



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO  
FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE,  
FISICHE E NATURALI  
CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN FISICA

***DISCRIMINAZIONE DEGLI IMPULSI DI  
SEGNALE E DI FONDO NELL'ESPERIMENTO  
DI MATERIA OSCURA DARKSIDE-50***

RELATORE INTERNO:  
Prof.ssa Emanuela Meroni

RELATORE ESTERNO:  
Ing. Giocchino Ranucci

Presentata da:  
Stefano Passadore  
Matricola 756164

Anno Accademico 2011/2012



# INDICE

<b>INTRODUZIONE (riassunto)</b>	<b>ii</b>
<b>1- La Materia Oscura</b>	<b>1</b>
1.1 Motivi della sua Teorizzazione	1
1.2 Natura e Composizione	4
<b>2- RIVELAZIONE DELLE WIMPs</b>	<b>8</b>
2.1 Scattering	8
2.2 La Rivelazione	12
2.3 DarkSide-50	15
2.3.1 <i>DarkSide-10</i>	15
2.3.2 <i>Argon poco radioattivo</i>	17
2.3.3 <i>Rivelatore TPC</i>	17
2.3.4 <i>Veto Attivo Neutronico</i>	20
2.3.5 <i>Veto Muonico</i>	21
<b>3- PULSE-SHAPE DISCRIMINATION</b>	<b>23</b>
3.1 Introduzione	23
3.2 La Simulazione	25
3.3 L'Analisi	31
<b>4- CONCLUSIONI</b>	<b>42</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>43</b>

# INTRODUZIONE (RIASSUNTO)

La materia oscura è un argomento di ricerca che negli anni recenti ha conosciuto il fiorire di molteplici iniziative sperimentali volte alla sua identificazione. Sebbene ci siano diverse prove di natura astronomica e cosmologica della sua effettiva esistenza, a partire dalle osservazioni astronomiche del Coma cluster effettuate da Fritz Zwicky negli anni 30, a tutt'oggi non sono ancora state individuate evidenze sperimentali dirette in grado di svelarne la natura.

Nell'ambito delle varie teorie ipotizzate per spiegarne caratteristiche e composizione, quella che negli ultimi anni si è accreditata come la più plausibile ipotizza che la materia oscura sia composta da particelle teoriche chiamate WIMPs, acronimo che sta a significare Weakly Interacting Massive Particles. Il nome stesso sintetizza la proprietà fondamentale di queste ipotetiche particelle di interagire debolissimamente con la materia ordinaria, solo attraverso l'attrazione gravitazionale e la forza debole.

L'idea che la materia oscura sia formata da WIMPs trova un forte sostegno nello studio della formazione delle cosiddette "Large Scale Structure" dell'Universo. Manca, però, la prova regina della loro esistenza, che scaturisca dalla loro rivelazione sperimentale diretta in uno dei molti esperimenti che sono stati concepiti e progettati a questo scopo.

Nell'ambito della ricerca diretta delle WIMPs rientra l'esperimento DarkSide-50, che verrà effettuato presso i Laboratori del Gran Sasso. Lo scopo di questo esperimento sarà di osservare le WIMPs tramite lo studio delle interazioni potenzialmente indotte all'interno di un rivelatore di tipo TPC (time projection chamber) dove è contenuto argon allo stato liquido: una singola WIMP può interagire tramite diffusione con un nucleo di argon causandone il rinculo, ed il nucleo a sua volta durante il rinculo produce un fenomeno di scintillazione dell'argon circostante. Di conseguenza, equipaggiando il rivelatore con opportuni fotosensori, l'ipotetica WIMP può essere riconosciuta tramite la scintillazione ad essa associata.

Tuttavia nell'argon che funge da materiale bersaglio avvengono anche interazioni dovute a particelle convenzionali, anch'esse in grado di indurre eventi di scintillazione che costituiscono, quindi, un segnale di fondo rispetto alla ricerca delle WIMPs. In

particolare, le radiazioni beta e gamma originate dalla radioattività naturale, che producono scintillazione a seguito dell'interazione con gli elettroni esterni degli atomi di argon, costituiscono la componente di fondo più abbondante.

Una proprietà tipica della scintillazione in Argon è che attraverso il metodo di Pulse-Shape Discrimination basato sul profilo temporale del segnale luminoso si può distinguere una scintillazione dovuta ad un rinculo di tipo elettronico (interazione del materiale bersaglio con una particella carica) o nucleare (interazione del materiale bersaglio con una particella senza carica). Questo ci permette di discriminare le interazioni di fondo dovute, per esempio, ad elettroni, da quelle dovute a neutroni o a WIMPs (infatti, sia i neutroni che le ipotetiche WIMPs hanno un comportamento simile all'interno dell'argon liquido).

In questa tesi presento un esempio di metodologia di elaborazione tramite Pulse-Shape Discrimination di un insieme di dati simulati attraverso un programma di computer che rappresentano realisticamente eventi di scintillazione in argon. Lo scopo sarà mostrare quali siano i migliori parametri da sfruttare per distinguere i due tipi di rinculi e quale sia il grado di contaminazione di fondo, cioè, in base all'energia di scintillazione rivelata, quanti rinculi elettronici confondiamo come rinculi nucleari.

# CAPITOLO 1

## LA MATERIA OSCURA

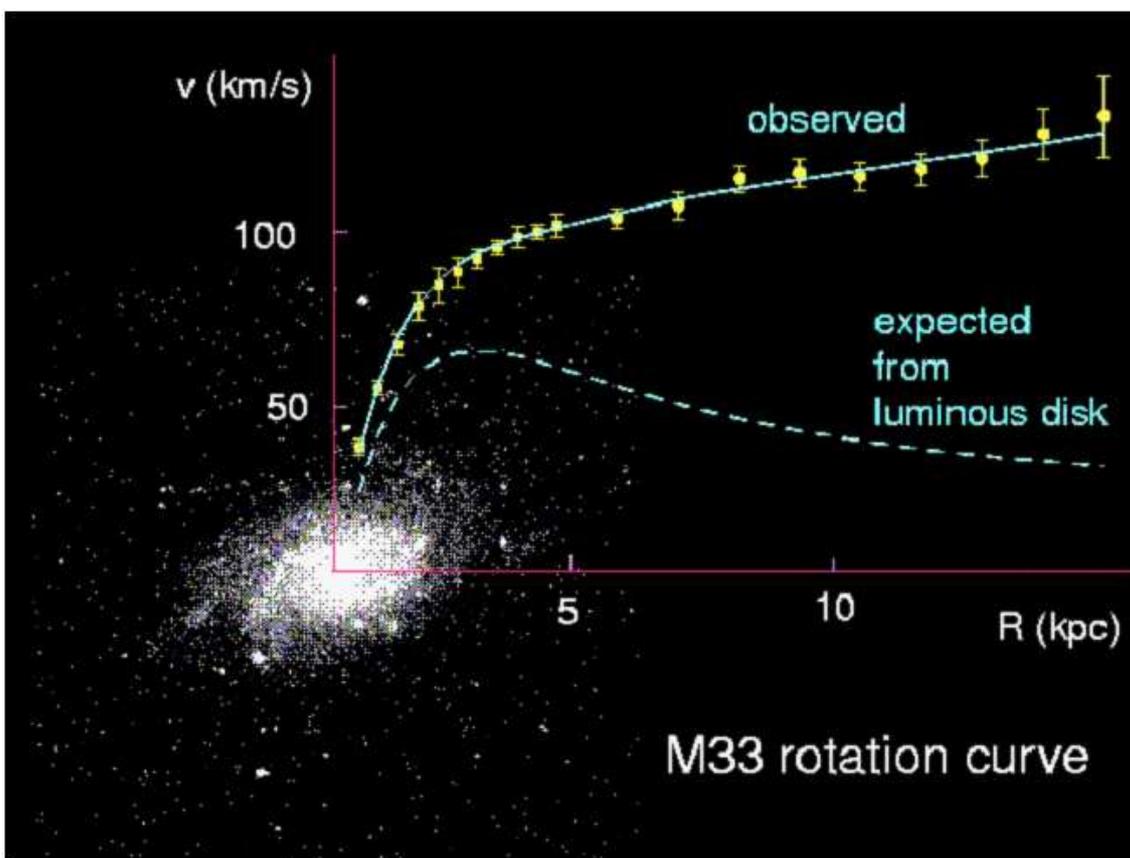
### 1.1 MOTIVI DELLA SUA TEORIZZAZIONE

Lo studio dei corpi celesti per lo più è basato sull'osservazione della luce che dalla Terra riusciamo a percepire. In alcuni casi osserviamo la luce emessa direttamente, come nel caso di stelle, galassie o nebulose luminose; altre volte osserviamo la presenza di "buchi" dove non viene osservata alcuna emissione di luce visibile, come nel caso delle nebulose oscure. Questi appena descritti sono i metodi più usati soprattutto nel passato per la rivelazione di materia nell'Universo. Con il passare del tempo questo tipo di rivelazione è andato sempre più a migliorare; infatti, con l'utilizzo di moderne tecnologie è stato possibile ampliare lo spettro di rivelazione, passando dall'osservazione della sola luce visibile fino ad osservare quasi l'intero spettro delle onde elettromagnetiche (dalle onde radio ai raggi gamma). L'importanza dello studio delle emissioni di luce dei corpi celesti sta anche nel fatto che vi è un rapporto particolare tra luce emessa e massa emettente luce, a seconda del tipo di corpo celeste preso in considerazione. Quindi, grazie a questo rapporto ci è permesso conoscere la massa dell'oggetto nella volta celeste che stiamo osservando. Però questo appena descritto non è l'unico metodo per conoscere la massa di un corpo celeste. È possibile ottenere dati a riguardo anche con l'osservazione dei moti degli stessi corpi celesti. Usando un metodo piuttosto che l'altro i risultati sulle masse dovrebbero alla fine combaciare o almeno somigliarsi. Ma questo non è sempre vero; infatti, ci sono state alcune osservazioni in cui i risultati di entrambi i metodi portavano a dei valori estremamente diversi. Tale discrepanza può essere spiegata in vari modi. La teoria più accreditata è che in tali zone dell'Universo vi sia la presenza di un particolare tipo di materia non visibile tale da spiegare la grande differenza dei valori. Questa materia è conosciuta con il nome di MATERIA OSCURA.

Una delle tante osservazioni a sostegno dell'esistenza della materia oscura fu fatta da Fritz Zwicky nel 1933. Costui studiò un ammasso di galassie, detto Coma cluster, e misurò la velocità che ogni componente del cluster possedeva, da cui si sarebbe ricondotto alle masse delle stesse. Con grande sorpresa ottenne che i valori delle masse calcolate in base alle dinamiche del sistema erano estremamente più grandi

rispetto ai valori delle masse calcolate in base alla luminosità. Per cui Zwicky concluse che ciò poteva spiegare le alte velocità delle galassie ed il fatto che esse rimanevano nonostante ciò raggruppate era la presenza di una grande quantità di materia non visibile, in quanto né emette né assorbe radiazione.

Un'altra possibile prova viene dalle osservazioni fatte alla galassia M33 da parte di Louise Volders nel 1959 e da Vera Rubin e collaboratori negli anni '70 e '80, che confermarono le osservazioni di Volders ed ampliarono la ricerca ad altri sistemi. Furono eseguite le stesse misure fatte per quanto riguarda il Coma cluster, solo che al posto della velocità delle galassie è stata misurata la velocità delle stelle attorno al centro della galassia. Mettendo a paragone le velocità osservate dalla dinamica del sistema e le velocità che erano previste in base alle masse calcolate sfruttando la luminosità delle stelle, anche in questo caso, i valori sono diversi. In particolare, come è possibile osservare dalla Figura 1.1



**Figura 1.1:** immagine della galassia M33. Il grafico annesso contiene le curve indicanti le velocità dei punti luminosi attorno al centro della galassia: quella in basso indica le velocità aspettate in base alla luminosità; quella in alto indica le velocità osservate.

vicino al centro della galassia le velocità calcolate in base alla luminosità sono simili a quelle che sono state calcolate secondo le dinamiche; però, più ci si allontana dal centro più le differenze si fanno notare. Infatti, secondo il modello basato sulla luminosità viene indicato che a grande distanza dal centro la velocità di rotazione

diminuisce all'aumentare di tale distanza; invece, secondo le stime fatte in base alle dinamiche del sistema, la velocità tangenziale di rotazione continua ad aumentare.

Un altro motivo che porta a supporre l'esistenza della materia oscura viene dalla Relatività Generale. Prendiamo in considerazione un corpo celeste luminoso e poniamo che tra noi e tale oggetto vi sia una galassia o anche un cluster; in particolare, poniamo che l'oggetto più lontano si veda sul bordo del conglomerato più vicino. L'esempio più famoso di questo fenomeno viene dal Bullet cluster, che consiste nella collisione di due cluster. Quello che viene osservato è che la luce proveniente dal corpo celeste di sfondo viene deviata ed amplificata dalla massa del cluster, secondo le leggi della Relatività Generale. Tale fenomeno è conosciuto con il nome di Lensing Gravitazionale; infatti, la massa del cluster devia la luce comportandosi come una lente. Importante da sottolineare il fatto che tale evento è possibile solo grazie alla presenza di un'enorme quantitativo di massa contenuta all'interno del cluster, la quale materia, anche in questo caso, non è visibile. Ancora interessante è il fatto che, ben conoscendo le formule della Relatività Generale riguardanti la deviazione della luce, ci è possibile calcolare anche la distribuzione della massa totale che è principale causa di tale fenomeno.

Come possiamo osservare in Figura 1.2, l'immagine ci fornisce informazioni sulla quantità di materia oscura attraverso la mappa lensing, messa in evidenza dalla zona blu.



**Figura 1.2:** immagine del 'Bullet Cluster', che comprende due cluster in collisione.

La materia oscura contribuisce al budget di energia dell'Universo nel contesto delle equazioni di Friedmann e Lemaître. Dopo la pubblicazione delle equazioni di Einstein sulla Relatività Generale nel 1915, i due matematici lavorarono su queste equazioni fino ad arrivare ad un nuovo modello del nostro Universo descritto dalle equazioni di Friedmann-Robertson-Walker (le soluzioni di tali equazioni portarono alla convinzione di un Universo in espansione nel tempo)

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{k}{a^2}$$

dove  $H^2$  è il parametro di Hubble,  $G$  è la costante di gravitazione universale che compare nell'equazione della gravità descritta da Newton,  $k$  è la costante associata alla curvatura dello spazio-tempo,  $\rho$  è la densità di energia e  $a$  è il fattore di scala descrivente l'espansione dell'Universo e che compare all'interno della metrica di Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker scritta nel seguente modo

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) d\Omega_k^2$$

In quest'ultima relazione  $d\Omega_k$  è la parte riguardante lo spazio ed, in base al valore di  $k$  si ha uno spazio sferico ( $k > 0$ ), piatto ( $k = 0$ ) o iperbolico ( $k < 0$ ).

Introduciamo la costante  $\rho_c$ , chiamata densità cosmologica critica, definita nel seguente modo

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

che corrisponde alla densità di energia totale dell'Universo spazialmente piatto (cioè siamo nel caso  $k = 0$ ).  $H_0^2$  è il valore attuale del parametro di Hubble. Che l'Universo sia piatto scaturisce dalle recenti osservazioni riguardanti la radiazione cosmica di fondo (CMB). In base alle osservazioni luminose la materia barionica normale contribuisce solo il 4.1% della  $\rho_c$ . Invece le osservazioni dinamiche portano a dire che la materia totale nell'Universo si circa il 27% della  $\rho_c$ . Il 23% di differenza viene associata alla presenza di materia oscura nell'Universo.

Per completezza ricordo che il restante 73% della densità critica viene attribuito ad una al momento misteriosa forma di "Energia oscura", che sarebbe la causa dell'espansione accelerata dell'Universo.

## 1.2 NATURA E COMPOSIZIONE

Nel paragrafo precedente abbiamo parlato delle incongruenze che hanno portato gli scienziati ad introdurre la materia oscura. Ma cosa è la materia oscura?

Uno dei problemi da risolvere è determinare la sua composizione. In principio possiamo ipotizzare che la materia oscura possa essere composta o da particelle barioniche o da particelle non-barioniche.

Secondo la teoria del Big Bang l'Universo appena dopo la sua formazione era costituito da particelle elementari, quali protoni, neutroni, elettroni, fotoni, ecc., che a causa delle alte temperature non potevano formare atomi più complessi. Quest'ultimo passaggio è stato possibile solo nel momento in cui l'Universo si è raffreddato a seguito dell'espansione. Più l'Universo si raffreddava più fu possibile che l'insieme di gas di particelle presenti formassero dei raggruppamenti che in una piccola parte avrebbero portato alla formazione di stelle luminose, mentre per lo più sarebbero andate a formare le corone gassose delle galassie. Ipoteticamente in questo processo si sarebbero potute generare stelle oscure non rivelabili. Comunque simulazioni numeriche mostrano che si tratta di eventi estremamente rari e non in grado di spiegare la massa mancante nella sua totalità.

Un'altra tesi a sostegno della materia oscura composta da materia barionica era che le corone gassose contenevano una quantità di materia abbastanza rilevante; però, studi condotti sulle corone delle galassie hanno portato a concludere che la quantità di gas presente nelle corone non è sufficiente per spiegare le curve di rotazione delle galassie. La possibilità, quindi, che la materia oscura sia composta da particelle di tipo barionico è stata scartata.

La seconda ipotesi fatta, e che alla fine ha prevalso, è quella per la quale la materia oscura sarebbe composta da particelle elementari non-barioniche.

Un'altra osservazione viene da alcuni modelli che descrivono l'evoluzione dell'Universo. Se la materia oscura fosse composta da particelle barioniche, la formazione delle strutture nell'Universo non sarebbe avvenuta abbastanza presto. Quindi la materia oscura non barionica spiegherebbe l'importanza della stessa nell'evoluzione dell'Universo.

