivelate a terra da esperimenti chiamati IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes), i quali sono in grado di rivelare la luce Cherenkov prodotta dagli sciami in aria. Alcuni di questi esperimenti sono HESS in Namibia, MAGIC nelle Isole Canarie, VERITAS in Arizona e il futuro CTA, che sarà situato anch'esso alle Canarie. Il satellite AMS-02 installato nel 2011 nella Stazione Spaziale Internazionale è in grado invece di rivelare coppie di particelle cariche $p\bar{p}$ e e^-e^+ . I risultati di questi esperimenti presentano alcune anomalie che potrebbero trovare una spiegazione nell'annichilazione o decadimento della Materia Oscura, ma tale interpretazione necessita di ulteriori investigazioni.

Se l'annichilazione o il decadimento di Materia Oscura hanno luogo all'interno di corpi massivi, come il Sole per esempio, le uniche particelle che si riesce a rivelare sono i neutrini, perché non interagiscono con i nuclei dei corpi astronomici. Essi vengono rivelati a partire dalla luce Cherenkov che producono interagendo con un rivelatore, costituito da grandi masse di ghiaccio e acqua. Tra questo tipo di esperimenti spiccano IceCUBE al Polo Sud, SuperKamiokande in Giappone e KM3Net nel Mar Mediterraneo.

1.3.3 Ricerca negli acceleratori di particelle

La ricerca della Materia Oscura negli acceleratori di particelle ha l'obiettivo di rivelare la presenza delle WIMP prodotte durante la collisione di particelle di materia ordinaria. Si cercano inoltre le particelle mediatrici dell'interazione tra le particelle del Modello Standard e della Materia Oscura, come mostrato in figura 1.4. A causa della loro interazione estremamente debole, il rivelatore non è in grado di registrare direttamente il segnale delle WIMP, la cui presenza si deduce da considerazioni riguardanti la conservazione della quantità di moto trasversale. Infatti, nel caso in cui la somma del momento angolare trasverso sia diversa da zero, si può ipotizzare che sia stata prodotta Materia Oscura all'interno degli acceleratori, come illustrato in figura 1.7. Gli esperimenti più promettenti in questo campo sono quelli che utilizzano il LHC (Large Hadron Collider) al CERN, date le elevate energie raggiunte finora, superiori a 10 TeV.

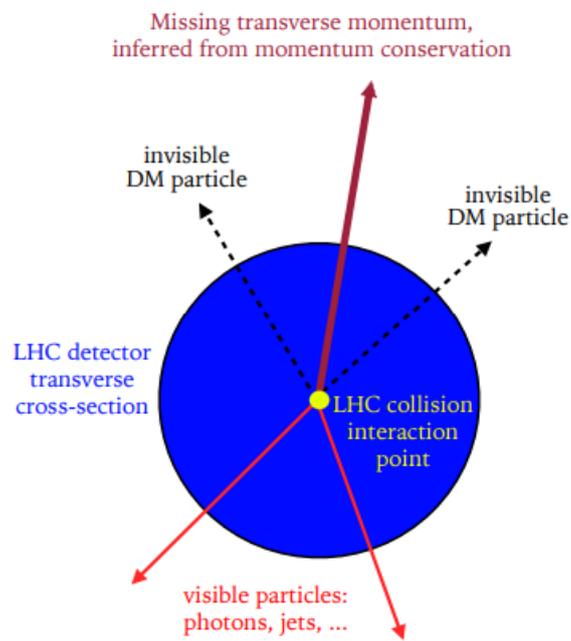


Figura 1.7: Illustrazione schematica della quantità di moto mancante, attribuita alla produzione di Materia Oscura dall'urto di particelle visibili [16].

Capitolo 2

Il Progetto XENON

Lo scopo del progetto XENON, situato in Italia nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS), è quello di rivelare direttamente particelle di Materia Oscura attraverso l'utilizzo di una Dual Phase TPC che contiene Xenon liquido (LXe) e gassoso (GXe) come materiale attivo. Il progetto ha avuto inizio nel 2005 con il rivelatore XENON10, in cui veniva utilizzata una massa attiva bersaglio di 15 kg. Nel corso degli ultimi 19 anni, la massa bersaglio è notevolmente aumentata fino ad arrivare a 5.9 t di LXe attivo (e 8 t in totale) nell'esperimento XENONnT, entrato in funzione nel 2021. Durante questi anni, ogni rivelatore installato ha progressivamente aumentato la sensibilità a interazioni di WIMP, per un incremento totale di quattro ordini di grandezza. La figura 2.1 mostra l'evoluzione del progetto durante gli anni, in termini di dimensioni, massa attiva del bersaglio e livello di rumore di fondo.

XENON10

Il rivelatore XENON10 [22] fu installato ai laboratori sotterranei LNGS nel marzo del 2006: il suo obiettivo era dimostrare la bassa soglia in energia raggiungibile con una TPC di massa attiva di 15 kg di LXe e il suo potere di mitigazione del background causato dai rinculi elettronici. Il volume attivo della TPC era definito da un cilindro di politetrafluoretilene (PTFE), il quale garantisce un'alta riflettività alla luce di scintillazione dello Xenon, e, al suo interno, erano disposti 89 fotomoltiplicatori (PMT), 48 nell'array superiore e 41 nell'array inferiore. La TPC era racchiusa in un criostato di acciaio inossidabile per mantenere la temperatura di LXe pari a -93 °C. L'esperimento ha raccolto dati per un totale di 58.4 giorni e l'analisi di questi è stata condotta selezionando una massa fiduciale centrale di 5.4 kg di LXe. Si è quindi ottenuto un limite superiore per la sezione d'urto di una WIMP di $30 \text{ GeV}/c^2$ pari a $4.5 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ per le interazioni SI [23] e a $5 \times 10^{-39} \text{ cm}^2$ per le interazioni SD (solo WIMP-neutrone) [24].

XENON100

Il rivelatore XENON100 [25], progettato per ospitare una maggiore massa bersaglio e



Figura 2.1: Rivelatori del progetto XENON, ognuno caratterizzato dall'anno di costruzione e dalla propria TPC, rappresentata in scala. Le barre e il testo in blu mostrano la massa di LXe contenuta all'interno delle TPC per ciascun esperimento; mentre in arancione è descritto il livello di rumore di fondo provocato dai rinculi elettronici a bassa energia, inferiore ai 20 keV. Il rate di XENONnT, contrassegnato con un asterisco, rappresenta l'obiettivo originario dell'esperimento, ad oggi già raggiunto [21].

ridurre il livello di background di 1 - 2 ordini di grandezza, fu installato ai LNGS nel 2008 e acquisì dati fino al 2016, per un totale di 477 giorni. La TPC era composta da una regione attiva di 62 kg di LXe circondati da 24 pannelli di PTFE e da 178 PMT, 98 disposti in alto e 80 in basso. Altri 64 PMT rivelavano segnali da un ulteriore strato di 99 kg di LXe, posto a circondare il volume centrale, con lo scopo di ridurre il rumore di fondo. Il sistema di raffreddamento criogenico fu allontanato dalla TPC e furono attuate ulteriori modifiche con lo scopo di diminuire il background radioattivo originato dalle componenti del rivelatore. Con questi miglioramenti, XENON100 è riuscito ad ottenere un limite di esclusione per la sezione d'urto WIMP-nucleone pari a $1.1 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$ per l'interazione SI [26, 27] e un limite per la sezione d'urto WIMP-neutrone pari a $2.0 \times 10^{-40} \text{ cm}^2$ per l'interazione SD [28], prendendo come riferimento una WIMP di massa pari a $50 \text{ GeV}/c^2$ [29].

XENON1T

Il rivelatore XENON1T [30] entrò in funzione ai LNGS nella primavera del 2016 e fu il primo rivelatore di Materia Oscura ad utilizzare una massa di LXe dell'ordine delle tonnellate. Esso conteneva infatti 3.2 t di LXe, 2 t delle quali attive. La TPC fu installata dentro un criostato posto al centro di un grande serbatoio d'acqua ($\sim 10 \times 10 \text{ m}$), il Muon Veto (descritto nella sezione 2.3), utilizzato sia come schermo passivo contro il rumore di fondo che come rivelatore di luce Cherenkov. Inoltre, accanto al serbatoio fu costruito un edificio a tre piani dove ospitare tutti i sistemi ausiliari, come quelli di raffreddamento, purificazione, stoccaggio dello Xenon, quelli di acquisizione dati e mo-

nitoraggio dell'esperimento e una colonna di distillazione criogenica per la rimozione del Krypton. Per questo esperimento, le superfici dei 24 pannelli di PTFE che componevano la TPC furono trattate in modo da ottimizzarne la riflettività per la luce ultravioletta e il numero di PMT utilizzati crebbe a 248, 127 disposti nell'array superiore e 121 in quello inferiore. Dal 2016 al 2018, XENON1T collezionò dati raccolti in due Science Run (SR), chiamati SR0 (32.1 giorni) e SR1 (246.7 giorni), per un'esposizione di 1 ton-year. Dall'analisi di questi dati, si è ottenuto, per una WIMP di massa pari a $30 \text{ GeV}/c^2$, un limite di esclusione sulla sezione d'urto WIMP-nucleone pari a $4.1 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ per le interazioni SI [31] e un limite di esclusione sulla sezione d'urto WIMP-neutrone pari a $6.3 \times 10^{-42} \text{ cm}^2$ per le interazioni SD [32].

XENONnT

Nel 2020, XENON1T è stato sostituito con XENONnT, rappresentato in figura 2.2. I maggiori progressi riguardano una nuova TPC più grande, contenente tre volte lo Xenon liquido presente nel rivelatore precedente, un nuovo detector Neutron Veto (descritto nella sezione 2.4), un migliore sistema di purificazione dello Xenon e una nuova colonna di distillazione del Radon. La massa di LXe utilizzata ammonta a 8.4 t, di cui 5.9 t di massa attiva, ed è disposta nel criostato al centro del serbatoio d'acqua. La TPC è composta da 24 pannelli riflettenti di PTFE e 494 PMT, 253 in alto e 241 in basso, circa il doppio rispetto a quelli presenti nel detector precedente. Con questo esperimento, l'obiettivo della Collaborazione XENON è di acquisire dati per 5 anni e raggiungere un'esposizione di 20 ton-year. Ciò che si prospetta è di arrivare a un limite superiore della sezione d'urto pari a $1.4 \times 10^{-48} \text{ cm}^2$ per le interazioni SI [33] e un limite superiore della sezione d'urto WIMP-neutrone pari a $2.2 \times 10^{-43} \text{ cm}^2$ per le interazioni SD [34], per una WIMP di massa $50 \text{ GeV}/c^2$. Tali miglioramenti sono attesi come risultato di un minore livello di background, insieme a una massa bersaglio più grande e a un maggiore periodo di acquisizione dati. Al momento l'esperimento è in presa dati nel terzo Science Run (SR2) iniziato ad ottobre 2023. Questo run segue SR0, il quale ha preso dati per una durata complessiva di 97.1 giorni (da luglio a novembre 2021), e SR1, il quale ha preso dati da maggio 2022 ad agosto 2023. Le analisi svolte sui dati acquisiti durante SR0 indicano il raggiungimento di un limite superiore per la sezione d'urto pari a $2.58 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ per le interazioni SI per una WIMP di massa pari a $28 \text{ GeV}/c^2$ con un livello di confidenza del 90% [1].

Nelle sezioni seguenti sono descritti gli elementi principali dell'esperimento XENONnT. A partire dalla struttura e dal funzionamento del rivelatore cuore dell'esperimento, la TPC (sezione 2.1), si delineano le principali sorgenti di background (sezione 2.2) e gli strumenti per ridurlo, tra cui spiccano i due sub-rivelatori Muon Veto (sezione 2.3) e Neutron Veto (2.4). Infine, si approfondiscono i principi di funzionamento dei fotomoltiplicatori (sezione 2.5).

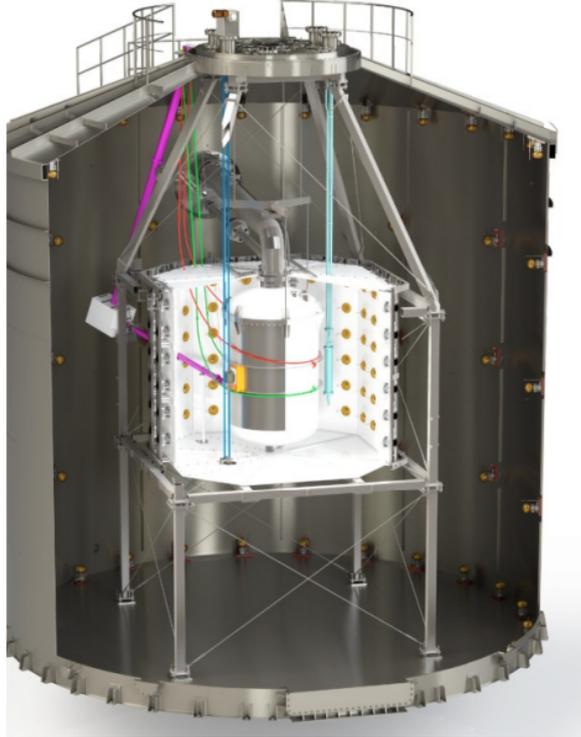


Figura 2.2: Illustrazione della struttura dell'esperimento XENONnT. Si nota internamente la TPC, circondata dal Neutron Veto, a sua volta contenuto nel Muon Veto.

