

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Corso di Laurea in Fisica

# Simulazione Monte Carlo del Muon Veto dell'esperimento XENON1T

Relatore:  
Prof.ssa Gabriella Sartorelli

Presentata da:  
Paolo Girotti

Correlatore:  
Dott. Marco Selvi

Sessione II  
Anno Accademico 2015/2016



*A Martina,  
grazie di tutto*



# Abstract

Numerose osservazioni astrofisiche e cosmologiche compiute a partire dagli anni '30 confermano che circa il 26% dell'Universo è costituito da materia oscura. Tale materia ha la particolarità di interagire solo gravitazionalmente e, forse, debolmente: essa si presenta massiva e neutra. Tra le numerose ipotesi avanzate riguardanti la natura della materia oscura una delle più accreditate è quella delle WIMP (*Weakly Interacting Massive Particle*).

Il progetto all'avanguardia nella ricerca diretta delle WIMP è XENON presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS). Tale esperimento è basato sulla diffusione elastica delle particelle ricercate su nuclei di Xenon: il rivelatore utilizzato è una TPC a doppia fase (liquido-gas). La rivelazione diretta di materia oscura prevede l'impiego di un rivelatore molto grande, a causa della piccola probabilità di interazione, e di ambienti a bassa radioattività naturale, per ridurre al minimo il rumore di fondo.

Risulta necessario inoltre l'utilizzo di uno schermo attivo che individui particelle di alta energia, in particolare muoni cosmici, che possono produrre falsi segnali. È stato realizzato a tale scopo un sistema di *Muon Veto* composto da un grande cilindro d'acqua posto attorno alla TPC, equipaggiato con 84 fotorivelatori atti ad osservare i fotoni ottici emessi per effetto Čerenkov dai raggi cosmici.

Il presente lavoro di tesi si colloca nell'ambito di un programma di simulazione Monte Carlo, creato per realizzare virtualmente l'esperimento XENON1T e per effettuare studi preliminari. Lo scopo di tale lavoro è stato quello di contribuire alla scrittura e alla verifica del codice di simulazione e allo studio di eventi di muoni cosmici da esso generati. L'analisi dati è stata effettuata scrivendo un programma in C++ in grado di analizzare i risultati forniti dal simulatore e di generare degli Event Display statici e dinamici per una visualizzazione efficace degli eventi.



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>7</b>
<b>1 Materia Oscura ed Esperimento XENON</b>	<b>10</b>
1.1 Evidenze Sperimentali . . . . .	10
1.1.1 Materia Oscura nelle Galassie . . . . .	10
1.1.2 Ammassi di Galassie . . . . .	12
1.1.3 Lensing Gravitazionale . . . . .	12
1.1.4 Bullet Cluster . . . . .	13
1.1.5 Radiazione Cosmica di Fondo . . . . .	14
1.2 Evidenze Cosmologiche . . . . .	16
1.3 Ipotesi sulla Natura della Materia Oscura . . . . .	17
1.3.1 MACHO . . . . .	18
1.3.2 WIMP . . . . .	19
1.3.3 MOND . . . . .	20
1.4 Rivelazione della Materia Oscura . . . . .	21
1.4.1 Rivelazione Indiretta . . . . .	21
1.4.2 Rivelazione Diretta . . . . .	21
1.5 Progetto XENON . . . . .	23
1.5.1 Perché lo Xeno? . . . . .	23
1.5.2 Time Projection Chamber . . . . .	24
1.5.3 Fasi del Progetto XENON . . . . .	27
1.5.4 XENON1T e XENONnT . . . . .	28
<b>2 Il programma di simulazione Montecarlo</b>	<b>29</b>
2.1 Costruzione esperimento . . . . .	29
2.1.1 Il programma . . . . .	30
2.1.2 Water Tank . . . . .	30
2.1.3 Posizionamento dei fotomoltiplicatori . . . . .	31
2.1.4 Costruzione galleria . . . . .	32
2.2 Generazione muoni . . . . .	37

<b>3 Programma di analisi dati</b>	<b>41</b>
3.1 Struttura dei dati . . . . .	42
3.2 Risultati . . . . .	42
3.3 Display di un evento . . . . .	43
3.4 Timelapse cumulativo . . . . .	45
3.5 Timelapse ad intervalli . . . . .	46
3.6 Mappa di riempimento PMT . . . . .	47
3.7 Simulazione completa degli eventi di muone cosmico . . . . .	49
<b>Conclusioni</b>	<b>52</b>
<b>A Soluzione analitica per un'ellisse vincolata</b>	<b>57</b>
<b>B Analyzer.h</b>	<b>59</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>60</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>61</b>



# Introduzione

Ci sono diverse osservazioni astronomiche e cosmologiche che indicano che la materia ordinaria è componente minoritaria dell'Universo. Le più recenti osservazioni da parte del satellite Planck delinano un Universo composto approssimativamente per il 68.3% da energia oscura, per il 26.8% da materia oscura e per il 4.9% da materia ordinaria.

La materia oscura non interagisce elettromagneticamente, ma solo gravitazionalmente e, forse, anche tramite interazione debole. La sua esistenza è confermata da numerose prove di natura astronomica e cosmologica come l'anormale rotazione delle galassie, le anisotropie della radiazione cosmica di fondo o la distribuzione delle masse di oggetti cosmici tramite lensing gravitazionale. Sono numerose le ipotesi riguardo alla sua natura: il principale candidato del costituente della materia oscura è da ricercarsi nelle teorie oltre il Modello Standard in quel tipo di particella definita WIMP (*Weakly Interacting Massive Particle*). Tale particella è ipotizzata in teorie quali la Supersimmetria, secondo cui ad ogni fermione del Modello Standard corrisponde un partner supersimmetrico bosonico e viceversa. Accanto a tali teorie è ipotizzata anche la possibilità che la materia oscura sia composta da strutture estese poco luminose non visibili dalla Terra (MACHO). Inoltre è idea di alcuni fisici teorici che la materia oscura non esista, bensì che sia necessario revisionare la gravitazione come è conosciuta oggi universalmente, un tentativo interessante è fatto nella teoria MOND.

Le tecniche di rivelazione della materia oscura possono essere di tipo indiretto o diretto. La rivelazione indiretta si basa sull'interazione della materia oscura con essa stessa e quindi sull'osservazione dei prodotti di annichilazione delle WIMP. La rivelazione diretta si basa invece sull'osservazione delle interazioni delle WIMP con la materia ordinaria (es. nuclei atomici). Data la natura stessa della materia oscura le tecniche di rivelazione diretta richiedono l'utilizzo di grandi rivelatori di materiali ultrapuri e situati in ambienti a bassissima radioattività e ben schermati (i candidati ideali sono i laboratori sotterranei).

Uno dei progetti di rivelazione diretta della materia oscura all'avanguardia nel proprio settore è XENON presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Questo esperimento si propone di rivelare in modo diretto le WIMP mediante la loro diffusione elastica su nuclei di Xenon liquido. Il rivelatore, cuore centrale dell'esperimento, è una Time Projection Chamber (TPC) a doppia fase che permette la ricostruzione spaziale dell'evento.

Tale rivelatore sfrutta un doppio segnale per ricostruire la posizione spaziale dell'evento e per distinguere gli eventi riconducibili a collisioni di WIMP da quelli riconducibili a collisioni elettroniche o a raggi  $\gamma$ . Il doppio segnale è dovuto alla natura del rivelatore di tipo TPC il cui segnale non solo è di luce, bensì anche di carica.

L'esperimento XENON ebbe inizio nel 2002 con XENON10: la TPC era riempita con 25 kg di Xenon e dopo un run di circa 60 giorni permise di stabilire un limite inferiore per la sezione d'urto per scattering elastico WIMP-nucleo, indipendente dallo spin. La successiva fase, attivata nel 2008 ed attualmente in funzione, prese il nome di XENON100 poiché sfrutta 161 kg di Xenon: ad oggi ha permesso di indicare come limite inferiore per la sezione d'urto elastico di WIMP di 55 GeV su nuclei  $1 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$  per interazioni indipendenti dallo spin. La fase successiva dell'esperimento è XENON1T attualmente in funzione presso la sala B dei LNGS: questo rivelatore è costituito da 3300 kg di Xenon con una massa fiduciale di circa 1000 kg. Per migliorare di due ordini di grandezza la sensibilità del rivelatore portando il precedente limite a  $1.6 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$  è necessario ridurre al minimo il fondo: per tale motivo XENON1T è provvisto di un sistema di veto di muoni oltre che una selezione estremamente accurata dei materiali utilizzati per la costruzione.

Il presente lavoro di tesi si colloca nell'ambito dello sviluppo di un programma di simulazione Monte Carlo, creato per realizzare virtualmente l'esperimento XENON1T e per effettuare studi preliminari. Lo scopo di tale lavoro è stato quello di contribuire alla scrittura del codice e allo studio di eventi di muoni cosmici mediante l'utilizzo di tale simulatore. In particolare, sono stati studiati eventi a bassa energia di muoni verticali ed eventi ad alta energia di muoni realistici. L'analisi dati è stata effettuata scrivendo un programma C++ in grado di analizzare i rootfile forniti dal simulatore e di generare degli Event Display statici e animati per una visualizzazione pratica degli eventi.

Nel primo capitolo sono riportate le evidenze astronomiche e cosmologiche in sostegno all'ipotesi dell'esistenza della materia oscura, le principali ipotesi riguardanti la natura della materia oscura e le ipotesi alternative. In seguito sono descritte le diverse tecniche di rivelazione della materia oscura a cui segue una descrizione maggiormente dettagliata dell'esperimento XENON di cui si illustra il principio di funzionamento.

Nel secondo capitolo è descritta la struttura e il funzionamento del programma di simulazione Montecarlo e il contributo fornito al codice. La prima parte è riguardante il controllo generale delle dimensioni e posizioni dei componenti del sistema di Muon Veto e il procedimento effettuato per la costruzione della galleria circostante l'esperimento. La seconda parte tratta di una nuova funzione implementata che permette la simulazione di eventi di muoni realistici.

Nel terzo capitolo è descritto il programma di analisi dati da me scritto, illustrando le sue funzionalità e mostrando i grafici e risultati ottenuti dallo studio della risposta del Muon Veto sugli eventi dei muoni verticali e di quelli realistici.

# Capitolo 1

## Materia Oscura ed Esperimento XENON

Sono numerosi gli indizi che portano alla necessità di aggiungere alla materia visibile la presenza di *Materia Oscura* che, a differenza della prima, non interagisce elettromagneticamente ed è quindi non visibile.

In questo primo capitolo sono presentate le principali evidenze della presenza di materia oscura nell'Universo e le teorie avanzate riguardanti la sua natura.

Inoltre sono presentate le diverse metodologie di rivelazione della materia oscura con particolare attenzione all'esperimento XENON presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS).

### 1.1 Evidenze Sperimentali

Poiché la materia oscura non è osservabile per definizione, la sua presenza può essere rivelata solamente per i suoi effetti gravitazionali. Le principali evidenze della sua esistenza provengono infatti dallo studio di effetti gravitazionali a livello astronomico, inspiegabili con la sola materia visibile.

#### 1.1.1 Materia Oscura nelle Galassie

Dalla teoria newtoniana è possibile determinare la velocità di rotazione delle stelle in una galassia a spirale eguagliando la forza centripeta a quella di attrazione gravitazionale [1]

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

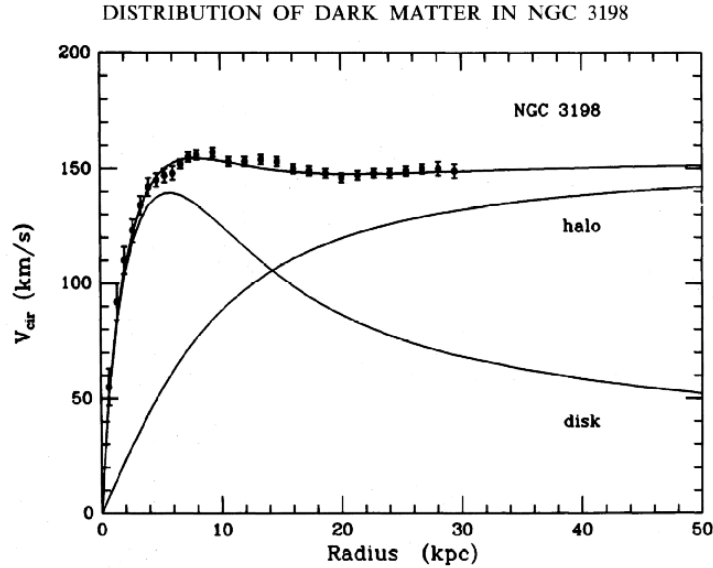


Figura 1.1: *Curva di rotazione della galassia NGC3198. Per grandi valori di  $r$  il contributo dell'alone di materia oscura mantiene la velocità di rotazione delle stelle approssimativamente costante in contrasto con quanto accadrebbe altrimenti per la sola materia visibile.*

La massa si ottiene integrando la densità nella sfera con centro sul centro della galassia e di raggio  $r$

$$M(r) = 4\pi \int_0^r \rho(x)x^2 dx \quad (1.2)$$

dove  $\rho(x)$  è la densità di materia visibile della galassia.

Poiché la massa della galassia si concentra principalmente nel suo centro si ottiene un andamento della velocità

$$v(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (1.3)$$

previsto dalla teoria newtoniana.

Le osservazioni sperimentali (Fig. 1.1) mostrano un andamento quasi costante della velocità a grandi distanze, in netto contrasto con quanto previsto dalla teoria classica. Tali osservazioni si basano, ad esempio, sull'effetto Doppler degli spettri stellari delle stelle più esterne. M. Roberts, R. Whitehurst e T. R. Cram [2] usando la riga di emissione dell'idrogeno neutro a  $\lambda = 21$  cm determinarono che la velocità delle stelle della galassia M31 si manteneva praticamente costante a  $v \approx 230$  km/s fino a distanze  $r \approx 30$  kpc.

Una possibile spiegazione di quanto osservato è la presenza di un alone non visibile ma di

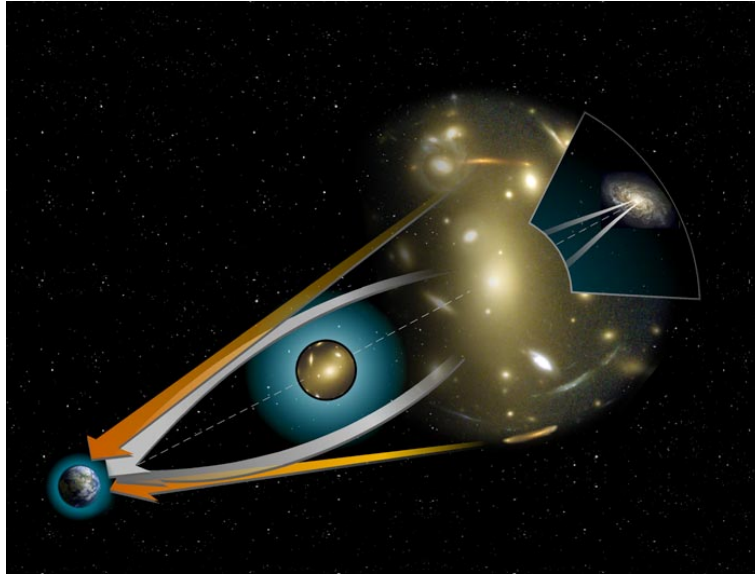


Figura 1.2: *Rappresentazione grafica del lensing gravitazionale (destra) ed esempio del lensing dovuto all'ammasso Abel 2218 (sinistra).*

massa proporzionale alla distanza  $M(r) \propto r$  costituito da materia oscura che si concentra principalmente sugli estremi della galassia.

### 1.1.2 Ammassi di Galassie

Un ammasso di galassie è una struttura di almeno 50 galassie legate gravitazionalmente che si muovono attorno ad un centro di massa comune. Negli anni '30 l'astronomo svizzero F. Zwicky teorizzò la presenza di materia oscura studiando l'ammasso della Chioma di Berenice: tale ammasso, sebbene stabile dalle osservazioni, risultava infatti essere gravitazionalmente instabile in quanto la velocità delle galassie misurata era maggiore della velocità di fuga, portando ad un contrasto tra quanto osservato e quanto misurato.

Dai dati ottenuti Zwicky concluse che la massa determinata dalla dinamica dell'ammasso corrispondeva a  $\sim 400$  volte la massa osservabile [3]. Tale osservazione portò alla prima ipotesi dell'esistenza di materia non visibile ma in grado di interagire gravitazionalmente.

### 1.1.3 Lensing Gravitazionale

La teoria della Relatività Generale di Einstein prevede che la luce segua esclusivamente le geodetiche della metrica spazio-temporale [4]. La presenza di una massa modifica la metrica e conseguentemente il cammino seguito dalla luce varia in prossimità di una

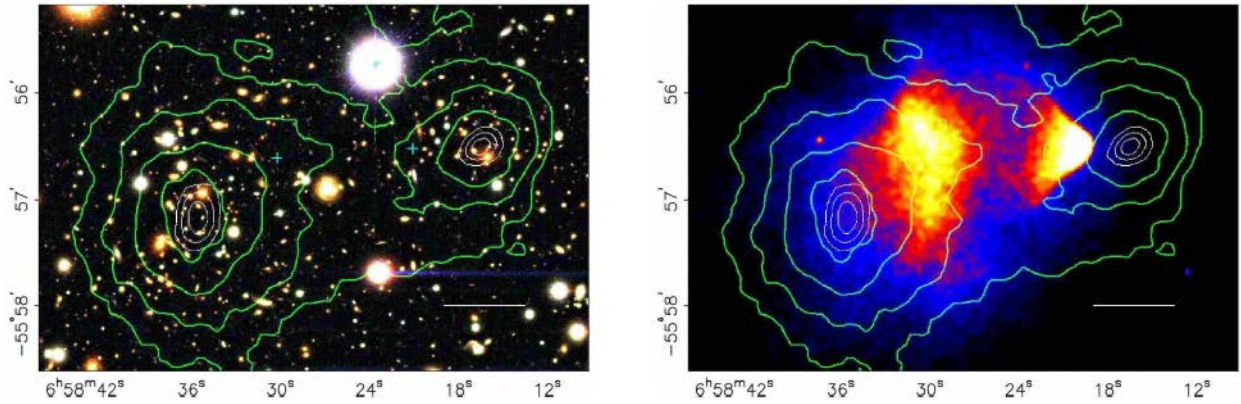


Figura 1.3: *Bullet cluster* appartenente all'ammasso 1E 0657-558. Le curve in verde rappresentano il profilo di potenziale gravitazionale per diversi livelli di confidenza: 68%, 95.5% e 99.7%.

massa: tale fenomeno è alla base del lensing gravitazionale. Questo effetto è spesso utilizzato in astronomia per determinare l'intensità dei campi gravitazionali di galassie o ammassi di galassie.

Valutando l'intensità della deflessione della luce da parte della struttura in esame è possibile determinarne la massa gravitazionale. Il confronto tra la massa determinata dal lensing gravitazionale con quella calcolata attraverso la luminosità porta in diversi casi alla necessità di introdurre una componente massiva non visibile come la materia oscura. Sfruttando il lensing gravitazionale sono stati determinati i profili di potenziale gravitazionale del bullet cluster in Fig. 1.3 e paragrafo 1.1.4.