Sebbene abbiamo identificato le particelle elementari non-barioniche come possibili candidate a formare la materia oscura, non abbiamo ancora detto che tipo di particelle non-barioniche possono costituirla. Ci sono due modelli che possono risolvere tale diatriba: uno secondo il quale la materia oscura sarebbe composta da neutrini pesanti (definita Hot Dark Matter o HDM) ed un altro secondo il quale la materia oscura sarebbe composta da particelle esotiche (assioni o WIMPs). In questo caso essa è definita Cold Dark Matter o CDM. Ciò che viene in aiuto per risolvere tale dilemma sono le strutture in cui le galassie si sono raggruppate in seguito al Big Bang e che oggi possiamo osservare; infatti, le galassie non sono del tutto distribuite in modo uniforme, bensì in raggruppamenti di poche galassie detti Cluster, raggruppati in gruppi più grandi detti Supercluster e poi in cosiddetti filamenti. Sono state fatte simulazioni numeriche da Melott nel 1983 e da White nel 1983 e nel 1987, considerando sia il modello HDM che quello CDM. La differenza sostanziale tra i due modelli sta nel fatto che nel modello CDM la formazione delle strutture e dei raggruppamenti di galassie inizia in periodi precedenti rispetto al modello HDM; in più le strutture osservate, cioè cluster, supercluster e filamenti, sono abbastanza ben riprodotte dalla simulazione. Un'altra simulazione più recente, il Millennium Simulation, compiuta nel 2005 da Volker Springel e da alcuni suoi collaboratori presso il Max Planck Institute ha tenuto conto anche della costante cosmologica  $\Lambda$ , legata

all'energia oscura, affinando molto il risultato della simulazione riguardante l'evoluzione delle singole galassie, tanto che ancora oggi il Millennium Simulation è usato come punto di partenza per nuove possibili teorie riguardo a evoluzioni dell'Universo su piccola scala.

Tra le particelle elementari che comporrebbero la Cold Dark Matter abbiamo citato gli assioni e le WIMPs. Sebbene l'assione sia un buon candidato come costituente della materia oscura, esso non è ancora quello più adatto. Una delle caratteristiche che permette loro di essere dei buoni candidati è il fatto che essi hanno delle interazioni estremamente deboli con la materia ordinaria (barionica).

La loro massa è data dalla seguente formula

$$m_a \approx 6\mu eV \left( \frac{10^{12} GeV}{f_a} \right)$$

dove  $f_a$  è la costante di decadimento.

La densità residua post-inflazione di livello appropriato per attribuire agli assioni il ruolo di dark matter si ottiene per un valore di  $f_a$  molto specifico ( $7 \times 10^{10}$  GeV). In alternativa, definendo  $\varphi_i$  il disallineamento tra il campo associato all'assione ed il suo minimo, la medesima condizione di densità corretta si ottiene per un ristretto intervallo di valori nel piano  $f_a - \varphi_i$ .

Dati questi motivi di "sintonia fine", ovvero di coincidenze ben precise richieste del modello, gli assioni possono avere un problema come possibili candidati come costituenti della materia oscura.

L'alternativa più accreditata è quella di una nuova classe di particelle detta WIMP (Weakly Interacting Massive Particles), cioè particelle massive debolmente interagenti. Le WIMPs sono particelle che nei modelli funzionano anche meglio degli assioni, anche per il fatto che tra la massa degli assioni e quella delle WIMPs le seconde superano le prime di un fattore 1000; anche queste candidate, come gli assioni, sono particelle teorizzate e non ancora osservate.

L'origine della teorizzazione di tutte le particelle che sono classificate come WIMP viene da un problema nel Modello Standard. Secondo il tale modello le correzioni radiative alla massa del bosone di Higgs divergerebbero in modo quadratico all'aumentare dell'energia. Tale problema alla fine può essere risolto in vari modi; tra questi il più promettente è quello della teoria della Supersimmetria (SUSY). Sfruttando questa nuova teoria è possibile prevedere che ad ogni particella prevista dal Modello Standard è associata una nuova particella detta "superpartner", che differisce dalla sua controparte solo dallo spin; per esempio, ad un fermione viene associato come superpartner uno "sfermione", che per lo spin sarebbe considerato come un bosone. Alla fine tra le WIMPs possiamo trovare particelle, quali il neutralino, il fotino, l'Higgsino, ecc.

Teoricamente le WIMPs si sarebbero prodotte termicamente nei primi momenti dopo la nascita dell'Universo. Il processo di produzione e di annichilazione è andato avanti stando in equilibrio sino al momento in cui l'Universo si è espanso a sufficienza. Siccome le WIMPs interagiscono solo debolmente, la creazione e l'annichilazione di

queste particelle cessò, permettendo così l'esistenza di un'abbondante quantità di particelle WIMPs che sarebbero andate a formare la cosiddetta materia oscura.

Per osservare le WIMPs, due sono le possibili strade da intraprendere: una è quella usare grandi acceleratori di particelle come LHC attraverso vari esperimenti di collisione di particelle; altrimenti, usare rivelatori che possano rivelare la presenza di tali particelle nell'Universo, in modo diretto o in modo indiretto. La seguente tesi sarà incentrata sulla seconda, in particolare sull'esperimento di materia oscura DarkSide-50, che a breve verrà compiuto nei laboratori del Gran Sasso.

# CAPITOLO 2

## RIVELAZIONE DELLE WIMPS

Nel capitolo precedente abbiamo parlato della materia oscura, cercando alla fine di capire i motivi della sua teorizzazione e la sua probabile composizione. In questo capitolo parleremo delle metodologie sfruttate per la rivelazione delle particelle WIMPs, fino ad arrivare a parlare dell'esperimento che è il centro della tesi, cioè DarkSide-50.

### 2.1 SCATTERING

Ipotizziamo che le WIMPs non siano relativistiche. Partendo dall'equazione che ci restituisce come risultato finale la sezione d'urto differenziale, è utile sfruttare la regola d'oro di Fermi, che ci permette di fattorizzare la sezione d'urto differenziale in una parte  $\sigma_{OWN}$  indipendente dal momento trasferito ed una parte che contiene  $F(q)$ , detto fattore di forma (dove  $q$  indica il momento trasferito), che è dipendente dal momento. In questo modo la sezione d'urto differenziale può essere scritta nel seguente modo

$$\frac{d\sigma_{OWN}(q)}{dq^2} = \frac{\sigma_{OWN}F^2(q)}{4\mu_A^2v^2}$$

dove  $v$  è la velocità della particella WIMP rispetto al sistema di riferimento del laboratorio, mentre  $\mu_A$  è la massa ridotta  $\mu_A = \frac{M_A M_\chi}{M_A + M_\chi}$ , in particolare dove  $M_\chi$  è la massa della particella WIMP e  $M_A$  è la massa del nucleo bersaglio con numero di massa  $A$ .  $\sigma_{OWN}$  è conosciuta anche come sezione d'urto di momento zero e può essere divisa in un termine indipendente dallo spin ed un altro dipendente. Per cui otteniamo

$$\sigma_{OWN} = \frac{4\mu_A^2}{\pi} [Zf_p + (A-Z)f_n]^2 + \frac{32G_F^2\mu_A^2}{\pi} \frac{J+1}{J} (a_p\langle S_p \rangle + a_n\langle S_n \rangle)^2$$

dove  $f_p$  e  $f_n$  ( $a_p$  e  $a_n$ ) sono parametri che riguardano la parte indipendente (dipendente) dallo spin della WIMP, associati rispettivamente ad un protone e ad un neutrone del nucleo,  $J$  è lo spin nucleare totale,  $\langle S_p \rangle$  e  $\langle S_n \rangle$  sono i valori di aspettazione di spin dei protoni e dei neutroni all'interno del nucleo (nel caso di nucleoni isolati entrambi avrebbero valore pari ad  $\frac{1}{2}$ ).

Se prendessimo in considerazione la parte non dipendente dallo spin, siccome in molti modelli  $f_p$  è approssimabile a  $f_n$ , possiamo riscrivere questa parte della sezione d'urto a momento zero nel seguente modo

$$\sigma_{0WN,SI} \approx \frac{4\mu_A^2}{\pi} [Af_n]^2$$

Da quest'ultima equazione possiamo osservare che la sezione d'urto è direttamente proporzionale ad  $A^2$ ; cioè, in pratica, se conducessimo un esperimento sarebbe opportuno sfruttare nuclei bersaglio con peso atomico alto, in modo tale da aumentare anche la probabilità che una particella qualsiasi possa scontrarsi con il nucleo bersaglio.

Invece, osservando la parte dipendente dallo spin, possiamo dire che essa è scritta in modo tale che ogni nucleone del nucleo bersaglio possa dare un suo contributo allo spin totale in modo lineare; per cui, se due nucleoni dello stesso tipo hanno spin opposto, allora lo spin totale tra i due è nullo. Alla fine per concludere è interessante osservare che la parte della sezione d'urto di momento zero è dipendente dallo spin netto del nucleo bersaglio. In particolare è utile dire che, se come bersaglio avessimo nuclei con numero pari sia di protoni che di neutroni, sarebbe possibile trascurare la parte di sezione d'urto dipendente dallo spin.

Dopo aver descritto la parte della sezione d'urto a momento zero, ora trattiamo del fattore di forma nucleare  $F(q)$ . Esso ha due diversi modi di essere scritto, in base al fatto se siamo in condizioni di indipendenza dallo spin del nucleo o se siamo in condizioni di dipendenza. Sfruttando l'approssimazione di Born il fattore di forma indipendente dallo spin può essere approssimato con il fattore di forma di Woods-Saxon, scritto nel seguente modo

$$F(q) = \frac{3[\sin qr_n - qr_n \cos qr_n]}{(qr_n)^3} e^{-(qs)^2/2}$$

che corrisponderebbe alla trasformata di Fourier di una superficie sferica di raggio medio  $r_n$  e spessore  $s$ . Mentre se siamo in condizioni di dipendenza dallo spin, in prima approssimazione, il fattore di forma sarebbe scritto nel seguente modo

$$F(q) = \frac{\sin qr_n}{qr_n}$$

Come abbiamo osservato dalla sezione d'urto, la parte indipendente dallo spin del bersaglio era direttamente proporzionale al quadrato del numero di massa  $A$  del nucleo stesso; quindi, in linea di principio, più è grande il nucleo bersaglio, più aumenta in modo proporzionale ad  $A^2$  la probabilità che una WIMP possa colpirlo. Eppure, come possiamo osservare, i fattori di forma in entrambi i casi sono minori dell'unità se  $r_n > \lambda$  (la lunghezza d'onda di De Broglie); ciò impedirebbe alle WIMPs di interagire coerentemente con l'intero nucleo. Il fatto che  $r_n$  sia maggiore di  $\lambda$  si rispecchia nel fatto che il numero di massa  $A$  non debba essere troppo grande; in pratica la perdita di coerenza delle WIMPs dovuta ad un numero di massa del nucleo bersaglio troppo grande fa sì che i nuclei bersaglio siano insensibili al deposito di energia da parte di WIMPs ad alta energia.

Interessante da discutere è anche la frequenza con cui sarebbe possibile osservare le WIMP fare scattering.

Consideriamo un'unica WIMP con energia iniziale  $E_i = M_x v^2/2$  (con  $M_x$  che indica la massa della WIMP) e supponiamo che tale particella compia uno scattering di tipo elastico; in particolare, consideriamo che nel sistema di riferimento che ha come origine il centro del momento la WIMP faccia scattering con un angolo  $\theta$  tale che il  $\cos \theta$  sia uniformemente distribuito tra 1 e -1. Secondo le ipotesi appena elencate l'energia di rinculo  $E_R$  risultante è descritta dalla seguente formula

$$E_R = E_i r \frac{1 - \cos \theta}{2}$$

dove  $r$  è un parametro adimensionale descritto dalla seguente equazione

$$r = \frac{4 M_x M_A}{(M_x + M_A)^2}$$

con  $M_A$  indicante la massa del nucleo bersaglio. Sfruttando queste formule e sapendo che siamo in presenza di uno scattering elastico isotropico (cioè che il  $\cos \theta$  è distribuito uniformemente tra 1 e -1), possiamo dire che alla fine l'energia di rinculo  $E_R$  è uniformemente distribuita tra 0 e  $E_i r$ .

Nel caso più generale non è detto che tutte le particelle WIMP che verranno rivelate avranno la medesima energia iniziale. Presupponendo tale ipotesi, la probabilità di osservare uno scattering di una particella non sarà più uniforme per tutte le energie, bensì aumenterà per energie basse e diminuirà per energie alte. Per fissare meglio l'idea riportiamo il seguente esempio.

Supponiamo di avere un numero  $2N$  fissato di particelle e poniamo che  $N$  particelle abbiano una energia iniziale  $E_{i1}$  mentre le altre  $E_{i2}$ , considerando che  $E_{i1} < E_{i2}$ . Nel momento in cui tutte le particelle compiono uno scattering elastico, per ognuno dei due gruppi l'energia di rinculo è uniformemente distribuita tra 0 e  $E_{i1}r$ , per quanto riguarda le particelle con energia iniziale  $E_{i1}$ , e tra 0 e  $E_{i2}r$ , per quanto riguarda le altre. Alla fine osserveremo che nell'intervallo di energie tra  $E_{i1}r$  ed  $E_{i2}r$  la probabilità rimarrebbe la stessa di quella del caso in cui abbiamo scatterato solo particelle con

energia iniziale  $E_{i2}$ ; ma se andassimo ad indagare ad energie più basse di  $E_{i1}$ , allora osserveremo che è più alta rispetto a quella dell'intervallo di energie  $E_{i1} - E_{i2}$ ; infatti, alle particelle che hanno un'energia iniziale  $E_{i2}$  dobbiamo aggiungere quelle con energia iniziale  $E_{i1}$ . Se al posto di solo due gruppi di particelle con energia iniziale differente ne avessimo di più, ciò che otterremo sarà un grafico simile a quello in Figura 2.1.

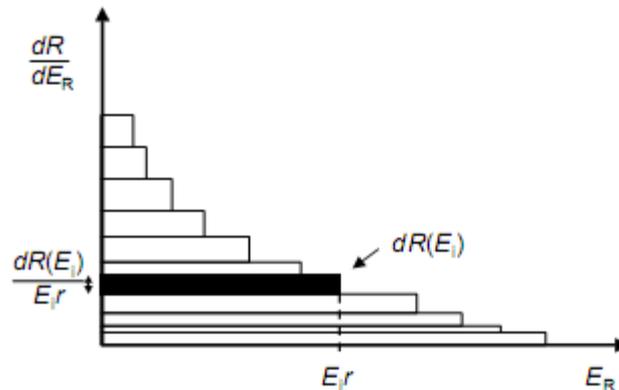


Figura 2.1: grafico indicante il contributo al tasso  $dR/dE_R$  per differenti valori di  $E_i$ .

Passando dal caso discreto al caso continuo di energie iniziali, avremo che osservare un certo numero di particelle con un'energia di rinculo  $E_R$  segue la seguente equazione.

$$\frac{dR(E_R)}{dE_R} = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{dR(E_i)}{E_i} dE_i$$

Siccome tra il numero di particelle totali  $N$  ed il numero  $R$  di particelle per unità di massa bersaglio vi è una semplice relazione di proporzionalità diretta, abbiamo scritto l'equazione avendo già sostituito  $N$  con  $R$ .

Gli estremi di integrazione sono gli estremi dell'intervallo di energie riferiti all'energia iniziale  $E_i$ . Considerando lo scattering di una particella, la velocità massima che essa può raggiungere è quella tale per cui la particella non risente della presenza del nucleo bersaglio; quindi, l'energia massima è quella che contempla al suo interno la velocità massima possibile, che in questo caso consideriamo uguale a quella di fuga galattica  $v_{esc}$ ,

$$E_{max} = \frac{1}{2} M_{\chi} v_{esc}^2$$

mentre per quando riguarda l'energia minima possiamo osservare l'equazione che ci indica il valore dell'energia di rinculo. A parità di energia  $E_R$ , l'energia  $E_i$  è tanto più piccola tanto più è piccolo il  $\cos \theta$ , in particolare otteniamo  $E_{min}$  per  $\cos \theta = -1$ ,

$$E_R = E_{min} r$$

$$E_{min} = E_R / r$$

Risolvendo l'equazione riguardante il tasso differenziale di scattering possiamo ottenere il numero di eventi previsti in base alla quantità di materiale rivelatore (cioè in base al numero di nuclei bersaglio) e alla durata di tempo di rivelazione.

$$R_0 \approx \frac{500}{M_x} \frac{\sigma_{OWN}}{1 \text{ pb}} \frac{\rho_x}{0.4 \text{ GeV/cm}^3} \text{ eventi kg}^{-1} \text{ giorno}^{-1}$$

dove  $\rho_x$  indica la densità di massa delle WIMPs nella galassia e che secondo alcuni studi è stata stimata  $0.3 \text{ GeV} / (\text{c}^2 \text{ cm}^3)$ . È necessario specificare che quest'ultima equazione è stata ottenuta però attraverso un calcolo approssimativo, secondo la quale la velocità della Terra è approssimabile a zero, mentre la velocità di fuga della galassia è approssimabile ad infinito.

Possiamo concludere dicendo che, ipotizzando di avere a che fare con WIMPs della massa di  $50 \text{ GeV}/\text{c}^2$  con una sezione d'urto  $\sigma_{OWN}$  di  $0.001 \text{ pb}$ , otterremo un tasso  $R_0$  pari a circa a  $0.01 \text{ eventi}/(\text{kg giorno})$ .