2.1 La Time Projection Chamber e lo Xenon

Tra gli esperimenti di rivelazione diretta di Materia Oscura, le Time Projection Chambers (TPC) che utilizzano come bersaglio liquidi nobili hanno ottenuto i migliori risultati in termini di sensibilità alle interazioni delle WIMP.

2.1.1 Proprietà dello Xenon liquido

In particolare, le TPC che impiegano lo Xenon liquido hanno ottenuto la migliore sensibilità al mondo per le interazioni SI e SD tra WIMP e nucleoni; l'utilizzo di questo elemento come bersaglio ha infatti molti vantaggi grazie ad alcune importanti proprietà che lo caratterizzano. Innanzitutto, l'elevato numero di massa dello Xenon ($A=131$) aumenta la sua probabilità di scattering con le particelle di Materia Oscura, data la dipendenza quadratica della sezione d'urto con il numero di massa della particella bersaglio (vedi equazione 1.12). Inoltre, lo Xenon è un materiale altamente radiopuro, caratteristica fondamentale per questo tipo di esperimenti che ricercano eventi ultra rari. Possiede 9 isotopi stabili e i suoi isotopi instabili hanno una vita media molto piccola, ad eccezione dello ^{136}Xe ($T_{\frac{1}{2}} = 2.2 \times 10^{21}$ y) e dello ^{124}Xe ($T_{\frac{1}{2}} = 1.8 \times 10^{22}$ y) [35]. Entrambi de-

cadono attraverso processi deboli di secondo ordine e il loro studio è interessante per la ricerca nel campo dei neutrini. I due isotopi stabili ^{129}Xe e ^{131}Xe , entrambi caratterizzati da spin semintero e quindi in grado di produrre interazioni dipendenti dallo spin, sono presenti con un'abbondanza rispettivamente del 26.4% e 21.2%. Grazie all'alto numero atomico ($Z=54$) e a una densità di circa 3 g/cm^3 , lo Xenon liquido ha ottime qualità auto-schermanti contro le radiazioni esterne e permette la costruzione di rivelatori massivi e compatti. Altra caratteristica vantaggiosa è la temperatura relativamente alta del suo punto triplo, pari a $-112 \text{ }^\circ\text{C}$, che richiede sistemi criogenici non troppo complessi per mantenerlo in fase liquida, tipicamente ad una temperatura di circa $-95 \text{ }^\circ\text{C}$.

Il deposito di energia nel LXe si osserva tramite la produzione di coppie elettrone-ione, l'eccitazione degli atomi e la subeccitazione degli elettroni. Rispetto ad altri mezzi, lo Xenon possiede alte efficienze di scintillazione e ionizzazione. Una frazione degli elettroni liberati si può ricombinare con gli ioni e questo meccanismo, insieme all'eccitazione diretta degli atomi, origina molecole dimeriche eccitate, dette eccimeri. La diseccitazione di quest'ultimi fino allo stato fondamentale produce il fenomeno della scintillazione, che ha luogo con l'emissione di luce di lunghezza d'onda pari a 175 nm [36], alla quale lo Xenon è trasparente.

2.1.2 Principio di funzionamento della TPC

L'esperimento XENONnT utilizza una TPC a doppia fase contenente LXe sormontato da un piccolo strato di GXe. La TPC, di forma cilindrica, si trova tra due array di fotomoltiplicatori: uno alla base immerso in LXe e uno nella parte superiore rivolto verso lo strato di GXe. Una rappresentazione e una foto della TPC attualmente in uso in XENONnT si possono trovare in figura 2.3. Il volume sensibile di LXe è contenuto tra

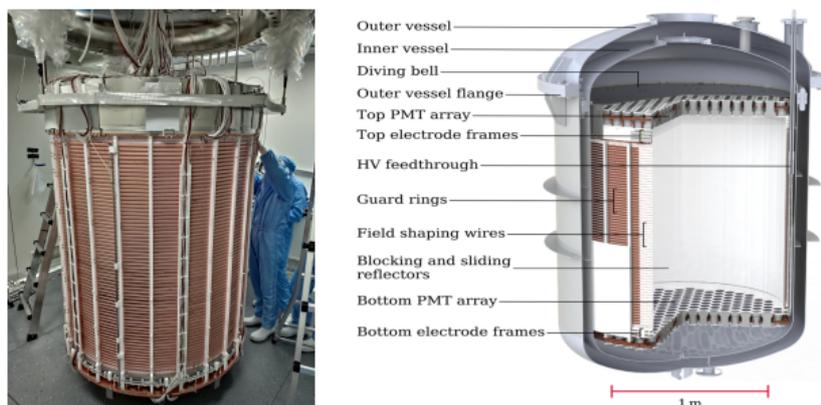


Figura 2.3: Da sinistra a destra: foto della TPC installata in XENONnT e illustrazione schematica della sua struttura.

due elettrodi che generano un campo elettrico di deriva tra il catodo (elettrodo a tensione

negativa) alla base e un gate situato sotto il volume di GXe (a potenziale nullo). Il campo elettrico è mantenuto uniforme grazie a sottili anelli di rame di opportuno potenziale distribuiti lungo l'asse verticale del cilindro. Nella TPC è presente inoltre un secondo campo elettrico generato da un anodo (elettrodo a tensione positiva) vicino al gate, sopra la superficie di separazione tra liquido e gas. Quando una particella interagisce con lo LXe produce un primo segnale di scintillazione, detto S1, che viene registrato da entrambi gli array di PMT, in frazione maggiore da quelli inferiori a causa della riflessione dei fotoni sulla superficie liquido-gas. L'interazione crea delle coppie elettrone-ione. Una frazione degli elettroni prodotti si ricombina, mentre gli altri sono accelerati dal campo elettrico verso lo strato di GXe, dove vengono in seguito estratti dal campo elettrico generato dall'anodo. In questo processo, gli elettroni acquistano abbastanza energia da poter eccitare gli atomi di GXe e produrre perciò luce per scintillazione, la quale viene registrata da entrambi gli array di PMT come un secondo segnale, detto S2. Il segnale S2 risulta in ritardo rispetto a S1 del tempo di deriva impiegato dagli elettroni per raggiungere la superficie liquido-gas a partire dal punto in cui è avvenuta l'interazione. Uno schema della produzione di questi segnali è presente in figura 2.4.

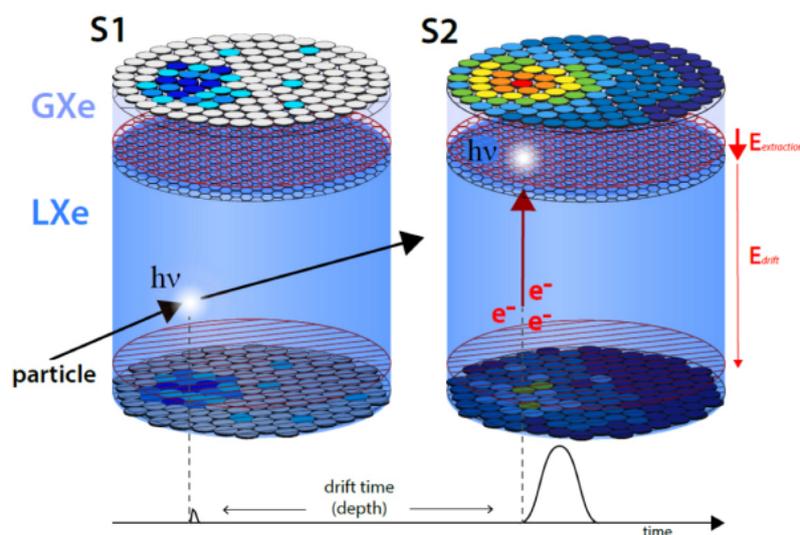


Figura 2.4: Principio di funzionamento della TPC a doppia fase. Il segnale S1 è registrato da entrambi gli array di PMT. Gli elettroni generati dalla ionizzazione sono accelerati fino alla superficie liquido-gas per mezzo del campo elettrico E_{drift} . Il segnale S2 si origina per la scintillazione causata dagli elettroni estratti nella regione di GXe dal campo elettrico $E_{extraction}$.

Questa tecnica permette la ricostruzione tridimensionale della posizione del punto in cui è avvenuta l'interazione tra la particella e lo LXe. Le coordinate x e y vengono determinate a partire dalla risposta dei PMT superiori al segnale S2; la coordinata z, invece, si trova a partire dalla differenza di tempo tra i segnali S1 e S2. La ricostruzione della

posizione consente la selezione degli eventi avvenuti nella regione centrale del bersaglio, chiamato volume fiduciale (FV). Dato che la maggior parte degli eventi di background è attesa ai margini della TPC, il volume di LXe più esterno è usato come schermo per sopprimere gli eventi di questo tipo.

La capacità della TPC in termini di rivelazione dei segnali di luce e carica è descritta dal guadagno di scintillazione primaria $g1 = cS1/n_\gamma$ e dal guadagno di scintillazione secondaria $g2 = cS2/n_e$, dove $cS1$ e $cS2$ sono le aree dei segnali S1 ed S2 corrette in base ad effetti legati alla posizione dell'interazione e n_γ , n_e sono il numero di fotoni ed elettroni prodotti dall'interazione. È possibile ricostruire l'energia dell'interazione dai segnali S1 e S2 come

$$E = \left(\frac{cS1}{g1} + \frac{cS2}{g2} \right) \times W \quad (2.1)$$

dove $W = (13.7 \pm 0.2)$ eV è l'energia media necessaria per produrre un quanto (un fotone o un elettrone) in LXe.

Inoltre, l'analisi dei segnali S1 e S2 permette di distinguere con grande precisione i rinculi nucleari (NR) da quelli elettronici (ER). I primi possono essere prodotti dagli urti dello Xenon con particelle come WIMP o neutroni; mentre i secondi comprendono le interazioni β o γ originate dal background radioattivo. Il processo di ricombinazione elettrone-ione influenza il rapporto tra S1 e S2, dato che è responsabile della sottrazione di elettroni al segnale di carica e aumenta la produzione di luce attraverso scintillazione. Un evento NR produce una traccia di particelle cariche più densa, visto l'alto numero atomico del nucleo di Xenon con cui si scontra la particella proiettile; ciò porta ad un più alto rate di ricombinazione rispetto ad un evento ER, in cui lo scontro avviene solamente con gli elettroni dell'atomo. Una maggiore ricombinazione implica un incremento del segnale S1 e una diminuzione di S2, perciò un rapporto S2/S1 inferiore. Nello spazio bidimensionale dei segnali osservabili $cS1$ e $cS2$, le distribuzioni di ER ed NR sono pertanto ben separate, consentendo di discriminare oltre il 99.5% di ER mantenendo una accettazione del 50% per gli eventi di tipo NR.

2.2 Rumore di fondo in XENONnT

Negli esperimenti di ricerca di Materia Oscura è fondamentale riuscire a ridurre il più possibile il rumore di fondo per aumentare la sensibilità del detector nel rivelare eventi ultra rari, come quelli attesi per le WIMP. In generale, possono essere distinte due principali categorie di rumore di fondo: i rinculi elettronici, dovuti principalmente a particelle β e γ prodotte da decadimento radioattivo, e i rinculi nucleari, tra i quali spicca il contributo dei neutroni. Altri eventi di background, inoltre, possono essere originati da coincidenze accidentali tra i segnali S1 e S2 o da artefatti del detector.

La regione di interesse (ROI) in cui cercare il segnale delle WIMP è scelta in modo tale da includere al suo interno anche particelle con masse elevate ($\mathcal{O}(\text{TeV}/c^2)$); ciò significa,

vista la diversa risposta del rivelatore ad eventi ER e NR, fissare rispettivamente i limiti di energia superiori a ~ 15 keV e ~ 50 keV.

In più, la probabilità che avvenga un urto tra un atomo di Xenon e una WIMP è così bassa che è atteso al massimo un singolo urto nell'intero volume bersaglio; perciò solo gli eventi ER e NR a bassa energia che non sono accompagnati da altre interazioni all'interno della TPC contribuiscono al rumore di fondo. Per comprendere meglio il relativo contributo delle differenti sorgenti di background, se ne può osservare lo spettro energetico atteso nell'esperimento XENONnT in figura 2.5.

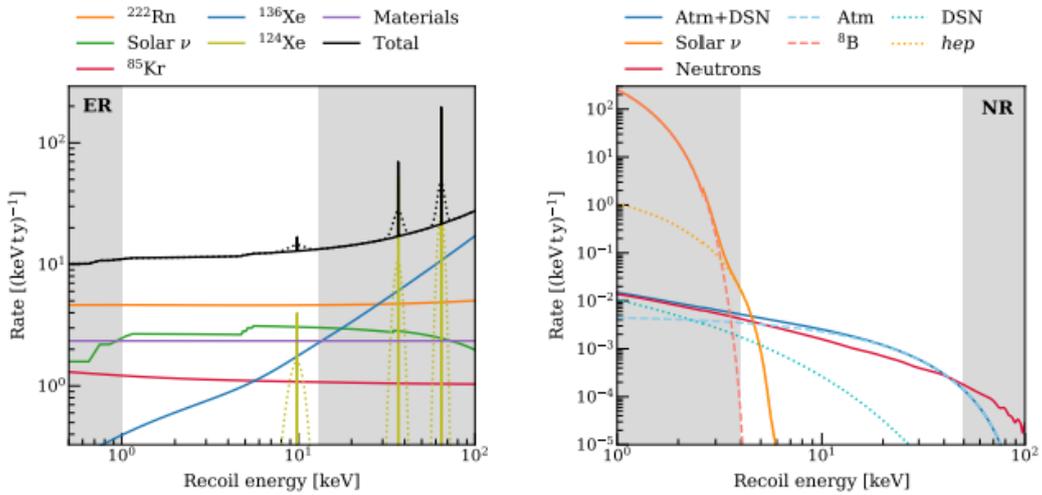


Figura 2.5: Spettro energetico degli eventi ER (sulla sinistra) e NR (sulla destra) dovuti al rumore di fondo atteso nelle 4 t di massa fiduciale del rivelatore XENONnT. Le aree bianche rappresentano le ROI per la ricerca di WIMP con interazione SI: (1,13) e (4,50) keV per eventi ER e NR, rispettivamente [33].