### 1.1.4 Bullet Cluster

Si definisce *bullet cluster* l'urto di un subammasso di galassie di piccole dimensioni contro un subammasso più grande: tale nome deriva dalla forma del sistema simile a quella di un proiettile sparato contro un bersaglio. Durante l'urto, mentre le galassie sono solamente rallentate in maniera trascurabile dall'attrazione gravitazionale delle vicine, il gas intergalattico interagisce elettromagneticamente emettendo raggi X e rallentando così la propria corsa.

L'osservazione del bullet cluster appartenente all'ammasso 1E 0657-558 (Fig. 1.3) costituisce una delle principali prove dell'esistenza della materia oscura [5]: dal rilevamento dei raggi X prodotti dal gas si osserva una distribuzione della massa diversa da quella osservata per mezzo del lensing gravitazionale. Questa discrepanza può essere spiegata introducendo la presenza di materia non osservabile e non interagente elettromagneti-

camente, caratteristiche riconducibili alla materia oscura. Tale separazione è ricondotta al diverso tipo di interazione del gas e della materia oscura: mentre il primo interagisce elettromagneticamente, la seconda interagisce solo gravitazionalmente e risente quindi di una minore forza frenante che le permette di allontanarsi maggiormente.

### 1.1.5 Radiazione Cosmica di Fondo

La radiazione cosmica di fondo (CMB, *Cosmic Microwave Background*) permea l'Universo ed è caratterizzata dall'essere fortemente isotropa: la sua presenza è una delle principali prove a supporto della teoria del Big Bang secondo la quale l'Universo ebbe inizio da una singolarità ad altissima densità di energia. Tale radiazione corrisponde ad una temperatura media di  $\sim 2.7 K$  [6]. La sonda Planck dell'agenzia spaziale ESA ha osservato tra il 2009 e il 2013 il CMB fornendone la mappatura più dettagliata finora disponibile riconoscendo differenze nell'ordine del decimo di  $\mu K$ . Le anisotropie evidenziate da Planck ( $\Delta T \sim 50 \mu K$ ) rappresentano una delle principali prove a favore dell'esistenza della materia oscura. Tali anisotropie possono essere scomposte in armoniche sferiche [7] ed è possibile valutarne il contributo per singolo multipolo (all'armonica di grado  $l$  corrisponde un multipolo di momento  $l$ ): dalle fluttuazioni del CMB si ricava uno spettro (Fig. 1.4) in totale analogia con la scomposizione dei segnali sfruttando la serie di Fourier.

Nella fase antecedente al disaccoppiamento radiazione-materia le fluttuazioni quantistiche hanno permesso alla materia di distribuirsi uniformemente con piccole variazioni di densità. Le anisotropie osservate sono dovute al differente comportamento della materia oscura e luminosa. Mentre la materia oscura risente esclusivamente dell'attrazione gravitazionale e si comprime, la materia luminosa risente anche della pressione di radiazione elettromagnetica che si oppone all'attrazione gravitazionale. La materia oscura, continuando a comprimersi, forma buche di potenziale gravitazionale di cui risente anche la materia non oscura: quest'ultima è attratta nella buca di potenziale contribuendo ulteriormente con la sua massa alla profondità. L'azione della pressione di radiazione combinata all'attrazione gravitazionale porta a fluttuazioni simili a quelle di un oscillatore armonico [8]: tali oscillazioni della materia visibile causano fluttuazioni della temperatura (comprimendosi aumenta, espandendosi diminuisce). Le fluttuazioni che si osservano (Fig. 1.5) sono quindi dovute alla presenza di buche di potenziale dove si concentra sia massa luminosa che oscura portando quindi a fluttuazioni della temperatura del CMB: laddove la materia è più densa la temperatura è più alta.

Un fit ai dati sperimentali ottenuti da Planck comporta la necessità di introdurre una quantità di materia oscura nell'Universo pari al 26.8%.

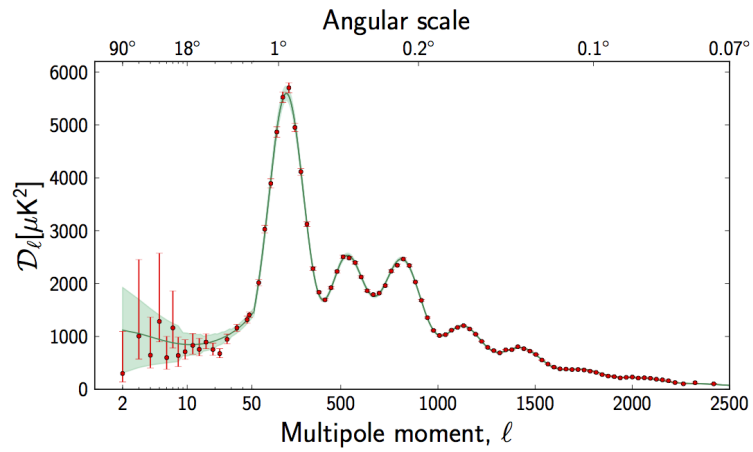


Figura 1.4: *Spettro delle anisotropie della CMB in funzione del momento di dipolo ottenute con il satellite Planck.*

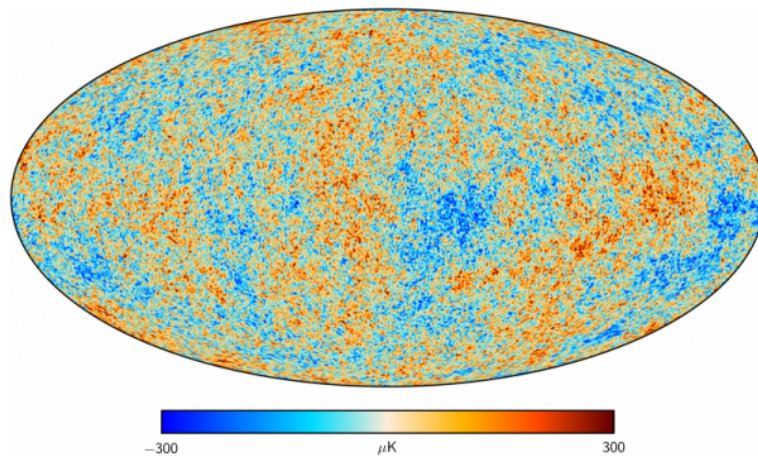


Figura 1.5: *Mappa della radiazione cosmica di fondo (CMB) ottenuta con il satellite Planck (2013).*



## 1.2 Evidenze Cosmologiche

In accordo con la teoria della Relatività Generale di Einstein [4] è possibile definire un campo gravitazionale a partire dalla metrica spazio-tempo  $g_{\mu\nu}$  data dall'equazione di campo

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G_N}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (1.4)$$

dove è necessario ricondursi alla ben nota legge di gravitazione di Newton per approssimazione di campo debole non relativistico. Dal momento che è necessario descrivere l'Universo in evoluzione non si ha più a disposizione un vettore di Killing temporale in quanto la metrica necessariamente deve cambiare con il passare del tempo. Considerando la sola omogeneità e isotropia dell'Universo si ottiene la metrica Friedmann-Robertson-Walker (FRW)

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1 - kr} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right] \quad (1.5)$$

dove  $k$  è una costante e  $a(t)$  è un fattore di scala. Sostituendo questa metrica nell'equazione di campo di Einstein si ottengono le due equazioni di Friedmann di cui si riportano solo le conclusioni: si definisce costante di Hubble  $H = \frac{\dot{a}}{a}$ , sebbene non sia necessariamente una costante. Definendo il parametro di densità  $\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$  con la densità critica  $\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G_N}$  si riscrivono le equazioni di Friedmann come

$$\Omega - 1 = \frac{k}{H^2 a^2} \quad (1.6)$$

da cui si ottengono tre possibili scenari:

- $\rho < \rho_c \Leftrightarrow \Omega < 1 \Leftrightarrow k = -1 \Leftrightarrow$  Universo aperto
- $\rho = \rho_c \Leftrightarrow \Omega = 1 \Leftrightarrow k = 0 \Leftrightarrow$  Universo piatto
- $\rho > \rho_c \Leftrightarrow \Omega > 1 \Leftrightarrow k = +1 \Leftrightarrow$  Universo chiuso

Queste tre possibilità portano a differenti ipotesi di evoluzione dell'Universo: un Universo aperto è in continua espansione, un Universo piatto, pur essendo anch'esso in continua espansione, a causa della maggiore densità rallenta la sua espansione fino ad essere in una condizione praticamente stazionaria. Infine un Universo chiuso ha una densità tale da contrastare l'espansione: questo comporta un'inversione dell'espansione in contrazione fino ad avere un evento opposto al Big Bang definito Big Crunch. Il Big Crunch è il collasso dell'Universo in una singolarità del tutto analoga a quella da cui ha avuto origine.

Osservazioni anche recenti come la CMB suggeriscono che il nostro Universo sia in una condizione di piattezza, cioè  $\Omega = 1$ . Dai dati ottenuti dalla sonda Planck nello studio

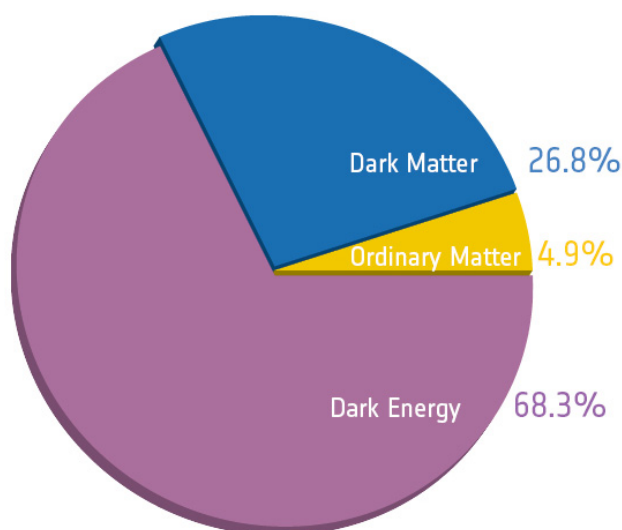


Figura 1.6: *Composizione dell'Universo in accordo con i dati ottenuti dal satellite Planck (2013).*

della radiazione cosmica di fondo si è osservata una suddivisione dei contributi a tale parametro così fatta: 4.9% di materia ordinaria barionica, 26.8% di materia oscura (prevalentemente CDM) e il restante 68.3% di energia oscura.

Tali conclusioni sono in accordo con il modello cosmologico  $\Lambda$ CDM per cui l'Universo è composto in prevalenza da energia oscura, introdotta dall'uso della costante cosmologica, e da materia oscura fredda di cui si tratterà in maniera più approfondita nel paragrafo successivo.

### 1.3 Ipotesi sulla Natura della Materia Oscura

Sono numerose le ipotesi avanzate nell'arco degli anni sulla natura della materia oscura, ma fino ad oggi non vi sono ancora state conferme sperimentali sufficientemente attendibili [9]. Si possono immediatamente distinguere due tipi di materia oscura: barionica e non barionica. La materia oscura barionica è composta da corpi celesti massivi non sufficientemente luminosi definiti MACHO (*MAssive Compact Halo Object*). La materia oscura non barionica si suddivide in materia oscura calda (*HDM*) e fredda (*CDM*): queste sono composte rispettivamente da particelle in moto relativistico o meno e rappresentano un residuo della fase di disaccoppiamento radiazione-materia.

### 1.3.1 MACHO

La presenza di materia oscura barionica è facilmente prevedibile: l'esistenza di corpi celesti che non emettono radiazione elettromagnetica sufficientemente intensa da poter essere osservata è un dato di fatto ben noto, basti infatti pensare a corpi celesti quali i pianeti. I principali costituenti della materia oscura barionica sono i MACHO, ossia oggetti molto massivi e poco luminosi come nane brune, stelle fredde (ad esempio stelle di neutroni o nane bianche) o buchi neri primordiali formatisi immediatamente dopo il Big Bang. Gli esperimenti volti all'individuazione di questo tipo di oggetti si basano sulla tecnica di *microlensing gravitazionale*: se un MACHO si interpone fra l'osservatore e una stella può causare un apparente aumento di luminosità per un breve periodo di tempo (da pochi giorni fino ad alcuni mesi per i corpi maggiormente massivi). L'esperimento EROS (*Expérience pour la Recherche d'Objets Sombres*) a La Silla (Cile) ha tenuto sotto osservazione per 5 anni circa 30 milioni di stelle appartenenti alle Nubi di Magellano individuando in totale 8 possibili MACHO [9, 10]: i dati ricavati confermano che una frazione della materia oscura è di tipo barionico, ma sicuramente una minima parte non sufficiente a spiegare in pieno la natura della materia oscura. In Figura 1.7 è riportato un esempio di osservazione del passaggio di un oggetto MACHO con rispettivo aumento di luminosità

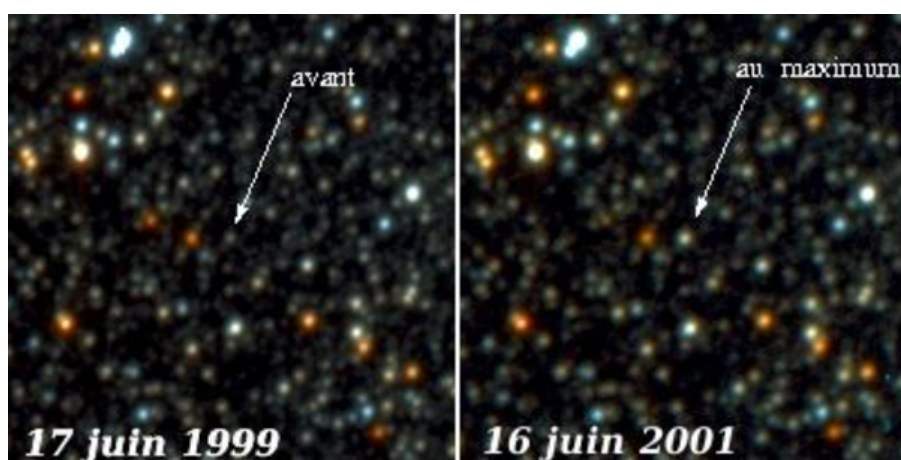


Figura 1.7: Esempio di aumento di luminosità osservato da EROS a causa del passaggio di un oggetto MACHO.

### 1.3.2 WIMP

La materia oscura non barionica è composta da particelle il cui comportamento è rimasto impresso al momento di disaccoppiamento radiazione-materia. Da questo dipende fortemente il processo di aggregazione della materia e quindi la formazione dei sistemi celesti osservati oggi. La materia oscura non barionica si suddivide in due classi [1]:

- HDM (*Hot Dark Matter*), materia poco massiva e con velocità relativistiche. I principali candidati di questo tipo sono i *neutrini fossili* originati dal Big Bang di cui ci si aspetta una densità di circa  $300 \text{ cm}^{-3}$  e una massa molto piccola ( $< 0.23 \text{ eV}$ ), quindi non sufficiente a dare conto totalmente della quantità di materia oscura stimata (cfr. 1.1.5) [11]. Questo tipo di materia determina il modello di sviluppo dell'Universo di tipo *top-down* secondo cui l'Universo come lo vediamo proviene dalla formazione dapprima di grandi strutture che si sono frammentate nel tempo per formare strutture più piccole. I tempi caratteristici di tale formazione sono però incompatibili con le osservazioni compiute.
- CDM (*Cold Dark Matter*), materia massiva di velocità non relativistica. A tale gruppo appartengono i due candidati più attendibili: gli *assioni* derivanti teoricamente dalla violazione della parità CP e potenzialmente rilevabili grazie all'effetto Primakoff, ossia la possibilità per gli assioni di convertirsi in fotoni in presenza di un intenso campo elettromagnetico. L'altro candidato sono le WIMP (*Weakly Interacting Massive Particle*) di cui sarà fornita una trattazione più esaustiva successivamente. Questo tipo di materia determina il modello *bottom-up* secondo cui le prime strutture a formarsi furono le più piccole (ammassi stellari e piccole galassie) agglomeratesi poi a formare ammassi di galassie e superammassi. Tale modello è in accordo con le osservazioni sperimentali come la presenza di ammassi non legati.

Il presente lavoro di tesi si concentra principalmente sul secondo candidato per la CDM, ossia le particelle definite generalmente con l'acronimo WIMP. Queste interagiscono solo gravitazionalmente e forse debolmente da cui le bassissime sezioni d'urto. Alcuni candidati emergono naturalmente da teorie fuori dal Modello Standard: la massa è in un range tra pochi GeV e 1 TeV.

Alcuni candidati naturali al ruolo di WIMP emergono da modelli al di là del modello Standard come ad esempio la supersimmetria (SUSY): ad ogni particella è associato un partner supersimmetrico, fermione nel caso di partner bosonico e bosone nel caso di partner fermionico. Tale teoria discende dall'idea secondo la quale ad altissime energie sparisce la differenza tra bosoni a spin intero e fermioni a spin semintero.

Nell'ambito della teoria supersimmetrica il migliore candidato per le WIMP è il più leggero neutralino  $\chi$ : in realtà è ipotizzata l'esistenza di quattro neutralini con massa  $0.1 \div 1 \text{ TeV}$ , differenti combinazioni lineari dei partner di  $\gamma$ ,  $Z$ ,  $H_1^0$  e  $H_2^0$  [12].

Dalle osservazioni dell'andamento della velocità delle stelle dell'alone galattico è possibile stimare la densità e la velocità di queste particelle nella nostra galassia come  $\rho_{WIMP} = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$  e  $\bar{v}_{WIMP} = 270 \text{ km/s}$ .

### 1.3.3 MOND

La teoria MOND (*MOdified Newtonian Dynamics*) fu proposta nel 1981 dal fisico israeliano Mordehai Milgrom: in alternativa all'esistenza della materia oscura ipotizzò la possibilità di modificare la dinamica newtoniana per accelerazioni molto basse.

Tale teoria prevede una modifica della seconda legge di Newton per scale di grandezza superiori a quelle tipiche del Sistema Solare: introducendo un'opportuna costante  $a_0 = 2 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$  è possibile spiegare l'andamento fisso della velocità delle stelle dell'alone galattico senza introdurre l'esistenza della materia oscura [13]. La seconda legge di Newton modificata diventa

$$F = ma\mu\left(\frac{a}{a_0}\right) \quad (1.7)$$

dove per piccoli valori dell'accelerazione si può effettuare l'approssimazione

$$\mu\left(\frac{a}{a_0}\right) \simeq \frac{a}{a_0}. \quad (1.8)$$

Sfruttando la seconda legge di Newton così modificata e la legge di gravitazione universale classica si può determinare l'accelerazione acquisita dalle stelle in funzione della distanza dal centro della galassia. Da tale relazione è possibile determinare l'andamento della velocità per grandi distanze (piccole accelerazioni):

$$\frac{GM}{r^2} = \frac{a^2}{a_0} \quad \rightarrow \quad a = \frac{\sqrt{GM}}{r} \quad \rightarrow \quad v = (GMa_0)^{1/4}.$$

L'andamento costante della velocità è in ottimo accordo con quanto effettivamente osservato e per tale motivo la teoria MOND rappresenta un'alternativa alla spiegazione dell'andamento della velocità di rotazione delle galassie. Questa risulta inefficace nel tentativo di spiegare fenomeni quali il bullet cluster o il lensing gravitazionale ed è quindi considerata meno attendibile dell'attuale modello cosmologico  $\Lambda$ CDM.