## 2.2 LA RIVELAZIONE

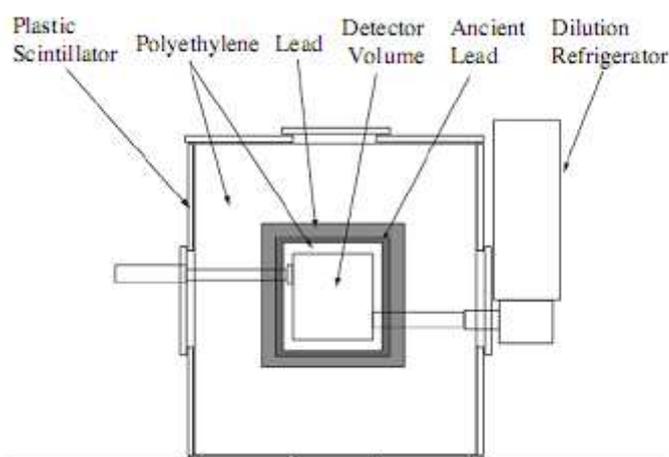
La ricerca delle WIMPs può essere fatta attraverso vari tipi di esperimenti. Le vie principali per fare tale ricerca sono attraverso l'uso di acceleratori di particella, rivelazione indiretta e la rivelazione diretta.

La ricerca attraverso gli acceleratori può avvenire grazie all'ausilio di strumentazioni e di grandi acceleratori quali lo è, per esempio, il Large Hadron Collider (LHC) presso il CERN di Ginevra. Questo tipo di ricerca consiste nel far collidere particelle ad alta energia al punto tale da creare particelle massive interagenti solo debolmente, quindi le WIMPs. Alla fine quello che ci si propone attraverso questa via di ricerca è di riprodurre in laboratorio le condizioni che erano presenti nei momenti seguenti al Big Bang, e quindi andare a giustificare anche le teorie sulla nascita delle WIMPs.

La ricerca attraverso rivelazione indiretta consiste nello sfruttare le possibili annichilazioni tra WIMP e WIMP. Tale fenomeno può portare alla produzione di altre particelle e lo scopo della rivelazione indiretta sarebbe quello di dimostrare l'esistenza di queste ultime.

L'ultima via che andiamo a descrivere, e che sarà anche la via intrapresa dall'esperimento che andremo a descrivere nel prossimo paragrafo, è quello della rivelazione diretta delle WIMPs. Questo tipo di esperimenti comprendono tutte le ipotesi e formule fatte nel paragrafo precedente.

Intraprendere questa via per la dimostrazione dell'esistenza delle WIMPs comporta alcuni problemi. Uno di questi è la frequenza di eventi che ci interessano; infatti alla fine del precedente paragrafo abbiamo citato che in buona approssimazione il numero di eventi riscontrabili sono di circa 0.01 al giorno per kilogrammo di materiale bersaglio. Questo è da considerarsi un tasso molto basso se consideriamo le interazioni di fondo (o background) dovuto ai raggi cosmici e alla radiazione naturale, che possono raggiungere tassi sul milione di eventi al giorno per kilogrammo di materiale bersaglio. Un altro problema viene dal comportamento simile di due particelle: WIMPs e neutroni. Questa similitudine genera, quindi, l'impossibilità di discernimento di scattering tra una WIMP e un neutrone.



**Figura 2.2:** immagine dell'apparato dell'esperimento CDMS.

Questi problemi possono essere risolti attraverso diverse tecniche.

La questione dell'enorme background provocato principalmente dalle radiazioni cosmiche può essere eliminato attraverso una schermatura del rivelatore. Come è già stato fatto per alcuni esperimenti è stata trovata la possibilità di schermare il rivelatore costruendo lo stesso sottoterra, in centri di ricerca come il Gran Sasso. Comunque è necessario dire che non basta approntare tale soluzione, in quanto, sebbene costruire l'apparato sottoterra permetta di avere una schermatura da parte dello strato di terra e delle rocce soprastanti, esso non bloccherà tutte le particelle provenienti dal cosmo; al massimo potrà ridurle. La quantità di particelle cosmiche rimanenti potrà essere anche calcolata e prevista; in questo modo è possibile comprendere se è permesso alla fine considerare tale residuo come trascurabile.

Un altro problema viene dalla radiazione naturale.

Sebbene abbiamo ipotizzato di costruire l'apparato sottoterra al fine di bloccare gran parte delle radiazioni cosmiche, il nuovo problema che sorge è il fatto che la terra e le rocce contengono al loro interno sostanze caratterizzate da una radioattività naturale. In più l'aria che circonda il rivelatore è anch'essa radioattiva, in quanto contenente radon-222. Questo problema potrà essere risolto solamente tramite l'ausilio di una protezione costruita direttamente sul rivelatore, che consiste nel rinchiudere il

rivelatore all'interno di un più grande contenitore nel cui centro è stato posto lo stesso rivelatore, circondato da una sostanza contenente molto idrogeno. Le più usate sono acqua o polietilene. Lo scopo di questi materiali è di eliminare le radiazioni di fondo composte principalmente da neutroni. Ciò è molto importante in quanto, come abbiamo detto in precedenza, i neutroni sono le uniche particelle che avrebbero un comportamento simile alle WIMPs all'interno del rivelatore. L'ausilio di materiali ad alto contenuto di idrogeno sfrutta il tipo di interazione che differenzia i neutroni dalle WIMPs; infatti, i neutroni hanno una sezione d'urto decisamente più alta delle WIMPs. Per cui, la grande quantità di polietilene o di acqua fa sì che i neutroni vengano fermati prima che arrivino al rivelatore posto al centro del contenitore; al più, possiamo dire che parte dei neutroni non venga del tutto fermata e arrivi al rivelatore, ma con energia più bassa rispetto all'energia minima di soglia. Alla fine, prese le precauzioni descritte in precedenza è possibile considerare le interazioni nel rivelatore da parte di radiazione cosmica, radiazione naturale sia della terra che dell'aria trascurabile.

Un ultimo problema proveniente dalla radiazione di fondo continua a venire dalla radiazione naturale. Infatti, sebbene abbiamo ipotizzato di installare apparecchiature che permettano di schermare la radiazione naturale proveniente da fuori l'apparato, esse non permettono di schermare la radiazione naturale che viene dall'interno dell'apparato stesso, in particolare, dalle componenti del rivelatore. Per lo più quest'ultimo è composto da metalli e, sebbene le tecnologie moderne permettono di ottenere metalli molto puri, il grado di purezza non sarà mai del 100%, quindi, avremmo comunque delle piccolissime impurità di Uranio, Torio ed altre sostanze caratterizzate da una radioattività naturale che, seppur piccola, è presente. In questo caso non è possibile costruire una schermatura per tale tipo di radiazione per due motivi. In primo luogo la costruzione di un'altra schermatura sarebbe fatta usando altro materiale che si presenterebbe comunque con un residuo di radioattività naturale, e quindi ci ritroveremmo nella stessa situazione di prima; in più, anche il materiale che viene usato per la rivelazione (materiale bersaglio) può contenere isotopi radioattivi. Questo comunque porta a delle impurità che generano un background che andrà a coprire la rivelazione delle WIMPs, in quanto tale radiazione naturale ha comunque una radioattività ancora troppo alta e quindi con frequenza di scattering maggiore rispetto a quello delle WIMPs. Siccome ci è impossibile eliminare tale radiazione di fondo, alla fine, le soluzioni per risolvere tale inconveniente sono principalmente due. In primo luogo, ed è anche lampante, è necessario ottenere delle componenti per la costruzione del rivelatore composte da materiali puri il più possibile. Un esempio che possiamo citare è il fatto che, se parliamo di rivelatori con argon come materiale bersaglio, esistono in natura vari tipi di isotopi dell'argon, di cui due principalmente: uno è l'Ar-40 che è quello predominante tra tutti gli isotopi, e l'Ar-39 che è radioattivo. Quest'ultimo si è scoperto che viene prodotto da argon bombardato da raggi cosmici. Quindi una via che può essere intrapresa è quello di sfruttare gas argon che non viene bombardato da una quantità di raggi cosmici tanto grande come quello che si trova in superficie; cioè, da residui di gas argon che si trovano sottoterra, in miniere. Precisiamo che non esistono giacimenti sotterranei di gas argon, ma nelle miniere durante l'estrazione è possibile imbattersi in gas

intrappolato sottoterra, contenente gas argon con grande percentuale del suo isotopo utile agli esperimenti di rivelazione.

Questo non eliminerà del tutto il problema, ma almeno diminuirà l'effetto di background che avremo durante l'esecuzione dell'esperimento.

Comunque il problema rimane, in quanto abbiamo la presenza di particelle di background tra cui i neutroni che, come abbiamo detto in precedenza, hanno uno scattering simile alle WIMPs.

Al fine di eliminare gli input causati da interazioni di background possiamo sfruttare il fatto che la maggior parte delle particelle di background, esclusi i neutroni, interagiscono con gli elettroni più che con i nuclei. In pratica, questo si traduce nel fatto che le particelle che interagiscono più con gli elettroni (rinculo elettronico) rilasciano la propria energia su un percorso più lungo rispetto a quelle che interagiscono più con i nuclei (rinculo nucleare), che rilasciano la loro energia su un percorso più corto; in altre parole, le particelle che hanno un rinculo elettronico cedono la loro energia in un periodo di tempo più lungo rispetto a quelle caratterizzate da un rinculo nucleare. Alla fine, per riconoscere il tipo di particella che attraversa il rivelatore, è necessario riconoscere il proprio "pulse timing", e quindi la densità di energia della particella rilasciata nel rivelatore. Questo metodo ci permette di discernere le particelle che hanno un rinculo elettronico con quelle che hanno un rinculo nucleare, ma non ci permette di riconoscere due particelle che hanno lo stesso tipo di rinculo, come le WIMPs e i neutroni, che hanno entrambe rinculo nucleare. Per distinguere queste due particelle si può sfruttare il fatto che il neutrone può fare un doppio scattering, questo non accade alle una WIMPs. A tale scopo è necessario costruire attorno al rivelatore principale un secondo rivelatore di tipo organico. In questo modo, se un neutrone fa scattering all'interno del rivelatore primario è molto probabile che faccia un secondo scattering nel rivelatore secondario (giustificato dal fatto che i neutroni in scintillatori organici hanno alta probabilità di scattering), e quindi, possiamo riconoscere tale particella come neutrone. Comunque quest'ultima parte la vedremo meglio nel prossimo paragrafo, quando descriveremo l'esperimento DarkSide-50.

## **2.3 DARKSIDE-50**

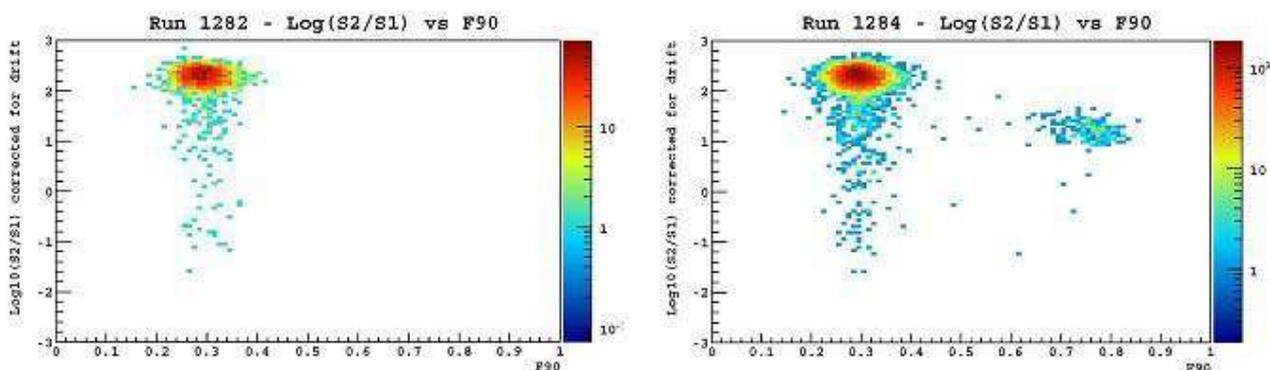
DarkSide-50 è un esperimento che verrà condotto presso i laboratori del Gran Sasso. Esso avrà lo scopo di rivelare direttamente la presenza o meno delle WIMPs, particelle che, secondo le teorie più accreditate, andrebbero a comporre la materia oscura. La grande importanza di questo esperimento sta nel fatto che la scoperta delle WIMPs andrebbe a sostenere, oltre alle teorie sulla composizione della materia oscura, anche le teorie riguardanti la nascita e l'evoluzione del nostro Universo.

### *2.3.1 DarkSide-10*

In passato sono già stati compiuti esperimenti a riguardo, come XENON-100 ed il prototipo DarkSide-10. Le particolarità, però, che stanno in questo nuovo esperimento

e che lo differenziano da quelli precedenti sono il fatto di sfruttare materiali estremamente puri dal punto di vista della radioattività; invece, DarkSide-10 ha sfruttato materiali normali dal punto di vista radiologico. Come esempio possiamo dire che in DarkSide-10 è stato usato come materiale rivelatore argon estratto secondo consuete tecniche (argon atmosferico); mentre in DarkSide-50 verrà sfruttato argon a basso contenuto del suo isotopo radioattivo (Ar-39). In più in DarkSide-10 sono stati posti nel rivelatore solo 10 kg di argon, mentre in DarkSide-50 nella TPC saranno contenuti 50 kg, l'uso di un veto per neutroni ad alta efficienza e fotosensori ad alta efficienza. La strumentazione presente permette di rivelare particelle con una sensibilità tale da raggiungere una sezione d'urto di  $1.5 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$ .

Lo scopo di DarkSide-10 non era comunque la rivelazione delle WIMPs. Lo scopo primario era quello di osservare in scala ridotta il comportamento di un rivelatore in scala più grande ma alla fine simile a DarkSide-10, e quindi il comportamento di DarkSide-50. Un esempio dei test fatti con DarkSide-10 è possibile osservarlo dalla Figura 2.3. Ciò che è stato condotto è una discriminazione degli impulsi tra eventi  $\beta/\gamma$  (caratterizzati da un rinculo elettronico) ed eventi di rinculo nucleare dovuti a neutroni.



**Figura 2.3:** discriminazione tra rinculo elettronico e rinculo nucleare. Nell'immagine di sinistra abbiamo la presenza solo di rinculi elettronici, ottenuti per mezzo di raggi  $\gamma$ ; nell'immagine di destra abbiamo la presenza sia di rinculi nucleari che elettronici, ottenuti per mezzo di una sorgente AmBe.

In DarkSide-10 sono stati sfruttati gli eventi  $\beta/\gamma$  dovuti alla radioattività naturale del gas argon; cioè l'argon in questo esperimento è stato usato sia come materiale rivelatore sia come sorgente radioattiva. Invece, l'attività neutronica è stata riprodotta grazie all'ausilio di una sorgente di AmBe (americium e berillio). Per poter fare una distinzione sono stati condotti due esperimenti. Il primo esperimento, descritto dal grafico sulla sinistra, è stato condotto solo con la sorgente emittitrice di  $\beta/\gamma$ ; mentre il secondo, descritto dal grafico sulla destra, è stata aggiunta anche la sorgente emittitrice di neutroni. Dal primo grafico possiamo osservare sul piano dei parametri di separazione S2/S1 e F90, descritti in seguito, la posizione e quindi le coordinate che caratterizzano gli eventi  $\beta/\gamma$ . Quindi, dal secondo possiamo osservare che nella stessa posizione si trovano gli eventi riconducibili agli eventi  $\beta/\gamma$ ; mentre, spostati sulla destra, osserviamo gli eventi riconducibili ai rinculi nucleari causati da neutroni. Il fatto

che la posizione del grafico dei due eventi sia differente ci può far capire che la forma dell'impulso di un rinculo elettronico è differente da uno nucleare (nel primo caso la forma è più dilatata nel tempo mentre la seconda è più concentrata) e che il rapporto S2/S1 (il cui significato verrà spiegato più avanti) è differente nei due casi. Queste sono le caratteristiche che ci permettono di fare una "pulse-shape discrimination".

### 2.3.2 ARGON POCO RADIOATTIVO

L'uso di gas nobili come materiali per la rivelazione di rinculi nucleari è una tecnologia molto promettente sia per quanto riguarda l'argon nella sua forma liquida LAr (altrimenti chiamato argon criogenico), sia per altri gas nobili come lo Xenon, sfruttato per l'appunto negli esperimenti Xenon-10 e Xenon-100.

Come abbiamo già detto in precedenza lo scopo di questo tipo di esperimenti è la rivelazione di WIMPs, che, come abbiamo sottolineato, hanno un tasso di rivelazione estremamente basso, se messo a paragone con il background. Un modo per diminuire tale fondo è quello di usare materiali il più possibile puri. Uno tra questi materiali deve essere l'argon stesso.

In natura l'argon si trova principalmente in atmosfera ed è caratterizzato da un miscuglio composto in gran parte da Ar-40, cioè il materiale necessario per l'esperimento DarkSide-50, ed in minima parte da Ar-39, che è radioattivo; infatti, è caratterizzato da un decadimento  $\beta$ . L'esistenza di argon radioattivo è giustificata dalla presenza di raggi cosmici, che producono Ar-39. Sebbene il rapporto tra argon radioattivo ed argon sia molto basso ( $8 \times 10^{-16}$ ), la radioattività corrispondente è di circa 1 Bq/kg, cioè una radiazione che va a comporre un background troppo elevato. L'unica soluzione è quella di usare argon a bassissimo contenuto di argon radioattivo.

