

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia “Augusto Righi”
Corso di Laurea in Fisica

DarkSide-20k: la trasmissione ottica del segnale

Relatore:
Prof. Luisa Cifarelli

Presentata da:
Sofia Tomassini

Correlatore:
Dott. Luigi Pio Rignanese

Anno Accademico 2020/2021

Sommario

Questa tesi descrive lo sviluppo di un sistema di trasmissione ottica di segnali elettrici concepito per il rivelatore dell'esperimento DarkSide-20k, un esperimento di ultima generazione per la ricerca di materia oscura che verrà realizzato presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

Il sistema sviluppato, chiamato Opto-Link, si basa su una tecnologia innovativa ideata per rispondere alle caratteristiche di DarkSide-20k. Costituito da materiali estremamente radio-puri, il sistema è in grado di funzionare in maniera ottimale alle temperature criogeniche dell'argon liquido usato nell'esperimento per la rivelazione diretta delle WIMPs. I test di laboratorio effettuati hanno permesso la caratterizzazione degli elementi essenziali dell'Opto-Link e la realizzazione di un primo prototipo di trasmissione ottica dei segnali per DarkSide-20k.

Indice

| | |
|---|-----------|
| Introduzione | 2 |
| 1 La materia oscura | 5 |
| 1.1 Evidenze dell'esistenza della materia oscura | 5 |
| 1.1.1 Curve di rotazione delle galassie a spirale | 6 |
| 1.1.2 Lensing gravitazionale | 7 |
| 1.1.3 Bullet Cluster | 8 |
| 1.1.4 CMB | 9 |
| 1.2 Composizione della materia oscura | 13 |
| 1.3 Teorie alternative | 14 |
| 2 La rivelazione diretta della materia oscura | 16 |
| 2.1 L'impiego dei gas nobili negli esperimenti di rivelazione diretta | 17 |
| 2.1.1 L'argon | 18 |
| 2.1.2 Argon sotterraneo | 19 |
| 2.2 TPC | 20 |
| 2.2.1 Pulse Shape Discrimination | 22 |
| 2.3 Stato dell'arte | 24 |
| 3 DarkSide-20k | 29 |
| 3.1 Il sistema di fotorivelazione | 32 |
| 4 Opto-Link: Componenti del sistema di trasmissione | 36 |
| 4.1 LED | 36 |
| 4.2 Fibra ottica | 38 |
| 4.3 Fotodiode | 40 |
| 4.4 Test di laboratorio | 41 |
| 4.4.1 Caratterizzazione del LED | 41 |
| 4.4.2 Confronto fra fibre ottiche | 45 |
| 4.4.3 Progettazione del connettore ottico | 46 |
| 4.5 Prototipo di trasmissione | 48 |

| | |
|---------------------|-----------|
| Conclusioni | 49 |
| Bibliografia | 50 |

Introduzione

L'esistenza della materia oscura è una ipotesi sempre più solida, grazie alle numerose evidenze scientifiche a suo sostegno, che vanno da anomalie nelle osservazioni astronomiche, a considerazioni di carattere cosmologico.

Si ritiene che questa componente costituisca circa il 26% dell'intero Universo ma, ad oggi, non è mai stata rivelata, né in maniera diretta né in maniera indiretta, e non si hanno quindi prove certe della sua esistenza, rendendo la materia oscura uno dei misteri più profondi nella conoscenza dell'Universo.

Molte sono le ipotesi fatte allo scopo di trovare oggetti che potrebbero formare la materia oscura e, fra di esse, la più accreditata è che sia composta da particelle.

Studi basati su osservazioni e su calcoli teorici hanno contribuito a delineare le principali caratteristiche a cui le particelle di materia oscura devono rispondere. Tuttavia, nessuna particella conosciuta, presente nel Modello Standard, può essere un buon candidato, aprendo nuovi interrogativi che hanno portato ad ipotizzare l'esistenza di nuove particelle, di natura non barionica, e ancora sconosciute.

In particolare, tra le diverse particelle ipotizzate, la ricerca scientifica si concentra sulla rivelazione delle WIMPs, Weakly Interacting Massive Particles, una classe di particelle massive non barioniche, che, interagendo solo a livello della interazione debole, rispettano tutte le caratteristiche attribuite ai costituenti della materia oscura.

La rivelazione delle WIMPs in maniera diretta è l'obiettivo di molti esperimenti fra i quali DarkSide-20k.

DarkSide-20k è un rivelatore di ultima generazione che entrerà in funzione nei prossimi anni ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Sarà in grado di raggiungere grandi sensibilità grazie all'utilizzo di una massa di circa 20 tonnellate di argon liquido all'interno di una camera a proiezione temporale (Time Projection Chamber, TPC) a doppia fase, che rappresenta il cuore dell'esperimento.

Nel primo capitolo di questo testo si spiegherà cosa è la materia oscura e si descriveranno alcune delle numerose evidenze della sua esistenza, a partire dalle prime osservazioni di anomalie nelle curve di rotazione delle galassie a spirale, fino agli effetti di lensing gravitazionale osservati, al Bullet Cluster, ma anche a considerazioni teoriche di carattere cosmologico basate sullo studio della radiazione cosmica di fondo (CMB).

Verranno presentate le caratteristiche dei principali candidati come costituenti della ma-

teria oscura e in particolare come WIMPs.