La teoria MOND non è l'unico tentativo compiuto di modifica della legge di gravitazione universale per evitare l'introduzione della materia oscura nel modello cosmologico, bensì fu la prima ipotesi realmente competitiva con quella della materia oscura. Negli anni successivi furono proposti modelli simili nell'ambito della relatività generale con cui il modello MOND non è in buon accordo.

## 1.4 Rivelazione della Materia Oscura

Le tecniche di rivelazione delle particelle che costituiscono la materia oscura non barionica si diversificano in base alla natura della particella ricercata. In questa trattazione ci si concentrerà esclusivamente sulle tecniche di rivelazione di WIMP: a causa della natura stessa di questo tipo di particelle la loro rivelazione è molto complicata e richiede esperimenti di altissima sensibilità. Le tecniche si dividono in due categorie: rivelazione indiretta e rivelazione diretta [14].

### 1.4.1 Rivelazione Indiretta

La rivelazione indiretta consiste nella ricerca di prodotti dell'interazione della materia oscura con essa stessa. L'osservazione di una maggiore quantità di particelle prodotte da tale interazione può indicare la presenza di processi di annichilazione di WIMP: in base al tipo di prodotti che si vogliono/possono osservare è necessario sfruttare apparati sperimentali appositi [15].

L'osservazione di radiazione gamma, di energia dell'ordine del GeV fino al TeV, deve essere compiuta esternamente all'atmosfera terrestre, ad essa opaca: questo richiede l'uso di appositi telescopi in orbita.

Neutrini e antineutrini prodotti dall'annichilazione di materia oscura all'interno di corpi massivi quali il Sole possono essere osservati con appositi telescopi, generalmente posti sotto grandi strati di ghiaccio o di acqua (ad esempio il telescopio sottomarino KM3NeT [16] a largo di Capo Passero, Sicilia o ICECUBE al Polo Sud).

Le particelle cariche prodotte dall'annichilazione possono inoltre produrre onde radio provenienti dal centro delle galassie: la rivelazione di tali onde radio può portare a misure della materia oscura solamente se si conosce la distribuzione della densità di materia oscura all'interno della galassia in esame.

Infine è di particolare rilievo l'osservazione della produzione di coppie particella-antiparticella, soprattutto  $p\bar{p}$  e  $e^-e^+$ : negli ultimi anni sono state evidenziate diverse anomalie negli spettri di carica riconducibili alla presenza di materia oscura sfruttando questo tipo di osservazioni. Gli ultimi risultati arrivano dall'esperimento AMS-02 posto sulla stazione ISS [17]. Il rilevamento di un'anormale quantità di antimateria può essere ricondotta all'annichilazione di materia oscura, ma la carica di queste particelle le rende sensibili a possibili deflessioni a causa di campi elettromagnetici galattici rendendo impossibile ricostruirne la provenienza. Tale impossibilità rende questo tipo di osservazioni non sufficienti ad affermare l'esistenza della materia oscura.

### 1.4.2 Rivelazione Diretta

La tecnica di rivelazione diretta mira ad osservare le WIMP di velocità inferiore a quella di fuga dalla Via Lattea rimaste quindi intrappolate nell'alone galattico. Tali particelle

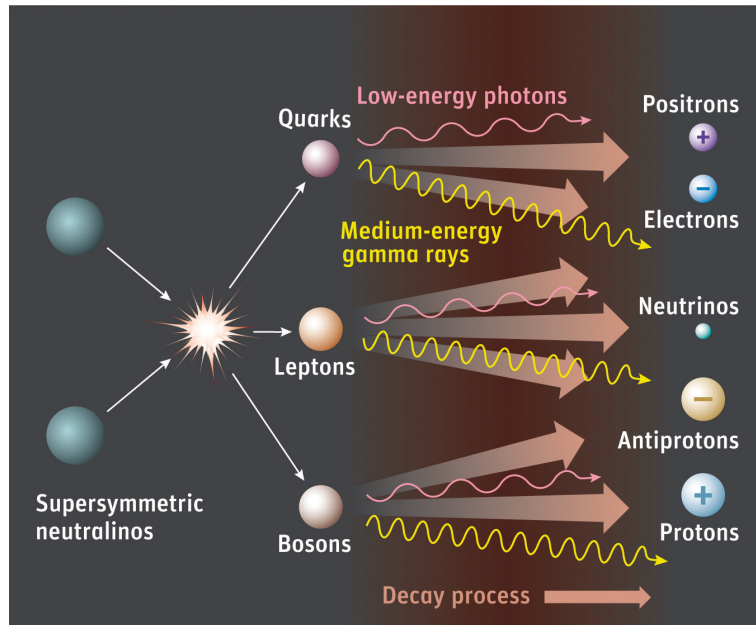


Figura 1.8: *Possibili processi di annichilazione di WIMP con produzione di particelle pesanti che decadono velocemente in raggi  $\gamma$  e coppie  $e^-e^+$ ,  $p\bar{p}$  e  $\nu\bar{\nu}$ .*

possono interagire con i nuclei della materia ordinaria per via debole e con una sezione d'urto molto piccola. Il limite superiore per tale sezione d'urto è ad oggi fissato a  $2.2 \times 10^{-46} \text{ cm}^2$  per una massa di 33 GeV (LUX [18]): le WIMP sono perfettamente in grado di attraversare corpi massivi come la Terra senza mai interagire. Le collisioni che possono avvenire tra WIMP e nucleo possono essere sia di tipo elastico sia anelastico e possono dipendere o meno dallo spin. A causa delle basse energie in gioco è necessario sfruttare strumenti ad altissima precisione in grado di rilevare segnali dell'ordine del keV.

Gli esperimenti basati su questo tipo di rivelazione devono essere compatibili con sezioni d'urto molto basse e quindi i tempi di esposizione si prolungano anche per diversi anni: secondo alcuni modelli teorici un campione di 2 kg ( $\sim 10^{25}$  atomi) interagisce con una WIMP una volta all'anno via diffusione elastica [1]. Le bassissime energie in gioco inoltre richiedono di considerare e ridurre tutte le possibili fonti di rumore come la radioattività naturale e i raggi cosmici: per schermare questi ultimi molti degli esperimenti sono situati in laboratori sotterranei. Un esempio di esperimento di rivelazione diretta di WIMP è XENON, ospitato nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) [19].

## 1.5 Progetto XENON

Il progetto XENON, iniziato nel 2002, si propone di rivelare in modo diretto le WIMP mediante la loro diffusione elastica su nuclei di Xenon utilizzato come bersaglio. Tale esperimento ha già superato diverse fasi fornendo risultati sempre più precisi: il rivelatore XENON100 ha permesso di stabilire un limite superiore per la sezione d'urto di WIMP di 55 GeV pari a  $1 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$  per collisioni elastiche indipendenti dallo spin [29]. A causa di questa bassa probabilità di interazione è necessario che i rivelatori utilizzati siano molto massivi e schermati da eventuali segnali di fondo: tale necessità ha portato alla scelta dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) come luogo per l'installazione del progetto.

I laboratori LNGS sono ideali in quanto schermati dalla radiazione cosmica dai 1400 metri di roccia sovrastante. Inoltre la radioattività naturale è migliaia di volte inferiore rispetto alla superficie a causa della minima presenza di uranio e torio nella roccia di tipo dolomitico [20].

### 1.5.1 Perché lo Xenon?

I progetti di rivelazione diretta delle WIMP si basano sull'interazione di queste particelle ancora ignote con la materia ordinaria: l'esperimento XENON sfrutta come bersaglio grandi quantità di Xenon ( $Z=54$ ) in fase liquida.

La scelta di questo elemento come bersaglio è dovuta ai diversi vantaggi che questo comporta sia per quanto riguarda l'aumento di probabilità di interazione sia per la possibilità di riduzione del rumore [21]. Dato il grande numero di massa la sezione d'urto indipendente dallo spin è maggiore rispetto ad altri gas nobili ( $\sigma \propto A^2$ ), inoltre la sua densità lo rende un elemento autoschermante.

Ad accentuare i suoi vantaggi di riduzione del rumore vi è anche il fatto che non siano presenti isotopi dello Xenon radioattivi di lunga vita media: l'unica presenza radioattiva di disturbo sono isotopi di kripton  $^{85}\text{Kr}$  da cui però può essere purificato opportunamente.

Ulteriori benefici nell'uso dello Xenon sono la sua non troppo bassa temperatura di condensazione rispetto agli altri gas nobili ( $T_C \sim 170 \text{ K}$ , per l'Argon  $T_C \sim 87 \text{ K}$ ) e la possibilità di poter studiare interazioni sia dipendenti che indipendenti dallo spin per la presenza di isotopi a spin non nullo.

Lo Xenon, inoltre, è un eccellente scintillatore ( $\sim 4.2 \cdot 10^4$  fotoni/MeV di  $\lambda \simeq 175 \text{ nm}$ ) e un ottimo mezzo da ionizzare ( $\sim 6 \cdot 10^4$  coppie/MeV): questo permette di avere segnale sia luminoso sia di carica.



## 1.5.2 Time Projection Chamber

Il nucleo dei rivelatori del progetto XENON è la TPC (*Time Projection Chamber*) a doppia fase di Xeno, liquida (LXe) e gassosa (GXe) [22, 23, 24]: è qui che avviene l'effettiva interazione tra le WIMP e lo Xeno bersaglio. Tale rivelatore di forma cilindrica contiene al suo interno Xeno liquido per la maggior parte e in contributo minore Xeno gassoso mantenuti a temperatura di condensazione. La parte più interna dello Xeno liquido costituisce il volume fiduciale, infatti la frazione più esterna ha principalmente azione schermante.

Nella base superiore della camera è presente un anodo mentre nella base inferiore un catodo: l'azione di questi (insieme a elettrodi intermedi) produce un campo elettrico uniforme all'interno della camera. In corrispondenza della superficie di separazione LXe-GXe è posta una griglia mantenuta a massa per permettere di mantenere due valori differenti del campo elettrico nello Xeno liquido e gassoso.

La TPC è infine dotata di PMT (*Photo Multiplier Tubes*) all'estremità superiore e inferiore definiti rispettivamente *top* e *bottom array*.

La particella interagente nel volume fiduciale di LXe produce fotoni di scintillazione diretta e coppie  $e^-$  - ione: parte di quest'ultime si ricombina immediatamente producendo radiazione che contribuisce alla scintillazione diretta.

Gli elettroni che non si ricombinano risentono del forte campo elettrico presente nella TPC: muovendosi con velocità di deriva questi migrano verso l'anodo. Raggiunta la superficie di separazione LXe-GXe l'intenso campo elettrico presente tra la griglia e l'anodo estrae questi elettroni accelerandoli in maniera tale da eccitare atomi di GXe generando la cosiddetta "scintillazione proporzionale".

Dal rapporto tra l'intensità del segnale di scintillazione primaria ( $S_1$ ) e proporzionale ( $S_2$ ) si può distinguere la natura del processo osservato. A parità di energia cinetica un bersaglio maggiormente massivo rincula con velocità minore di un bersaglio leggero: tale differenza si risente quindi in accordo con la teoria di Bethe-Bloch secondo cui la perdita di energia per ionizzazione è proporzionale a  $\beta^{-2}$ . Il rinculo di un nucleo massivo come quello dello Xeno produce una grande densità di ioni a cui corrisponde una maggiore ricombinazione degli elettroni liberi: questo diminuisce la probabilità di scintillazione nel GXe.

Basandosi su tale modello è possibile distinguere i segnali prodotti dal *nuclear recoil* ( $S_1$ ) dovuto all'interazione particella-nucleo dai segnali prodotti dal *electronic recoil* ( $S_2$ ) dovuto a fotoni o elettroni (Fig. 1.9). Il rapporto fra la "scintillazione proporzionale" e quella diretta nel primo caso è molto minore dello stesso rapporto nel secondo caso

$$\left(\frac{S_2}{S_1}\right)_N \ll \left(\frac{S_2}{S_1}\right)_{e^-}.$$

In questo modo nel rivelatore attualmente in funzione XENON100 è possibile eliminare il 99.75% dei segnali di natura elettronica rivelando così il 50% dei segnali di natura

nucleare riconducibili a interazioni di WIMP o neutroni.

Un'ulteriore potenzialità della TPC è la sua capacità di ricostruire nello spazio tridimensionale la posizione in cui è avvenuta l'interazione con una precisione dell'ordine del mm. La coordinata  $z$  lungo l'asse di simmetria della struttura è determinata a partire dal ritardo tra il segnale  $S_1$  e il segnale  $S_2$ . Le coordinate  $x$  e  $y$  sono invece determinate dalla distribuzione dei fotoni rilevati nei fotomoltiplicatori posti nella parete superiore e inferiore della TPC.

La ricostruzione tridimensionale del punto d'interazione permette appunto la fiducializzazione del volume del rivelatore: sono cioè considerati solamente gli eventi la cui posizione spaziale è nel volume fiduciale di Xenon.

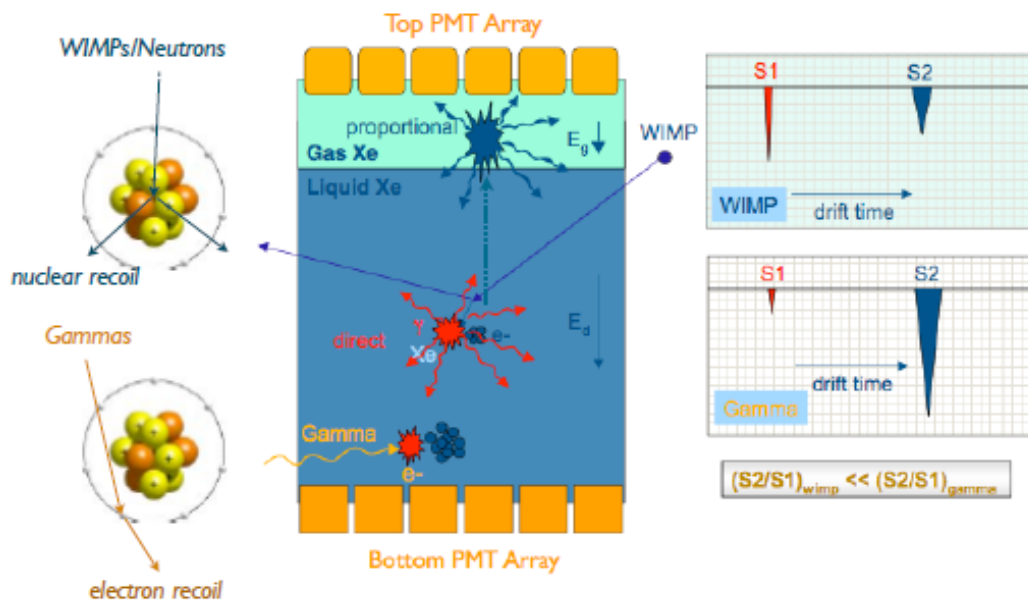


Figura 1.9: Schema della TPC a doppia fase del progetto XENON. La WIMP incidente nel LXe produce fotoni di scintillazione e di ricombinazione  $e^-$  - ione (segnale  $S_1$ ); gli elettroni liberi derivano verso l'anodo generando un secondo segnale per eccitazione degli atomi di GXe (segnale  $S_2$ ).

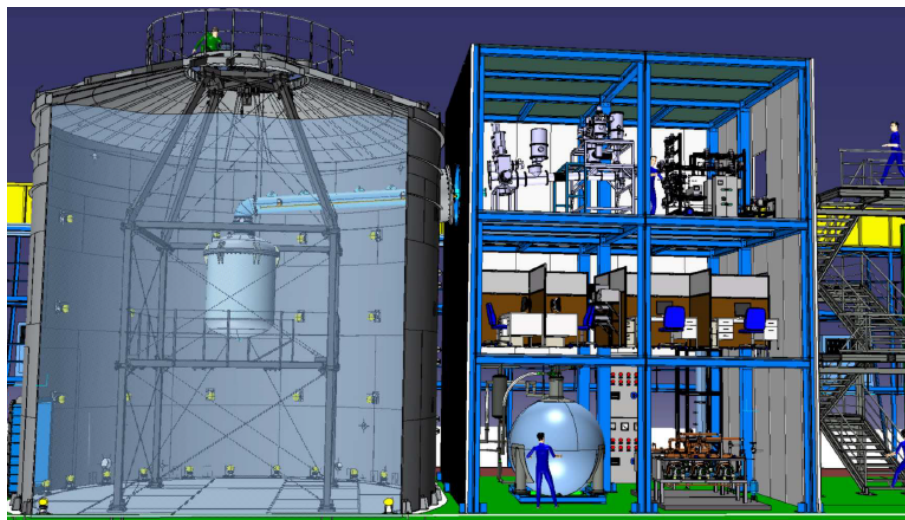


Figura 1.10: Rappresentazione del progetto XENON1T presso LNGS. Sono rappresentati anche la "water tank" e gli 84 PMT che realizzano il sistema di rivelazione del Muon Veto.

### 1.5.3 Fasi del Progetto XENON

Il progetto XENON ai LNGS è suddiviso in tre fasi, ciascuna caratterizzata da una dimensione crescente del rivelatore e quindi da una maggiore sensibilità. Il primo esperimento, XENON10, fu attivo dal 2005 al 2007 ed era caratterizzato da una TPC contenente 25 kg di Xenon di cui solo 5.4 kg fiduciali [25]. I dati acquisiti nell'arco di 58.4 giorni permisero di stabilire un limite superiore per la sezione d'urto sia dipendente sia indipendente dallo spin in funzione della massa delle WIMP al 90% del livello di confidenza. Tale limite si attesta a  $4.5 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$  per  $M_{WIMP} = 30 \text{ GeV}$  nel caso di interazione SI (*Spin Independent*) e a  $5 \times 10^{-39} \text{ cm}^2$  per uguale massa nel caso di interazione SD (*Spin Dependent*).

La fase successiva del progetto è XENON100, attivo dal 2008 e attualmente in fase di acquisizione dati: la quantità di Xenon è pari a 161 kg con una massa fiduciale di 62 kg. Questa seconda fase è caratterizzata da una riduzione del rumore di fondo di un fattore 100 rispetto a XENON10: dopo 225 giorni di run le osservazioni compiute, in accordo con il fondo aspettato, portarono ad un'ulteriore diminuzione del limite della sezione d'urto. Tale limite è attualmente pari a  $1 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$  per interazione indipendente dallo spin WIMP-nucleo con  $M_{WIMP} = 55 \text{ GeV}$ , mentre per interazioni dipendenti dallo spin è  $3.5 \times 10^{-40} \text{ cm}^2$  [29] (Fig. 1.11).