2.2.1 ER background

Nonostante siano ben distinguibili dai rinculi nucleari, tra i quali è atteso il segnale delle WIMP, i rinculi elettronici costituiscono la maggiore sorgente del background dell'esperimento. Alcuni di essi, a bassa energia, sono prodotti tramite scattering Compton dai raggi γ ad alta energia ($\mathcal{O}(\text{MeV})$) emessi dai contaminanti radioattivi presenti nei materiali che costituiscono il rivelatore. I principali contaminanti sono i radioisotopi naturali (^{40}K) e le loro catene di decadimento (^{238}U , ^{232}Th), gli isotopi cosmogenici (^{60}Co) e antropogenici (^{137}Cs).

Il contributo più grande a questo tipo di background è dovuto all'emissione di raggi β da parte di metalli pesanti contenuti nello LXe, i quali producono lo stesso segnale dei rinculi elettronici senza che avvenga un'effettiva collisione. Fra di essi, il segnale più difficile da sopprimere è quello del ^{222}Rn , che, caratterizzato da un tempo di dimezzamento

relativamente lungo (3.8 giorni), è in grado di diffondersi in modo quasi del tutto omogeneo nel volume di LXe. Un altro emettitore di particelle β è l'isotopo radioattivo ^{85}Kr , contenuto del Krypton naturale $^{\text{nat}}\text{Kr}$, presente a sua volta nello Xenon in commercio con una concentrazione dell'ordine $\mathcal{O}(\text{ppm})$.

Infine, tra le fonti esterne di background di questo tipo si trovano i neutrini solari, i quali causano singoli rinculi a bassa energia che tendono a distribuirsi uniformemente nel volume della TPC, per la loro piccola sezione d'urto ed elevata profondità di penetrazione. Quest'ultimi costituiscono una fonte di background irriducibile per gli esperimenti di ricerca diretta di Materia Oscura non direzionali.

2.2.2 NR background

Tra gli eventi NR, le interazioni dei neutroni e lo scattering elastico coerente tra neutrini e nucleo ($\text{CE}\nu\text{NS}$) possono produrre segnali che imitano esattamente quelli attesi per le WIMP. Mentre i neutrini interagiscono una sola volta all'interno della TPC, i neutroni possono generare interazioni multiple all'interno del volume fiduciale, perché caratterizzati da un libero cammino medio di ~ 10 cm (prendendo come riferimento neutroni con energia dell'ordine dei MeV). Essi sono in grado di penetrare ancora più in profondità rispetto ai raggi γ e risulta perciò molto complicato schermare il volume fiduciale da queste particelle.

La presenza di ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th tra i materiali del detector genera neutroni radiogenici dell'energia dei MeV attraverso fissione spontanea o reazioni (α, n) indotte da particelle α emesse lungo la catena di decadimento.

Neutroni di tipo cosmogenico possono essere prodotti dai muoni che riescono a superare la roccia della montagna e arrivare fino ai laboratori sotterranei del Gran Sasso. Tali neutroni, con energie che possono estendersi fino a decine di GeV, costituiscono una potenziale sorgente di background, che può essere però ridotta fino a livelli trascurabili schermando la TPC con un sistema di Veto (vedi sezione 2.3). Ciò è possibile per i neutroni cosmogenici e non per quelli radiogenici, dato che i primi si originano più lontano dal detector rispetto ai secondi.

Anche i neutrini astrofisici e atmosferici, attraverso $\text{CE}\nu\text{NS}$, contribuiscono a questo tipo di background; la maggior parte di essi è composta dai neutrini solari ^8B e hep. Nel luglio 2024 la collaborazione XENONnT ha annunciato la prima osservazione del segnale proveniente dai neutrini solari del ^8B , con una significatività pari a 2.7σ . Mentre la presenza dei neutrini solari peggiora per lo più la sensibilità nella ricerca delle WIMP con masse di pochi GeV/c^2 , i neutrini solari più energetici o provenienti dalle supernove hanno potenzialmente un impatto sulla ricerca delle WIMP più massive. Questo tipo di background è irriducibile per questo tipo di esperimenti.

2.2.3 Alcune strategie di mitigazione del rumore di fondo

Alla luce di ciò, la scelta di posizionare gli esperimenti del progetto XENON ai laboratori sotterranei LNGS è elemento che contribuisce fortemente alla riduzione del rumore di fondo. La montagna che sovrasta i laboratori ha un'altezza media di 1400 m, corrispondente a circa 3800 m d'acqua equivalenti. Ciò permette di ridurre il flusso di muoni di un fattore un milione rispetto a quello che si rileva sulla superficie della montagna; quello residuo si attesta attorno ad un valore di $1.2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ [37, 38]. Inoltre, il contenuto limitato di Uranio e Thorio della roccia dolomitica del Gran Sasso garantisce un flusso di neutroni cento volte minore rispetto a quello sulla superficie, stabilendosi su $1\text{-}10 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ [39] per neutroni fino a 5 MeV, a seconda della loro energia.

Inoltre, per ridurre il rumore di fondo di tipo radiogenico originato dai materiali che costituiscono il detector, tutte le componenti della TPC, del criostato e delle strutture che lo circondano sono selezionate molto accuratamente per avere un basso contenuto di isotopi radioattivi e i materiali a contatto con lo Xenon liquido e gassoso sono stati scelti in modo tale da avere un basso rate di emissione del ^{222}Rn .

2.3 Il sistema Muon Veto

Con lo scopo di sopprimere ulteriormente il rumore di fondo di origine cosmogenica, gli esperimenti XENON1T e XENONnT hanno inserito le TPC all'interno di un serbatoio cilindrico di acqua deionizzata (o water tank, WT). Il flusso di muoni con un'energia media di 270 MeV che raggiunge la Hall B dei LNGS, dove è collocato l'esperimento, è pari a $(3.31 \pm 0.03) \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ [40]. Questo serbatoio, chiamato Muon Veto (MV), funge da schermo assorbente contro i neutroni esterni, i raggi γ ed è in grado di rivelare le tracce dei muoni e degli sciami di particelle indotte da quest'ultimi.

2.3.1 Descrizione del Muon Veto

Il MV consiste in un serbatoio cilindrico di acciaio inossidabile di 9.6 m di diametro e 10.2 m di altezza, contenente ~ 700 t di acqua deionizzata. Il serbatoio possiede al suo interno 84 PMT di 8" di diametro, distribuiti ad altezze differenti in cinque anelli lungo la circonferenza del rivelatore; i tre anelli intermedi sono costituiti da 12 PMT ciascuno, mentre i restanti da 24 PMT l'uno. Il numero di PMT utilizzati è relativamente ridotto, dato che l'energia rilasciata dai muoni è molto elevata. Per aumentare l'efficienza di rivelazione dei fotoni Cherenkov, la superficie interna del serbatoio è ricoperta con una lamina con riflettività $>99\%$ alle lunghezze d'onda comprese tra i 400 nm e i 700 nm [41]. Un'immagine del rivelatore si trova in figura 2.6.

La figura 2.7 mostra una simulazione in funzione dello spessore d'acqua del fenomeno di assorbimento dei neutroni indotti da muone, dei raggi γ e dei neutroni provenienti dalla radioattività delle rocce. Come emerge dalla figura, alcune particelle che si cer-

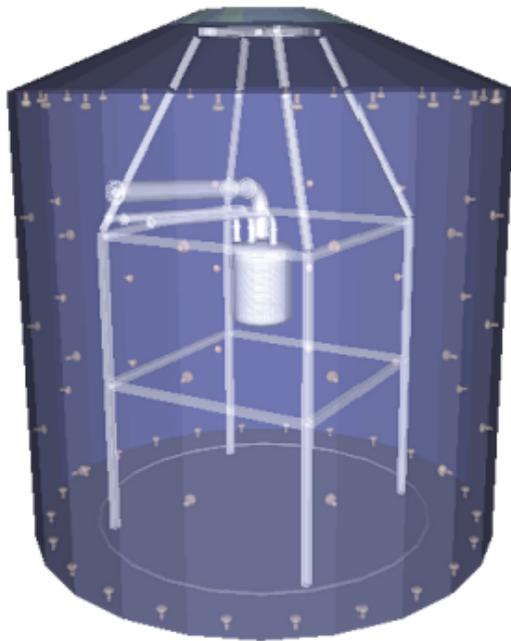


Figura 2.6: Illustrazione schematica del Muon Veto. In grigio sono raffigurati i PMT. Al suo interno è possibile distinguere il criostato che circonda la TPC [41].

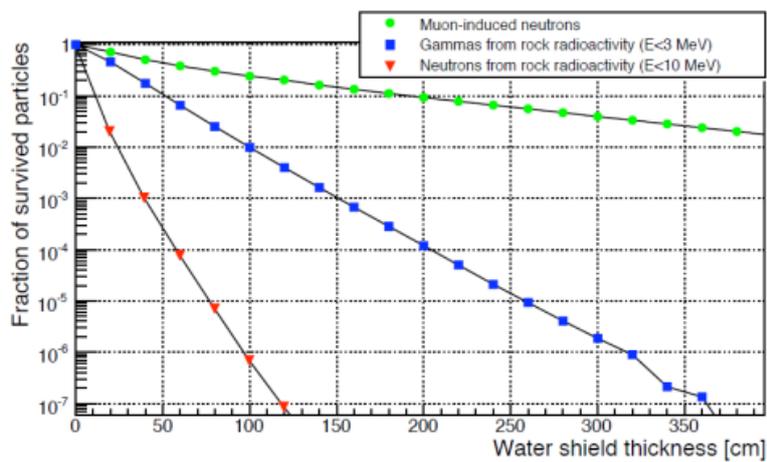


Figura 2.7: Frazione di particelle sopravvissute al fenomeno di assorbimento in funzione dello spessore d'acqua che circonda il rivelatore [42].

ca di schermare, come i neutroni indotti da muone, possono essere così energetiche da

oltrepassare il Muon Veto e raggiungere la TPC, provocando segnali simili a quelli di Materia Oscura. Per questo motivo, il Muon Veto ha anche la funzione di rivelatore di luce Cherenkov prodotta in acqua: se si osservano due eventi con segnale compatibile nel MV e nella TPC all'interno di una stabilita finestra temporale, essi vengono riconosciuti come rumore di fondo e scartati. Si possono distinguere due tipi di eventi: quelli muone, quando questo tipo di particella attraversa la WT, e quelli legati a sciame di particelle, quando il muone non entra nella WT ma lo fanno i suoi neutroni indotti e lo sciame di particelle associato. L'efficienza stimata tramite simulazioni Monte Carlo per la rilevazione del primo tipo di evento è $\sim 100\%$, mentre per il secondo è pari a $\sim 50\%$. L'azione combinata dell'assorbimento da parte dell'acqua e dell'efficienza del rivelatore porta ad una soppressione del rumore di fondo dovuto a neutroni cosmogenici di oltre due ordini di grandezza e il rate residuo risulta trascurabile se comparato a quello dei neutroni radiogenici.

2.3.2 Effetto Cherenkov

L'effetto fisico alla base del funzionamento del Muon Veto è l'effetto Cherenkov. Esso consiste nell'emissione di radiazione elettromagnetica ad opera di un materiale dielettrico che viene attraversato da una particella dotata di carica. Perché questo fenomeno avvenga la particella carica deve muoversi ad una velocità $v_{particella}$ maggiore della velocità della luce nel mezzo, ossia

$$v_{particella} > \frac{c}{n} \quad (2.2)$$

dove c è la velocità della luce e n l'indice di rifrazione del mezzo.

Lungo la sua traiettoria, la particella genera dei momenti di dipolo temporanei negli atomi o nelle molecole del mezzo; questi, tornando alla configurazione iniziale, producono una radiazione elettromagnetica con fronte d'onda sferico. Una velocità della particella minore di quella della luce nel mezzo permetterebbe alle radiazioni emesse di annullarsi tra loro per simmetria; quando la particella si muove con velocità superiori, invece, i fronti d'onda si sovrappongono costruttivamente e l'energia prodotta si irradia come un'onda d'urto con fronte d'onda conico che forma un angolo θ rispetto alla traiettoria della particella, come mostrato in figura 2.8. L'angolo θ è detto angolo di Cherenkov e si ottiene dalla relazione:

$$\cos(\theta) = \frac{1}{\beta n} \quad (2.3)$$

dove $\beta = \frac{v}{c}$.

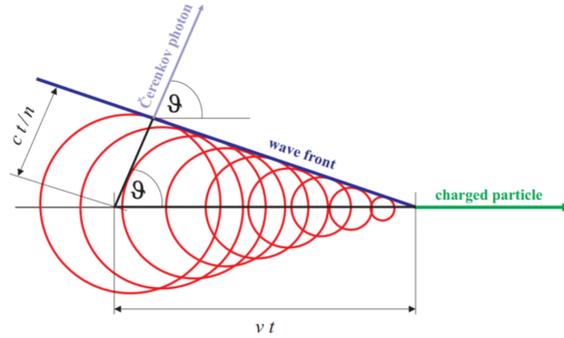


Figura 2.8: Fronte d'onda conico dei fotoni Cherenkov che si genera nel mezzo al passaggio di una particella carica con velocità $> \frac{c}{n}$.