Ci sono varie metodologie per ottenere il risultato desiderato. Uno di questi è la depurazione dell'argon tramite centrifugazione. Il problema di questa tecnologia è che ha un prodotto molto costoso (40.000\$/kg), in più la produzione è molto limitata (pochi chilogrammi al mese). Nel ultimi tempi però ha preso piede una nuova tecnologia che ha permesso di abbattere i costi. Si è scoperto che esistono alcune miniere sotterranee dove in modo naturale si è intrappolato gas composto in buona percentuale da argon. Il fatto che questo argon sia rimasto per un periodo lunghissimo di tempo sottoterra ha permesso che quest'ultimo non venisse colpito dai raggi cosmici, causa della formazione di Ar-39 nell'atmosfera. In conclusione la concentrazione di argon radioattivo in questo gas rimasto intrappolato sottoterra è di gran lunga più basso rispetto a quello che si trova in atmosfera. L'estrazione dell'argon dal sottosuolo permette di avere alla fine un prodotto estremamente povero di Ar-39 in grande quantità (circa 1kg/giorno) e a costi più accessibili.

### 2.3.3 RIVELATORE TPC

I 50 kg necessari all'esperimento saranno contenuti all'interno del rivelatore più interno che è chiamato Time Projection Chamber (TPC) a doppia fase. Esso è composto principalmente da una camera cilindrica, al cui interno è contenuto l'argon in due fasi:

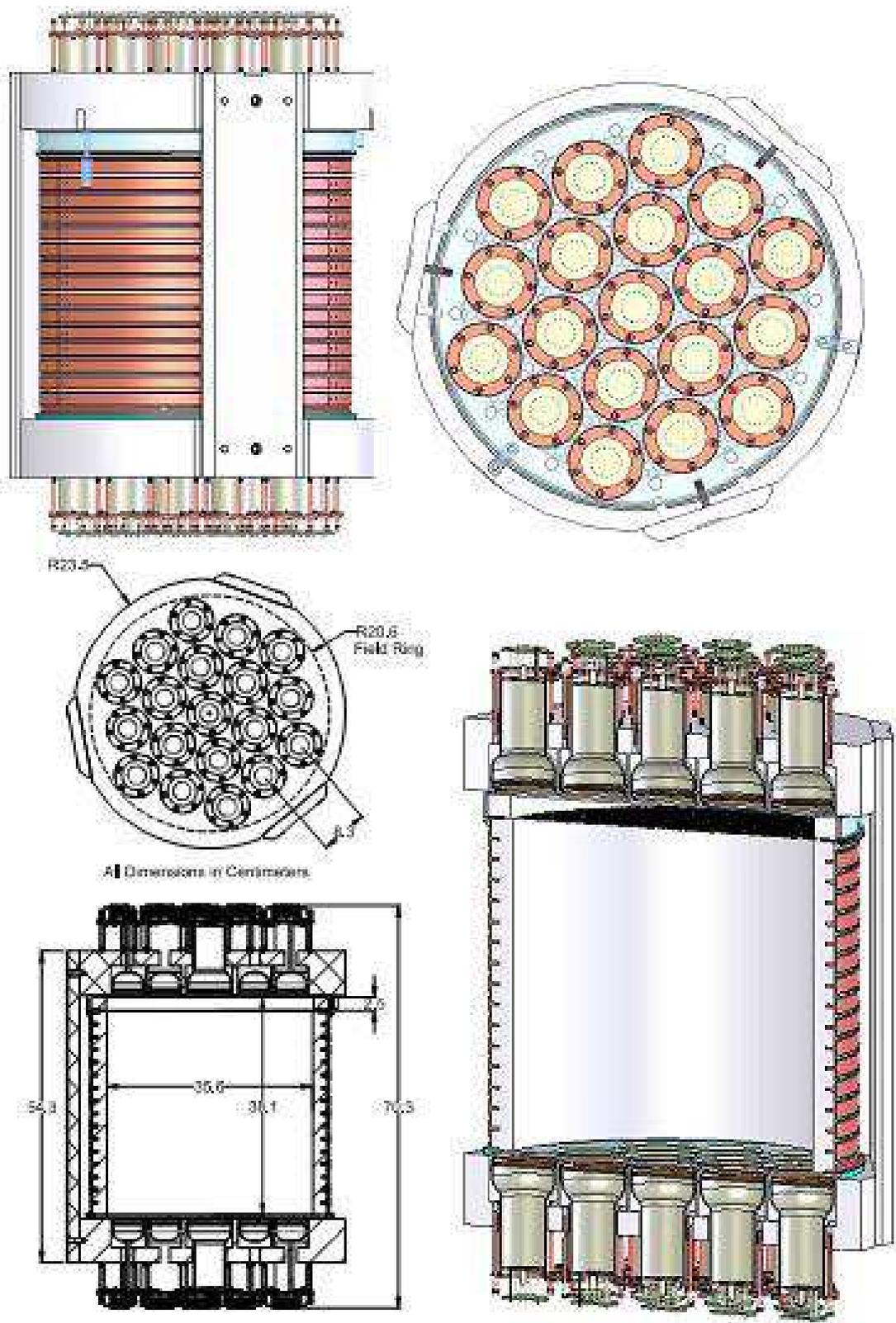


Figura 2.4: Time Projection Chamber (TPC) a due fasi dell'esperimento DarkSide-50.

uno liquido grazie al sistema criogenico e uno gassoso, che comunque occupa solo una minima parte dello spazio.

Durante il suo funzionamento le WIMPs andrebbero a colpire gli atomi di Ar, generando una traccia composta da atomi che hanno avuto un rinculo nucleare. Durante questo momento la WIMP trasferisce energia all'atomo di Ar, facendo sì che quest'ultimo si trovi in uno stato ionizzato. Da qui questi atomi hanno una ricombinazione elettronica che in seguito porterà alla formazione a stati diatomici metastabili, che decadendo emettono fotoni con una lunghezza d'onda di 128 nm. Questa radiazione viene rivelata da 38 fotosensori, metà posti sulla parte superiore del contenitore cilindrico e l'altra metà sulla parte inferiore. Lo scopo di questi sensori non è solo la semplice rivelazione dei fotoni che vengono prodotti all'interno dell'ammasso di argon, ma anche la posizione dove è avvenuta la scintillazione. Per fare questo, supponendo che i fotoni di una stessa scintillazione vengano prodotti nello stesso istante di tempo, basta sfruttare il fatto che questi fotoni possano essere rivelati da diversi fotosensori in tempi diversi, a seconda del tragitto percorso; quindi, in base ai ritardi registrati da tutti i fotosensori, sarebbe possibile ricondursi alla posizione in cui è avvenuta la scintillazione.

Una componente importante della TPC è il campo elettrico con un'intensità di circa 1kV/cm, generato da lastre poste piatte sulle superfici del contenitore cilindrico contenente l'argon liquido (quella superiore è l'anodo mentre quella inferiore è il catodo) e da anelli di rame che circondano lo stesso sulla parte laterale. Lo scopo di tale elemento è quello di impedire che tutti gli elettroni generati dalla ionizzazione si ricombinino; infatti, senza di esso tutti gli elettroni si ricombinerebbero. In più, la sua presenza fa sì che gli elettroni rimasti liberi, siano soggetti ad uno spostamento verso l'anodo, verso una griglia di estrazione, oltre la quale c'è argon allo stato gassoso immerso in un campo elettrico di circa 3 kV/cm, che permette agli elettroni di passare dalla prima alla seconda regione. Qui gli elettroni interagiscono con gli atomi di argon producendo una seconda scintillazione dovuta ad un processo detto "elettroluminescenza". Infine anche i fotoni prodotti per elettroluminescenza vengono rivelati anch'essi dai fotosensori.

Rivelare entrambi gli eventi ci permette di distinguere sia il rinculo elettronico e quello nucleare; infatti, la differenza sta nel rapporto tra seconda e prima scintillazione ( $S_2/S_1$ ).

Un rinculo elettronico lascia una traccia più lunga nel rivelatore, lasciando dietro sé un enorme quantità di particelle ionizzate, e quindi più elettroni liberi, e poche in uno stato che porta ad un'unica scintillazione. Per cui nel primo caso avremo una emissione molto alta dovuta alla seconda scintillazione rispetto alla prima. Viceversa per il rinculo nucleare.

In più il rinculo nucleare ha una durata di scintillazione minore rispetto a quella del rinculo elettronico. Il riconoscimento attraverso quest'ultima caratteristica che differenzia i due eventi è un procedimento detto "pulse shape discrimination".

Alla fine sfruttando sia il rapporto tra ionizzazione e scintillazione, sia sfruttando il "pulse shape discrimination" ci è possibile discriminare le particelle di background da quelle che ci possono interessare.

Fino adesso abbiamo parlato di energia delle particelle. Se parliamo di elettroni questi rilasciano la loro intera energia nel rivelatore; ma se parlassimo di quelle che scatteranno con un rinculo nucleare, esse non rilasciano totalmente la loro energia all'interno del materiale bersaglio. Ne rilasciano solo una parte e di questa energia rilasciata una parte viene trasformata in luce per scintillazione ed un'altra viene rilasciata sotto forma di calore. Questa è una caratteristica propria del tipo di rinculo.

Per esempio, se un neutrone ed un elettrone venissero rivelati all'interno della TPC e venisse osservato il fatto che entrambe le particelle possiedono la medesima energia, nella realtà il neutrone avrebbe rilasciato un'energia circa tre volte superiore all'elettrone. Infatti, il neutrone, in percentuale rispetto all'energia totale rilasciata, libera meno energia sotto forma di luce rispetto ad un elettrone (che comunque non rilascerebbe tutta la sua energia). Per non cadere in ambiguità, alla fine, si è deciso di introdurre due nuovi simboli per identificare l'energia:

- keVr: indica l'energia rilasciata nel caso di rinculo nucleare.

- keVee: indica l'energia rilasciata nel caso di rinculo elettronico.

Il rapporto tra i due è diverso per ogni tipo di particella e si chiama Quenching Factor

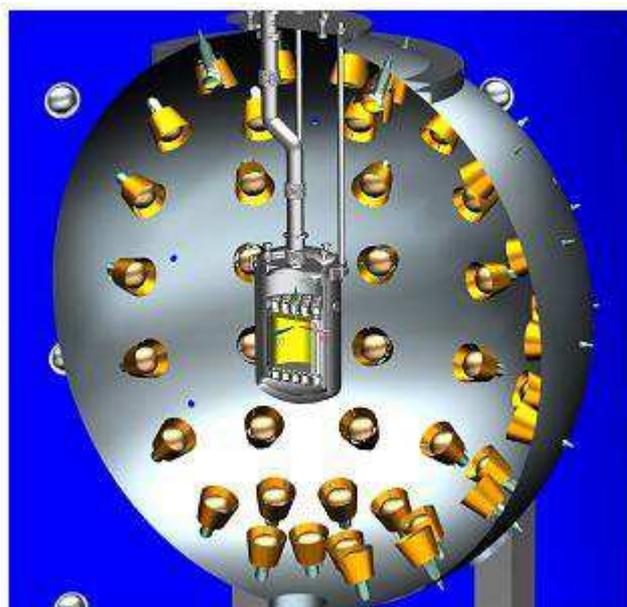
$$QF = E(keVr)/E(keVee)$$

che nell'argon vale circa 3. Per chiarezza precisiamo che quando parleremo di energia misurata in keV corrisponderà a energia in keVee.

### 2.3.4 VETO ATTIVO NEUTRONICO

Ciò che principalmente fa un rinculo elettronico sono i raggi  $\beta$  e  $\gamma$ ; mentre le particelle che hanno un rinculo nucleare sono i neutroni e le WIMPs. Come abbiamo detto in precedenza la TPC permette di distinguere un rinculo elettronico da uno nucleare; quindi, usando solo la TPC ci è impossibile discernere un rinculo provocato da una WIMP da uno provocato da un neutrone.

Ciò che sarà sfruttato nell'esperimento DarkSide-50 è un veto neutronico attivo che consiste in una sfera cava di diametro 4 m. Al centro di questa sfera verrà posta la TPC. Il resto dello spazio è riempito con un miscuglio costituito per metà da PseudoCumene (PC) e per il resto da TriMetilBorato (TMB). La presenza di boro nel veto neutronico permette di avere un'alta probabilità che i neutroni, provenienti sia dall'esterno del veto neutronico che dall'interno della TPC, siano rivelati, poiché la sezione d'urto neutronica del boro, in particolare quella dell'isotopo B-10, è molto grande. Comunque i neutroni interagiscono con le sostanze all'interno della sfera, producendo una traccia di atomi che scintillano; infine, quest'ultima viene rivelata da fotosensori che ricoprono la superficie interna della sfera e che segnalano anche i punti di origine delle scintillazioni. Scopo di questa rivelazione è di identificare i neutroni che provengono da fuori la sfera da quelli che provengono da



**Figura 2.5:** Veto neutronico dell'esperimento DarkSide-50, con al centro la TPC.

dentro la sfera. I neutroni provenienti da fuori hanno una rilevanza minore rispetto agli altri, soprattutto per il fatto che, appena entrati nel veto, vengono fermati con un'altissima probabilità, per cui la probabilità che essi arrivino fino alla TPC è estremamente bassa. Invece, è estremamente importante rivelare i neutroni che provengono dall'interno della TPC; infatti, la TPC non è in grado di riconoscere uno scattering dovuto a una WIMP piuttosto che da un neutrone.

Poniamo il caso che all'interno della TPC venga rivelato un rinculo nucleare. Che si tratti di un neutrone o di una WIMP, sarà molto probabile che la particella in questione passi dalla TPC al veto neutronico. A causa della presenza di B-10 all'interno di quest'ultimo possiamo dire che sarà molto alta la probabilità che avvenga una scintillazione dovuta all'interazione del materiale scintillatore con un neutrone, piuttosto che con una WIMP.

Per cui, unendo la capacità discriminativa della TPC con quella del veto neutronico ci è possibile distinguere con una buona efficienza interazione di una WIMP rispetto ad un'interazione provocata da una qualsivoglia particella appartenente al background.

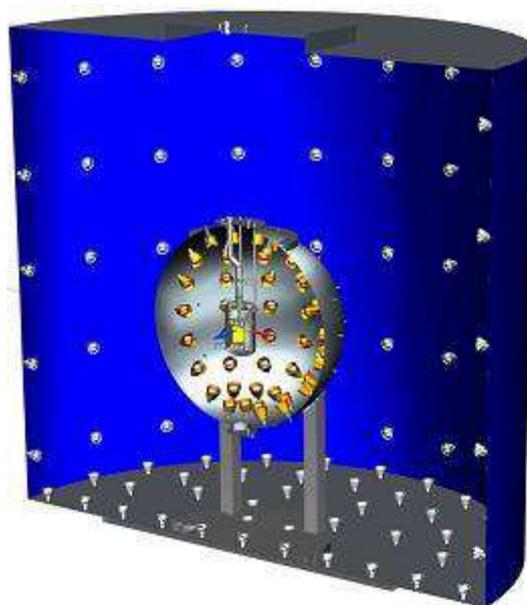
### 2.3.5 VETO MUONICO

Come ulteriore protezione sia per la TPC sia per il veto neutronico, è necessario porre un secondo veto, chiamato Counting Test Facility (CTF). Questo tipo di veto è già stato testato ed usato nell'esperimento Borexino, raggiungendo un'efficienza del 99,3%, anche se quello che sarà usato in DarkSide-50 ha subito alcune migliorie. Lo scopo di questa parte dell'apparato è di fermare i residui i raggi cosmici, in particolare i muoni, prima che arrivino agli apparati più interni. Infatti, per lo più i raggi cosmici vengono schermati grazie allo strato terra sovrastante il laboratorio Gran Sasso, dove sarà

costruito l'apparato di rivelazione dell'esperimento DarkSide-50, eppure una minima parte, in particolare, muoni ad alta energia passano attraverso questo strato protettivo. In sé i muoni non sono estremamente dannosi al fine della rivelazione; il problema più grande viene dagli effetti che gli stessi producono. Infatti, se non ci fosse il CTF i muoni interagirebbero con i materiali che compongono il veto neutronico o, peggio ancora, la TPC e tale interazione ha come risultato finale la produzione di neutroni. Quindi, lo scopo principale della CTF è quella di ridurre la parte di background composta da neutroni generati a causa dei raggi cosmici (neutroni cosmogenici).

Il veto muonico è un contenitore cilindrico alto 10 m e con un diametro di 11 m e sulla superficie interna sono posizionati dei fotosensori. Al centro è posizionato il veto neutronico con all'interno la TPC. Il resto dello spazio è riempito con acqua deionizzata. Lo scopo dell'acqua, in questo caso, non è quello di produrre una scintillazione come nel caso del veto neutronico; infatti, i muoni ad alta energia, passando attraverso l'acqua interagiscono in modo tale da produrre un effetto luminoso conosciuto come effetto Cherenkov.

I fotoni prodotti tramite tale effetto vengono poi rivelati dai fotosensori posti sulla superficie interna del contenitore cilindrico.



**Figura 2.6:** Veto muonico (CTF) dell'esperimento DarkSide-50, con al centro il veto neutronico e la TPC.

# CAPITOLO 3

## PULSE-SHAPE DISCRIMINATION

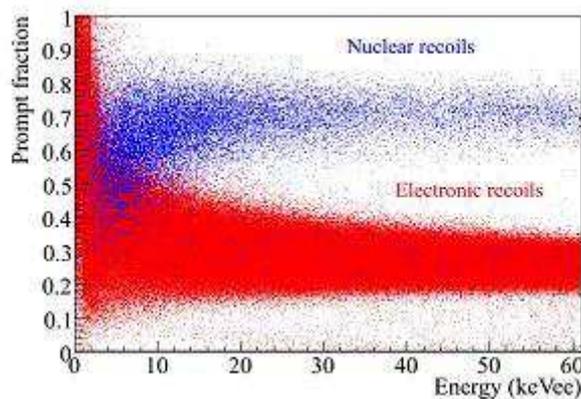
### 3.1 INTRODUZIONE

L'argomento di cui andremo a parlare in questo capitolo sarà incentrato sulle metodologie sfruttate per la distinzione tra particelle di fondo e potenziali WIMPs in base ai segnali di impulso.