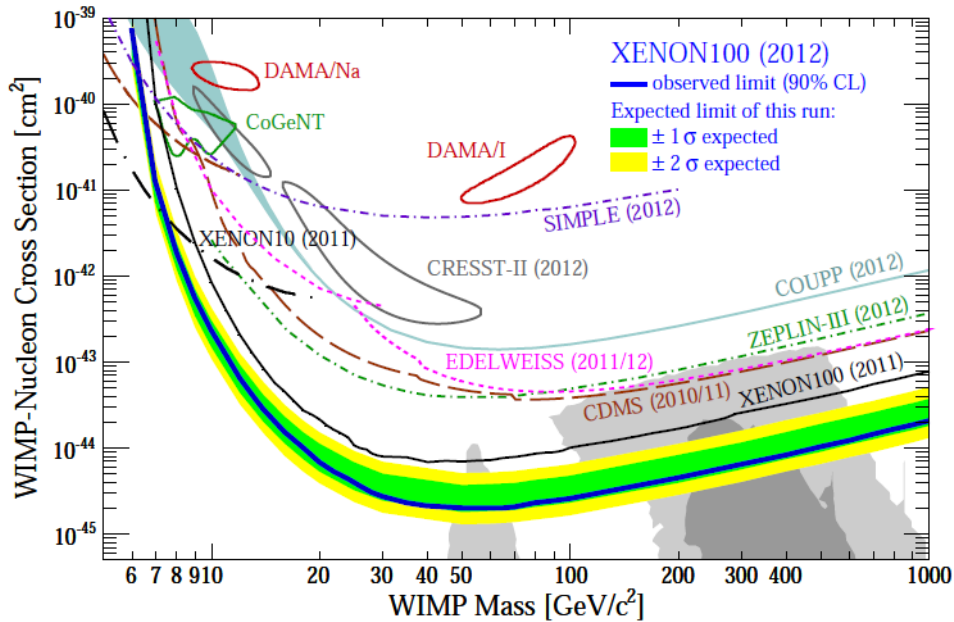


Figura 1.11: Sezione d'urto WIMP-nucleo indipendenti dallo spin in funzione della massa della WIMP.

### 1.5.4 XENON1T e XENONnT

La terza fase dell'esperimento è ora operativa presso la sala B dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Fig. 1.10). Tale rivelatore (Fig. 1.12) sfrutta una quantità di Xeno pari a 3300 kg di cui circa 1000 kg costituiscono la massa fiduciale: l'aumento dello Xeno schermante e l'utilizzo di materiali meno radioattivi permette una diminuzione del fondo di circa due ordini di grandezza. In tale modo, sfruttando simulazioni Montecarlo, è possibile prevedere un limite inferiore per la sezione d'urto pari a  $1.6 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$  per  $M_{WIMP} = 50 \text{ GeV}$  [26].

Il rivelatore è contenuto all'interno di una struttura cilindrica di diametro di base 10 m e alta 10 m totalmente riempita di acqua ed equipaggiata di fotorivelatori: questa funge come rivelatore di muoni (*muon veto*). Sfruttando l'effetto Čerenkov è possibile rivelare il passaggio di muoni cosmici; tali muoni infatti, interagendo, possono produrre neutroni anche di alta energia che possono arrivare all'interno della TPC e produrre un segnale analogo a quello atteso dall'interazione di una WIMP.

La struttura dell'esperimento XENON1T è tale da permettere un futuro ulteriore sviluppo: la TPC è infatti sostituibile mantenendo inalterati tutti gli altri elementi del rivelatore. Questo è dovuto al fatto che la TPC isolata termicamente da uno strato di vuoto è contenuta all'interno di un *vessel* che semplifica tale upgrade. Il possibile sviluppo XENONnT dovrebbe sfruttare 7000 kg di Xeno ultrapuro aumentando così la sensibilità : è previsto un abbassamento della sezione d'urto SI fino a  $1.6 \times 10^{-48} \text{ cm}^2$  [26].

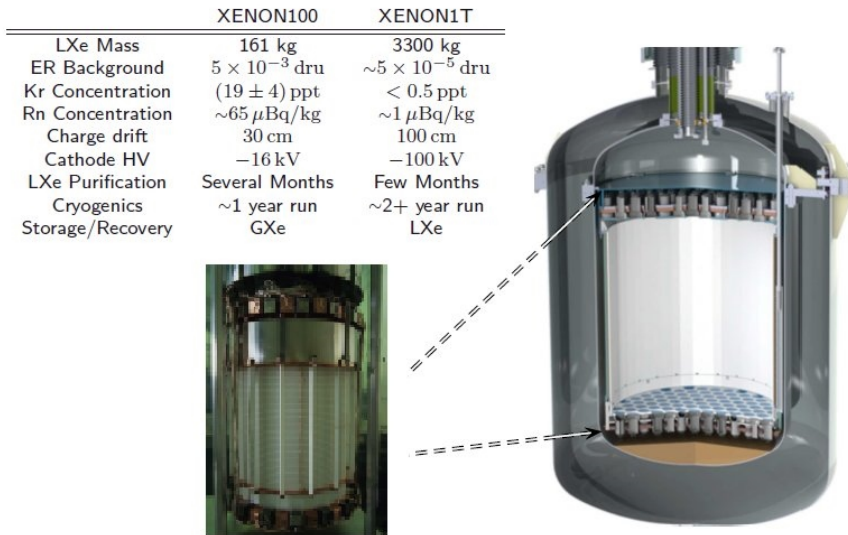


Figura 1.12: Rappresentazione della TPC e confronto tra le caratteristiche tecniche di XENON100 e del suo successore XENON1T.

## Capitolo 2

# Il programma di simulazione Montecarlo

Il lavoro svolto si basa principalmente sul programma C++ di simulazione Monte Carlo, scritto dal gruppo di ricercatori dell'esperimento XENON e basato sul set di librerie *GEANT4*. Il programma ha la capacità di riprodurre l'intero rivelatore XENON1T con grande precisione, descrivendo posizione, forma e materiali di tutte le parti che lo compongono. Le librerie *GEANT4* permettono la simulazione di numerose interazioni fisiche, in modo da poter effettuare esperimenti virtuali che comportano la generazione di particelle e la valutazione del loro comportamento all'interno del rivelatore con una buona approssimazione. Acquisendo progressivamente confidenza e manualità con il programma, sono state dapprima verificate le dimensioni e le posizioni relative dei vari componenti del rivelatore, in particolare la Water Tank e la TPC. Successivamente sono state scritte diverse parti di codice, che sono state poi incorporate nel programma ufficiale. Tra queste ultime, vedremo ora in dettaglio tre principali aggiunte:

- Controllo sulle posizioni dei fotomoltiplicatori del sistema di Muon Veto e assegnazione di numeri identificativi;
- Costruzione della galleria attorno all'esperimento, rappresentativa della Hall B dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso;
- Generazione realistica di eventi di muoni di alta energia.

### 2.1 Costruzione esperimento

In questa sezione verranno trattate le prime due aggiunte, introducendo prima il funzionamento del programma e approfondendo anche la struttura del rivelatore.

### 2.1.1 Il programma

Il programma di simulazione montecarlo *xenon1t.v315* è suddiviso in diversi file, uno dei quali (*Xenon1tDetectorConstruction.cc*) è dedicato alla struttura del rivelatore. Le librerie di *GEANT4* consentono di costruire virtualmente il rivelatore mediante l'utilizzo di volumi incapsulati uno dentro l'altro. Ogni volume contiene le informazioni sulla propria forma, posizione e composizione. Allo stesso tempo il file contiene anche le informazioni dettagliate di ogni parametro geometrico e di ogni materiale ed elemento chimico utilizzato per tale costruzione. Le prime due aggiunte al programma riguardano proprio questo file.

Il programma complessivo permette di eseguire simulazioni interattive, particolarmente utili se utilizzate per lanciare *geantini*: particelle fittizie che non interagiscono in alcun modo con i materiali, ma che permettono di visualizzare i volumi attraverso cui passano. Generando dunque geantini con posizioni e direzioni scelte accuratamente è possibile osservare le coordinate di inizio e fine di ogni volume, permettendo così di controllare la correttezza del codice.

### 2.1.2 Water Tank

Il primo esercizio atto all'apprendimento del funzionamento del programma è stato quello di verificare le dimensioni della Water Tank e dei suoi componenti mediante l'utilizzo dei geantini in modalità interattiva.

La Water Tank è un cilindro di acciaio inox di diametro 9.60 m e altezza 9.00 m, chiuso superiormente da un tronco di cono, per un totale di 10.50 m di altezza. Il suo interno è quasi completamente riempito di acqua, quest'ultima contiene la TPC e il set di fotomoltiplicatori dedicati al sistema di Muon Veto. L'intera superficie interna della Water Tank è ricoperta da una sottile pellicola riflettente, che serve ad aumentare le probabilità di rivelare fotoni, anche quelli riflessi dalle pareti interne della Water Tank.

Le dimensioni sono state confrontate con il modello CAD mostrato in figura 2.1.

La posizione complessiva della Water Tank e della TPC è tale da rendere il centro dell'elettrodo collegato "a terra", posto 2.7 mm sotto il livello di separazione tra lo Xenon liquido e lo Xenon gassoso, l'origine del sistema di riferimento cartesiano. In figura 2.2 vediamo una rappresentazione grafica di una sezione trasversale della Water Tank, ottenuta generando un grande numero di geantini casuali confinati forzatamente nei volumi mostrati e mostrandone le posizioni iniziali.





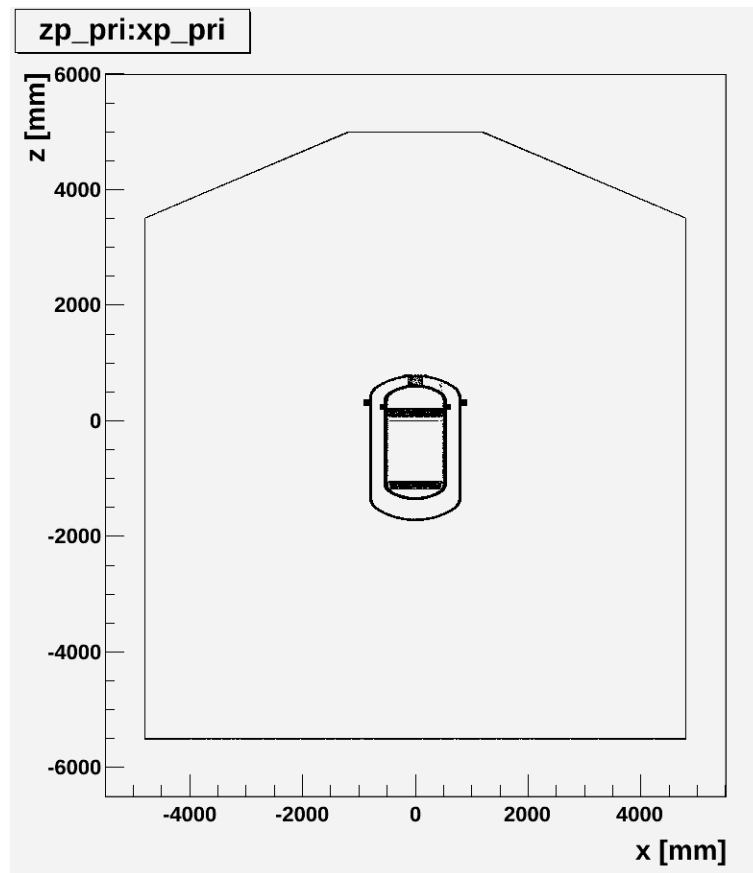


Figura 2.2: Sezione trasversale della Water Tank ottenuta tramite generazione di  $10^5$  geantini. Vengono qui visualizzati la Water Tank, il criostato, i fotomoltiplicatori e le varie griglie della TPC.

### 2.1.4 Costruzione galleria

Parte del lavoro è stato poi dedicato alla costruzione della galleria che ospita l'esperimento, ovvero la Hall B dei laboratori sotterranei dei LNGS. Essa contiene infatti l'esperimento XENON1T con relativa Water Tank, Service Building e tutto ciò che non fa parte dell'esperimento. Per quanto riguarda il programma, si è deciso di inserire solamente la Water Tank e la galleria circostante, composta da:

- galleria di aria, lunga 100 m;
- rivestimento di cemento, spessore 0.50 m;
- rivestimento di roccia, spessore 5.00 m.

Le informazioni sulla composizione della roccia e del cemento sono state prelevate dalla documentazione online [27] e riassunte in tabella 2.1.

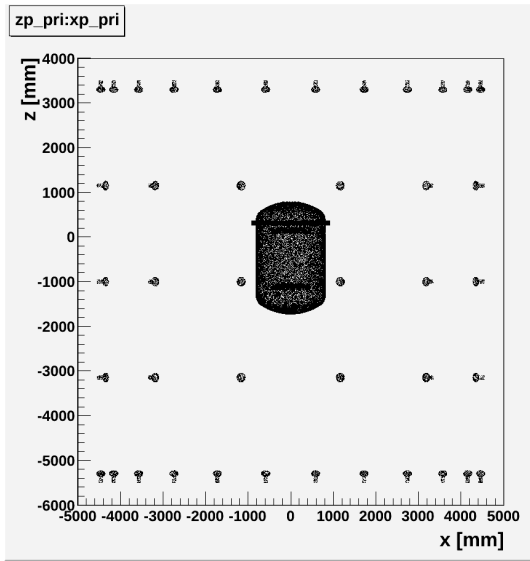


Figura 2.3: Proiezione sul piano XZ delle posizioni degli 84 PMT.

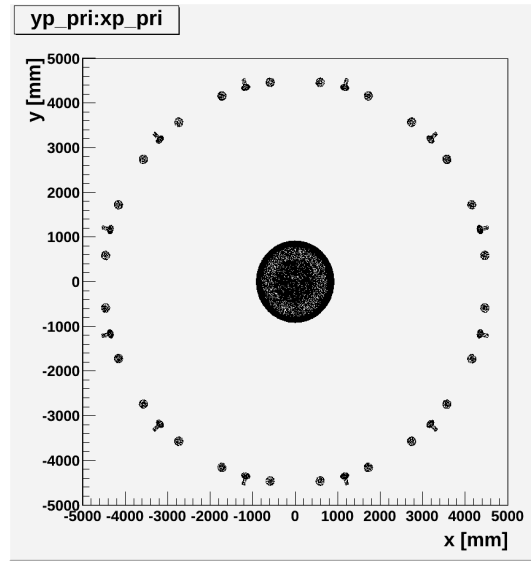


Figura 2.4: Proiezione sul piano XY delle posizioni degli 84 PMT.

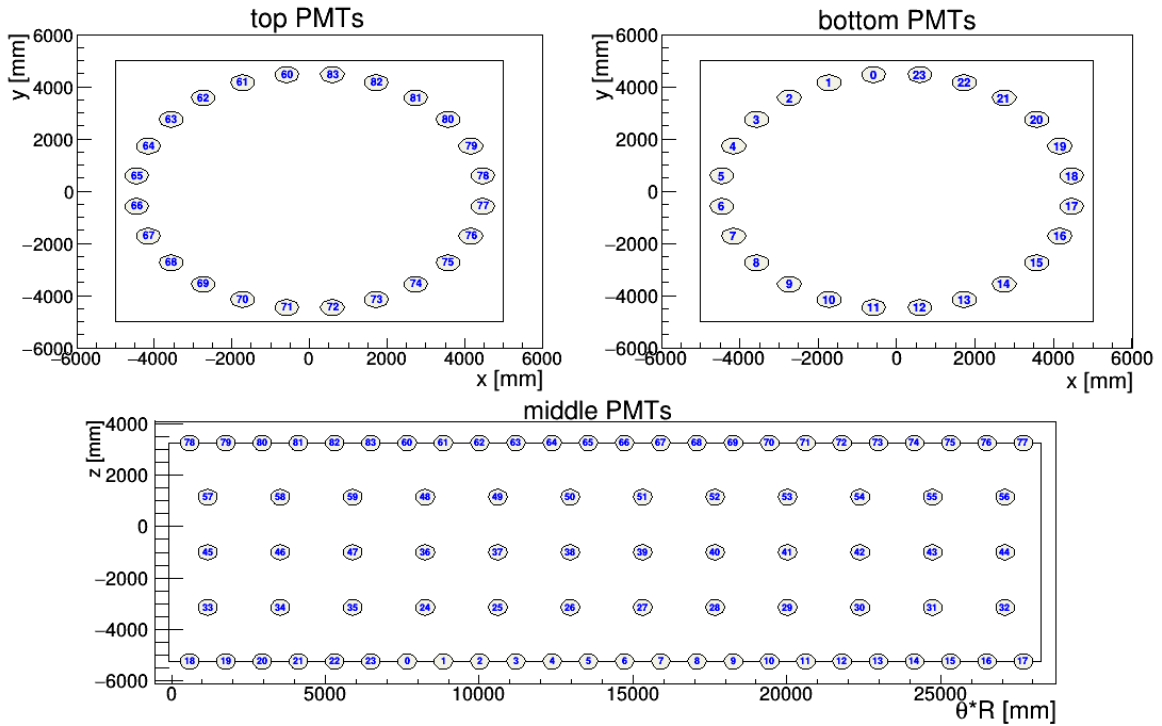


Figura 2.5: Mappa dei PMT con rispettivo numero identificativo.

Elemento	Cemento	Roccia
H	0.89%	-
C	7.99%	12.0%
O	48.43%	51.0%
Na	0.6%	-
Mg	0.85%	8.4%
Al	0.9%	0.6%
Si	3.86%	1.0%
P	0.04%	-
S	0.16%	-
K	0.54%	-
Ca	34.06%	27.0%
Ti	0.04%	-
Fe	0.43%	-
Densità	2.4 g/cm <sup>3</sup>	2.71 g/cm <sup>3</sup>

Tabella 2.1: Densità e composizione percentuale per i materiali utilizzati nella costruzione della galleria.

### Sezione trasversale

Per quanto riguarda la sezione trasversale, si è cercato di imitare quanto più possibile la reale forma della galleria. In figura 2.6 è rappresentato il CAD della sezione: quello che si vuole rappresentare è il contorno interno dello strato di cemento, trascurando le paratie laterali e la gru sovrastante.

Dalla figura 2.6 si possono leggere anche le misure della galleria, che vengono ora riportate per chiarezza:

1. Distanza massima tra soffitto e pavimento:  $H = 16.065$  m;
2. Distanza massima orizzontale:  $D = 18.480$  m;
3. Larghezza pavimento:  $L = 15.619$  m;

Queste tre misure sono state considerate come le più importanti, in particolare la larghezza del pavimento in quanto deve rispettare la posizione della Water Tank e le dimensioni dei corridoi percorribili della galleria. Con queste considerazioni si è prima provato ad approssimare la sezione trasversale con una circonferenza. Per fare ciò si possono considerare fissate le misure 1. e 3. o alternativamente le misure 2. e 3. . Per facilitare la lettura le misure verranno da ora indicate rispettivamente come H, D, L.

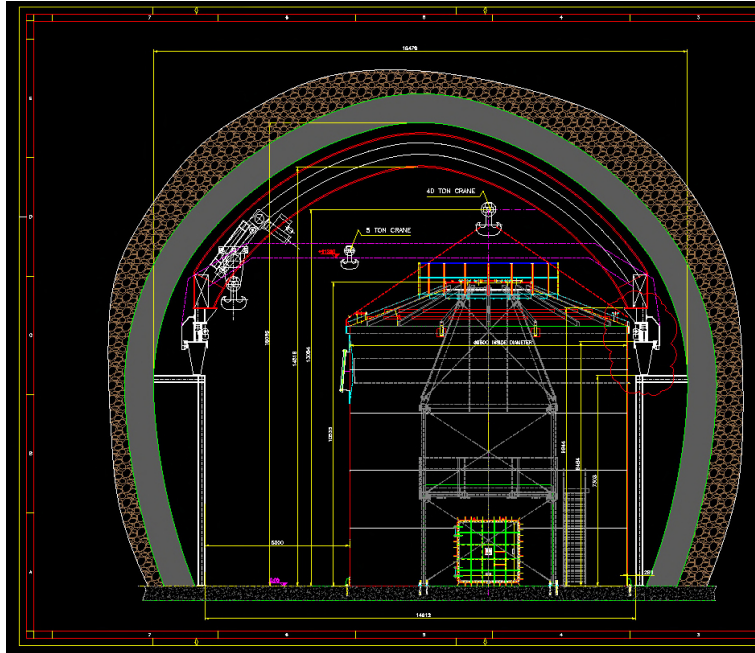


Figura 2.6: CAD della sezione trasversale della galleria reale. È presente anche la Water Tank.