2.4 Il sistema Neutron Veto

Come già evidenziato nella sezione 2.2.2, i neutroni di origine radiogenica costituiscono una sorgente di background che può ridurre la sensibilità dell'esperimento, trattandosi di particelle che possono simulare il segnale atteso per le WIMP. Nell'esperimento XENONnT è stato perciò inserito il Neutron Veto (NV), un rivelatore di luce Cherenkov, capace di rivelare i neutroni attraverso la loro cattura da parte di acqua o Gadolinio. Similmente a ciò che accade per il MV, il NV permette di rigettare gli eventi neutrone osservati in coincidenza temporale nella TPC. La maggior parte di essi proviene dalla radioattività dei PMT, del criostato e del PTFE che costituisce le pareti della TPC; alcuni interagiscono con lo LXe, escono dal criostato e raggiungono il NV. Per aumentare l'efficienza del NV, nell'autunno 2023 è stato disciolto in acqua il solfato di Gadolinio ottoidrato ($Gd_2(SO_4)_3 \times 8(H_2O)$), con una concentrazione in massa dello 0.05%. Con l'inserimento del Gadolinio, si è stimata una tagging efficiency per i neutroni di background pari al 77% (rispetto al 53% con acqua pura) e una riduzione della finestra di tempo necessaria per individuare un evento neutrone. In tale configurazione, il NV è in grado di ridurre il fondo dovuto a neutroni di un fattore ~ 4 . L'obiettivo finale dell'esperimento è quello di aumentare ancora la concentrazione di solfato di Gadolinio fino a una concentrazione dello 0.5%, che permetterà di raggiungere una tagging efficiency attesa di $\sim 85\%$.

2.4.1 Descrizione del Neutron Veto

Il Neutron Veto è una struttura ottagonale alta ~ 3 m e larga ~ 4 m che contiene al suo interno la TPC. Le sue pareti, come quelle esterne del criostato, sono ricoperte da pannelli di PTFE espanso (ePTFE), che permettono una riflettività $> 99\%$ alla luce Cherenkov per lunghezze d'onda maggiori di 280 nm. Le pareti del NV sono dotate

di 120 PMT di 8" di diametro molto sensibili e a bassa radioattività. Un'immagine dell'interno del NV è presente in figura 2.9.

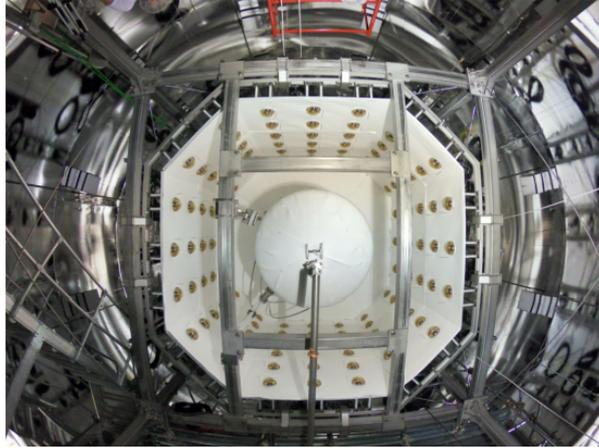
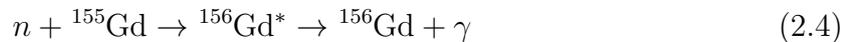


Figura 2.9: Fotografia scattata da sotto il Neutron Veto. L'inquadratura dal basso permette di vedere il criostato contenente la TPC al centro e i PMT del NV sulle pareti.

2.4.2 Cattura neutronica e rivelazione del segnale

Un neutrone radiogenico, dopo aver interagito una sola volta con lo Xenon nella TPC ed esserne uscito, va incontro a termalizzazione nell'acqua della WT, cioè perde energia cinetica scontrandosi con gli atomi del mezzo in cui si trova. Nel caso del NV, essi sono principalmente atomi d'idrogeno. A seguito di ciò, avviene il processo di cattura neutronica, nella maggior parte dei casi con il Gadolinio, per la sua sezione d'urto maggiore comparata a quella dell'idrogeno. Il nucleo si trova così in uno stato eccitato e nel ritornare allo stato fondamentale emette una cascata di raggi γ con energia di pochi MeV. Tale processo si verifica in particolare con gli isotopi ^{155}Gd e ^{157}Gd . Con il primo, ad esempio, si ha:



L'energia dei raggi γ emessi può essere calcolata tramite la differenza di massa:

$$E_\gamma = M({}^{155}\text{Gd}) + M_n - M({}^{156}\text{Gd}) = 8.54\text{MeV} \quad (2.5)$$

dove M_n è la massa del neutrone e $M({}^{155}\text{Gd})$, $M({}^{156}\text{Gd})$ sono rispettivamente le masse del ^{155}Gd e ^{156}Gd . Similmente, per il processo che coinvolge il ^{157}Gd , l'energia è 7.94 MeV [21]. I raggi γ che vengono emessi producono scattering Compton sugli elettroni dell'acqua, i quali acquistano un'accelerazione e vanno incontro ad effetto Cherenkov, producendo fotoni che subiscono numerose riflessioni per effetto delle pareti del serbatoio e vengono quindi rivelati facilmente dai PMT. Il NV è in grado in questo modo di rivelare

la presenza di un neutrone che, se osservato in una finestra temporale compatibile con quella del neutrone osservato nella TPC, viene rigettato come rumore di fondo.

2.5 Fotomoltiplicatori

I fotomoltiplicatori (PhotoMultiplier Tubes) sono dispositivi in grado di convertire un segnale luminoso in un segnale elettrico. Spesso utilizzati in fisica della particelle e delle alte energie per la loro elevata sensibilità e velocità, l'esperimento XENONnT li adopera in tutti i rivelatori che lo compongono. Sono costituiti, di norma, da un tubo di vetro al cui interno è praticato il vuoto. La figura 2.10 ne mostra le principali componenti, tra

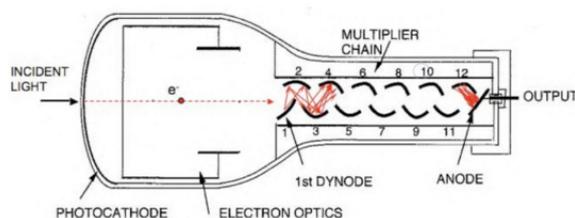


Figura 2.10: Illustrazione delle principali componenti di un fotomoltiplicatore.

cui si può riconoscere:

- un fotocatodo, ovvero un elettrodo rivestito di un sottilissimo strato di materiale fotosensibile, in grado di convertire un fotone in un elettrone tramite effetto fotoelettrico;
- un sistema elettronico-ottico che focalizza e accelera il flusso degli elettroni;
- un moltiplicatore formato da vari elettrodi, detti dinodi, che emettono elettroni per emissione secondaria;
- un anodo, che viene colpito dal flusso di elettroni generando un rapido impulso elettrico.

2.5.1 Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento dei PMT si basa su due fenomeni: l'effetto fotoelettrico e l'emissione secondaria. Il primo consiste nell'emissione di elettroni da parte di un materiale quando questo viene colpito da una radiazione luminosa che fornisce energia sufficiente agli elettroni per liberarsi. È detta quantum efficiency la probabilità di emissione di un elettrone, dato un fotone incidente; essa dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione luminosa, dalla composizione e dallo spessore del materiale fotoemissivo ed

è sempre < 1 , a causa delle perdite di energia che si verificano durante il processo. Il secondo effetto, l'emissione secondaria, è il fenomeno che si osserva quando un elettrone colpisce un elettrodo, provocando l'emissione di altri elettroni. È descritto dal coefficiente di emissione secondaria, pari al numero di elettroni secondari emessi sul numero di elettroni primari.

Quando un fotone colpisce il fotocatodo, un elettrone viene emesso per effetto fotoelettrico e subito dopo accelerato verso il primo dinodo per la differenza di potenziale applicata ai capi del fotomoltiplicatore. Per emissione secondaria vengono prodotti nuovi elettroni, a loro volta accelerati verso il secondo dinodo. Il processo va avanti e si genera man mano una cascata di elettroni che raggiunge l'anodo, dove viene generato l'impulso elettrico. Tale segnale viene poi registrato ed elaborato opportunamente dal sistema di acquisizione dati dell'esperimento.

2.5.2 Rumore di fondo

Esistono alcuni fenomeni, come il rumore statistico, la Dark Current e l'AfterPulse, che limitano l'accuratezza delle misure di corrente e voltaggio [21].

Rumore statistico

Per una data luminosità incidente sul PMT, il numero di fotoelettroni emessi e di elettroni secondari fluttua nel tempo e, di conseguenza, la corrente presente nell'anodo oscilla attorno ad un valore medio. L'intensità del rumore è misurata proprio a partire dalla varianza delle fluttuazioni della corrente dell'anodo attorno al valore medio. Le fluttuazioni statistiche possono originarsi nel fotocatodo o nel moltiplicatore, data la natura statistica dell'effetto fotoelettrico e dell'emissione secondaria, rispettivamente. Nel moltiplicatore sono presenti anche fluttuazioni di natura non statistica ma dovute alle differenze temporali del transito degli elettroni e alla non uniformità del coefficiente di emissione secondaria.

Dark Current

La Dark Current costituisce il rumore di fondo dei PMT, è presente anche in condizioni di totale assenza di luce e limita la rivelazione di radiazioni a bassa energia. È una corrente composta da una componente continua ed una nella quale si susseguono ad intermittenza impulsi di pochi ns. È causata principalmente dagli elettroni emessi termoionicamente dal fotocatodo e dai dinodi, insieme ad altri effetti minori. Questi, acquisendo energia accelerati dal campo elettrico, producono lo stesso fenomeno del segnale fisico. La Dark Current varia sia per alcune condizioni esterne come il voltaggio applicato, il guadagno, la temperatura, l'umidità, sia per l'utilizzo passato del PMT. Nell'esperimento XENONnT, le frequenze tipiche della Dark Current sono dell'ordine del kHz per il NV e di ~ 2 kHz per il MV. Questi risultati determinano il rate delle coincidenze accidentali, le quali influenzano negativamente la sensibilità a segnali fisici di interesse. Per la TPC,

invece, le frequenze caratteristiche della Dark Current sono molto minori (<100 Hz), a causa delle basse temperature del LXe.

AfterPulse

Gli AfterPulse (AP) sono segnali che compaiono come una scia dopo il segnale principale e il ritardo temporale che li separa da esso permette di distinguerne due differenti cause.

- **Reazioni luminose** Un elettrodo che viene colpito da elettroni emette fotoni e, nonostante l'efficienza luminosa di questi fenomeni sia molta bassa, è possibile che in alcuni tubi la luce emessa, anche negli step finali della moltiplicazione, torni indietro e raggiunga il fotocatodo originando il segnale di AP. Il ritardo dal segnale principale è di circa $20\div 100$ ns, dato dalla somma del tempo di transito degli elettroni e dei fotoni.
- **Ionizzazione dei gas residui** Per evitare che gli elettroni non perdano energia interagendo con l'aria, nel fotomoltiplicatore si mantiene il vuoto. È possibile, però, che siano presenti alcuni gas residui provenienti dalle emissioni dei materiali che compongono la struttura e dall'elio che riesce a penetrare il vetro. Questi atomi o molecole possono essere ionizzati dagli elettroni in moto e successivamente venire attratti verso il catodo, dove possono provocare l'emissione di altri elettroni, che provocano il segnale di AP. Il tempo che intercorre tra il segnale principale e l'AP dipende dal tempo di transito degli ioni, correlato alla loro massa e al campo presente nel PMT. È generalmente dell'ordine dei microsecondi e può essere stimato come:

$$t = \int_{s_0}^L \frac{1}{v} ds = \sqrt{\frac{m}{2q}} \int_{s_0}^L \frac{1}{\sqrt{V(s_0) - V(s)}} ds \approx \sqrt{\frac{2m}{qV_0}} L \quad (2.6)$$

dove L e V_0 sono rispettivamente la distanza e la differenza di potenziale tra il catodo e il primo dinodo, s è una generica posizione in questa regione, s_0 è il punto in cui viene prodotto lo ione. Per un fotomoltiplicatore di forma emisferica, si può assumere $V(s) = V_0(1 - \frac{s}{L})^2$, da cui si deriva l'approssimazione finale.