Quello che verrà mostrato in queste pagine sarà riproporre la tecnica di "pulse-shape discrimination" nell'analisi di alcuni dati simulati tramite un programma opportuno, basato su formule ottenute da esperimenti di rivelazione con argon liquido. Ponendo alcuni errori sistematici ben conosciuti dovuti alla strumentazione è possibile alla fine ricondurci ad immagini di impulsi realistici.

La parte di analisi andrà a distinguere i vari impulsi ottenuti dalla simulazione, associandoli al tipo di rinculo (elettronico o nucleare) che la particella ha avuto.

Infatti se osservassimo la Figura 3.1 , presa in letteratura, relativa al parametro prompt fraction detto anche F90

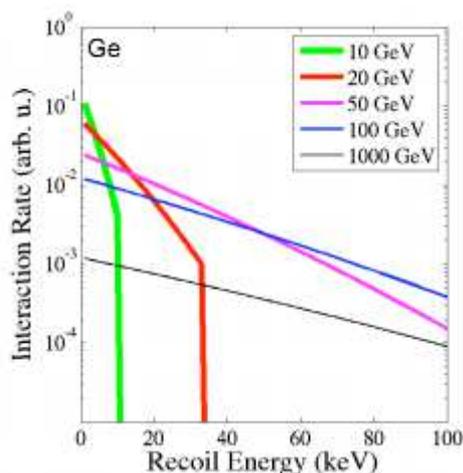


**Figura 3.1:** distribuzione dei rinculi nucleari ed elettronici in un grafico F90 (ordinate) ed energia (ascisse)

potremmo notare che le particelle che nell'argon liquido hanno un rinculo elettrico (punti rossi) sono ben distinguibili rispetto a quelle che hanno avuto un rinculo nucleare (punti blu), se parlassimo di particelle con un'energia sufficientemente alta; mentre, se ci spostassimo ad energie più basse il discernimento tra i due diventa arduo da fare.

Scopo di questa parte dell'elaborato è di provare che le metodologie di riconoscimento che saranno usate nell'esperimento DarkSide-50 hanno una buona efficienza; cioè, sapendo a priori il tipo di particelle simulate, osservare se la metodologia di discernimento è capace di riconoscerle o se verranno confuse.

Possiamo già prevedere dalla Figura 3.1 che il riconoscimento sarà ottimo per particelle ad alte energie ma discreto se non scarso per particelle a bassa energia. Questo può risultare come un problema, in quanto, se osservassimo la Figura 3.2 riguardante lo scattering di ipotetiche WIMPs a varie energie (l'esempio è per il germanio, ma il concetto è analogo anche nell'argon)



**Figura 3.2:** grafico indicante la probabilità di scattering di una ipotetica WIMP in funzione dell'energia di rinculo all'interno di un scintillatore al germanio (Ge). Ogni linea è caratterizzata da un'energia iniziale diversa (vedi la legenda).

è possibile notare che le particelle a bassa massa (nel qual caso le particelle da 10  $\text{GeV}/c^2$  e da 20  $\text{GeV}/c^2$ ) hanno un limite superiore nell'energia di rinculo sotto il quale è possibile che abbiamo uno scattering e rilascino energia, ma sopra il quale è impossibile osservarle.

Alla fine possiamo dire che se le WIMPs avessero una grande massa possiamo non avere particolari problemi; invece, se avessero una massa piccola, siccome lo scattering non permette di avere rinculi molto energetici, il discernimento delle particelle può risultare molto difficile.

### 3.2 LA SIMULAZIONE

Una qualsiasi metodologia di analisi dati deve essere “testata” prima di essere usata nell’esperimento in questione. Il test di cui stiamo parlando consiste nell’osservare se la metodologia analizza alcuni dati campione, di cui siamo certi dell’origine, e riconosce l’origine dei dati.

È possibile avere dei dati campione attraverso due vie di reperimento. Da una parte possiamo prendere un rivelatore ad argon liquido, sottoporlo a vari scattering con diversi tipi di particelle, prendere i dati ed analizzarli. Oppure, cosa che si fa più spesso è creare al computer un programma che abbia lo scopo di simulare tali eventi in modo che risultino il più realistici possibili; cioè, una simulazione Monte Carlo.

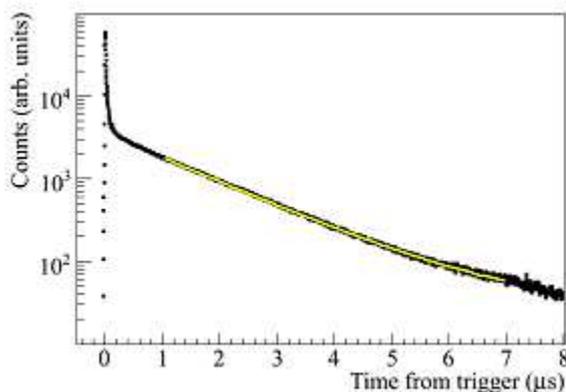
A parole la seconda opzione sembra essere la più semplice, in realtà è tutto il contrario, come vedremo a breve.

Una simulazione dei segnali che dobbiamo andare ad analizzare parte dalla descrizione dell’apparato da cui ipoteticamente dovremmo ricavare i dati dei segnali. In questa tesi abbiamo supposto di avere un contenitore, al cui interno abbiamo inserito dell’argon liquido e con una parete trasparente, dove è posto il fotosensore (un fotomoltiplicatore) che ha lo scopo di trasformare i segnali di luce dovuti alla scintillazione in segnali elettrici che teoricamente verrebbero letti da un oscilloscopio, disegnandolo su un grafico tensione-tempo. È facile intuire che i fotoni generati dalla scintillazione si disperdano in modo uniforme e senza una direzione preferenziale; allora, il fotosensore riceverebbe solo una parte dell’intero segnale. Però, siccome i fotoni sono distribuiti in modo uniforme, il segnale ricevuto dal foto sensore è proporzionale all’intero segnale generato dalla scintillazione. Per semplicità ipotizziamo che il fotosensore abbia la capacità di osservare tutti i fotoni generati.

Nel momento in cui avviene uno scattering di una particella qualsiasi nell’argon liquido, come abbiamo detto nel capitolo precedente, genera dei dimeri di argon che non essendo stabili, decadono emettendo luce (scintillazione). Lo stato metastabile in cui si trova il dimero prima di decadere può essere di due tipi: uno stato di singoletto, che decade al groundstate e che ha una vita media tipica di 6 ns, o uno stato di tripletto, che decade allo stato di singoletto e che ha una vita media tipica di 1.6  $\mu$ s. I due decadimenti generano fotoni a diversa energia; tuttavia, la differenza è estremamente minima da poter dire che tutti i fotoni generati hanno uguale energia ( $\lambda = 128$  nm). Siccome i decadimenti nucleari seguono un andamento esponenziale, la forma del segnale risultante sarà la sovrapposizione di due esponenziali con vite medie differenti, e quindi con pendenze diverse. È importante osservare tale differenza, in quanto nel caso di un rinculo nucleare vengono generati più stati di singoletto; mentre, un rinculo elettronico genera più stati di tripletto. Questa differenza porta a diverse forme di segnale a parità di energia rilasciata: nel caso del rinculo nucleare ad una forma più stretta e lanciata all’inizio del segnale; mentre nel caso del rinculo elettronico ad una forma più dilatata nel tempo.

Per generare in una simulazione tali impulsi è necessario conoscere la distribuzione del numero di fotoni di una scintillazione nel tempo. Questo è possibile registrando una

grande quantità di impulsi da un rivelatore reale, sommarli in un istogramma e quello che si dovrebbe ottenere è un istogramma simile alla Figura 3.3.



**Figura 3.3:** esempio di rappresentazione della distribuzione di fotoni di una scintillazione in argon liquido

È possibile osservare due diverse pendenze derivanti dai due diversi tempi di decadimento degli stati di singoletto e tripletto. Un grafico del genere viene fittato dalla seguente funzione

$$f(t - t_0) = \frac{q}{\tau_l} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_l}} + \frac{1-q}{\tau_s} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_s}}$$

dove  $\tau_l$  e  $\tau_s$  sono parametri legati alla pendenza dei due esponenziali e variano in base all'energia depositata dalla particella,  $q$  è un parametro che, oltre a cambiare in base all'energia depositata, cambia a seconda che si tratti di un rinculo nucleare o elettronico. I dati specifici che sono stati sfruttati per questa simulazione sono esposti nella seguente tabella:

Bin (pe)	$\tau_l$ (ns)	$\tau_s$ (ns)	$q_{nuclear}$	$q_{electronic}$
20-24	1634 ± 150	9 ± 3	0.378 ± 0.011	0.523 ± 0.015
25-29	1535 ± 128	10 ± 3	0.382 ± 0.011	0.573 ± 0.015
30-34	1478 ± 107	10 ± 3	0.357 ± 0.010	0.601 ± 0.014
35-39	1455 ± 102	11 ± 3	0.353 ± 0.010	0.627 ± 0.014
40-49	1461 ± 96	12 ± 3	0.344 ± 0.010	0.658 ± 0.014
50-59	1459 ± 92	12 ± 3	0.327 ± 0.009	0.681 ± 0.015
60-69	1439 ± 89	12 ± 3	0.315 ± 0.010	0.699 ± 0.015
70-79	1448 ± 89	13 ± 3	0.309 ± 0.010	0.710 ± 0.015
80-99	1447 ± 85	13 ± 3	0.298 ± 0.010	0.721 ± 0.015
100-119	1452 ± 84	13 ± 3	0.289 ± 0.010	0.733 ± 0.015
120-139	1447 ± 84	13 ± 3	0.284 ± 0.011	0.741 ± 0.016
140-159	1446 ± 84	14 ± 3	0.278 ± 0.012	0.747 ± 0.016
160-199	1450 ± 84	14 ± 3	0.272 ± 0.013	0.752 ± 0.016
200-239	1460 ± 84	15 ± 3	0.265 ± 0.015	0.760 ± 0.016
240-279	1467 ± 84	15 ± 3	0.258 ± 0.018	0.764 ± 0.016

Invece  $t_0$  è un parametro che permette solo di traslare la funzione. Nel nostro caso è stata posta nulla e tale scelta deriva da un'approssimazione che è stata fatta.

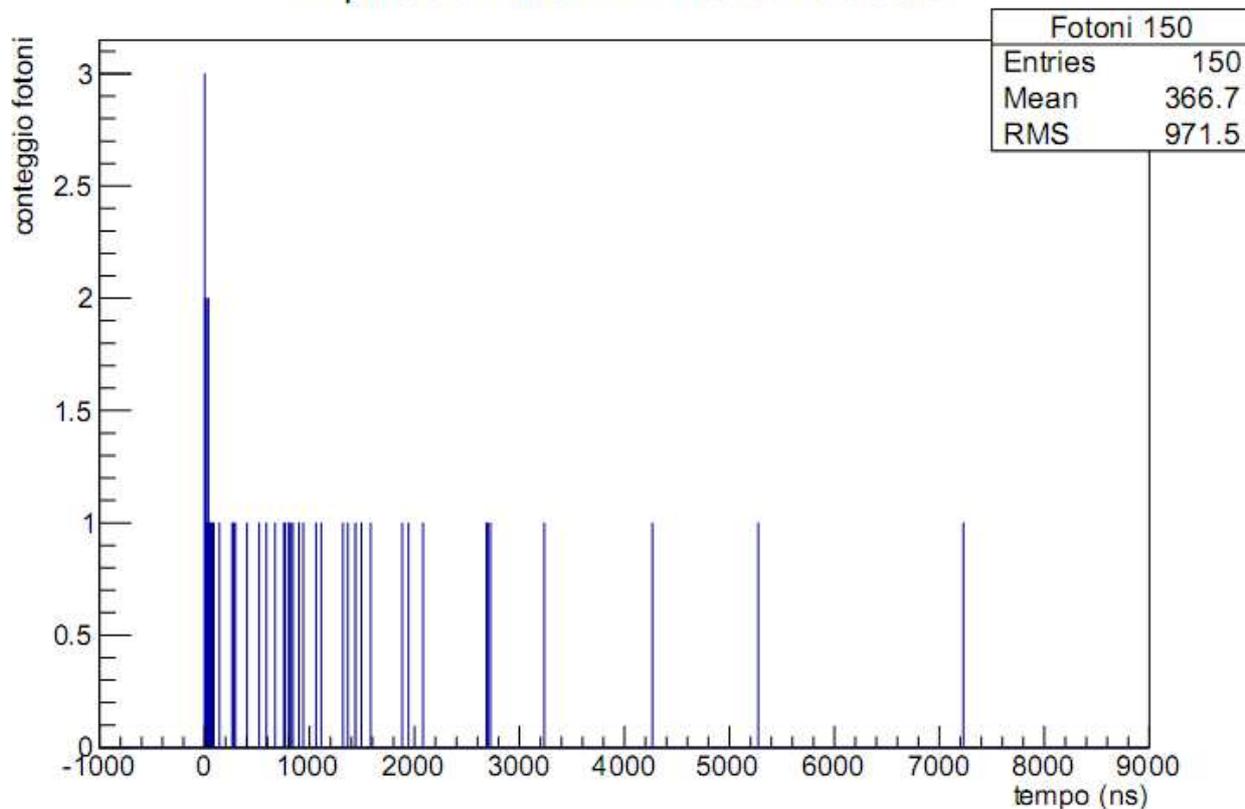
Siccome la velocità della luce è limitata, a seconda della posizione in cui avviene la scintillazione, i fotoni avranno un cammino più o meno lungo per raggiungere il fotosensore; per cui, il momento in cui avviene la scintillazione non è lo stesso della rivelazione fatta dal fotosensore. Questo fa sì che ci sia la possibilità che fotoni generati nello stesso istante vengano rivelati in tempi diversi. In questa tesi supponiamo che l'apparato sia abbastanza piccolo che il cammino sia tanto corto che il tempo di percorrenza sia trascurabile (30 cm al massimo in modo tale che il tempo di percorrenza sia di circa 1 ns ). Per cui, il momento della scintillazione coincide con quello della rivelazione.

Importante da sottolineare è che ogni scintillazione, che sia derivante da un rinculo elettronico o nucleare, non ha mai una produzione di fotoni fissa. Essa segue una distribuzione di Poisson, variando attorno ad un numero medio, che nel nostro caso appartiene ad un intervallo che ha come minimo 20 e come massimo di 279 (vedi tabella sopra).

Come programma per la ricerca delle  $t$  in cui vengono emanati i fotoni dalla scintillazione abbiamo sfruttato l'integrale della funzione di distribuzione dei fotoni descritta sopra. In questo modo abbiamo una funzione avente ordinate che vanno da zero all'integrale totale del segnale che è pari a 1. Generando un numero casuale all'interno di quest'ultimo intervallo 0 - 1, al fine di ottenere il tempo  $t$  corrispondente, è necessario invertire la funzione integrale. Tale operazione si è rivelata ardua da fare in modo analitico. Per aggirare questo ostacolo abbiamo sfruttato il cosiddetto metodo della secante; infatti, ponendo la funzione integrale uguale al valore casuale compreso tra zero e l'integrale totale, otteniamo un'equazione riconducibile a quelle risolvibili con tale metodo (cioè funzioni che non hanno derivata seconda che cambiano di segno). Usando un metodo di questo genere, però, è necessario dire che viene aggiunto un errore dovuto a tale calcolo, ma questo errore è estremamente piccolo ( dell'ordine del  $10^{-12}$  ) da poterlo considerare trascurabile. In più possiamo aggiungere che il metodo della secante è il più adatto da usare in questo caso secondo l'opinione di chi scrive, in quanto, oltre a lavorare su equazioni caratterizzate da una derivata seconda sempre dello stesso segno, ha una velocità di calcolo maggiore rispetto a metodi aventi lo stesso scopo (per esempi il metodo di bisezione).

Quello che alla fine otterremo è un'immagine simile alla Figura 3.4.

### Impulso di fotoni - Rinculo Nucleare



**Figura 3.4:** rappresentazione di un impulso di 150 fotoni di una scintillazione dovuto ad un rinculo nucleare

Fino adesso abbiamo parlato di fotoni; ma quando facciamo una rivelazione non osserviamo fotoni, bensì segnali elettrici e questo porta a modifiche della forma dell'impulso. Per dire quali siano queste modifiche da approntare è necessario descrivere il funzionamento dei fotosensori usati (nel caso di DarkSide-50 verranno usati fotomoltiplicatori criogenici R11065).

Ad ogni fotone prodotto nella scintillazione corrisponde un fotoelettrone generato nel fotosensore. Ogni scintillazione genera un numero medio di circa 5 fotoelettroni per KeV e il segnale elettrico che ne deriverebbe sarebbe troppo flebile. Al fine di avere un segnale elettrico abbastanza apprezzabile è necessario amplificarlo; il fotomoltiplicatore esegue l'operazione di moltiplicazione e porta il segnale amplificato al circuito che ha lo scopo di acquisirlo. Durante il percorso all'interno del fototubo il fotoelettrone subisce amplificazioni successive ai vari dinodi, ognuno dei quali moltiplica per circa quattro volte. In questo modo otteniamo un segnale elettrico finale composto da circa  $10^7$  elettroni. Da quello che abbiamo appena detto possiamo definire il fotomoltiplicatore come un generatore di corrente.