Nel primo caso abbiamo una circonferenza di cui è nota la lunghezza di una corda e la sua distanza dal punto antipodale. Risolvendo il problema di geometria si ricava che il raggio è:

$$R = \frac{4H^2 + L^2}{8H} = 9.931 \text{ m} \quad (2.1)$$

Confrontando con la misura D, che rappresenta il diametro, si ha un errore di:

$$|D - 2R| = 1.382 \text{ m} \quad (2.2)$$

Nel secondo caso abbiamo invece una circonferenza di cui è nota la lunghezza di una corda e il diametro. Calcolando quindi l'altezza massima otteniamo:

$$H_{calc} = R + \sqrt{R^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} = 14.179 \text{ m} \quad (2.3)$$

Confrontando con la misura reale di H si ha una differenza di:

$$|H - H_{calc}| = 1.886 \text{ m} \quad (2.4)$$

Le differenze tra i modelli circolari e la sezione reale non sono trascurabili, infatti calcolando il rapporto tra le discrepanze e le misure reali otteniamo i seguenti errori percentuali:

$$\frac{\Delta D}{D} \cdot 100 = 7.48\% \qquad \frac{\Delta H}{H} \cdot 100 = 11.74\% \qquad (2.5)$$

Decidendo di rigettare il modello appena elaborato, si è poi scelto di approssimare la sezione con un'ellisse. Questo ci permette di mantenere come vincoli tutte e tre le misure H, D, L, essendo D l'asse minore, L una corda e H la distanza dalla corda al punto antipodale dell'ellisse. Risolvendo il problema di geometria e chiamando A l'asse maggiore, otteniamo:

$$A = 2 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{L^2}{D^2}} \right) \frac{D^2}{L^2} H = 20.939 \text{ m} \qquad (2.6)$$

La soluzione del problema è riportata in appendice A.

Possiamo ora confrontare l'ellisse elaborata con la figura 2.6 per avere un riscontro visivo del modello, poiché non ci è possibile calcolare facilmente degli errori quantitativi in quanto tutte le misure principali sono rispettate per costruzione.

Come mostra la figura 2.7 l'ellisse usata è una buona approssimazione della sezione reale della galleria. Misurando le distanze tra l'ellisse e il cemento in pixel e convertendole in centimetri esse non superano i 25 cm, dunque il massimo errore percentuale sulle distanze di punti antipodali è di circa:

$$\frac{\Delta x}{x_{min}} \cdot 100 = \frac{0.25}{18.480} \cdot 100 \simeq 1.5\% \qquad (2.7)$$

dove  $x_{min}$  è la più piccola distanza tra due punti opposti dell'ellisse, ovvero l'asse minore D.

## Controllo del modello

Per controllare l'esattezza del codice scritto e per verificare che le posizioni e le dimensioni dei vari volumi siano come richiesto, sono stati generati geantini casuali confinati nei vari volumi per ottenere delle immagini su piano cartesiano (figg. 2.8, 2.9, 2.10).

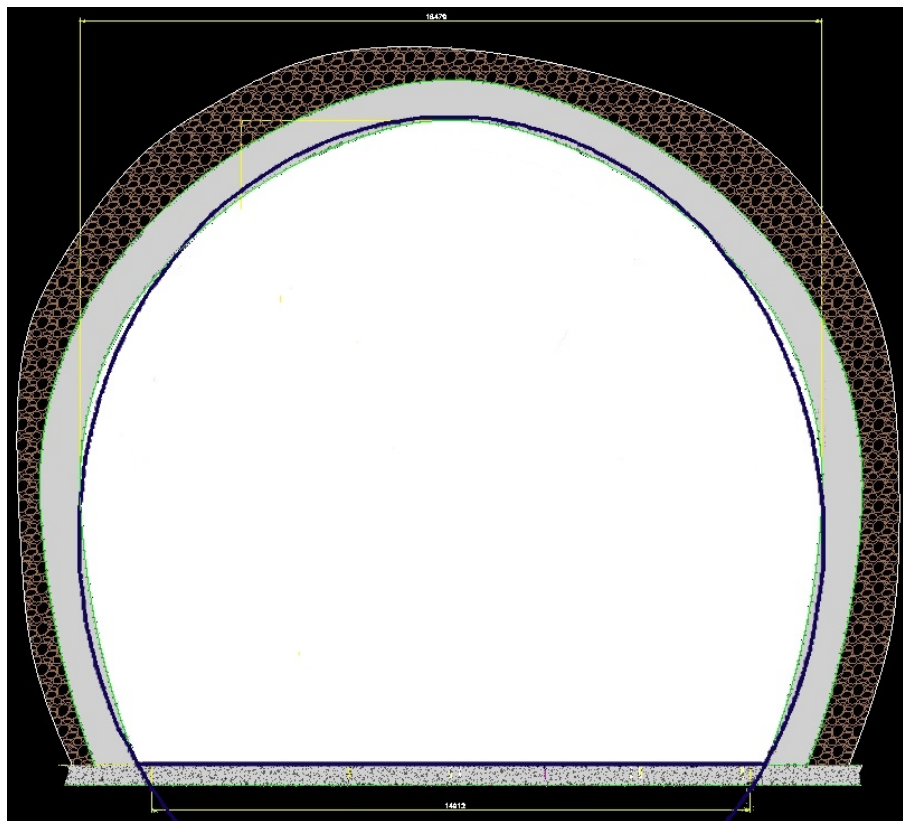


Figura 2.7: Sovrapposizione tra ellisse elaborata (blu) e CAD (verde). Per pulizia sono stati eliminati i dettagli ininfluenti.

## 2.2 Generazione muoni

Il passo successivo nello sviluppo del programma di simulazione è stato quello di inserire delle funzioni che permettono la generazione di un evento di muone realistico. Il laboratorio si trova infatti sotto il monte Gran Sasso e il profilo della montagna influisce sulle energie e le direzioni dei muoni che riescono a raggiungere il rivelatore.

Le caratteristiche dei muoni sono state prese da una simulazione Monte Carlo [28] che è poi stata validata sperimentalmente nel laboratorio. È stata quindi resa possibile la scrittura di un file di testo contenente le informazioni di  $10^6$  muoni. Per ogni particella è specificata la carica (muone - antimuone), l'energia e i tre coseni direttori del vettore momento. Le funzioni così introdotte nel programma leggono tale database e impostano le condizioni iniziali dei muoni corrispondentemente. L'energia e la direzione vengono quindi semplicemente letti dal file esterno, mentre la posizione viene generata con una distribuzione uniforme in un cilindro di 15 m di raggio. L'asse di tale cilindro passa

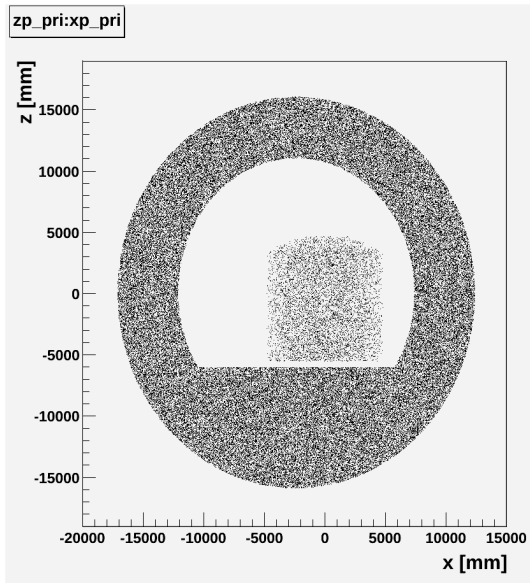


Figura 2.8: Sezione trasversale: sono visibili l'acqua e la roccia.

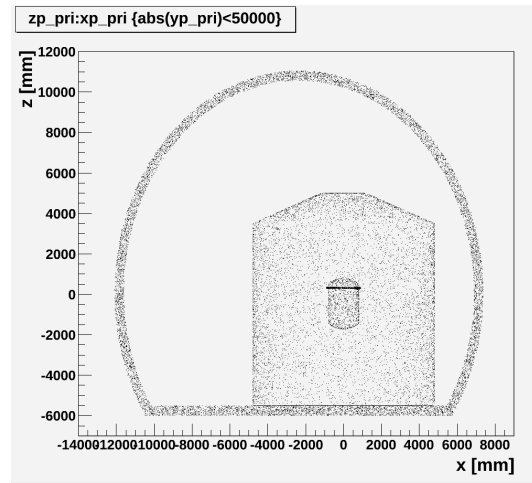


Figura 2.9: Sezione trasversale: sono visibili il cemento, la Water Tank, e il criostato centrale.

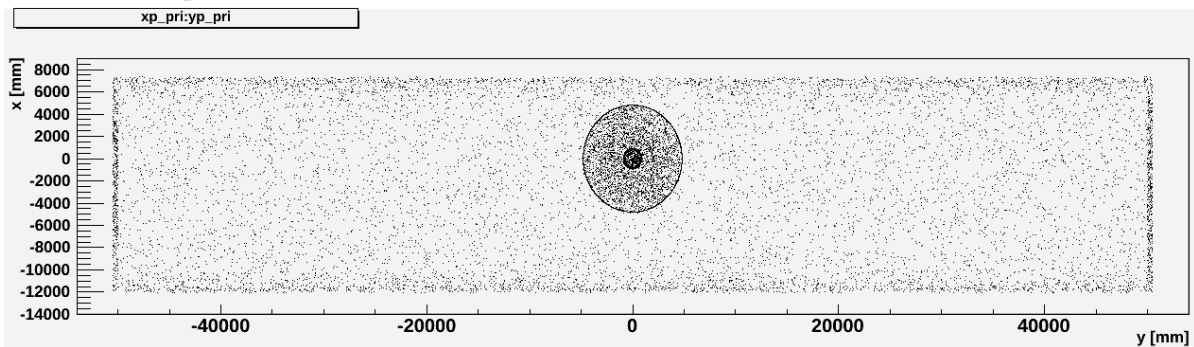


Figura 2.10: Vista aerea: come in figura 2.9, ma si vede la galleria per tutta la sua lunghezza.

per l'origine del sistema di riferimento (e quindi attraverso la TPC) e la sua direzione è quella del muone. Generando la *pioggia* di muoni in questo modo può capitare che qualche muone non attraversi neanche in piccola parte il rivelatore. Questo è un effetto voluto, in quanto si vogliono osservare anche i comportamenti delle particelle generate per decadimento del muone e per interazione dello stesso con la materia circostante; gli eventuali neutroni prodotti da questi sciami esterni alla Water Tank possono infatti entrare comunque nella TPC e produrre falsi segnali.

Per controllare dunque che il codice sia stato implementato correttamente si è generato un numero elevato di muoni utilizzando le funzioni appena introdotte. Le distribuzioni di energia e direzione così ottenute sono state confrontate con quelle originali, risultando

esatte. Nelle figure 2.11, 2.12 e 2.13 vengono mostrate le distribuzioni di energia e degli angoli sferici.

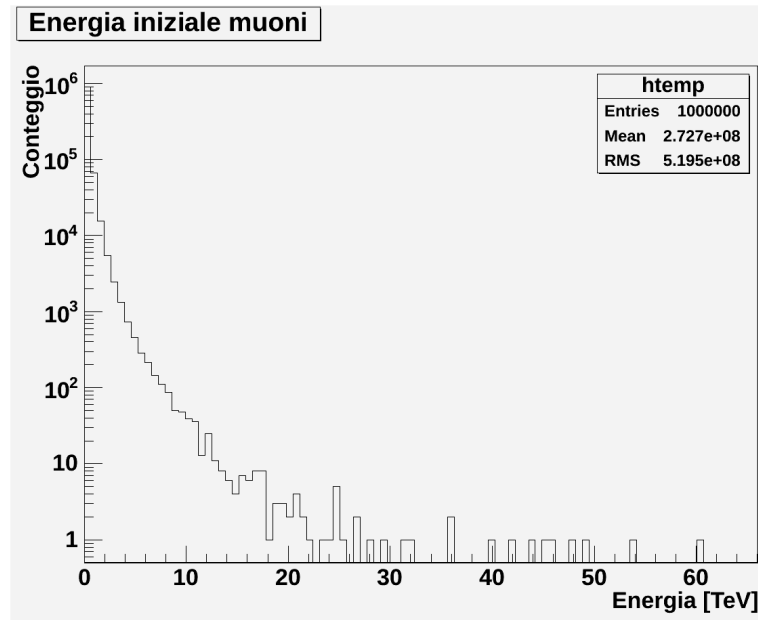


Figura 2.11: Distribuzione delle energie dei muoni.

In figura 2.11 si può notare come una piccola parte (circa lo 0.01%) dei muoni abbia energie superiori ai 10 TeV, energie difficilmente raggiungibili perfino dagli attuali acceleratori: bisogna ricordare che l'universo è un potente acceleratore naturale.



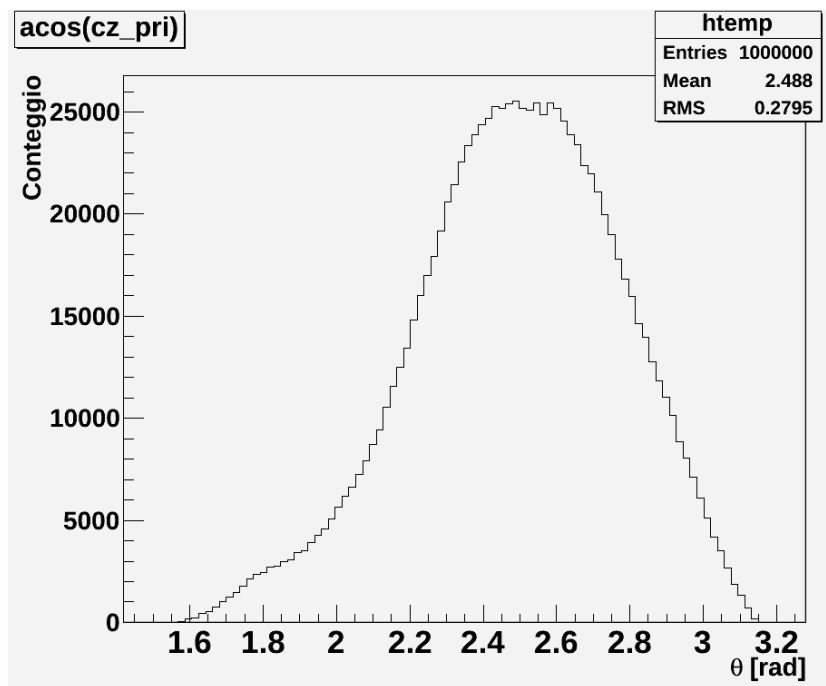


Figura 2.12: Distribuzione dell'angolo zenitale  $\theta = \arccos(p_z)$  dei muoni.

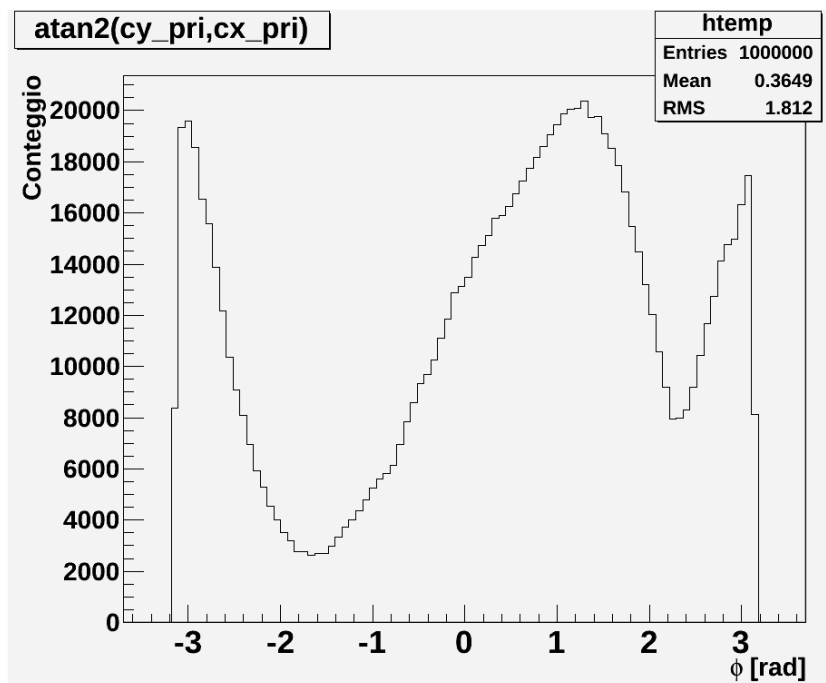


Figura 2.13: Distribuzione dell'angolo azimutale  $\phi = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right)$  dei muoni.

## Capitolo 3

# Programma di analisi dati

Parte del lavoro svolto è stata la creazione di un tool di analisi dati che permetta una veloce e comoda elaborazione dei risultati prodotti dal programma di simulazione. È stato dunque scritto un programma in C++ ("*Analyzer.C*") capace di leggere i rootfile prodotti come output dal simulatore Montecarlo.

Elencando le principali funzionalità inserite nel programma, abbiamo:

- `Loop()` : Una funzione che legge tutti gli eventi contenuti nel rootfile e mostra una generica collezione di grafici.
- `EventDisplay(entry)` : Funzione che, selezionato uno specifico evento mediante l'argomento "entry", mostra un display con le informazioni collezionate dai PMT per quell'evento.
- `EventTimelapse(entry)` : Funzione che permette la creazione di immagini animate in formato .gif i cui fotogrammi sono gli `EventDisplay` della funzione precedente. Le informazioni vengono qui collezionate in modo cumulativo in funzione del tempo.
- `EventTimeFrames(entry)` : Funzione analoga alla precedente, tuttavia i vari fotogrammi non sono a riempimento cumulativo ma mostrano le informazioni istantanee del display.
- `RelevantPMTs(entry)` : Funzione che mostra in un grafico l'accensione di ogni PMT in funzione del tempo.

Vediamo ora in dettaglio queste funzioni, soffermandoci prima sulla struttura del rootfile e sul tipo di dati che vengono analizzati.

## 3.1 Struttura dei dati

Il simulatore *Xenon1t-v315* produce come output un file *.root* che contiene tutte le informazioni sulle tracce delle particelle generate nelle simulazioni, disponendole in un *Tree*. Ad esempio, di ogni particella vengono salvate l'energia, il momento, la posizione in cui passa da un volume ad un altro e quella in cui interagisce con la materia o decade, oltre al proprio numero identificativo e quello della particella "madre" che l'ha generata. In particolare siamo interessati alle informazioni delle particelle iniziali, ovvero i muoni cosmici che producono lo sciame di particelle, e dei fotoni ottici emessi per effetto Čerenkov, che avviene quando una particella carica si muove in un mezzo (dielettrico) più veloce della luce in quello stesso mezzo. Questi ultimi possono venire assorbiti dai PMT del Muon Veto, generando un *hit* che viene salvato sul file. Il programma scritto si propone di analizzare principalmente questi fotoni, producendo distribuzioni spaziali e temporali che sono di cruciale importanza per capire se nell'esperimento reale un evento sia generato da un muone cosmico o da una particella di materia oscura.