Capitolo 3

Studio degli eventi rivelati dal Muon Veto

La superficie terrestre è costantemente colpita da particelle e nuclei ad alta energia che si muovono a velocità prossime a quella della luce: queste particelle sono dette raggi cosmici perché, come suggerisce il nome, provengono dal cosmo e la loro origine può essere galattica o extragalattica. La maggior parte di essi è costituita da protoni (circa 90%), mentre in misura minore sono composti da nuclei di vari elementi, a partire da quelli più leggeri come l'elio a quelli più pesanti come il ferro o l'uranio. Insieme a questi sono presenti in piccolissima parte elettroni, positroni, fotoni e altre particelle subatomiche. Il loro spettro energetico si espande da 10^8 a 10^{20} eV, nonostante la maggior parte di essi abbia energie appartenenti alla porzione inferiore di tale intervallo. Quando i raggi cosmici collidono con i nuclei dell'atmosfera terrestre producono molte particelle che a loro volta possono interagire o decadere creandone altre. Questo fenomeno, detto "shower", è raffigurato in figura 3.1. L'interazione di un raggio cosmico con l'atmosfera produce un elevato numero di pioni carichi e pioni neutri. Il pione carico decade in muoni e neutrini muonici, mentre il pione neutro decade in una coppia di fotoni ad alta energia, in grado di produrre sciami di elettroni, positroni e raggi γ . In figura 3.2 sono mostrati i processi sopra descritti. I muoni prodotti riescono a raggiungere grandi profondità, nonostante lungo la loro traiettoria perdano progressivamente energia tramite processi di ionizzazione del mezzo che attraversano. Sebbene il loro flusso diminuisca con la profondità, essi costituiscono una fonte di background presente anche nei laboratori sotterranei. Nella Hall B dei LNGS, dove si trova l'esperimento XENONnT, il flusso di muoni è pari a $1.2 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$. La presenza di sistemi di veto, come il Muon Veto e il Neutron Veto, risulta perciò fondamentale per la riuscita dell'esperimento che necessita un livello di rumore di fondo estremamente basso.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è lo studio degli eventi muone rivelati dal Muon Veto, all'interno dei quali si approfondisce in particolare il contributo che rivestono i segnali di AfterPulse. Di quest'ultimi si caratterizzano i tempi e le probabilità di arrivo,

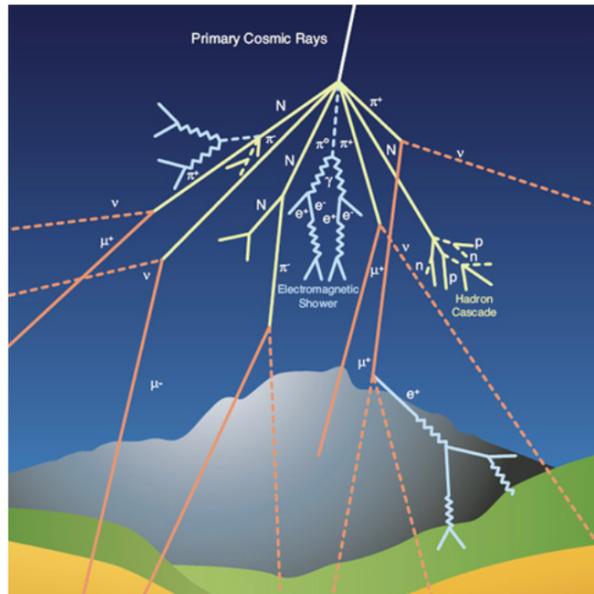


Figura 3.1: Illustrazione dello sciame di particelle create da un raggio cosmico che interagisce con l'atmosfera.

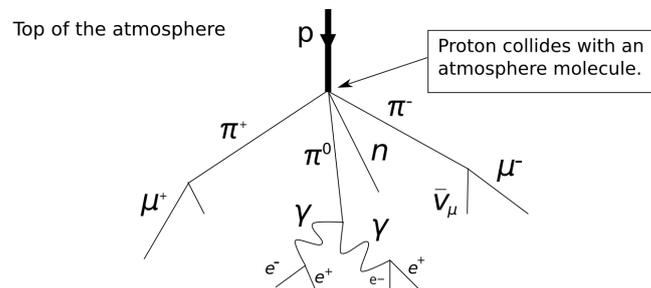


Figura 3.2: Illustrazione dell'interazione di un raggio cosmico, in particolare un protone, con l'atmosfera e conseguente produzione di particelle.

le molecole che li provocano e, infine, la loro influenza su alcune grandezze, come la durata temporale e l'area degli eventi dovuti all'arrivo di muoni.

3.1 Raccolta dei dati sperimentali

L'esperimento XENONnT acquisisce contemporaneamente dati provenienti dai tre rivelatori Muon Veto, Neutron Veto e TPC; le modalità di rivelazione di ciascuno dei tre sono diverse, così come i metodi di elaborazione dei dati raccolti. In questa tesi sono stati utilizzati dati registrati durante il Science Run 2, per un'esposizione totale di circa 76 ore. Si descrivono in seguito l'acquisizione e l'elaborazione dei dati del rivelatore MV.

3.1.1 Acquisizione dei dati

Ognuno degli 84 PMT del Muon Veto è collegato a un canale di un dispositivo ADC (Analog to Digital Converter). In particolare, si utilizzano 11 digitizer CAEN V1724 a 8 canali con 14 bit di risoluzione, range dinamico di 500 mV e frequenza di campionamento di 100 MSample/s corrispondente a una risoluzione temporale di 10 ns per sample. Diversamente dal NV e dalla TPC, l'acquisizione del MV è caratterizzata da un trigger hardware. La condizione di trigger si verifica quando almeno 5 PMT sono in coincidenza in una finestra temporale di 300 ns. Ogni PMT partecipa al trigger quando registra un segnale con ampiezza media maggiore di una data soglia, fissata a 1 fotoelettrone (PE), pari a circa ~ 100 ADC counts. Ogni volta che si produce il trigger, tutti gli 84 canali sono acquisiti per una finestra temporale di $5.12 \mu\text{s}$, comprensiva, oltre che dell'intervallo di tempo che contiene il segnale, anche di un intervallo di pre-trigger e uno di post-trigger.

3.1.2 Elaborazione dei dati

Una volta che i dati sono stati acquisiti attraversano una catena di processamento che li trasforma in un formato maggiormente leggibile e analizzabile. In questo paragrafo sono descritti i successivi livelli di elaborazione a partire da quello più primitivo. Il processamento viene effettuato da un server chiamato event-builder.

1° livello I dati in uscita dai digitizers, denominati raw-data, vengono trasformati nei dati di primo livello, detti raw-records. Questi contengono informazioni di basso livello come le indicazioni temporali, il canale in cui si registra il segnale e le waveform espresse come array di ADC counts, di cui è riportato un esempio in figura 3.3. Esaminando le waveform è possibile identificare i singoli hit, ossia i picchi presenti all'interno del segnale che superano la soglia di energia fissata.

2° livello Ampliando il segnale registrato da un singolo hit di alcuni sample in entrambe le direzioni e concatenando gli hit sovrapposti, si ottiene un hitlet, dato di secondo livello. In questo stadio i dati di primo livello, più pesanti in quanto a spazio su disco occupato e possibilità di elaborazione, sono sintetizzati in alcuni parametri che caratterizzano l'hitlet, tra cui:

- il tempo di inizio, espresso in nanosecondi;
- l'identificativo del PMT in cui viene registrato l'hit;
- l'area, calcolata come la superficie sottesa dalla waveform, espressa in PE.

3° livello Un insieme di almeno tre hitlet contenuti in una finestra temporale di 200 ns viene infine raggruppato all'interno di un evento, dato di terzo livello. Tale finestra

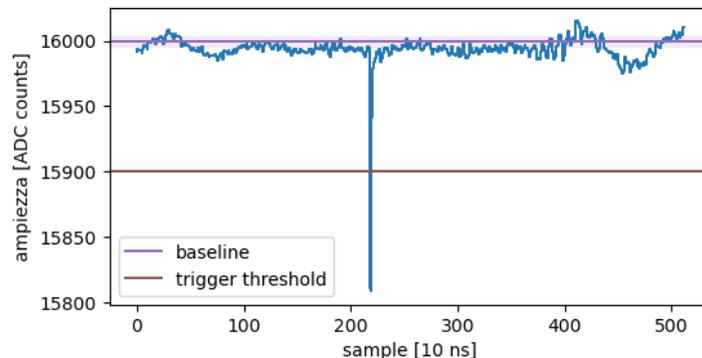


Figura 3.3: Waveform di un singolo fotoelettrone registrata da un PMT del MV. La linea orizzontale viola rappresenta la baseline, ossia il valore di riferimento stimato tramite la media delle ampiezze dei primi 50 sample. La regione ombreggiata viola evidenzia la deviazione standard della baseline. La soglia del trigger è indicata dalla linea marrone, a circa 10 ADC counts dalla baseline.

temporale si può espandere per ogni hitlet che viene compreso nell'evento. Questo tipo di dati contiene importanti informazioni tra cui:

- il tempo di inizio e di fine, espresso in nanosecondi;
- l'area, calcolata come la somma degli hitlet coinvolti, espressa in PE;
- il numero di PMT coinvolti;
- il center time, ossia il tempo medio dell'evento pesato rispetto all'area dei singoli hitlet, espresso in nanosecondi.

3.2 Selezione degli eventi nel Muon Veto

Per poter selezionare gli eventi relativi all'arrivo di un muone all'interno del Muon Veto si adottano alcuni criteri di selezione. La scelta di questi si propone di escludere il maggior numero degli eventi di background e di minimizzare il numero di eventi validi scartati erroneamente. I tagli utilizzati in questo lavoro di tesi sono i seguenti.

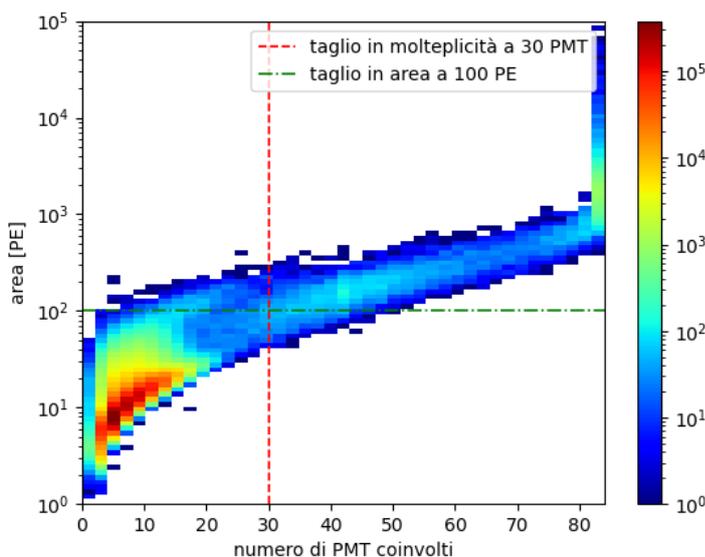
Taglio degli eventi AfterPulse Il primo taglio applicato è stato quello dei segnali AP (sezione 2.5.2). La probabilità che un AP si verifichi è proporzionale alla carica del segnale principale, ossia all'energia depositata dalla particella nel mezzo; perciò, data l'elevata energia che caratterizza il passaggio di un muone, per questo tipo di eventi gli AP costituiscono una fonte di background significativa. In questa analisi, si è deciso

di escludere un evento se si verifica entro $10 \mu\text{s}$ da quello precedente. Per un campione di acquisizione dati di 76 ore questo taglio porta all'esclusione di circa il 2.6% degli eventi registrati dal MV. Tale scelta è supportata dal fatto che studi precedenti condotti sui PMT utilizzati nel MV hanno mostrato che il segnale di AP causato dallo ione più massivo si presenti con un ritardo di circa $7\text{-}8 \mu\text{s}$ [43]. Inoltre, la probabilità che un evento valido si verifichi entro la finestra temporale scelta, considerando il rate di muoni ai LNGS e le dimensioni del rivelatore, si può considerare trascurabile.

Taglio in molteplicità Come già sottolineato, il passaggio di un muone è un evento molto energetico e questa sua caratteristica, unita all'elevata riflettività delle pareti del serbatoio ai fotoni Cherenkov, provoca l'accensione di numerosi PMT. Nella selezione degli eventi muone si trascurano perciò tutti gli eventi che coinvolgono meno di 30 PMT, escludendo in questo modo il $(99.73 \pm 0.05)\%$ degli eventi sopravvissuti al taglio precedente.

Taglio in area L'evento registrato deve infine possedere un'area maggiore di 100 PE. Tale valore permette che ci sia una carica media maggiore di 1 PE su ogni PMT, condizione necessaria per l'attivazione dello stesso. Quest'ultimo taglio esclude una piccola percentuale degli eventi sopravvissuti ai tagli precedenti, pari al $(1.49 \pm 0.12)\%$.

La figura 3.4 mostra gli eventi osservati dal rivelatore in funzione della loro molteplicità e area, prima e dopo aver effettuato il taglio degli eventi AP.



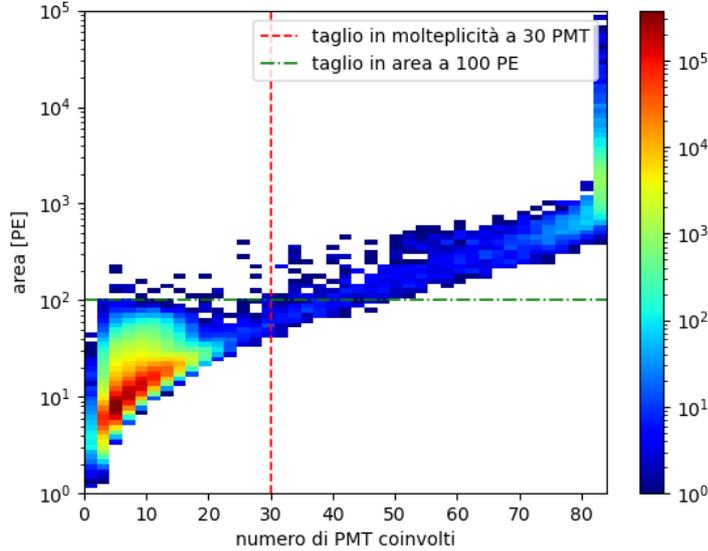


Figura 3.4: Istogrammi bidimensionali in scala semilogaritmica degli eventi registrati dal rivelatore MV. Sulle ascisse è presente il numero di PMT coinvolti nell’evento e nelle ordinate la corrispondente area. Nel primo grafico sono rappresentati tutti gli eventi, mentre nel secondo solo quelli sopravvisuti al taglio in AP. La linea tratteggiata verticale è posta in corrispondenza del taglio in molteplicità dei PMT, pari a 30, mentre quella orizzontale taglia l’asse delle ascisse a 100 PE, valore scelto per il taglio in area. Gli eventi muone risultano perciò quelli appartenenti al quadrante in alto a destra delimitato dalle linee tratteggiate del secondo istogramma.