Questa aggiunta tecnica porta ad errori di tipo statistico. Infatti, è impossibile che ogni fotoelettrone venga amplificato con un numero fissato di elettroni. Quindi, ad un fotoelettrone corrisponde un numero variabile di elettroni che formerà il segnale

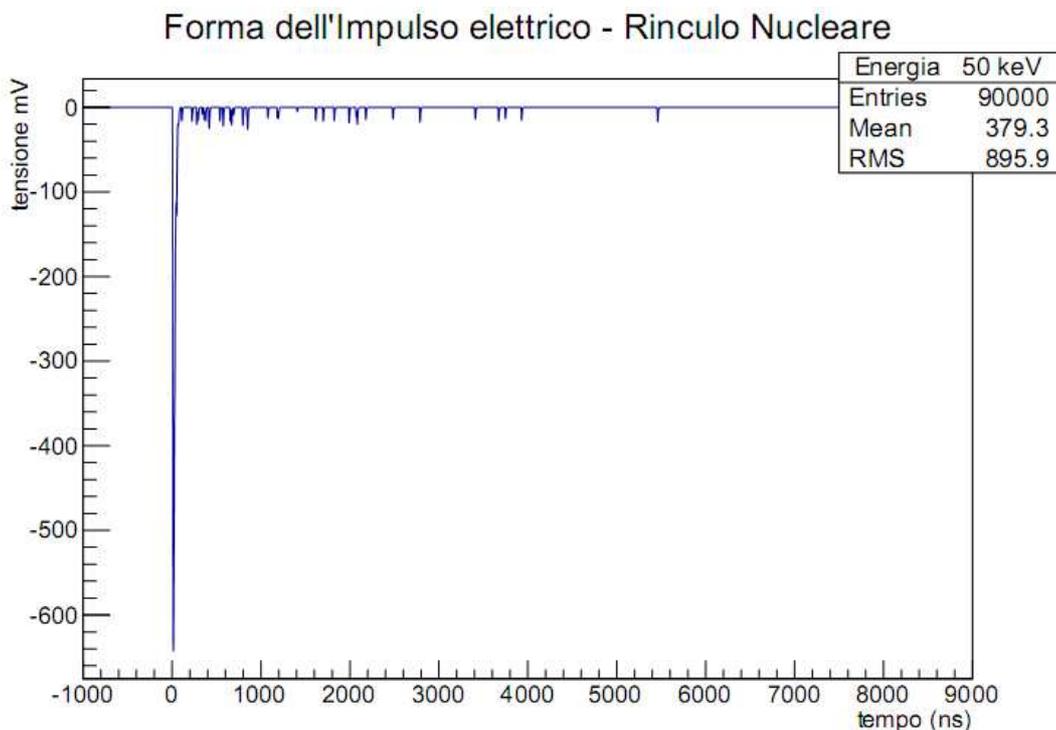
elettrico, che sarà raccolto ed analizzato dal sistema di acquisizione dati. La formula che descrive la forma di tale segnale è la seguente.

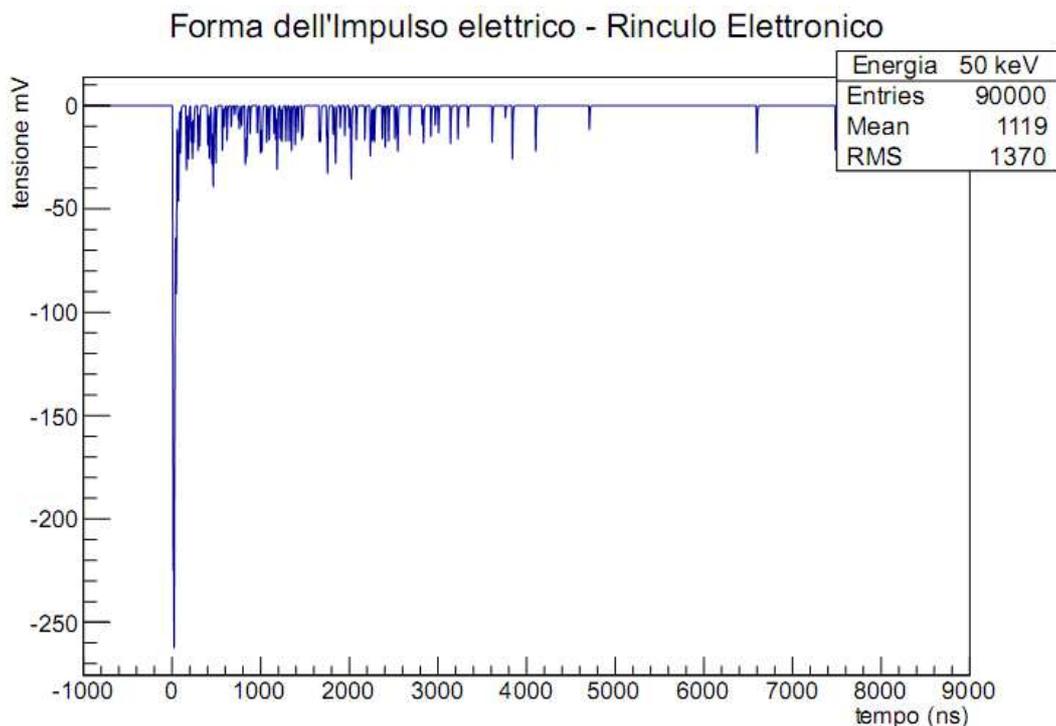
$$f(t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_i \\ A_{peak} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln\left(\frac{(t-t_i)}{\tau}\right)}{\sigma}\right)^2\right) & t > t_i \end{cases}$$

dove  $\tau = 9$  ns e  $\sigma = 0.4$ . L'esponenziale descrive come gli elettroni vengono raccolti e rivelati nel tempo; invece, il parametro che varia in base al numero di elettroni prodotti per fotomoltiplicazione è  $A_{peak}$ , che varia secondo una distribuzione gaussiana con una standard deviation ( $\sigma$ ) pari a circa un terzo dell'altezza del picco del segnale (cioè  $A_{peak}$ ). Nel nostro caso abbiamo un  $A_{peak} = 15$  mV, quindi  $\sigma = 5$  mV.  $t_i$  corrisponde al tempo in cui il segnale inizia.

Tale equazione corrisponde al segnale elettrico di un unico fotone. Per avere il segnale di tutta la scintillazione basta fare la sovrapposizione di tutti i segnali elettrici di tutti i fotoni. Come è possibile osservare, se  $t$  fosse minore di  $t_i$  e usassimo solo la parte con l'esponenziale, non esisterebbe alcun risultato in quanto non esiste il logaritmo di un numero negativo. Dal punto di vista fisico per ogni tempo precedente a  $t_i$  il segnale non esiste, quindi il valore della funzione deve essere nullo. Nel punto  $t = t_i$  le due funzioni si uniscono, come possiamo notare, in modo tale da avere una funzione continua per tutto l'asse dei tempi.

Quello che alla fine otterremo è un'immagine simile alla Figura 3.5.





**Figura 3.5:** rappresentazione di un impulso elettrico di una scintillazione dovuto ad un rinculo nucleare (sopra) ed uno dovuto ad un rinculo elettronico (sotto).

L'ultima cosa importante da citare è la presenza di "rumore bianco". Infatti, nel momento in cui il fotosensore non rivela alcuna scintillazione, la corrente che l'oscilloscopio osserva deve essere nulla. Questo accadrebbe se vivessimo in un mondo ideale. Nella realtà abbiamo una corrente fluttuante che genera quello che in gergo è conosciuto come "rumore bianco". Il problema del rumore bianco è assai arduo da risolvere, in quanto non esistono formule precise che ci permettono di riprodurre le fluttuazioni che lo caratterizzano; al più possiamo fare delle approssimazioni abbastanza realistiche. Siccome ciò che per noi è rilevante nell'elaborazione dei dati è l'integrale della forma della scintillazione e non la forma stessa, la metodologia sfruttata nella simulazione è la seguente. Nella realtà se accendessimo rivelatore e un oscilloscopio ad esso connesso, osserveremo una serie di fluttuazioni casuali (il rumore bianco) e se ne facessimo l'integrale otterremo un valore che è diverso da zero. Poiché ciò che ci interessa è l'integrale del rumore bianco, c'è la possibilità di considerare quest'ultimo come se fosse l'integrale di due fotoelettroni aggiuntivi e non realmente esistenti. Quindi, quello che otterremo è l'immagine di una singola scintillazione caratterizzata da un certo numero di impulsi elettrici corrispondente a un numero di fotoelettroni tale da essere la somma dei fotoelettroni reali e dei due fotoelettroni corrispondenti al rumore bianco. Il problema in questa approssimazione non è tanto la generazione di questi fotoelettroni aggiuntivi (basta riusare la parte di programma che abbiamo già sfruttato per la generazione dei veri fotoelettroni), quanto la loro distribuzione nel tempo e l'ampiezza degli impulsi corrispondenti. In un primo momento possiamo pensare che questi due fotoelettroni siano semplicemente

distribuiti in modo uniforme su tutta la lunghezza temporale della scintillazione; eppure, facendo in questo modo commetteremmo un errore. Infatti, facendo l'integrale del rumore bianco di un piccolo intervallo temporale qualsiasi, è possibile ottenere un valore in modulo anche maggiore dell'integrale su un arco temporale molto più lungo. Questo è dovuto al fatto che le oscillazioni dovute al rumore bianco possono avere valore anche negativo, andando a controbilanciare i valori positivi. Invece, considerare la distribuzione uniforme è come dire che l'integrale del rumore bianco sull'arco temporale lungo è direttamente proporzionale a quello corto (nel senso che l'integrale lungo è tante volte più grande di quello sull'arco temporale corto). Siccome nella parte di analisi gli integrali, e quindi gli intervalli temporali, sono solo due (circa 90 ns e 9000ns nella nostra simulazione) dobbiamo posizionare un fotoelettrone all'interno dell'intervallo breve (Prompt), che dura 90 ns, e l'altro nell'intervallo lungo (Late), che dura 8910 ns (cioè  $9000-90=8910$  ns). I due impulsi elettrici corrispondenti ai due fotoelettroni che andranno a caratterizzare il rumore bianco saranno elaborati con le stesse metodologie degli impulsi reali, ma con caratteristiche diverse: ampiezza variabile secondo distribuzione gaussiana con media zero e deviazione standard pari a 3.5 volte l'ampiezza media di un impulso elettrico reale (cioè  $15\text{mV} \times 3.5 = 52.5\text{mV}$ ) nel caso dell'impulso di rumore nella finestra late, mentre nella finestra prompt sempre un'ampiezza distribuita in modo gaussiano con media zero e deviazione standard pari a 0.5 volte l'ampiezza media di un impulso elettrico reale. I fattori di moltiplicazione (cioè 3.5 e 0.5) per trovare la deviazione standard sono stati ottenuti attraverso misurazioni sperimentali riportate in letteratura. Il motivo per cui è stato scelto 90 ns come intervallo temporale su cui fare l'integrale prompt viene dal fatto che è stato verificato essere l'intervallo di tempo per mezzo del quale si può avere la più bassa contaminazione (come ottenere questo risultato verrà meglio spiegato inseguito).

Una questione sorta nel momento in cui abbiamo dovuto rappresentare gli impulsi su un istogramma è il problema della scelta della larghezza dei bin. La scelta di un bin troppo stretto ha come vantaggio una più precisa rappresentazione degli impulsi, ma come svantaggio un tempo di elaborazione più lungo. Alla fine si è convenuto che la larghezza del bin dovesse essere di circa 1 ns e come altezza il valore che la funzione assume nel punto centrale del bin (per esempio il bin che va da 0 a 1 ha come altezza il valore della funzione nel punto 0.5).

### **3.3 L'ANALISI**

A questo punto abbiamo ottenuto una serie di impulsi di segnale riprodotti in modo abbastanza realistico grazie alle metodologie descritte sopra. Dalla simulazione ci è possibile sapere l'origine del segnale (cioè sappiamo se il segnale è dovuto ad un rinculo elettronico o nucleare). Se ci mettessimo nella condizione di cancellare ogni riferimento da tutti i segnali simulati, non ci sarebbe dato sapere in modo immediato l'origine di ogni segnale. Una tipologia di riconoscimento degli impulsi è la "Pulse-Shape Discrimination". Le tecniche che rientrano in questa tipologia sono caratterizzate, come dice il nome, da una discriminazioni dei segnali in base alla forma.

In questa tesi è stata usata la tecnica denominata Prompt Fraction Method, tramite cui si procede poi al calcolo del cosiddetto ERC (Electron Recoil Contamination) che determina il grado di contaminazione del fondo elettronico nella fascia di accettazione delle WIMPs.

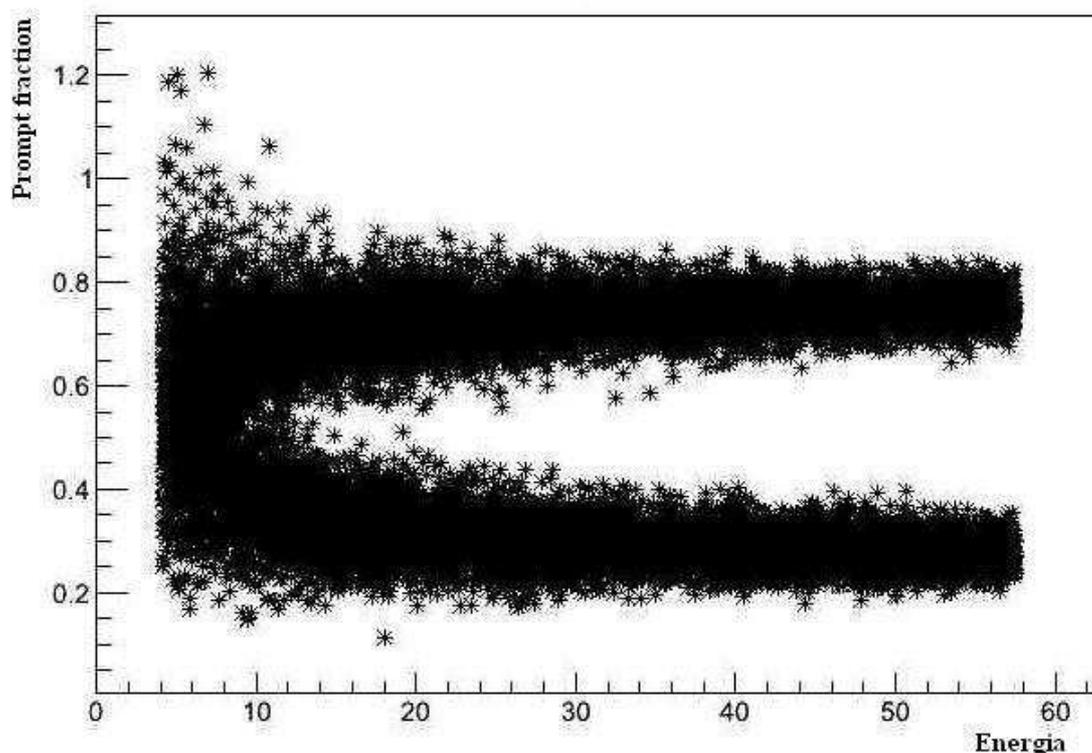
La "Prompt Fraction Method" è la parte dell'analisi che si occupa dell'esame della "forma" del segnale. Come abbiamo già detto in precedenza i segnali dovuti ad un rinculo nucleare, rispetto ad uno elettronico, hanno una forma più concentrata all'inizio del segnale stesso, dovuto al fatto che i rinculi nucleari generano un numero di dimeri caratterizzati da uno stato di singoletto (vita media corta) maggiore dell'altro, caratterizzato da un numero di stati di tripletto (vita media lunga) maggiore. Quindi, due segnali, di cui uno dovuto ad un rinculo nucleare ed uno elettrico, a parità di energia di scintillazione rilasciata (proporzionale all'integrale del segnale sull'intero arco temporale) avranno una forma diversa. È possibile sfruttare tale caratteristica facendo per ogni segnale il rapporto F90 tra l'integrale del segnale su un ristretto intervallo di tempo (90 ns) e l'integrale del segnale su tutto l'arco temporale. Teoricamente sarebbe giusto fare l'integrale avente come estremi di integrazione  $-\infty$  e  $+\infty$ , ma sarebbe impossibile da scrivere in un programma; per cui ci limitiamo a fare l'integrale del segnale tra l'inizio del segnale e 7000 ns dopo tale inizio, in cui possiamo considerare il segnale ormai scomparso o al più trascurabile.

Un particolare abbastanza importante da sottolineare è che stiamo esaminando segnali elettrici, ognuno dei quali confinato all'interno dell'intervallo temporale di 9000 ns, all'interno del quale è stato generato; è come dire che prima del momento zero non è stato segnalato alcun segnale elettrico. Quindi, basterebbe fare i due integrali con l'estremo inferiore di integrazione uguale a zero per ottenere i risultati desiderati. Nell'esperimento reale, invece, quello che si andrà ad analizzare sarà un intervallo di tempo continuo dell'ordine degli anni, all'interno del quale sono distribuiti i segnali da analizzare e, quindi, ogni coppia di integrali (prompt e totale) di ogni segnale necessiterà di un estremo inferiore diverso dagli altri segnali. In principio possiamo porre l'estremo inferiore di integrazione al momento in cui il segnale inizia ad essere minore di zero (in quanto il segnale elettrico corrispondente ad una scintillazione è negativo); ma questa soluzione non è adatta in quanto, a causa del rumore bianco il segnale elettrico è sempre diverso da zero. Il compromesso che si usa in questi casi è quello di porre una soglia oltre il quale possiamo essere certi che il rumore bianco non arriva (in modulo circa 5 mV) ed impostare il programma in modo tale che inizi ad elaborare gli integrali da quell'istante. In seguito, oltrepassato il momento in cui consideriamo il segnale terminato (circa 7000 ns dopo l'inizio del segnale) viene riattivata la parte del programma che ricercherà l'inizio del segnale successivo. Nel nostro caso, invece, faremo in modo che ogni segnale confinato all'interno dell'intervallo di 9000 ns venga analizzato, ricercando prima il tempo in cui inizia il segnale stesso, poi facendo il rapporto tra i due integrali.