## 3.2 Risultati

La funzione *Loop()* del programma legge tutti gli eventi simulati e presenti nel rootfile, dove con "evento" si intende un singolo muone generato. La funzione quindi si occupa di generare grafici statistici, che non riguardano il singolo evento ma una collezione di essi.

Il grafico più significativo tra quelli prodotti mostra la relazione tra l'energia del muone iniziale e il numero di fotoni che vengono osservati per quell'evento. È un istogramma mono-dimensionale pesato: ad ogni valore di energia viene attribuito il corrispettivo numero di fotoni ottici rivelati. Tuttavia essendo l'asse delle energie suddiviso in un numero finito di bin (100) è stato necessario normalizzare l'istogramma dividendo il numero di fotoni osservati per il numero di muoni cosmici aventi energie appartenenti allo stesso bin. In questo modo ogni punto rappresenta la media di fotoni osservati per un dato intervallo di energia, da cui le barre di errore verticali.

In figura 3.1 osserviamo il grafico prodotto da 12886 muoni aventi energia compresa tra 200 MeV e 5 GeV. Tutti i muoni sono stati generati in un disco orizzontale posto sopra la water tank e con direzione verticale. Si è voluto studiare per quali energie il muone riesce ad attraversare l'intera water tank. Aiutandosi con le tracce delle particelle fornite dal programma di simulazione, si è dapprima cercata la più piccola energia per la quale i muoni riescono ad attraversare l'intera water tank. Avendo trovato un valore di circa 2.2 GeV, si è quindi proceduto alla simulazione di un gran numero di muoni con lo spettro di energie che si vede nel grafico, spostandosi di  $\pm 2.5$  GeV dall'energia critica. La previsione teorica è che il numero di fotoni raccolti debba aumentare

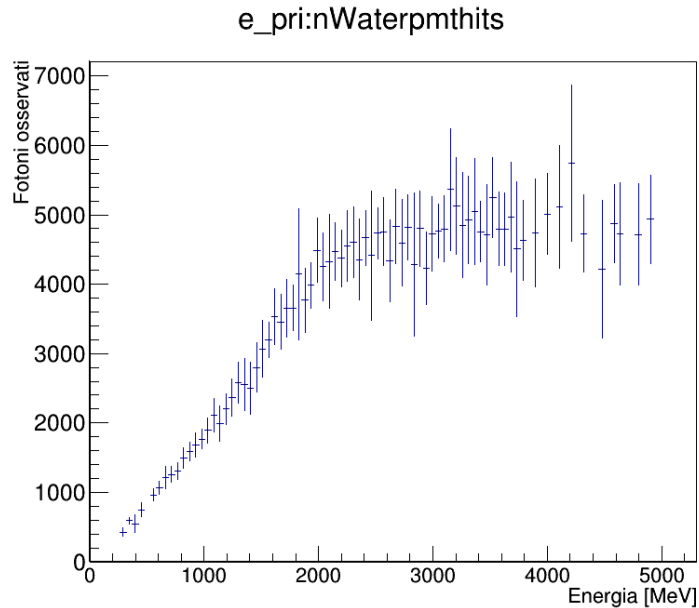


Figura 3.1: Numero di fotoni osservati in funzione dell'energia del muone iniziale.

proporzionalmente alla lunghezza della traccia del muone all'interno della water tank, e diventare più o meno costante quando i muoni la attraversano tutta. Questo è dovuto al fatto che la luminosità dovuta all'effetto Čerenkov dipende debolmente dall'energia della particella (per energie ultra-relativistiche). Il grafico mostra una salita iniziale fino alle energie dell'ordine di 2.5 GeV, che poi finisce in un plateau, proprio come atteso.

Un altro grafico interessante tra quelli prodotti dalla funzione *Loop()* mostra il numero totale di fotoni ottici rivelati da ogni singolo PMT del Muon Veto. Questo tipo di distribuzione mostra quali siano i PMT più colpiti dai fotoni e quindi da quali ci si aspettano più segnali nell'esperimento reale.

In figura 3.2 vediamo tale grafico ottenuto con la simulazione precedente. Ricordando che a ID crescente corrisponde la coordinata  $z$  crescente, si può notare che mediamente il numero di fotoni osservati da ogni PMT per evento è di circa 40, e che i PMT inferiori rivelano il doppio dei fotoni rispetto a quelli superiori.

### 3.3 Display di un evento

La funzionalità principale *EventDisplay()* del programma è quella di mostrare un display di un singolo evento. Il display contiene tre mappe di PMT che rappresentano lo sviluppo sul piano del cilindro formato dal Muon Veto. Si hanno quindi tre grafici: uno contiene l'anello superiore, uno l'anello inferiore e uno contiene la superficie laterale in cui sono

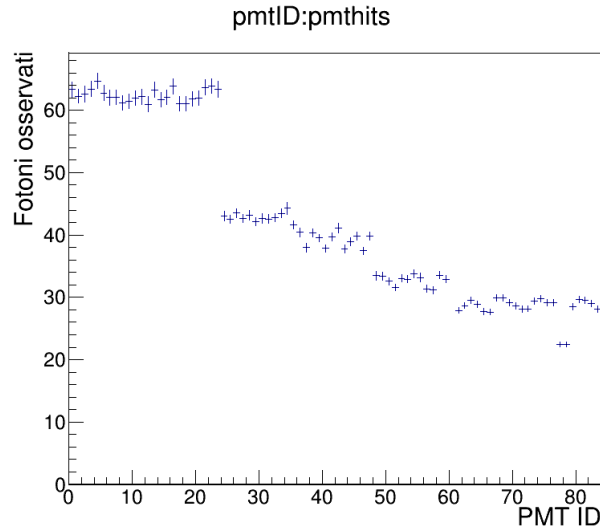


Figura 3.2: Distribuzione di fotoni ottici osservati da ogni PMT. Sull’asse delle ascisse sono indicati i numeri identificativi dei PMT.

rappresentati nuovamente anche i PMT superiori e inferiori. Ogni fotomoltiplicatore è quindi rappresentato come un cerchio colorato (non in scala): il colore dipende dal numero di fotoni assorbiti dal PMT in quell’evento. Sulla destra del display è presente la *Color Palette* che indica a quale colore corrispondono quanti fotoni osservati, colore che al crescere del numero di fotoni passa dal bianco al nero, passando per il giallo e per il rosso. In cima al display vengono stampati l’energia e gli angoli zenitali e azimutali del muone iniziale. In basso a destra è presente una grafico che mostra la distribuzione di fotoni osservati in funzione del tempo. Subito sopra di esso è stampato il tempo totale della simulazione.

In figura 3.3 abbiamo il display di un evento generico, in questo caso un muone di energia  $E = 4.9$  GeV che viaggia verticalmente verso il basso. Poichè il muone produce dei coni di fotoni per effetto Čerenkov, osservando quali PMT si riempiono è possibile fare delle stime sulla provenienza del muone. Ad esempio notiamo che nei PMT dell’anello inferiore si riempiono principalmente i PMT aventi  $x > 0$  e  $y < 0$ , suggerendo che il muone viaggi proprio in quella direzione. Nell’anello superiore i PMT si riempiono per  $x < 0$  e  $y > 0$  e con un numero inferiore di fotoni. Questo ci indica che i fotoni osservati dai *topPMTs* siano quelli che sono stati riflessi dal pavimento della Water Tank. Osservando infine la mappa completa del cilindro sviluppato sul piano si notano i PMT laterali che si riempiono in modo da collegare i PMT riempiti nel *bottom* con quelli nel *top*, a conferma delle ipotesi fatte. La distribuzione dei fotoni nel tempo ci mostra come la maggior parte dei fotoni venga osservata nei primi 50 ns dall’inizio dell’evento.

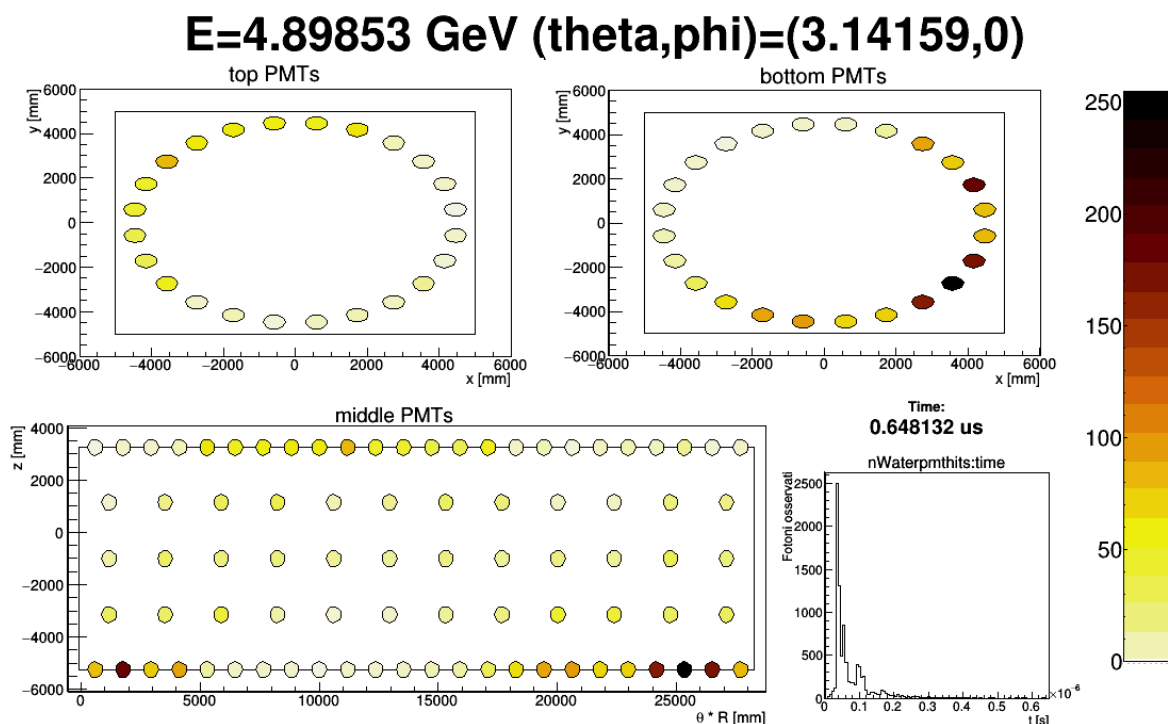


Figura 3.3: Event display di un evento generico.

### 3.4 Timelapse cumulativo

La funzione *EventTimelapse()* sfrutta il display creato dalla funzione precedente per la realizzazione di immagini animate in formato .gif che vogliono rappresentare l'evoluzione temporale di un evento. Ogni gif è una serie di fotogrammi, ognuno dei quali rappresenta l'EventDisplay al tempo  $t$ . L'istogramma temporale dei fotoni osservati subisce in questa funzione una leggera modifica: vengono rappresentati due istogrammi sovrapposti, uno (grigio) che è quello completo come nell'EventDisplay al tempo finale  $T$ , l'altro (nero) che rappresenta la situazione fino al tempo attuale  $t$ . Questa modifica fornisce un utile strumento per visualizzare l'evoluzione temporale dell'evento.

Poichè non ci è possibile inserire in questo scritto l'intera immagine .gif animata, in figura 3.4 è rappresentato un singolo fotogramma al tempo  $t = 0.0622$   $\mu$ s. Si noti l'istogramma temporale che si sta riempiendo come già descritto. Nelle mappe dei PMT possiamo osservare che i fotoni hanno raggiunto solo l'anello inferiore, dovendo ancora rimbalzare per illuminare i PMT dell'anello superiore.

## E=4.89853 GeV (theta,phi)=(3.14159,0)

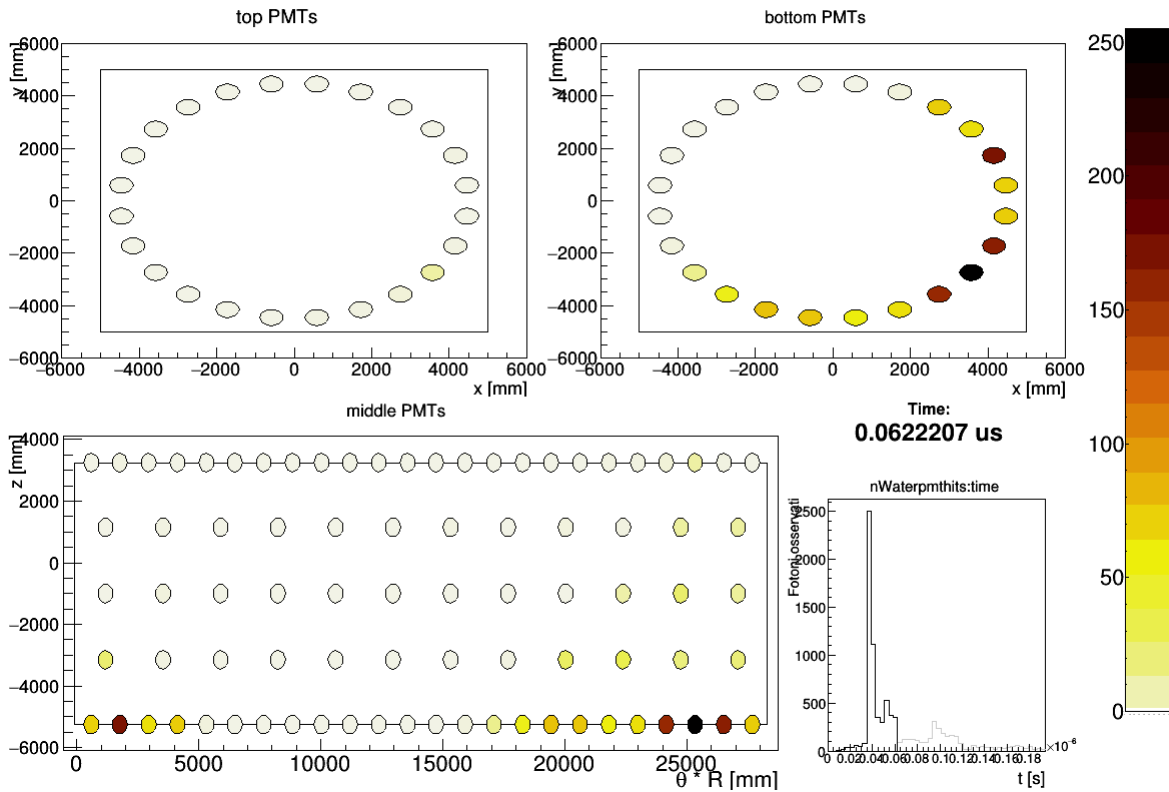


Figura 3.4: Fotogramma intermedio di un EventTimelapse. L'evento è lo stesso di quello in figura 3.3.

### 3.5 Timelapse ad intervalli

La funzione *EventTimeFrames()* rappresenta una modifica alla funzione precedente. Produce anch'essa delle immagini .gif animate, con una modifica al riempimento dei PMT. Infatti in questa funzione non vengono mostrati i fotoni complessivi osservati da ogni PMT, ma i fotoni osservati per ogni intervallo di tempo, dell'ordine di  $1 - 10ns$ . Allo stesso modo, anche la parte nera dell'istogramma temporale non rappresenta il riempimento cumulativo ma solo l'intervallo attuale. Per ottimizzare l'efficacia visiva di questa funzione, il tempo totale di evoluzione non corrisponde al tempo dell'intero evento, ma si ferma quando il 96% dei fotoni viene osservato. In questo modo una suddivisione in bin temporali (solitamente 30-50) permette di avere una risoluzione maggiore per eventi veloci. Questa modifica è applicata anche alla precedente *EventTimelapse()*, ma non all'*EventDisplay()*. Un'ulteriore modifica riguarda il colore di riempimento: poiché il numero di fotoni osservati per ogni intervallo di tempo è molto minore rispetto alle

due funzioni precedenti, si è preferito attribuire una ristretta gamma di colori, ovvero 5 sfumature di grigio.

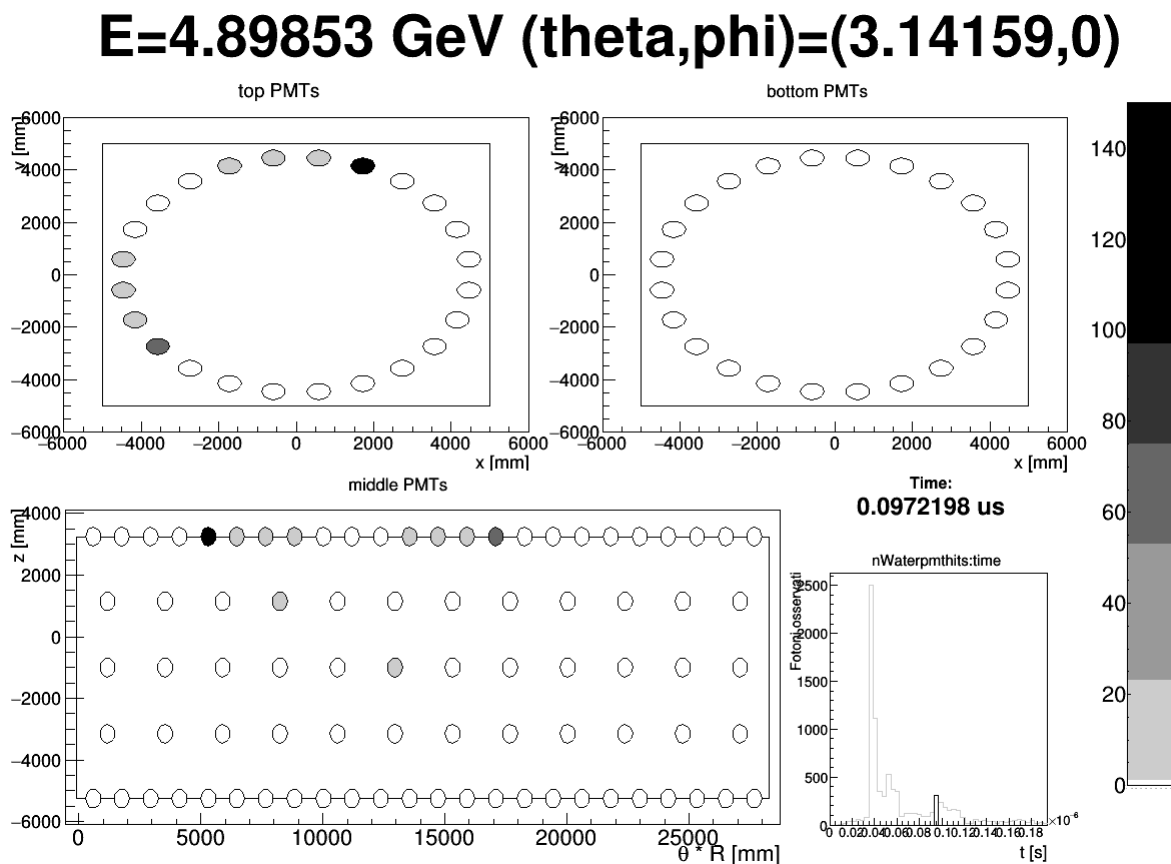


Figura 3.5: Fotogramma intermedio di un EventTimeFrames. L'evento è lo stesso di quello in figura 3.3

La figura 3.5 mostra un fotogramma della immagine .gif, al tempo  $t = 0.0972 \mu s$ . In questo istante i fotoni che hanno rimbalzato sul pavimento della Water Tank stanno raggiungendo i PMT dell'anello superiore, illuminandoli. Dal grafico temporale si evince che in questa finestra temporale di circa 4 ns sono stati rivelati poco più di 300 fotoni.