La percentuale di eventi muone che accende la totalità dei PMT si attesta al $(70.3 \pm 0.9)\%$. Tra questi, quelli con area maggiore di 10^4 PE sono riconducibili all’arrivo di più muoni contemporaneamente (“multi-muon shower events”). Infine, la popolazione di eventi con area minore di 100 PE e molteplicità minore di 20 è da attribuire principalmente alla radioattività naturale che entra nel serbatoio, ma può essere dovuta anche ai neutroni cosmogenici che raggiungono la WT quando il muone da cui si sono originati sia passato all’esterno di essa.

3.3 Contributo degli AfterPulse all’interno degli eventi muone

Una volta selezionati gli eventi relativi all’arrivo di un muone all’interno del MV, ne si è analizzata la durata temporale. Dai risultati, riassunti nell’istogramma in figura 3.5, si nota l’esistenza di tre popolazioni distinte: la prima caratterizzata da eventi con una durata temporale inferiore a 1900 ns, la seconda con una durata temporale compresa

tra 1900 ns e 6000 ns circa e un'ultima con durata temporale di circa 8000 ns. Le tre

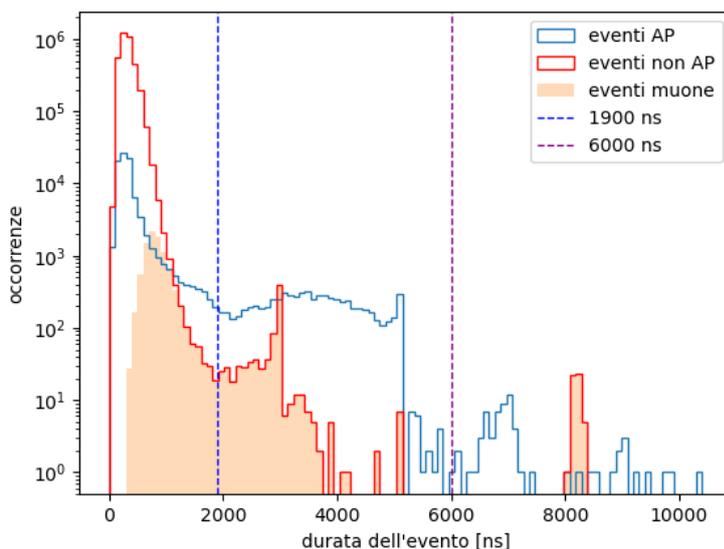


Figura 3.5: Istogramma in scala semilogaritmica della durata temporale degli eventi muone (in rosa) affiancata a quella degli eventi AP (in azzurro) e non AP (in rosso), tra i quali i muoni sono compresi. Le due linee tratteggiate verticali sono poste in corrispondenza di 1900 ns e 6000 ns, valori scelti come discriminare delle tre popolazioni di eventi muone.

popolazioni si presentano con frequenza differente e sono caratterizzate da valori di area e center time diversi l'una dall'altra. Tali informazioni sono riassunte in tabella 3.1.

Popolazione	Durata temporale	%	Area	Center time
Prima	fino a 1900 ns	$(91.0 \pm 1.0)\%$	(1533 ± 9) PE	(63.7 ± 0.4) ns
Seconda	1900 ns - 6000 ns	$(8.5 \pm 0.3)\%$	$(668 \pm 3) \times 10$ PE	(152 ± 6) ns
Terza	sopra 6000 ns	$(0.53 \pm 0.07)\%$	$(64 \pm 3) \times 10^2$ PE	(651 ± 10) ns

Tabella 3.1: Tabella contenente per ognuna delle tre popolazioni degli eventi muone la durata temporale, la percentuale con cui essa si verifica sul totale degli eventi muone, l'area media e il center time medio.

3.3.1 Definizione delle popolazioni di AfterPulse

Con lo scopo di indagare la natura delle tre diverse popolazioni si è approfondita l'analisi degli eventi muone a livello degli hitlet. Studiando la distribuzione del tempo di arrivo degli hitlet all'interno dell'evento si è potuto riconoscere un primo picco comune a tutte

e tre le popolazioni, corrispondente all'evento principale, seguito da segnali di AP che si manifestano in misura diversa per le tre popolazioni. La prima di queste, caratterizzata da una durata temporale inferiore, presenta un solo segnale di AP dopo qualche centinaia di nanosecondi; la seconda e la terza popolazione mostrano invece ulteriori segnali di questa natura che allungano la durata dell'evento fino ad alcune migliaia di nanosecondi. Nelle figure 3.6, 3.7, 3.8 sono riportati i tre istogrammi che mostrano l'andamento temporale degli hitlet all'interno delle tre popolazioni.

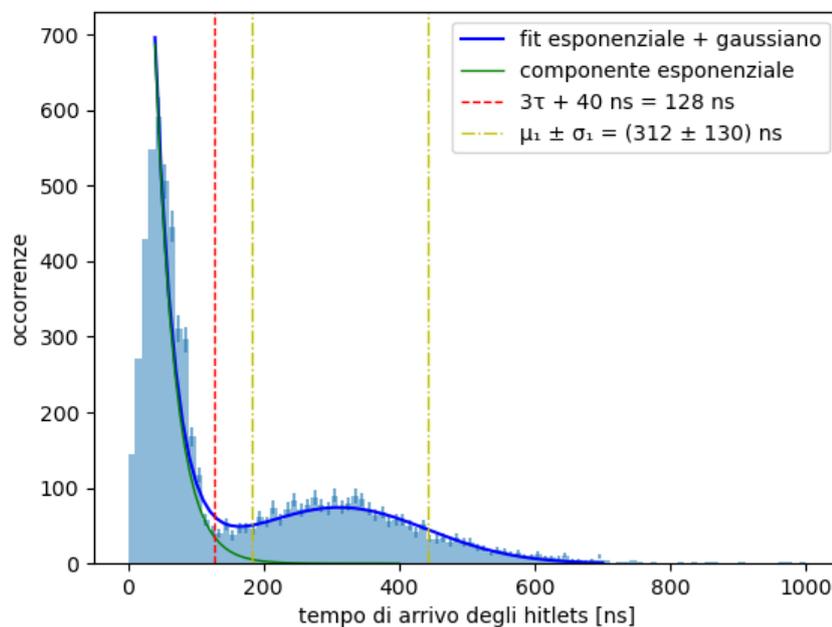


Figura 3.6: Istogramma nel range $[0, 1000]$ ns del tempo di arrivo degli hitlet appartenenti a 50 eventi muone della prima popolazione. Il grafico presenta un primo picco dovuto alla luce prodotta dall'arrivo del muone e un secondo originato da una popolazione di AP. Nel range $[40, 700]$ ns è mostrato in blu un fit, composto da una componente esponenziale e da una gaussiana, che approssima la decrescita della prima distribuzione e il picco consecutivo. Il triplo della costante di tempo τ che caratterizza l'andamento esponenziale permette di discriminare il segnale generato dall'arrivo del muone da quello degli AP. La linea rossa tratteggiata è posta in corrispondenza di questo taglio. Le linee gialle tratto-punto circoscrivono la distribuzione gaussiana intorno al suo valore medio μ_1 con un'ampiezza a sinistra e a destra pari alla deviazione standard σ_1 .

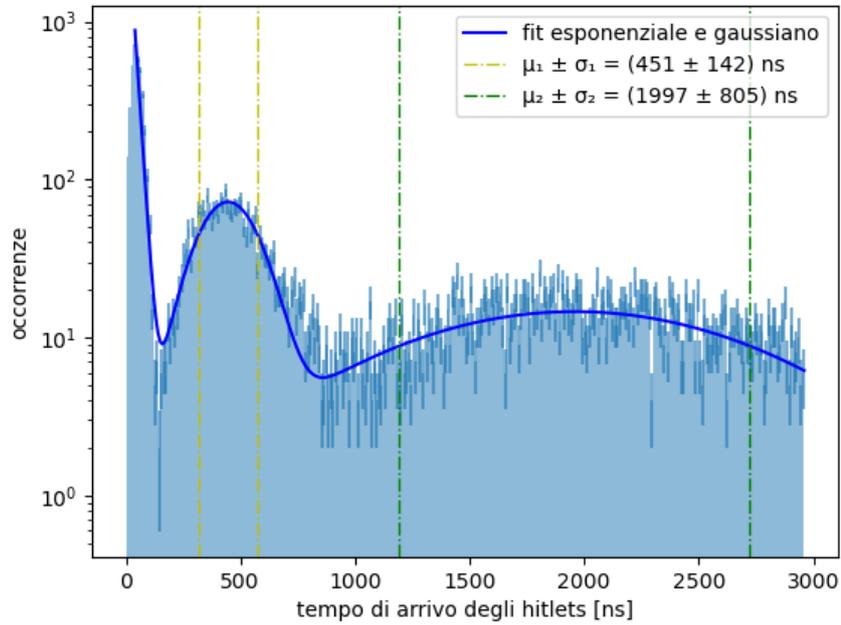


Figura 3.7: Istogramma in scala semilogaritmica del tempo di arrivo degli hitlet appartenenti a 50 eventi muone della seconda popolazione. Il grafico presenta un primo picco dovuto al passaggio del muone e di seguito il segnale originato da due popolazioni di AP. In blu è mostrato un fit, composto dalla somma di un esponenziale e due gaussiane, che approssima la decrescita della prima distribuzione (a partire da 40 ns) e i picchi consecutivi. Le linee gialle e verdi tratto-punto circoscrivono le distribuzioni gaussiane intorno ai loro valori medi μ_1 e μ_2 con un'ampiezza a sinistra e a destra pari alle deviazioni standard σ_1 e σ_2 .

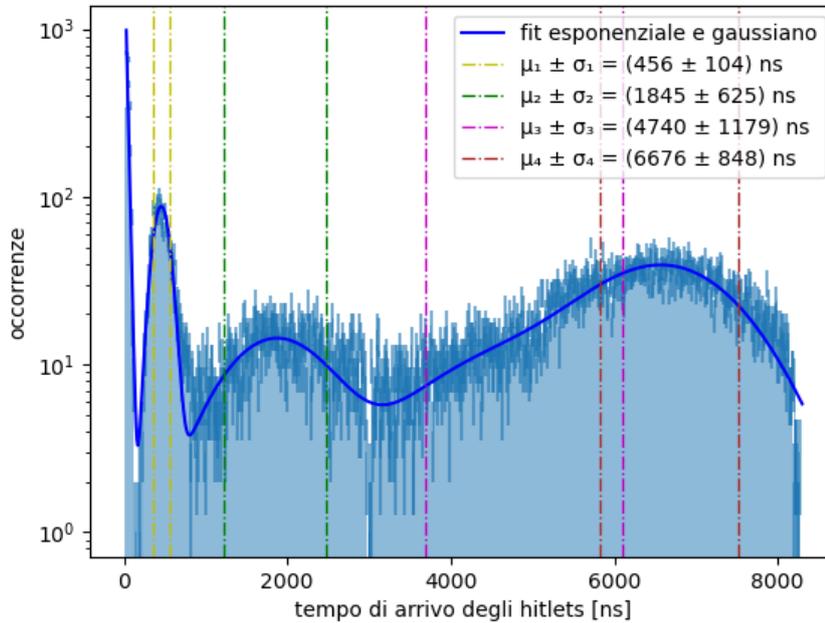


Figura 3.8: Istogramma in scala semilogaritmica del tempo di arrivo degli hitlet appartenenti a 50 eventi muone della terza popolazione. Il grafico presenta un primo picco dovuto al passaggio del muone e di seguito il segnale originato da quattro popolazioni di AP. In blu è mostrato un fit, composto dalla somma di un esponenziale e tre gaussiane, che approssima la decrescita della prima distribuzione (a partire da 40 ns) e i picchi consecutivi. Le linee tratto-punto gialle, verdi, viola e rosse circoscrivono le distribuzioni gaussiane intorno ai loro valori medi μ_1 , μ_2 , μ_3 , μ_4 con un'ampiezza a sinistra e a destra pari alle deviazioni standard σ_1 , σ_2 , σ_3 , σ_4 .

Applicando un fit esponenziale al primo istogramma si è individuato un valore temporale che permette di distinguere gli hitlet generati dall'evento principale, ossia il passaggio del muone, da quelli provocati dai segnali di AP. Il valore trovato è pari a 128 ns. Si è verificato inoltre che questo taglio fosse compatibile anche con le distribuzioni del tempo di arrivo degli hitlet delle altre due popolazioni. La scelta di tale valore è resa ancor più robusta dal fatto che a seguito di esso non si osservano (o si osservano in misura del tutto trascurabile) hitlet con aree maggiori di poche decine di PE, al contrario di ciò che si verifica prima del taglio, dove le aree che caratterizzano l'evento principale risultano decisamente maggiori. Di seguito, in figura 3.9, è riportato un istogramma che mette in relazione il tempo di arrivo degli hitlet degli eventi della terza popolazione con l'area che essi coinvolgono. Come detto in precedenza, è possibile distinguere i maggiori valori di area in corrispondenza del passaggio del muone e, in misura minore, in corrispondenza dei picchi delle popolazioni di AP.