È evidente che sfruttando questo metodo è possibile che ci siano degli errori. Infatti, consideriamo due segnali senza rumore bianco del tutto identici. Consideriamo anche che all'inizio del primo segnale vi sia del rumore bianco positivo e che nel secondo vi sia del rumore bianco negativo. Allora, nel secondo caso otterremo che il nostro

programma segnalerà un inizio del segnale antecedente rispetto al primo (questo perché il segnale elettrico è negativo). Comunque questo errore è abbastanza basso da considerarsi trascurabile.

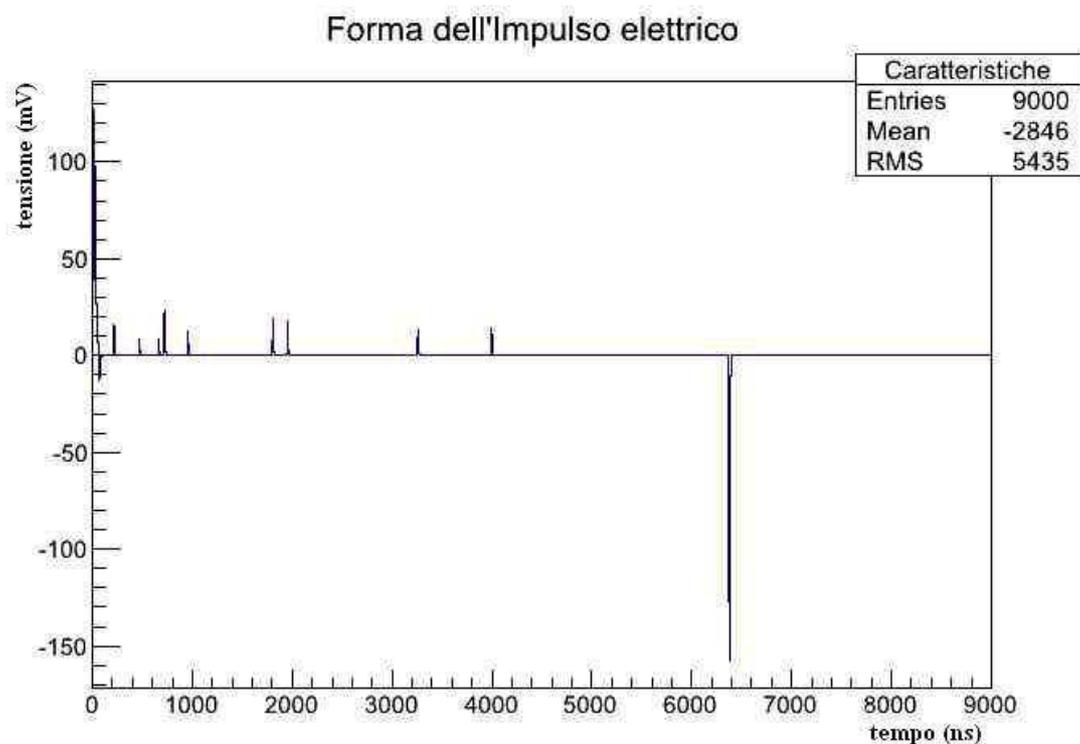
Nella nostra simulazione, per rendere l'analisi realistica, sarà caratterizzata da questo programma che andrà ad identificare l'inizio di ogni segnale simulato. Alla fine di questa parte di analisi otterremo un grafico (scatter plot) simile a quello della Figura 3.6.



**Figura 3.6:** rappresentazione in un grafico prompt fraction – energia dei dati provenienti dai dati simulati.

Da questa figura è possibile osservare che per energie abbastanza alte la divisione tra rinculi nucleari ed elettronici è netta (possiamo immaginare una linea orizzontale divisoria con ordinata pari a 0.5 e dire che al di sopra troviamo rinculi nucleari e sotto quelli elettronici); mentre per basse energie fare un discernimento diventa difficile in quanto possiamo osservare rinculi elettronici con un rapporto F90 (prompt fraction riferito ai primi 90 ns del segnale) maggiore di 0.5 .

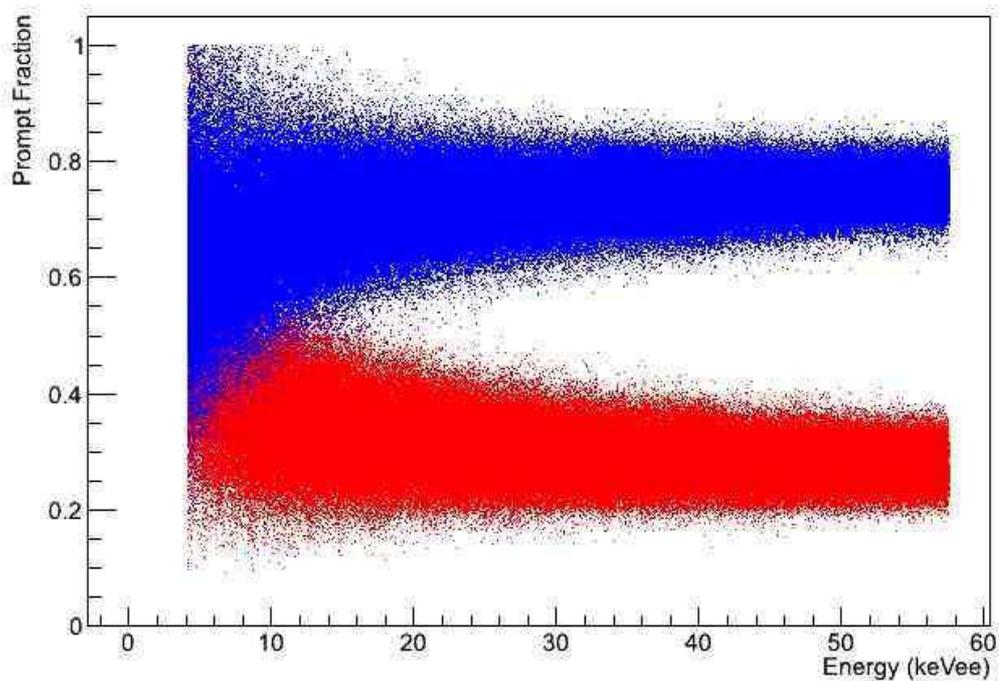
Osserviamo altresì che a basse energie (cioè nel momento in cui una scintillazione emana pochi fotoni) può capitare che il rumore nella finestra late abbia un'ampiezza positiva talmente alta da far sì che il rapporto F90 abbia un valore superiore a 1 (cosa che non dovrebbe accadere neanche nella realtà).



**Figura 3.7:** rappresentazione di un impulso a bassa energia (la tensione in questo caso è positiva) con rumore molto alto (negativo). Questa caratteristica del segnale genera un prompt fraction maggiore dell'unità.

In questo caso prendiamo solo nota di tale problema in quanto la frequenza di questo errore è molto alta solo per energie basse (sotto i 10 keV) e il nostro lavoro si concentrerà su energie più alte di 10 keV.

Per avere un grafico più chiaro abbiamo eliminato tutte le simulazioni in cui il rapporto F90 è maggiore di 1.



F

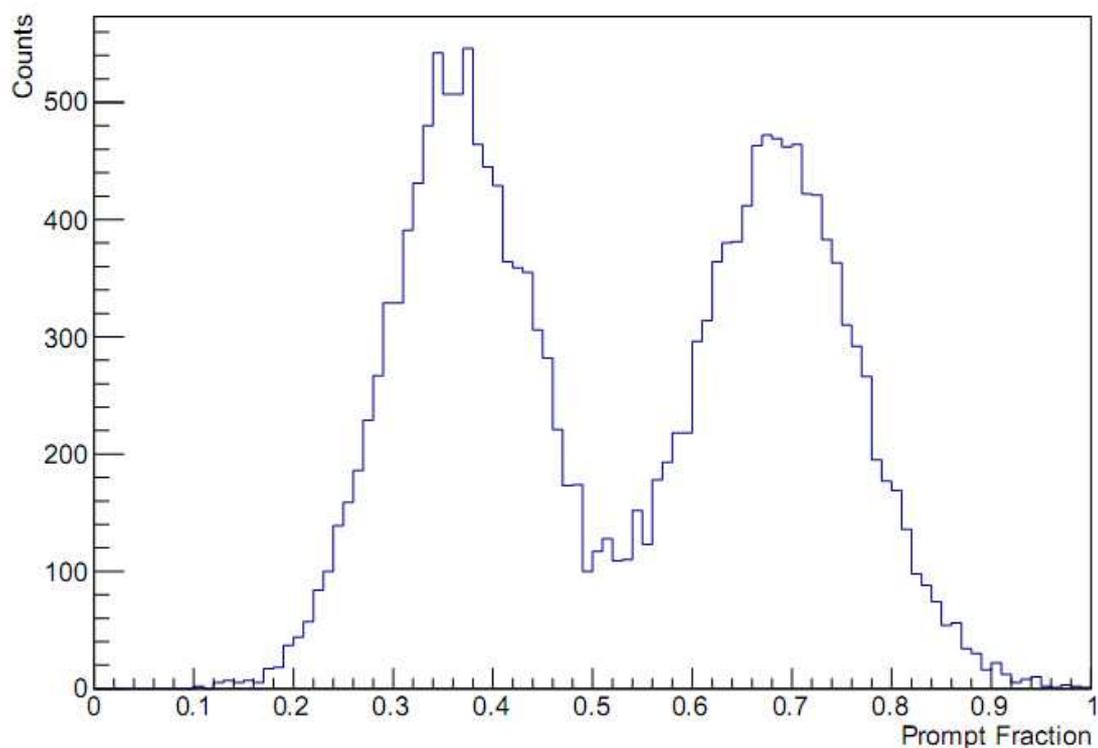
**figura 3.8:** grafico prompt fraction (F90) – energia, con eliminati le prompt fraction maggiori di 1. In blu sono segnalati i rinculi nucleari; in rosso quelli elettronici.

Lo scopo delle metodologie di discernimento, comunque, è quello di avere una capacità di riconoscimento con una conoscenza a priori della contaminazione teorica. Il totale delle simulazioni effettuate è sintetizzato nel grafico in Figura 3.8, nel quale si riporta per ogni impulso simulato il parametro F90 in funzione dell'energia.

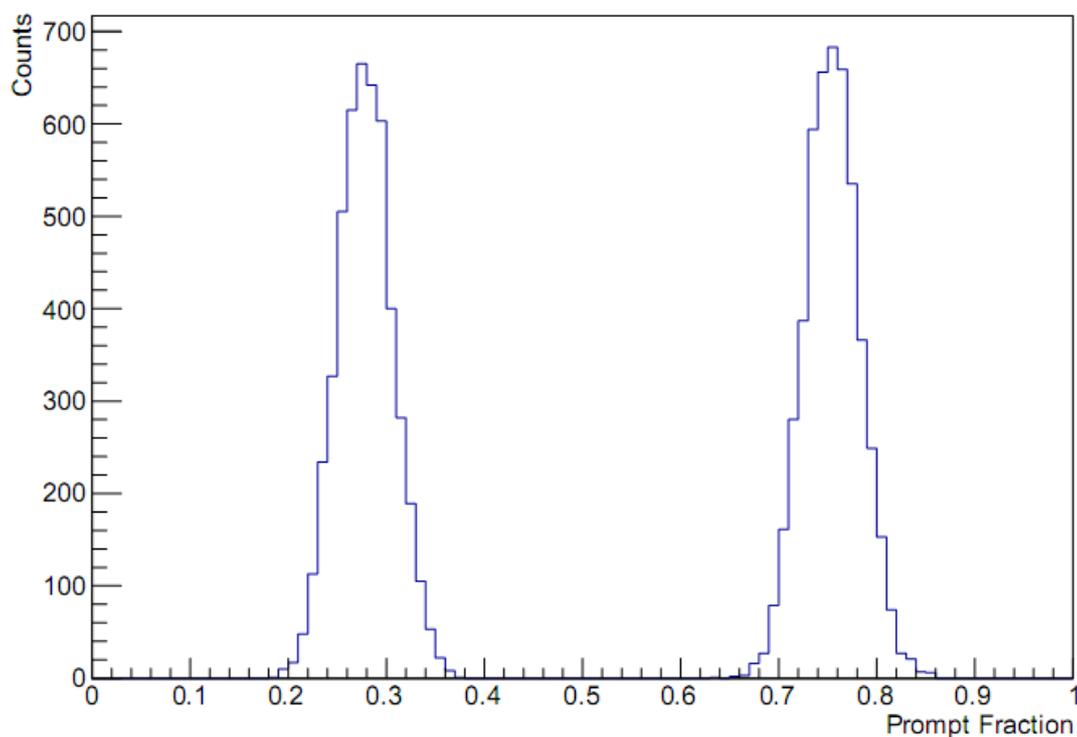
Descriviamo ora come conoscere la contaminazione.

Se osservassimo le sezioni trasversali del grafico nella Figura 3.8 (quindi consideriamo i punti che hanno una energia compresa tra due valori energia), osserveremo un grafico simile alla Figura 3.9.

Forma trasversale del grafico Impulsi F90-E (10-11 keVee)



Forma trasversale del grafico Impulsi F90-E (57-58 keVee)



**Figura 3.9:** sezioni trasversali del grafico prompt fraction – energia nel caso F90 negli intervalli di energia 10-11 keVee (in alto) e 57-58 keVee (in basso).

Osserviamo così due distribuzioni: una che descrive il numero dei rinculi elettronici in funzione della prompt fraction (a sinistra); l'altra che descrive il numero dei rinculi nucleari sempre in funzione della prompt fraction (a destra). Ognuna di queste distribuzioni è caratterizzata da un valore medio che può essere calcolato facendo la media aritmetica della prompt fraction dello stesso tipo di rinculo, contenuti all'interno della sezione trasversale. Se calcolassimo questi valori medi per ogni sezione trasversale quello che otterremo è il seguente grafico.

F90 - fp medi elettronici (rossi) e nucleari (blu)

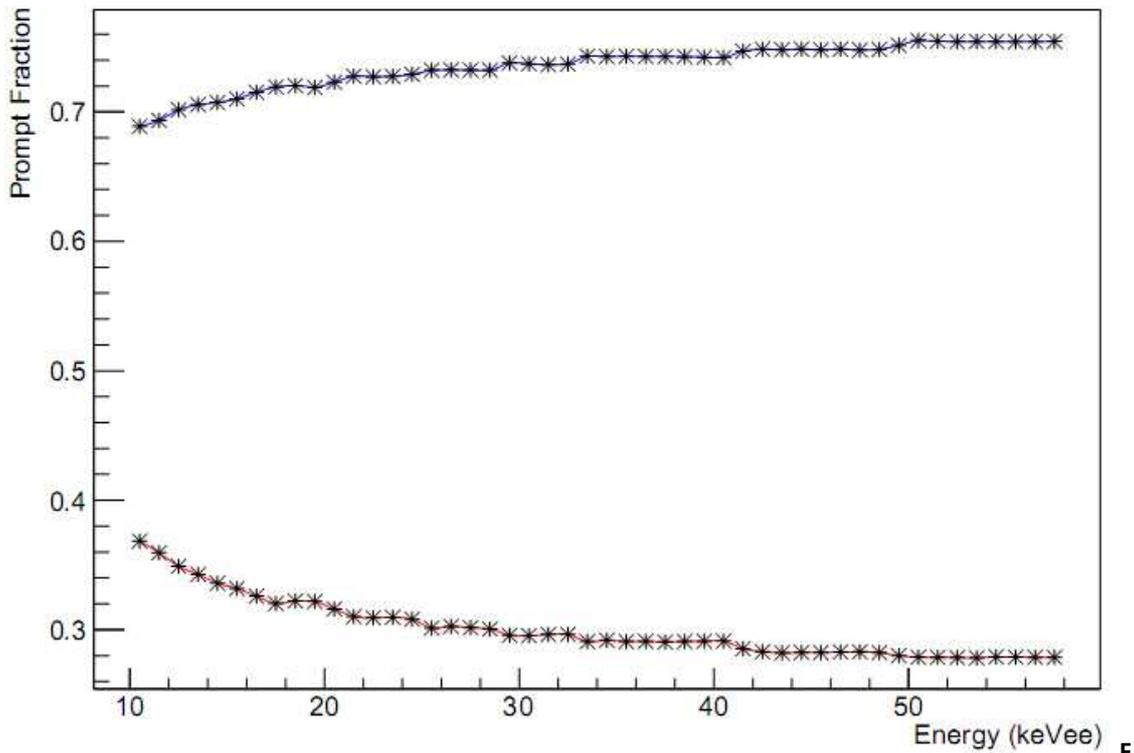


figura 3.10: rappresentazione grafica dei fp medi nel grafico prompt fraction (F90) – energia.