### 3.6 Mappa di riempimento PMT

La funzione *RelevantPMTs()* crea un istogramma bidimensionale che mostra il riempimento istantaneo dei PMT in funzione del tempo. Analogamente alla funzione *EventTimeFrames()* vuole mostrare l'influenza della direzione del muone sul pattern dei PMT che ricevono segnale, tuttavia è qui visibile l'intero evento su un grafico solo e non me-



diante un'immagine animata. Sull'asse delle ascisse abbiamo il tempo, che anche qui è limitato superiormente dal tempo in cui il 96% dei fotoni è stato rivelato. Sull'asse delle ordinate abbiamo invece il numero identificativo dei PMT, suddiviso in cinque sezioni in modo da differenziare maggiormente i cinque anelli di rivelatori. In questo modo la sezione più in alto è quella contenente i PMT superiori, viceversa la sezione in basso è quella contenente l'anello inferiore. Il grafico è disegnato in modalità "BOX" in cui ogni bin bidimensionale viene rappresentato da un quadrato, la cui area è proporzionale al conteggio di fotoni in quel bin.

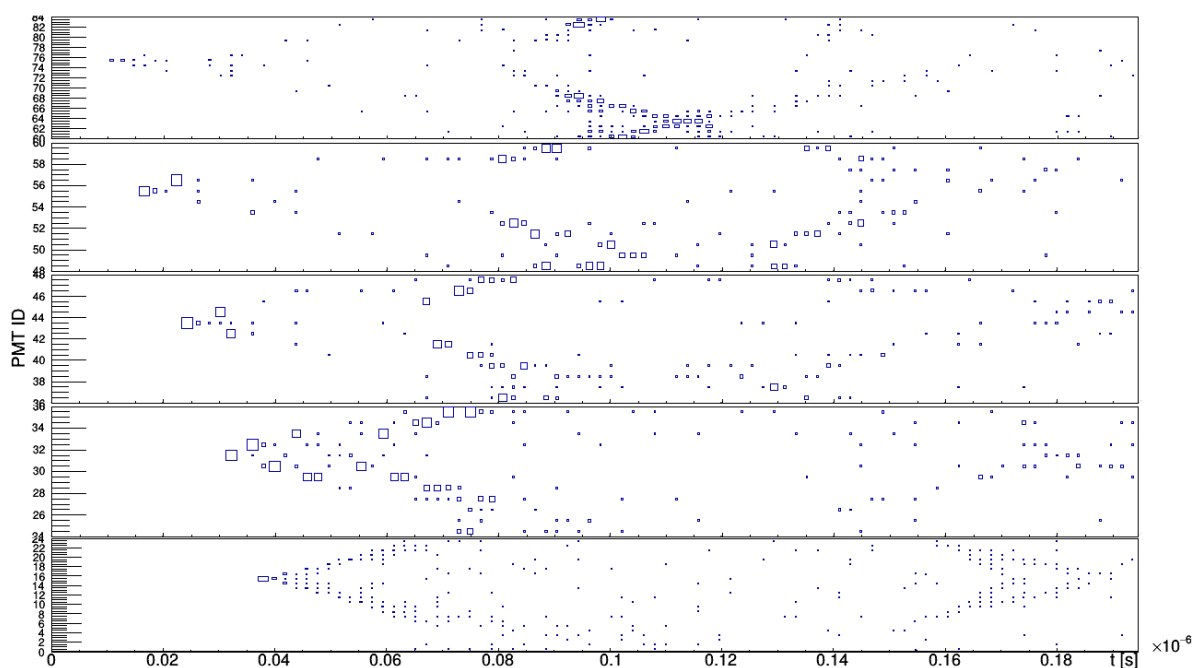


Figura 3.6: Mappa di riempimento PMT per lo stesso evento della figura 3.3. Il grafico è suddiviso in 5 sezioni, ognuna corrispondente ad un diverso anello di PMT.

La figura 3.6 mostra come questa funzione sia di grande efficacia: nel caso di un muone verticale è possibile osservare l'arrivo dei fotoni verso l'anello inferiore e il successivo rimbalzo verso quello superiore. Dal tempo  $t_0 = 0.01 \mu s$  al tempo  $t_1 = 0.04 \mu s$  vengono registrati i primi segnali, ovvero fotoni che illuminano pochi PMT per anello, in ordine discendente. Successivamente, fino al tempo  $t_3 = 0.10 \mu s$  i segnali si propagano verso l'anello superiore, questa volta illuminando molti più PMT per anello. Dal tempo  $t_1$  è interessante notare il segnale che arriva e riempie l'anello inferiore: i PMT si riempiono progressivamente da entrambi i lati rispetto al primo PMT che riceve il segnale, in modo da formare una sorta di cono temporale. Questo fenomeno si può spiegare ricordando che l'effetto Čerenkov produce dei coni di fotoni che si aprono con un angolo costante nella direzione del muone. Poiché il muone arriva in direzione verticale e poiché generalmente

non arriverà nel centro esatto della Water Tank, i fotoni dei coni di luce arriveranno prima sui PMT vicini al muone e poi a quelli più lontani. Questo fenomeno è dovuto alla fisica dell'effetto Čerenkov ; i fotoni prodotti per ultimi saranno infatti i primi ad arrivare su una superficie perpendicolare alla direzione del moto della particella.

### 3.7 Simulazione completa degli eventi di muone cosmico

In questa sezione vedremo i risultati ottenuti dall'analisi di una simulazione con muoni realistici. Le condizioni iniziali dei muoni sono imposte dalla funzione descritta nella sezione 2.2. Utilizzando il programma di simulazione Monte Carlo è stato prodotto un rootfile contenente 1000 eventi, di cui solamente 221 hanno prodotto fotoni rivelati dal Muon Veto. Probabilmente la maggior parte dei muoni che non hanno prodotto segnale sono passati troppo lontano dalla Water Tank e non hanno causato effetto Čerenkov . Gli eventi che invece hanno prodotto segnale hanno portato un numero di fotoni osservati che va dalle poche decine a circa 50000. In figura 3.7 è mostrato il grafico prodotto dalla funzione *Loop()* che mostra la luminosità osservata dell'evento in funzione dell'energia.

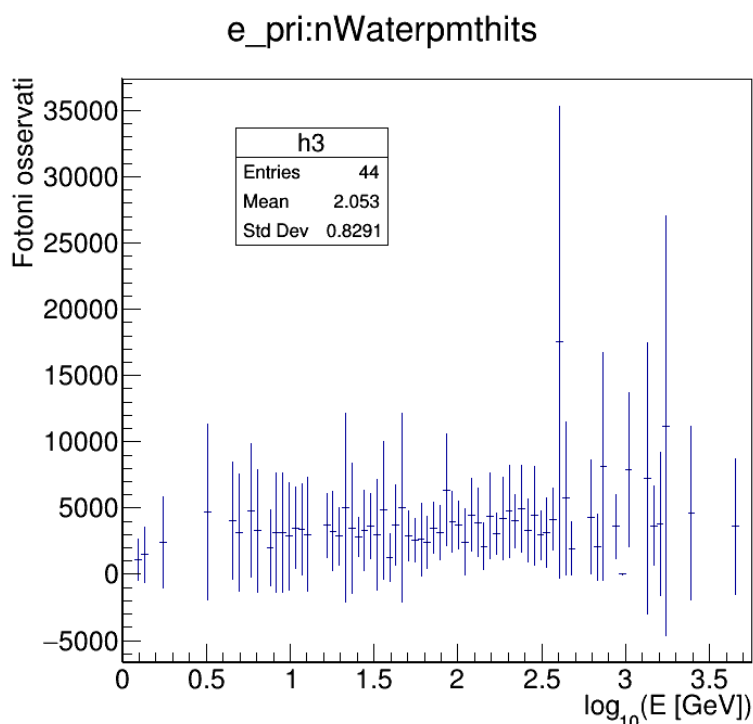


Figura 3.7: Numero medio di fotoni osservati in funzione dell'energia del muone.

Poiché il range delle energie dei muoni copre 5 ordini di grandezza è qui rappresentato sull'asse delle ascisse il logaritmo in base 10 dell'energia, intesa in MeV; in questo modo i bin contengono un numero comparabile di eventi. Nonostante il numero di fotoni osservati abbia una certa variabilità, dovuta alla lunghezza della traiettoria nell'acqua della Water Tank, il numero medio è di circa 5000, come già previsto nella figura 3.1.

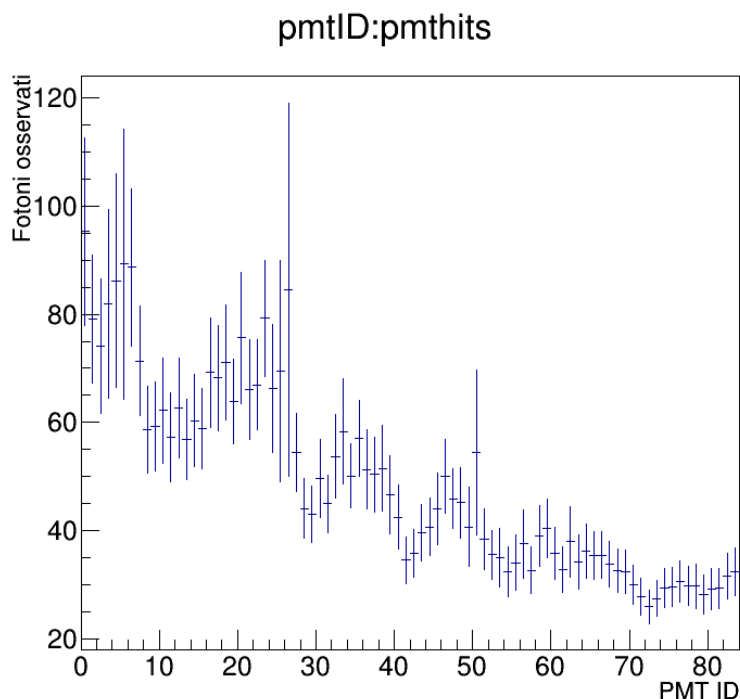


Figura 3.8: Numero medio di fotoni osservati in funzione del singolo PMT.

In figura 3.8 è mostrata la media dei fotoni osservati da ogni PMT. Anche se i muoni non sono tutti verticali, si nota una luminosità più accentuata nei PMT con ID piccolo, ovvero quelli posti più in basso. Come in figura 3.2 il numero medio di fotoni in questa parte di grafico è circa il doppio rispetto a quelli dei PMT superiori.

Andremo ora ad analizzare un singolo evento, per poter produrre i display. L'evento 971 della simulazione realistica contiene un muone di energia  $E = 150.1$  GeV e di direzione dettata dagli angoli sferici  $(\theta, \phi) = (2.25984, 1.85566) = (129.5^\circ, 106.3^\circ)$  che ha prodotto 6637 fotoni osservati. Inoltre, la posizione iniziale del muone è  $(x, y, z) = (-0.979, -0.999, 5.500)$  m, quindi parte molto vicino ( $\sim 1.5$  m) all'asse centrale della Water Tank, e circa 50 cm sopra di essa.

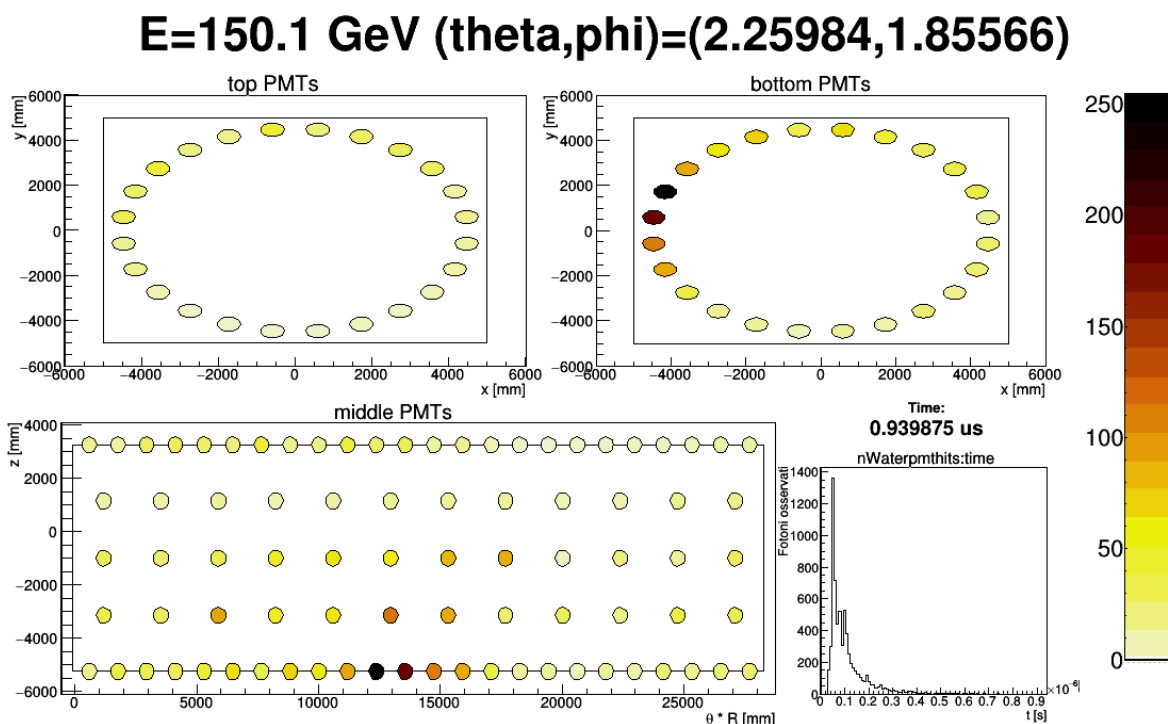


Figura 3.9: Event display per un muone realistico

In figura 3.9 è presente l'event display per l'evento 971. Nonostante la direzione del muone sia piuttosto angolata ( $50.5^\circ$  rispetto alla verticale) la maggior parte dei fotoni osservati si registra nell'anello inferiore di PMT. A differenza del display in figura 3.3 qui abbiamo un riempimento molto più uniforme dei PMT e più duraturo: invece che fermarsi dopo 300 ns in questo evento i fotoni continuano a produrre segnali fino a 400 ns.

In figura 3.10 vediamo il display cumulativo al tempo  $t = 0.0659 \mu\text{s}$ , nel quale i fotoni hanno appena raggiunto l'anello inferiore producendo il picco di segnale. Una caratteristica di questi eventi, indipendente dall'energia e dalla direzione del muone, è che la maggior parte dei fotoni vengono osservati in un breve intervallo di tempo.

In figura 3.11 vediamo il display ad intervalli al tempo  $t = 0.0988 \mu\text{s}$ . In questo momento i fotoni hanno già raggiunto l'anello superiore e cominciano a propagarsi in tutte le direzioni rimbalzando sulle pareti della Water Tank. Si osserva un comportamento interessante guardando la .gif animata, ovvero che i fotoni ottici rimbalzano principalmente in una sola direzione, in senso antiorario guardando dall'alto. Questo fenomeno potrebbe essere dovuto alla direzione angolata del muone, che non permette a metà dei fotoni di raggiungere i PMT perché bloccati dal criostato contenente la TPC.

## E=150.1 GeV (theta,phi)=(2.25984,1.85566)

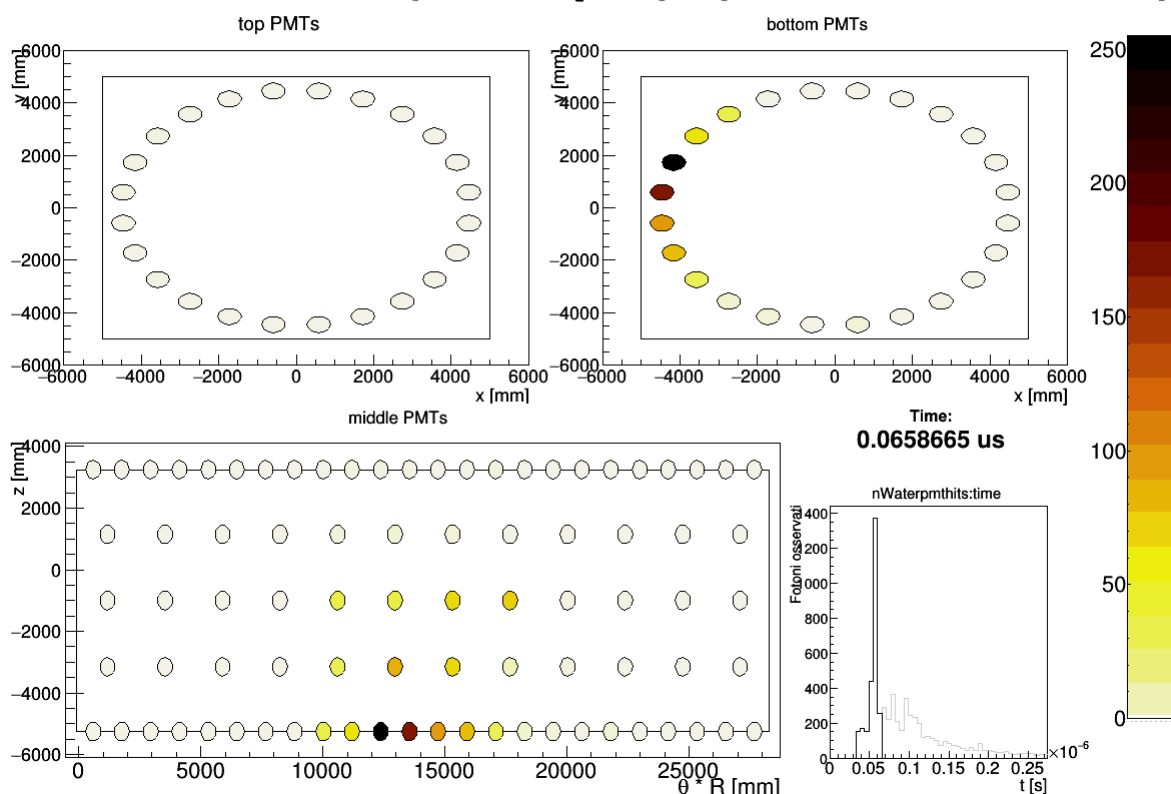


Figura 3.10: Fotogramma dell'EventTimelapse del muone 971

In figura 3.12 è presente la mappa temporale dei fotoni osservati, che torna molto utile dato che non è possibile inserire le immagini animate in questo scritto. Come in figura 3.6 si nota un movimento discendente dei segnali nell'intervallo tra  $t_0 = 30$  ns e  $t_1 = 60$  ns e uno ascendente tra  $t_1$  e  $t_2 = 110$  ns. Tuttavia già da subito i segnali sono molto più diffusi anche in tutti gli altri PMT. Anche in questa mappa sono evidenti le strutture a cono come in figura 3.6, questa volta però hanno solo una delle due "semirette" con un numero significativo di fotoni osservati. Apparentemente dal grafico sembra che i segnali si propaghino da una sezione all'altra (e quindi da un anello all'altro), ma bisogna ricordare che sull'asse delle ordinate abbiamo i numeri identificativi dei PMT, che sono ciclici per ogni anello. Quindi quando una "scia" di segnale sembra passare all'anello inferiore, in realtà sta passando all'altro estremo della sezione stessa. In questo evento piuttosto particolare i fotoni stanno rimbalzando in senso antiorario all'interno della Water Tank, effettuando quasi due giri completi (piuttosto evidenti nei PMT aventi ID compreso tra 48 e 59).