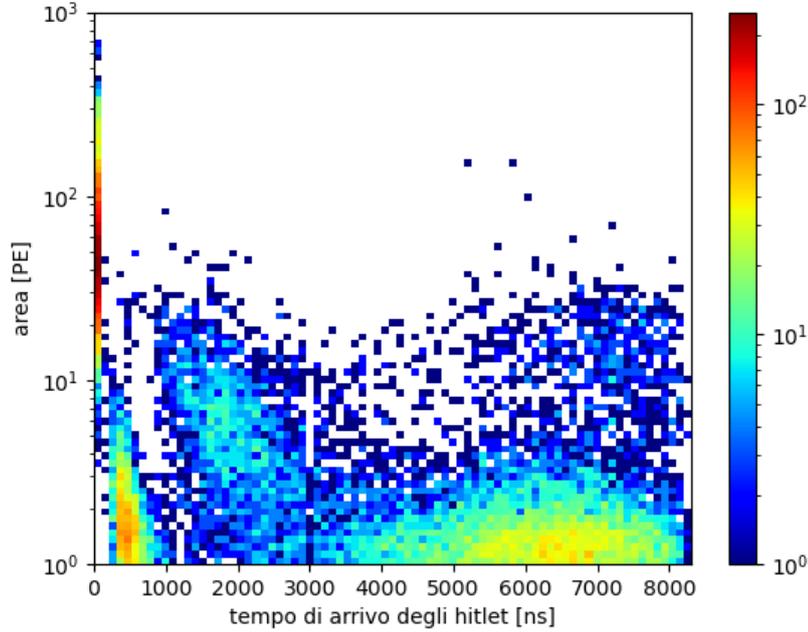


Figura 3.9: Istogramma bidimensionale in scala semilogaritmica del tempo di arrivo degli hitlet e dell'area. I dati presenti appartengono a 50 eventi muone della terza popolazione, quella con durata temporale maggiore.

Inoltre, tramite i fit gaussiani applicati sugli istogrammi in figura 3.6, 3.7, 3.8 si sono ricavati i tempi medi e le ampiezze che caratterizzano la comparsa delle quattro famiglie di AP individuate. Nonostante per una stessa famiglia di AP i tempi medi ottenuti presentino delle variazioni a seconda della popolazione di evento muone in cui si manifestano, è possibile distinguere la presenza di quattro picchi intorno a circa 400 ns, 1900 ns, 4700 ns e 6700 ns. In accordo con quanto trovato in letteratura [43, 44], si desume che il primo picco sia dovuto allo ione H^+ , dato il suo rapporto m/q minore possibile (vedi equazione 2.6), mentre il secondo e l'ultimo agli ioni He^+ e CO_2^+ . Il terzo picco è attribuibile ad alcuni ioni con massa compresa tra i precedenti, come O^+ , CH_4^+ , N_2^+ , O_2^+ , Ar^+ . L'ampiezza a cui sono soggetti i diversi picchi è causata dalla non esatta uniformità delle condizioni a cui sono sottoposti i PMT, prima tra tutte la differente tensione di alimentazione di ciascuno.

3.3.2 Contributo in area degli AfterPulse

In seguito, si è approfondita l'analisi degli AP andando a studiare il loro contributo in area all'interno dell'evento muone. In figura 3.10 si mostra l'andamento dell'area degli

AP in funzione dell'area evento muone privata dal contributo in area degli stessi. In accordo con i risultati del paragrafo precedente, si considerano appartenenti all'evento principale tutti i segnali che si verificano entro 128 ns dal primo.

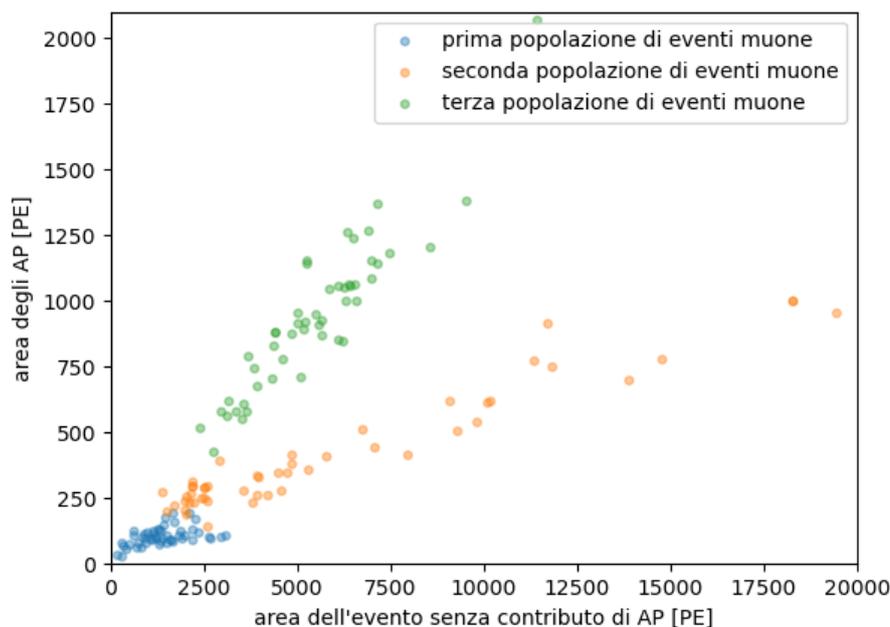


Figura 3.10: Scatter plot che mette in relazione l'area dell'evento muone privata del contributo degli AP (in ascisse) con l'area degli AP che sono prodotti in quell'evento (in ordinate). In azzurro, arancione e verde sono rappresentati rispettivamente i dati appartenenti a 50 eventi della prima, seconda e terza popolazione di eventi muone.

Dal grafico si evince che la prima popolazione di muoni si origina quando l'evento principale è caratterizzato da aree inferiori a circa 2000-2500 PE. Nei casi invece in cui l'area dell'evento principale supera questo valore si verificano eventi muone della seconda e terza popolazione con contributi percentuali pari al 96.1% e 5.9%, rispettivamente. Per tutte e tre le popolazioni si riscontra dal grafico una chiara proporzionalità diretta tra le due grandezze. La figura 3.11 mostra invece la percentuale dell'area degli eventi AP su quella totale in funzione dell'area dell'evento ripulita dal contributo degli AP. Per le prime due popolazioni si nota una proporzionalità inversa tra le due grandezze rappresentate.

Prendendo in considerazione una statistica di 50 eventi per ogni popolazione, si sono ottenuti i seguenti risultati riassunti in tabella 3.2 per quanto riguarda il contributo in area degli AP nelle tre popolazioni di eventi muone. Mentre per le prime due tale contributo si attesta intorno all'8-9% dell'area totale, nell'ultima popolazione esso rag-

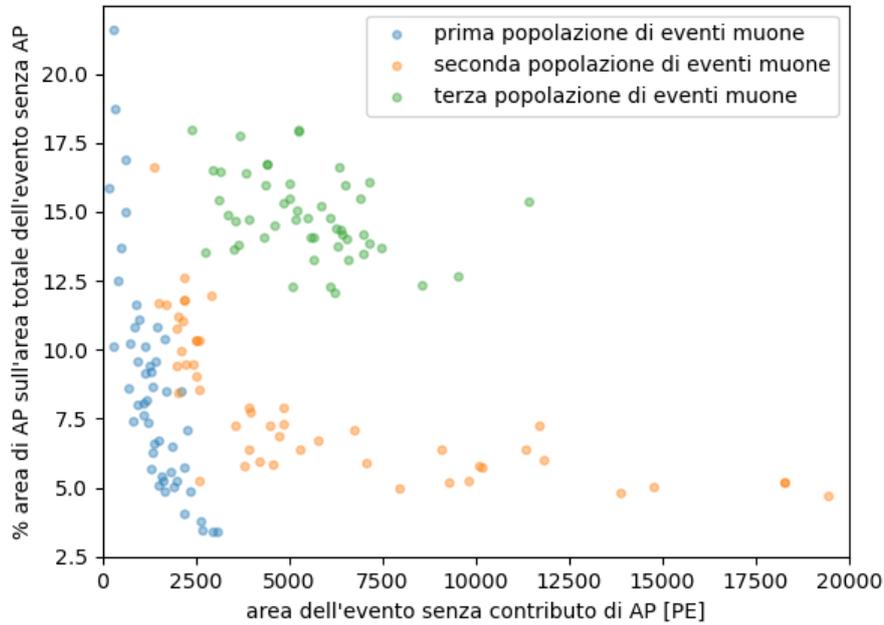


Figura 3.11: Scatter plot che mette in relazione l'area dell'evento muone senza il contributo degli AP (in ascisse) con la percentuale dell'area degli AP sull'area totale dell'evento (in ordinate). In azzurro, arancione e verde sono rappresentati rispettivamente i dati appartenenti a 50 eventi della prima, seconda e terza popolazione di eventi muone.

giunge circa il 15%. Grazie a tale taglio, è stato possibile calcolare l'area media delle tre popolazioni di evento muone ripulita dal contributo degli AP.

Popolazione	Area totale (PE)	Area senza AP (PE)	Area AP (PE)	% Area AP
Prima	$(148 \pm 10) \times 10$	$(137 \pm 10) \times 10$	(106 ± 5)	$(8.6 \pm 0.6) \%$
Seconda	$(63 \pm 7) \times 10^2$	$(59 \pm 7) \times 10^2$	$(42 \pm 3) \times 10$	$(8.0 \pm 0.34) \%$
Terza	$(64 \pm 3) \times 10^2$	$(54 \pm 2) \times 10^2$	$(94 \pm 4) \times 10$	$(14.9 \pm 0.2) \%$

Tabella 3.2: Tabella contenente per ognuna delle tre popolazioni degli eventi muone i valori medi dell'area totale, dell'area privata dal contributo degli AP, dell'area degli AP e della percentuale in area degli AP sull'area totale. Si è utilizzata una statistica di 50 eventi per popolazione.

3.3.3 Molteplicità dei PMT nei segnale di AfterPulse

È stato studiato infine il comportamento di ogni PMT all'interno dei segnali di AP per gli eventi muone della seconda e terza popolazione, dove questo fenomeno risulta più abbondante. La figura 3.12 mostra la relazione presente tra la molteplicità con cui ogni PMT è coinvolto nei segnali di AP della seconda popolazione con la molteplicità con cui è coinvolto nella terza popolazione. Dalla distribuzione dei punti si nota una relazione lineare tra le due grandezze, quantificata dal coefficiente di correlazione lineare pari a 0.73, il quale attesta una correlazione altamente significativa. In primo luogo ciò suggerisce, come previsto, che gli hitlet della terza popolazione comprendano le popolazioni di AP caratteristiche della seconda popolazione. Infine, si deduce che i PMT che si collocano nella porzione in alto a destra del grafico, ossia quelli con alta molteplicità per entrambe le popolazioni, siano maggiormente predisposti a generare segnali di AP. Questo comportamento può essere attribuito a una condizione di vuoto non ottimale all'interno del PMT; nonostante ciò, non si riscontra la presenza di PMT con comportamenti anomali, tali da escluderli dall'analisi dati. Sulla scia di tale indagine, uno studio che si propone per il futuro è la stima del contributo agli AP originato da ogni PMT.

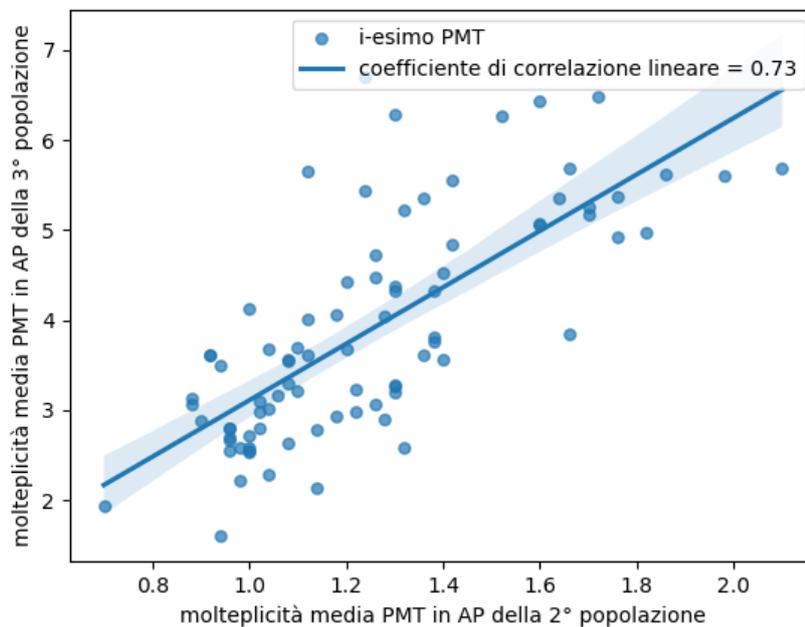


Figura 3.12: Scatter plot che mette in relazione il numero medio di volte in cui ogni PMT è coinvolto con un segnale di AP per un evento della seconda popolazione (in ascisse) con il numero medio di volte in cui è coinvolto per un evento della terza popolazione (in ordinate). I valori medi sono stati calcolati su una statistica di 50 eventi per entrambe le popolazioni. Nel grafico sono presenti 84 punti, uno per ogni PMT. La linea blu rappresenta la retta di correlazione lineare caratterizzata da un coefficiente pari a 0.73.