Si dimostra in letteratura che ciascuna delle distribuzione per ogni sezione trasversale segue un andamento descritto dalla seguente formula:

$$g_{f_p}(x) = \frac{\sigma_i^2 \mu_p x + \sigma_p^2 \mu_l (1-x)}{\sqrt{2\pi}(\sigma_i^2 x^2 + \sigma_p^2 (1-x)^2)^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(\mu_l x - \mu_p (1-x))^2}{2(\sigma_i^2 x^2 + \sigma_p^2 (1-x)^2)} \right]$$

$$\mu_p = f_p \mu_{tot}$$

$$\mu_l = (1 - f_p) \mu_{tot}$$

$$\sigma_p^2 = \mu_p + (0.3 * \sqrt{\mu_p})^2 + (0.5)^2$$

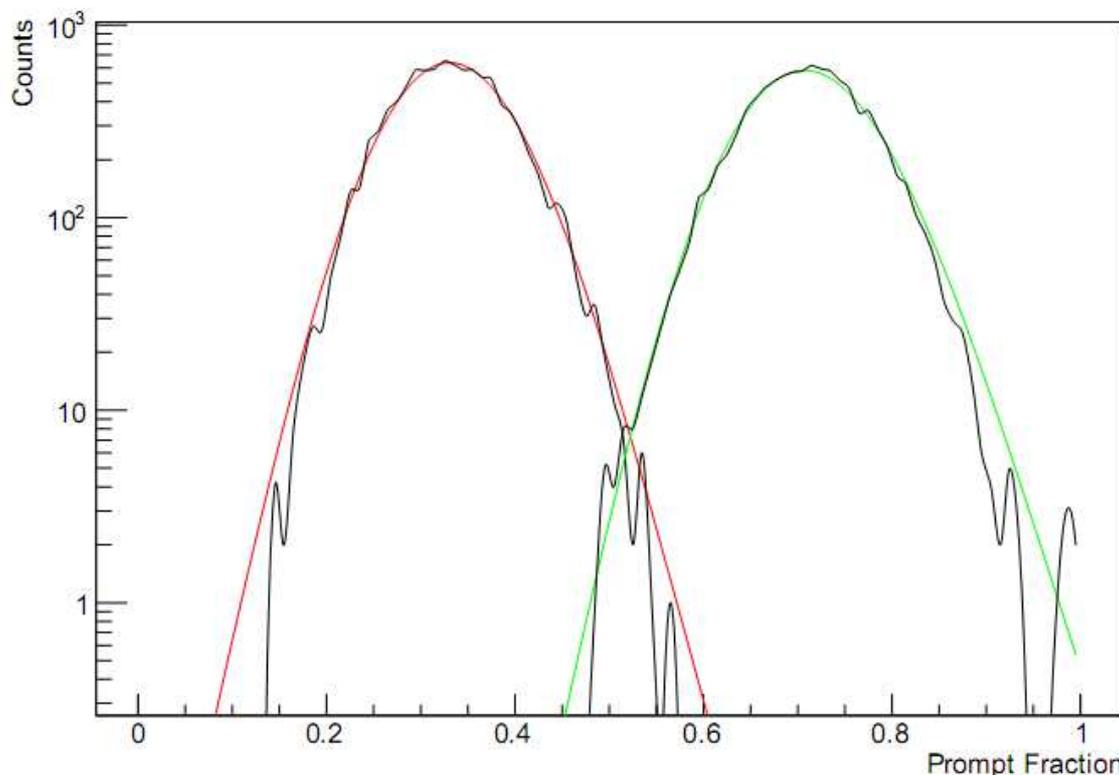
$$\sigma_l^2 = \mu_l + (0.3 * \sqrt{\mu_l})^2 + (3.5)^2$$

Dove  $\mu_{tot}$  corrisponde al numero medio di fotoelettroni emessi nella sezione trasversale, ottenuto facendo il valore medio delle energie della sezione in questione e trasformandolo nel numero di fotoelettroni corrispondenti a tale valore medio. Come valore di conversione si è usato il fattore 4.85 pe/KeV trovato in letteratura.

Invece  $f_p$  corrisponde al valore medio dei rapporti F90 in precedenza calcolati. Così definiti allora  $\mu_p$  e  $\mu_l$  sono i fotoelettroni conteggiati all'interno della finestra prompt e late. Il fatto che le varianze contengono all'interno in numero medio dei fotoelettroni come primo termine è dovuto al fatto che  $\mu_p$  e  $\mu_l$  sono valori caratterizzati da una distribuzione di tipo poissoniano. Il secondo termine, invece, è dovuto al fatto che gli impulsi elettrici avevano un'ampiezza pari a circa tre volte la loro deviazione standard. Mentre l'ultimo termine è dovuto alla deviazione standard dell'impulso del rumore bianco, pari a 0.5 volte l'ampiezza media di un impulso medio nel caso della finestra prompt, mentre pari a 3.5 nella finestra late.

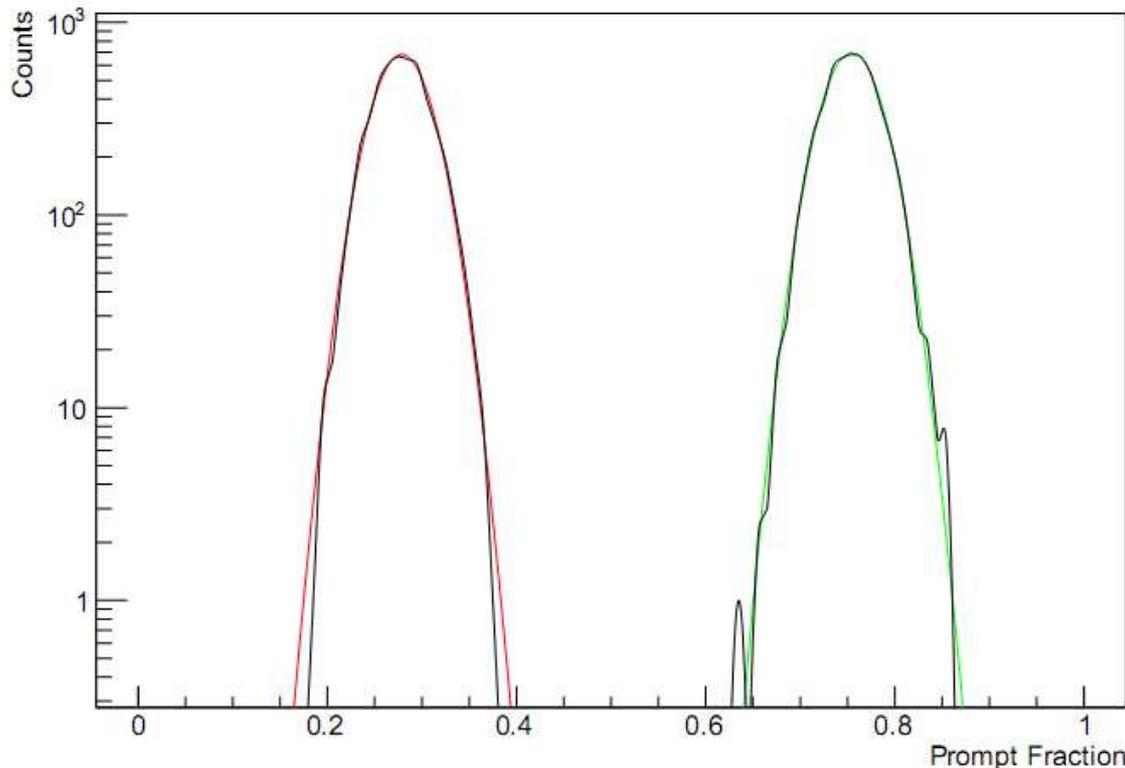
Possiamo anche verificare dal punto di vista grafico che la distribuzione reale e la distribuzione  $g_{f_p}$  si sovrappongono (attenzione che la seconda è normalizzata mentre la prima no). Se questa condizione viene rispettata (vedi Figura 3.11a e Figura 3.11b), allora è lecito sfruttare la distribuzione  $g_{f_p}$  al posto della distribuzione reale.

Paragone tra gfp(colorati) e dati(nero) - (15-16 keV)



**Figura 3.11a:** sezione trasversale del grafico prompt fraction (F90) – energia con sovrapposizione dei dati dei rinculi nucleari ed elettronici. In più sono ricalcate le distribuzioni non normalizzate (intervallo di energia 15 – 16 keV).

### Paragone tra gfp(colorati) e dati(nero) - (57-58 keV)



**Figura 3.11b:** sezione trasversale del grafico prompt fraction (F90) – energia con sovrapposizione dei dati dei rinculi nucleari ed elettronici. In più sono ricalcate le distribuzioni non normalizzate (intervallo di energia 57 – 58 keV).

Siccome le distribuzioni ricalcano in modo abbastanza fedele i dati simulati, possiamo sfruttare le distribuzioni  $g_{f_p}$  al posto dei dati simulati.

A questo punto ci è permesso calcolare l'ERC (Electronic Recoil Contamination).

$$ERC = \int_{\eta}^1 g_{f_{pe}}(x) dx$$

dove  $\eta$  è un valore compreso 0 e 1. Il significato che ha tale  $\eta$  sta nel fatto che nella sezione trasversale l'integrale della distribuzione  $g_{f_{pe}}$  dei rinculi elettronici sull'intervallo  $\eta$  e 1 (cioè l'ERC che per definizione è compreso tra 0 e 1) corrisponde alla probabilità che una scintillazione dovuta a rinculo elettronico possa essere confusa come rinculo nucleare. Questa probabilità è messa a paragone con l'integrale della distribuzione  $g_{f_{pn}}$  dei rinculi nucleare sull'intervallo  $\eta$  e 1 corrispondente al rapporto tra rinculi nucleari accettati e quelli totali (stiamo sempre lavorando all'interno di una singola sezione trasversale).

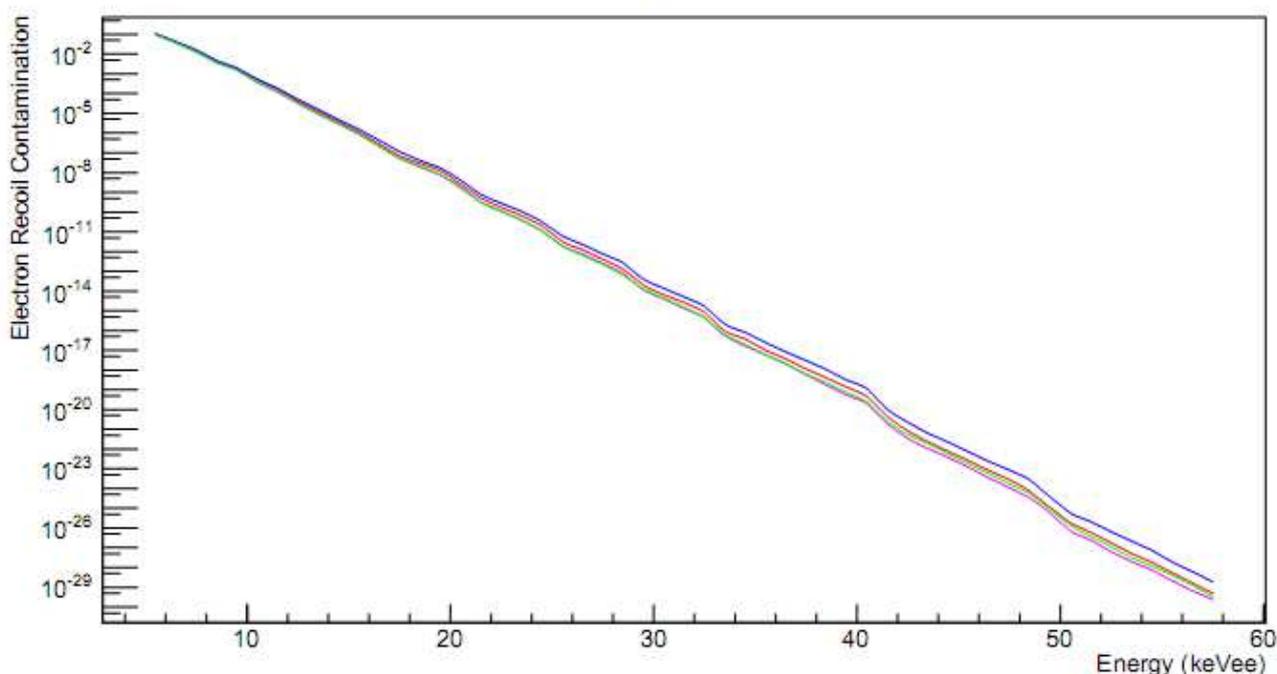
Per fare un esempio, nel caso in cui volessimo accettare solo il 50% dei rinculi nucleari all'interno di una sezione trasversale, allora avremo un ERC definito nel seguente modo:

$$ERC = \int_{f_{pn}}^1 g_{f_{pe}}(x) dx$$

in quanto  $f_{pn}$  si trova al centro della distribuzione  $g_{f_{pn}}$  relativa ai rinculi nucleare per definizione di  $g_{f_{pn}}$ . È evidente che più ampliamo l'intervallo di integrazione (cioè più avviciniamo  $\eta$  a zero) più la contaminazione da parte dei rinculi elettronici aumenta. in questo caso abbiamo scelto di accettare solo il 50% dei rinculi nucleari rivelati; quindi, abbiamo fatto i calcoli come è stato descritto nell'esempio (scelta fatta anche dalla maggior parte delle collaborazioni che si occupano di rivelazione di materia oscura).

L'intera elaborazione si basa sul fatto che il rapporto F90 sia già prossimo al migliore per un discernimento tra rinculi nucleari ed elettronici. Per esserne sicuri abbiamo fatto altre simulazioni, variando la lunghezza dell'intervallo di integrazione diverso (50ns, 70ns, 110ns). In questo modo, riproponendo il calcolo dell'ERC per ogni prompt fraction, possiamo confrontare quale è il metodo che abbia una contaminazione minore.

Grafico ERC



**Figura 3.12:** ERC dei quattro prompt fraction fatti nell'analisi: blu -> F110 ; rosso -> F90 ; fucsia -> F70 ; verde -> F50.

Alla fine possiamo osservare dalla Figura 3.12 che tutte le prompt fraction partono a basse energie da un valore relativamente alto simile per ogni caso e poi diminuiscono sempre più andando ad alte energie, allontanandosi l'uno dall'altro anche se di poco, seguendo un andamento che in scala logaritmica è abbastanza lineare. Dalle nostre analisi è emerso che la prompt fraction con ERC minore è in realtà quella fatta sui primi 70 ns ; cioè quella corrispondente al parametro F70, comunque nell'intorno dei 90 ns scelti a priori.

# CAPITOLO 4

## CONCLUSIONI

Sfruttando dati simulati basati su esperimenti precedenti, siamo riusciti ad analizzare tali simulazioni per mezzo della prompt fraction della Pulse-Shape Discrimination.

Sebbene a basse energie sono sorti alcuni problemi (come il fatto che in alcuni casi il rumore interferiva talmente tanto da generare una prompt fraction maggiore dell'unità), il fatto che ci interessavano energie abbastanza alte da ritenere tali problemi trascurabili ci ha permesso di andare avanti con l'analisi dei dati; infatti, si ritiene che le WIMPs abbiano una massa tale per cui i corrispondenti rinculi nucleari si aggirano attorno a qualche decina di keVr.

Come abbiamo osservato nella parte di analisi, è possibile fare un riconoscimento dei vari impulsi di segnale per mezzo di una prompt fraction, ma è possibile che tale discriminazione sia affetta da una certa contaminazione; in altre parole, i metodi di discernimento non hanno un'efficienza del 100%, bensì c'è la possibilità che un segnale causato da un rinculo elettronico sia invece identificato come rinculo nucleare. Esiste anche la possibilità del contrario, ma questo caso non è stato trattato, siccome ci interessa riconoscere i rinculi nucleari.

I risultati, descritti in questa tesi, basati su dati simulati, indicano che l'argon ha ottime proprietà di reiezione di eventi di fondo tramite la Pulse-Shape Discrimination. Poiché queste proprietà variano con l'energia, le caratteristiche a bassa energia della Pulse Shape Discrimination determinano la soglia inferiore a cui il rivelatore può essere impiegato, al di sotto della quale la contaminazione di eventi elettronici nella zona di accettazione delle WIMP è troppo elevata. Il passo successivo sarebbe quello di coinvolgere le funzioni ERC che ci siamo calcolati con lo spettro dei segnali di contaminazione, ad esempio l'Ar-39 o anche i  $\gamma$  dal fondo dei materiali, per determinare la contaminazione complessiva di segnali  $\beta/\gamma$  nella zona di studio delle WIMPs. In altri termini la PSD svolge un ruolo cruciale nel determinare la sensibilità ultima alle WIMPs in un rivelatore ad argon.

In DarkSide-50 questa tecnica verrà applicata, scegliendo anche una soglia opportuna, con l'obiettivo di raggiungere un fondo ridottissimo di solo 0.1 eventi di contaminazione in 3 anni di presa dati.

# BIBLIOGRAFIA

- *Stefano Sello – Universo sconosciuto: l’Energia oscura – Phasar Edizioni*
- *Jaan Einasto – Dark Matter – arXiv:0901.0632v2*
- *Pat Scott – Search for Particle Dark Matter –arXiv:1110.2757v1*
- *R. W. Schnee – Introduction to Dark Matter Experiments - Physics of the Large and the Small: TASI 2009 . Csaba Csaki & Scott Dodelson editors . World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2011, pp. 775-829*
- *DarkSide collaboration - DarkSide-50 and CTF-RD proposal*
- *W. H. Lippincott, K. J. Coakley, D. Gastler, A. Hime, E. Kearns, D. N. McKinsey, J. A. Nikkel, L. C. Stonehill – Scintillation time dependence and pulse shape discrimination in liquid argon - Physical Review C, vol. 78, id. 035801 (2008)*
- *M.G. Boulay, B. Cai, M. Chen, V.V. Golovko, P. Harvey, R. Mathew, J.J. Lidgard, A.B. McDonald, P.Pasuthip, T.Pollmann, P. Skensved - Measurement of the scintillation time spectra and pulse-shape discrimination of low-energy beta and nuclear recoils in liquid argon with DEAP-1 - arXiv0904.2930.v1*
- *Sören, Jetter; Dan, Dwyer; Jiang, Wen-Qi; Liu, Da-Wei; Wang, Yi-Fang; Wang, Zhi-Min; Wen, Liang-Jian - PMT waveform modeling at the Daya Bay experiment - Chinese Physics C, Volume 36, pp. 733-741 (2012)*
- *G. Ranucci, A. Coretti, P. Lombardi – Pulse-Shape Discrimination of liquid scintillator – Nuclear instruments and methods in Physics research A412, 374-386 (1998)*
- *J.J. Lidgard – Pulse Shape Discrimination Studies in Liquid Argon for the Deap-1 Detector – Master thesis Queen’s University, Kingston, Canada (2008)*