**$E=150.1 \text{ GeV } (\theta, \phi)=(2.25984, 1.85566)$**

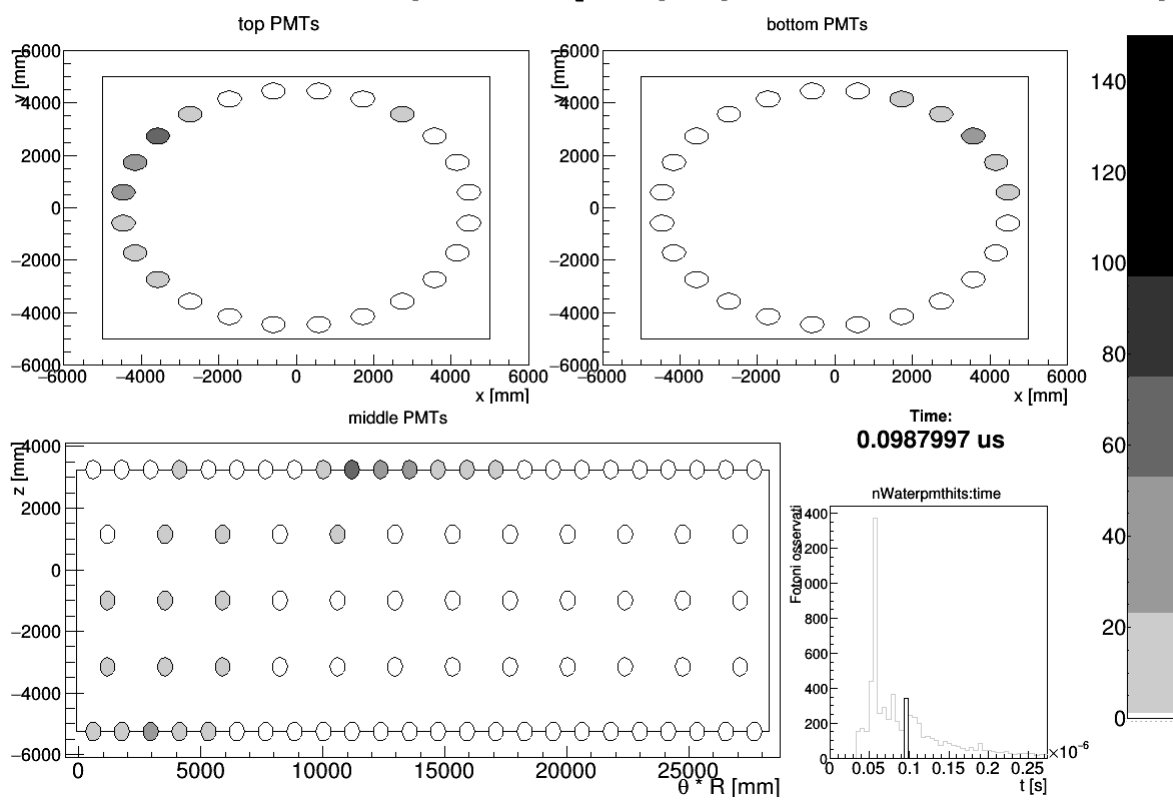


Figura 3.11: Fotogramma dell'EventTimeFrames del muone 971

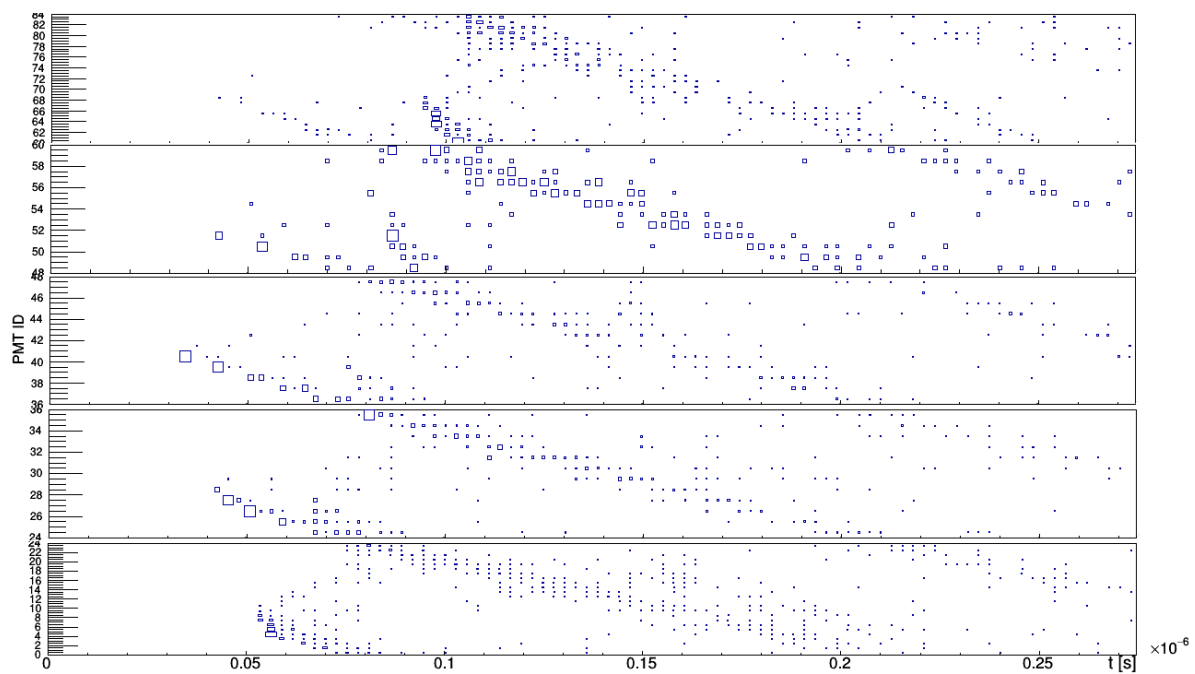


Figura 3.12: Mappa temporale dei PMT del muone 971

# Conclusioni

Uno dei principali quesiti della cosmologia e della fisica moderna è la natura della materia oscura. L'ipotesi della sua esistenza è supportata da numerose osservazioni di tipo astronomico e cosmologico. Tra i vari candidati al ruolo di particella di materia oscura i principali sono da ricercarsi nelle WIMP: l'esistenza di queste particelle non è contemplata nel Modello Standard, bensì in teorie al di là del modello standard come ad esempio la teoria della Supersimmetria.

Sono molteplici gli esperimenti volti alla rivelazione della materia oscura, che sfruttano sia tecniche di rivelazione indiretta che diretta. Tra gli esperimenti di ricerca diretta di materia oscura occupa una posizione di rilievo il progetto XENON presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso: questi sono situati sotto 1.4 km di roccia, schermo naturale contro la radiazione cosmica. Tali laboratori a bassissima radioattività ambientale sono il luogo ideale per ospitare un esperimento di tale sensibilità. Il rivelatore di XENON, cuore centrale dell'esperimento, è una TPC a doppia fase (liquido-gas) riempita di Xenon: la WIMP urta elasticamente un nucleo di Xenon producendo un doppio segnale, sia in carica per ionizzazione che in luce per scintillazione. Il limite inferiore della sezione d'urto raggiunto da XENON100, attualmente in funzione, è di  $1 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$  per interazione indipendente dallo spin per WIMP di massa 55 GeV.

Il presente lavoro di tesi si colloca nell'ambito dello sviluppo di un programma di simulazione Monte Carlo, creato per realizzare virtualmente l'esperimento XENON1T e per effettuare studi preliminari. Lo scopo di questa tesi è stato quello di contribuire alla scrittura e alla verifica del codice e allo studio di eventi di muoni cosmici mediante l'utilizzo di tale simulatore. In particolare è stato controllato il posizionamento dei componenti del Muon Veto, è stata inserita nel codice la galleria circostante l'esperimento, costituita da uno strato sottile di cemento e uno strato spesso di roccia. È stata inoltre aggiunta una funzione di supporto alla generazione di particelle nel simulatore, che ha permesso la generazione di muoni realistici che tengono conto della struttura e del profilo della montagna del Gran Sasso soprastante i laboratori. L'analisi dati è stata effettuata scrivendo un programma C++ in grado di analizzare i risultati forniti dal simulatore e di generare degli Event Display statici e dinamici per una visualizzazione efficace degli eventi. Tale programma ha come oggetto di studio le caratteristiche dei muoni generati e



della risposta del Muon Veto, sia per quanto riguarda una collezione numerosa di eventi, sia per l'evento singolo. In particolare si è studiata la luminosità osservata degli eventi e la dinamica temporale e geometrica dei fotoni emessi per effetto Čerenkov .

# Appendice A

## Soluzione analitica per un'ellisse vincolata

Consideriamo un'ellisse centrata nell'origine di un piano cartesiano. Siano  $a$  e  $b$  i due semiassi, con  $a$  diretto verso la semiretta positiva delle  $y$ . Sia poi  $l$  una corda parallela all'asse  $x$  e posta nel semipiano negativo delle  $y$ . Vogliamo trovare un'espressione per  $a$ , noti  $b$ ,  $l$  e  $H$ . Possiamo dunque scrivere l'equazione analitica dell'ellisse, nella forma:

$$\left(\frac{x}{b}\right)^2 + \left(\frac{y}{a}\right)^2 = 1 \quad (\text{A.1})$$

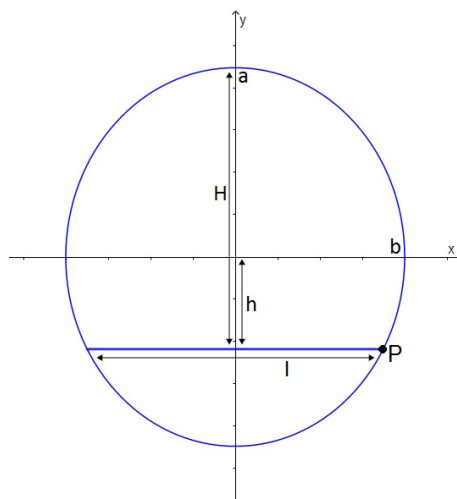
Considerando poi l'estremo  $P$  della corda con ascissa maggiore, e chiamando  $h$  la distanza tra corda e origine del piano, abbiamo che il punto  $P\left(\frac{l}{2}, -h\right)$  deve soddisfare la A.1:

$$\left(\frac{l}{2b}\right)^2 + \left(\frac{-h}{a}\right)^2 = 1 \quad (\text{A.2})$$

Eseguendo ora la sostituzione  $a = H - h$ , dove  $H$  è la distanza tra corda e punto dell'ellisse con ordinata maggiore, e svolgendo i calcoli otteniamo:

$$\left(\frac{l}{2b}\right)^2 + \left(1 - \frac{H}{H-h}\right)^2 = 1 \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{l^2}{4b^2} + \frac{H^2}{(H-h)^2} - \frac{2H}{H-h} = 0 \quad (\text{A.4})$$



Applicando ora la sostituzione  $\alpha = \frac{l^2}{4b^2}$  e moltiplicando l'equazione A.4 per  $(H - h)^2$  otteniamo:

$$\alpha h^2 + 2H(1 - \alpha)h - H^2(1 - \alpha) = 0 \quad (\text{A.5})$$

Da cui, dividendo per  $(1 - \alpha)$ ,

$$\left(\frac{\alpha}{1 - \alpha}\right) h^2 + 2Hh - H^2 = 0 \quad (\text{A.6})$$

Abbiamo quindi un'equazione di secondo grado che ci fornisce due soluzioni per  $h$ :

$$h = \frac{-H \pm \sqrt{H^2 + H^2 \frac{\alpha}{1 - \alpha}}}{\frac{\alpha}{1 - \alpha}} = \left(1 - \frac{1}{\alpha} \pm \frac{\sqrt{1 - \alpha}}{\alpha}\right) H \quad (\text{A.7})$$

Recuperando ora le sostituzioni fatte e considerando solo la soluzione positiva per  $h$ , poiché è una lunghezza, abbiamo la seguente formula finale per  $a$ :

$$a = H - \left(1 - \frac{4b^2}{l^2} + \frac{2b\sqrt{4b^2 - l^2}}{l^2}\right) H = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{l^2}{4b^2}}\right) \frac{4b^2}{l^2} H \quad (\text{A.8})$$

◇

# Appendice B

## Analizer.h

Viene qui riportato parte del codice del programma di analisi dati *Analizer.C*, in particolare l'header file *Analizer.h*. Vengono solamente mostrate le dichiarazioni delle funzioni più importanti.

---

```
class Analizer{
public :
    Analizer();
    virtual void LoadFile(const char* filename);
    virtual void Loop(bool more=false);
    virtual void FindIDs();
    virtual void SetPMTs();
    virtual void FillPMTs(Long64_t entry);
    virtual void SetPMTPaletteC();
    virtual void SetPMTPaletteBW();
    virtual void DrawDisplay(TCanvas* Display, bool graphic=true);
    virtual void DrawInfo(TCanvas* Display, Long64_t entry);
    virtual void DrawPMTs(TCanvas* Display, bool graphic=true);
    virtual void DrawTime(TCanvas* Display, float actualtime=-1);
    virtual void DrawTimes(TCanvas* Display, Long64_t entry, int nframes=0,
        int frame=0);
    virtual float FindMaxTime(Long64_t entry, Bool_t verbose=false);
    virtual void EventDisplay(Long64_t entry, Bool_t verbose=false);
    virtual void EventTimelapse(Long64_t entry, string gifname = "", int
        Ntimes=100);
    virtual void EventTimeFrames(Long64_t entry, string gifname = "", int
        Ntimes=50);
    virtual void RelevantPMTs(Long64_t entry);
    virtual void SaveData(string filename = "");
};
```

---

# Bibliografia

- [1] F. Agostini, *Caratterizzazione e calibrazione dei fotomoltiplicatori del sistema di veto di muoni per l'esperimento XENON1T*, Tesi di Laurea Magistrale, Bologna, 2012/2013
- [2] T. R. Cram et al., *A complete, high-sensitivity 21 cm hydrogen line survey of M31*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 40, 215-248, 1980
- [3] Chung Kao, *Neutralino Dark Matter in Supersymmetric Models*, Oklahoma, 27/12/2004
- [4] R. Casadio, *Elements of Relativity*, Dispense per il corso "Elementi di Teoria della relatività", Bologna, 30/09/2014
- [5] D. Clowe, *A direct empirical proof of the existence of dark matter*, arXiv:astro-ph/0608407v1, 19/08/2006
- [6] J. Tauber, *Latest results from Planck*, ISAPP International Summer School "The Dark Side of the Universe", Heidelberg, Luglio 2012
- [7] R. Tojeiro, *Understanding the Cosmic Microwave Background temperature power spectrum*, 16/03/2006
- [8] G. Tormen, *Anisotropie del Fondo Cosmico di Microonde*, Dispense per il corso "Cosmologia", Padova, 19/12/2010
- [9] B. Caccianiga, *La Materia Oscura. Corso di Introduzione all'Astrofisica*, 2009/2010
- [10] *Esperimento EROS*, <http://eros.in2p3.fr/>
- [11] *IRAP (Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie)*, <http://www.irap.omp.eu/en/actualites/actu-planck4>
- [12] T. Montaruli, *Flusso dei neutrini atmosferici e ricerca di neutrini astrofisici*, Tesi di Dottorato in Fisica, Bari, Febbraio 1998

- [13] P. Mishra e T. P. Singh, *Galaxy rotation curves from a fourth order gravity*, arXiv:1206.3322v1 [astro-ph.GA], 14/06/2012
- [14] R. Pesce, *Dark Matter particellare e sua rivelazione*, Dottorato di Ricerca in Fisica, Genova, 28/07/2005
- [15] C. de los Heros, *Indirect Dark Detection*, ISAPP International Summer School "The Dark Side of the Universe", Heidelberg, Luglio 2012
- [16] *Esperimento KM3NeT*, <http://www.km3net.org/home.php>
- [17] M. Di Mauro et al., *Dark matter vs. astrophysics in the interpretation of AMS-02 electron and positron data*, arXiv:1507.07001v1 [astro-ph.HE], 24/07/2015
- [18] D. S. Akerib et al., *Results from a search for dark matter in LUX with 332 live days of exposure*, arXiv:1608.07648v1, 27/8/2016
- [19] *Esperimento XENON, sezione di Bologna*, <http://www.bo.infn.it/xenon/>
- [20] *Descrizione Generale LNGS*, <https://www.lngs.infn.it/it/descrizione-generale>
- [21] E. Aprile, *Direct Dark Matter Searches: Lecture 2*, NIJMEGEN09 Summer School, 25/09/2009
- [22] *Esperimento XENON, LNGS*, <https://www.lngs.infn.it/it/pagine/xenon-ita>
- [23] L. Leardini, *Studio delle interazioni dei neutroni in Xenon liquido*, Tesi di Laurea, Bologna, 2010/2011
- [24] M. Pinelli, *Preparazione di un setup sperimentale e misure preliminari per la caratterizzazione in aria di SiPM da utilizzare per esperimenti di ricerca della Materia Oscura*, Tesi di Laurea, Bologna, 2014/2015
- [25] E. Aprile et al., *Design and Performance of the XENON10 Dark Matter Experiment*, arXiv:1001.2834v1 [astro-ph.IM], 16/01/2010
- [26] E. Aprile et al., *Physics reach of the XENON1T dark matter experiment*, JCAP04 (2016) 027
- [27] H. Wulandari, *Neutron Flux at the Gran Sasso Underground Laboratory*, arXiv:hep-ex/0312050v2, 19/07/2004
- [28] V. A. Kudryavtsev, *Muon simulation codes MUSIC and MUSUN for underground physics*, arXiv:0810.4635v1, 25/10/2008
- [29] E. Aprile et al., *XENON100 Dark Matter Results from a Combination of 477 live days*, arXiv:1609.06154v1, 20/09/2016

# Ringraziamenti

Al termine di questo lavoro non posso che ringraziare la Prof.ssa Gabriella Sartorelli, mia relatrice, per avermi permesso di affrontare questo lavoro di tesi e per avermi fatto conoscere e vivere l'ambiente di lavoro dei ricercatori INFN. Tengo a ringraziare particolarmente il Dott. Marco Selvi, mio correlatore, per il costante aiuto e la disponibilità, e i Dott.ri Fabio V. Massoli, Pietro Di Gangi, Arianna Rocchetti per l'aiuto e la simpatia portata nel luogo di lavoro. Ringrazio sentitamente la mia famiglia e i miei amici, specialmente i ragazzi della *BandOfPhysicists* che mi hanno accompagnato in questi tre anni del corso di Laurea in Fisica.