Conclusioni

Il mistero della Materia Oscura ha affascinato e impegnato per decenni un gran numero di scienziati e sono numerosi gli sforzi teorici e sperimentali tuttora in corso con lo scopo di venire a capo di questo dilemma. Sono state avanzate molte ipotesi riguardo la natura della Materia Oscura, sebbene nessun esperimento sia stato ancora in grado di osservarla direttamente. Tra i candidati più promettenti spiccano quelli proposti dalle teorie supersimmetriche; in questo ambito, i maggiori sforzi sperimentali si sono concentrati sulla rivelazione delle WIMP, particelle neutre, stabili e in grado di interagire solo gravitazionalmente e debolmente. Negli ultimi anni sono stati fatti numerosi progressi sia per quanto riguarda gli esperimenti di rivelazione diretta di Materia Oscura, il cui scopo è la ricerca dell'energia rilasciata dallo scattering delle WIMP con i nuclei bersaglio, sia per quelli di rivelazione indiretta, che si focalizzano sull'osservazione dei prodotti di annichilazione di tali particelle. Le sezioni d'urto di queste interazioni sono molto piccole, tanto che, per quanto riguarda gli esperimenti di ricerca diretta, il numero di eventi attesi è minore di 1 evento/ton/year. Gli esperimenti su questo fronte tentano perciò di aumentare il più possibile la loro esposizione, utilizzando grandi masse bersaglio, e di diminuirne il fondo, scegliendo ambienti a bassa radioattività, come i laboratori sotterranei, e utilizzando materiali ultra-puri e sistemi di veto. L'esperimento XENON, situato presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS), è uno dei progetti all'avanguardia nel campo della ricerca diretta delle WIMP. Il suo principale obiettivo è infatti la rivelazione di tali particelle tramite l'energia rilasciata dalla loro collisione con i nuclei di Xenon contenuti all'interno di una Dual-Phase Time Projection Chamber. Al momento il rivelatore XENONnT è in presa dati nel terzo Science Run (SR2) iniziato ad ottobre 2023. Questo run segue SR0, nel quale si sono acquisiti dati per una durata complessiva di 97.1 giorni (da luglio a novembre 2021), e SR1, da maggio 2022 ad agosto 2023. Le analisi svolte sui dati acquisiti durante SR0 presentano un miglioramento rispetto ai risultati del rivelatore precedente (XENON1T), ottenendo un limite superiore per la sezione d'urto a $2.58 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ per le interazioni indipendenti dallo spin per una WIMP di massa pari a $28 \text{ GeV}/c^2$ [1]. Per raggiungere tali sensibilità, i sistemi Muon Veto e Neutron Veto giocano un ruolo fondamentale contro il background a cui è sottoposto l'esperimento.

In questo lavoro di tesi si è concentrata l'attenzione sul rumore di fondo provocato

dai raggi cosmici che riescono a raggiungere le profondità dei Laboratori del Gran Sasso. A tale scopo, si sono analizzati gli eventi relativi al passaggio di un muone attraverso la water tank del Muon Veto. Studiandone la durata temporale si sono riconosciute tre diverse popolazioni di eventi muone: la prima, la quale costituisce il 91.0% degli eventi muone, è caratterizzata da una durata fino a circa 1900 ns, la seconda, che si presenta nell'8.5% dei casi, ha una durata compresa tra 1900 ns e 6000 ns, mentre la terza, che rappresenta solamente lo 0.53% dei casi, ha una durata di circa 8000 ns. Per ognuna di queste popolazioni si è approfondita l'analisi del segnale esaminandone la distribuzione dei singoli hitlet, dalla quale emergono, a seguito di un primo segnale corrispondente al passaggio del muone, diversi picchi riconducibili a segnali di AfterPulse provocati da differenti ioni per i quali sono stati caratterizzati i tempi medi di arrivo (circa 400 ns, 1900 ns, 4700 ns e 6700 ns). La prima popolazione presenta solamente un segnale di AP causato dallo ione più leggero H^+ , per la seconda popolazione ad esso si aggiunge un picco provocato dallo ione He^+ , mentre nella terza emergono due ulteriori picchi corrispondenti a ioni compresi tra O^+ , CH_4^+ , N_2^+ , O_2^+ , Ar^+ nel caso del primo picco e allo ione CO_2^+ per il secondo. Si osserva inoltre che le occorrenze degli hitlet appartenenti agli AP provocati dallo ione He^+ sono inferiori se comparate alle altre: ciò si ipotizza possa essere causato sia da una minore presenza di questi atomi all'interno dei PMT, sia dalla maggiore energia di ionizzazione necessaria per strappare un elettrone dall' He piuttosto che dall' H o dalla CO_2 . Inoltre, si è individuato a 128 ns il tempo che permette di discriminare all'interno di un evento gli hitlet generati dal passaggio del muone da quelli provocati dagli AP. Grazie a questo taglio si è potuta calcolare l'area dell'evento muone ripulita dai segnali di AP, mentre si è ottenuto per le tre popolazioni che questi hanno un'area rispettivamente pari all'8.6%, all'8% e al 14.9% dell'area totale. Alla luce di questi risultati, il presente lavoro di tesi propone l'inserimento di un plug-in nella struttura di elaborazione dei dati del Muon Veto che consenta di distinguere il segnale relativo al passaggio del muone privato dal contributo degli AP; ciò è possibile prendendo in considerazione solamente gli hitlet registrati entro 128 ns dall'inizio dell'evento. Si è osservato inoltre che eventi con aree iniziali fino a un massimo di 2000-2500 PE danno luogo prevalentemente a eventi muone della prima popolazione, al contrario di ciò che accade per quelli ad aree maggiori. Inoltre, si nota una proporzionalità diretta tra le aree degli AP di ogni popolazione e le aree iniziali dell'evento. Tutti questi risultati sono in accordo con i comportamenti attesi. Infine, si è riscontrata una correlazione lineare significativa tra la molteplicità con cui i PMT partecipano agli AP della seconda e terza popolazione: questo risultato suggerisce che alcuni di essi siano maggiormente predisposti a generare AP a causa di una condizione di vuoto non ottimale al loro interno. Nonostante ciò, non si rileva la presenza di PMT con comportamenti anomali, tali da essere esclusi dall'analisi dati. Un possibile sviluppo futuro di tale indagine è lo studio del contributo ai segnali di AP dovuto a ogni PMT.

Bibliografia

- [1] E. Aprile et al. «First Dark Matter Search with Nuclear Recoils from the XENONnT Experiment». In: *Phys. Rev. Lett.* 131 (2023), p. 041003.
- [2] M. Cirelli, A. Strumia e J. Zupan. *Dark Matter*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2406.01705>.
- [3] F. Zwicky. «Spectral displacement of extra galactic nebulae». In: *Helv. Phys. Acta* 6, p. 110 (1933).
- [4] V. C. Rubin. «Dark Matter in Spiral Galaxies». In: *Scientific American* 248.6, pp. 96–109 (1983).
- [5] K. G. Begeman, A. H. Broeils e R. H. Sanders. «Extended rotation curves of spiral galaxies: dark haloes and modified dynamics». In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 249.3 (1991), pp. 523–537.
- [6] *The Bullet Cluster*. URL: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2007/07/The_Bullet_Cluster2.
- [7] A. A. Penzias e R. W. Wilson. «A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s.» In: *The Astrophysical Journal* 142 (1965), pp. 419–421.
- [8] G. Bertone, D. Hooper e J. Silk. «Particle dark matter: evidence, candidates and constraints». In: *Physics Reports* 405.5 (2005), pp. 279–390.
- [9] N. Aghanim et al. «Planck2018 results: VI. Cosmological parameters». In: *Astronomy & Astrophysics* 641 (2020), A6.
- [10] C. Alcock et al. «The MACHO Project: Microlensing Results from 5.7 Years of Large Magellanic Cloud Observations». In: *The Astrophysical Journal* 542.1 (2000), pp. 281–307.
- [11] P. Tisserand et al. «Limits on the Macho content of the Galactic Halo from the EROS-2 Survey of the Magellanic Clouds». In: *Astronomy & Astrophysics* 469.2 (2007), pp. 387–404.
- [12] J. Lesgourgues e S. Pastor. «Neutrino Mass from Cosmology». In: *Advances in High Energy Physics* 2012 (2012), pp. 1–34.

- [13] G. Carugno. *Un vento leggero. Assioni per spiegare la materia oscura*. URL: <https://www.asimmetrie.it/un-vento-leggero>.
- [14] E. Aldufeery e M. Binjonaid. «Dark Matter Constraints and the Neutralino Sector of the scNMSSM». In: *Universe* 7.2 (2021), p. 31.
- [15] B. P. Abbott et al. «Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger». In: *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016), p. 061102.
- [16] O. Buchmueller, C. Doglioni e L. Wang. «Search for dark matter at colliders». In: *Nature Physics* 13.3 (2017), pp. 217–223.
- [17] M. W. Goodman e E. Witten. «Detectability of certain dark-matter candidates». In: *Phys. Rev. D* 31 (1985), pp. 3059–3063.
- [18] A. Mancuso. «Neutron Veto of XENONnT: final construction design of the system and extensive study and calibration of the PMTs.» Alma Mater Studiorum, 2019. URL: <http://amslaurea.unibo.it/19854/>.
- [19] J.D. Lewin e P.F. Smith. «Review of mathematics, numerical factors, and corrections for dark matter experiments based on elastic nuclear recoil». In: *Astroparticle Physics* 6.1 (1996), pp. 87–112.
- [20] J. Fan, M. Reece e L. T. Wang. «Non-relativistic effective theory of dark matter direct detection». In: *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2010.11 (2010), p. 042.
- [21] A. Mancuso. «The XENONnT Neutron Veto: design, construction e performance.» Tesi di dott. Alma Mater Studiorum, 2024.
- [22] E. Aprile et al. «Design and performance of the XENON10 dark matter experiment». In: *Astroparticle Physics* 34.9 (2011), pp. 679–698.
- [23] J. Angle et al. «First Results from the XENON10 Dark Matter Experiment at the Gran Sasso National Laboratory». In: *Phys. Rev. Lett.* 100 (2008), p. 021303.
- [24] J. Angle et al. «Limits on Spin-Dependent WIMP-Nucleon Cross Sections from the XENON10 Experiment». In: *Phys. Rev. Lett.* 101 (2008), p. 091301.
- [25] E. Aprile et al. «The XENON100 dark matter experiment». In: *Astroparticle Physics* 35.9 (2012), pp. 573–590.
- [26] E. Aprile et al. «Dark Matter Results from 100 Live Days of XENON100 Data». In: *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011), p. 131302.
- [27] E. Aprile et al. «Dark Matter Results from 225 Live Days of XENON100 Data». In: *Phys. Rev. Lett.* 109 (2012), p. 181301.
- [28] E. Aprile et al. «Limits on Spin-Dependent WIMP-Nucleon Cross Sections from 225 Live Days of XENON100 Data». In: *Phys. Rev. Lett.* 111 (2013), p. 021301.

- [29] E. Aprile et al. «XENON100 dark matter results from a combination of 477 live days». In: *Phys. Rev. D* 94 (2016), p. 122001.
- [30] E. Aprile et al. «The XENON1T dark matter experiment». In: *The European Physical Journal C* 77 (2017).
- [31] E. Aprile et al. «Dark Matter Search Results from a One Ton-Year Exposure of XENON1T». In: *Phys. Rev. Lett.* 121 (2018), p. 111302.
- [32] E. Aprile et al. «Constraining the Spin-Dependent WIMP-Nucleon Cross Sections with XENON1T». In: *Phys. Rev. Lett.* 122 (2019), p. 141301.
- [33] E. Aprile et al. «Projected WIMP sensitivity of the XENONnT dark matter experiment.» In: *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 31 (nov. 2020).
- [34] P. Di Gangi. «The Xenon Road to Direct Detection of Dark Matter at LNGS: The XENON Project». In: *Universe* 7.8 (2021), p. 313.
- [35] E. Aprile et al. «Observation of two-neutrino double electron capture in ^{124}Xe with XENON1T». In: *Nature* 568.7753 (2019), pp. 532–535.
- [36] E. Aprile et al. «Lowering the radioactivity of the photomultiplier tubes for the XENON1T dark matter experiment». In: *The European Physical Journal C* 75.11 (2015).
- [37] M. Aglietta et al. «Muon “depth-intensity” relation measured by the LVD underground experiment and cosmic-ray muon spectrum at sea level». In: *Phys. Rev. D* 58 (1998), p. 092005.
- [38] V. A. Kudryavtsev et al. «Neutron- and muon-induced background in underground physics experiments». In: *The European Physical Journal A* 36 (2008).
- [39] H. Wulandari et al. «Neutron flux at the Gran Sasso underground laboratory revisited». In: *Astroparticle Physics* 22.3 (2004), pp. 313–322.
- [40] M. Ambrosio et al. «Measurement of the residual energy of muons in the Gran Sasso underground laboratories». In: *Astroparticle Physics* 19.3 (2003), pp. 313–328.
- [41] C. Geis et al. «Optical response of highly reflective film used in the water Cherenkov muon veto of the XENON1T dark matter experiment». In: *Journal of Instrumentation* 12.06 (2017), P06017.
- [42] E. Aprile et al. «Conceptual design and simulation of a water Cherenkov muon veto for the XENON1T experiment». In: *Journal of Instrumentation* 9.11 (2014), P11006.
- [43] F. Agostini. «Caratterizzazione e calibrazione dei fotomoltiplicatori del sistema di veto di muoni per l’esperimento XENON1T». Alma Mater Studiorum, 2013. URL: https://web.bo.infn.it/xenon/sito_web_Bologna/tesi/agostini_federica_tesi.pdf.

- [44] K.J. Ma et al. «Time and amplitude of afterpulse measured with a large size photomultiplier tube». In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 629.1 (2011), pp. 93–100.