Inoltre si presenteranno sinteticamente alcune teorie alternative, chiamate teoria MOND e TeVeS, che cercano di spiegare le anomalie non come evidenze dell'esistenza della materia oscura ma come conseguenze di teorie che propongono una modifica della legge di gravitazione.

Nel secondo capitolo si descriverà la tecnica di rivelazione diretta, basata sullo studio dei segnali di scintillazione e ionizzazione prodotti dalle interazioni delle WIMPs con il materiale bersaglio impiegato nel rivelatore.

Verranno approfonditi il comportamento dei gas nobili e, in particolare, i vantaggi nell'impiego dell'argon liquido come materiale bersaglio.

Si descriveranno la struttura e il principio di funzionamento della camera a proiezione temporale a doppia fase (TPC) che rappresenta la parte centrale di molti degli esperimenti di rivelazione diretta della materia oscura.

I principali esperimenti ad oggi in funzione o in fase di costruzione verranno illustrati e descritti, mettendone a confronto le dimensioni, le sensibilità raggiunte e i risultati ottenuti.

Nel terzo capitolo verrà presentato DarkSide-20k. Il rivelatore, ancora in fase di costruzione, sarà descritto nelle sue componenti, con particolare attenzione al sistema di acquisizione e trasmissione del segnale.

Infine, nel quarto capitolo, ci si concentrerà sul sistema di trasmissione ottica del segnale, chiamato Opto-Link, progettato e sottoposto a test in laboratorio criogenico al fine di studiare la risposta del sistema, ottimizzare la trasmissione e realizzare un prototipo di trasmissione quanto più efficiente possibile. Il prototipo di trasmissione è il risultato di test che hanno permesso la caratterizzazione delle singole componenti del sistema Opto-Link (LED, fibre ottiche e fotodiodi) con particolare attenzione alla progettazione e realizzazione del connettore ottico fra LED e fibra ottica.

Capitolo 1

La materia oscura

A partire dall'inizio del XX secolo sono state raccolte numerosissime evidenze che affermano l'esistenza di una componente di materia ignota che non emette luce e non può dunque essere osservata ma che svolge un ruolo chiave nell'Universo.

Le possibili prove dell'esistenza di questa componente misteriosa, che viene chiamata materia oscura, riguardano vari campi della ricerca: da anomalie nelle osservazioni astronomiche alla elaborazione di modelli cosmologici per la formazione e l'evoluzione delle strutture presenti nell'Universo.

1.1 Evidenze dell'esistenza della materia oscura

Il primo scienziato a sostenere l'esistenza di una componente nuova e nascosta dell'Universo fu Fritz Zwicky, astronomo svizzero che nel 1933 studiò i moti di molte galassie all'interno dell'ammasso galattico della Chioma. Zwicky nota che la velocità con cui le galassie si muovono è qualche ordine di grandezza superiore rispetto alla velocità ricavata da calcoli teorici fatti stimando che la massa contenuta nell'ammasso sia solamente la massa osservata, cioè la somma delle masse delle singole galassie presenti che possono essere calcolate considerando la quantità di luce emessa. Per stimare la quantità di massa gravitazionale presente realmente in una galassia si utilizza il teorema del viriale, che stabilisce una relazione fra energia cinetica e potenziale di un corpo in equilibrio secondo l'equazione:

$$2K + U = 0 \tag{1.1}$$

con K energia cinetica e U energia potenziale del sistema.

La velocità misurata può essere giustificata considerando la presenza di una massa pari a circa $3 \times 10^{14} M_{sun}$ (M_{sun} = massa solare), contro però una stima di $10^{12} M_{sun}$ per la massa osservata.

Supponendo che la gravità newtoniana sia valida anche a grandi distanze, per spiegare tale eccesso di materia, necessaria per descrivere la velocità sperimentalmente misurata,

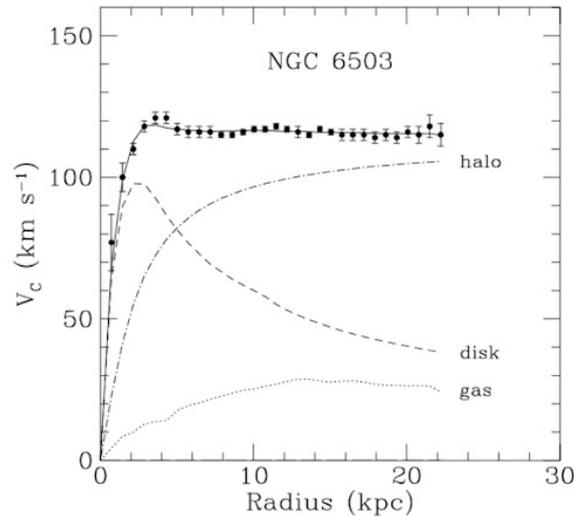


Figura 1.1: Curve di rotazione della galassia a spirale NGC 60503 in cui si vedono separatamente i contributi di gas, del disco galattico e dell’alone di materia oscura. Si può notare che la curva resta costante al crescere del raggio contrariamente a quanto atteso [1]

si deve ipotizzare l’esistenza di una parte di materia non ordinaria, che non emette luce e che circonda con grandi aloni massivi le galassie osservate: la materia oscura.

1.1.1 Curve di rotazione delle galassie a spirale

Successive osservazioni astronomiche hanno condotto al consolidamento dell’ipotesi della esistenza della materia oscura, prima fra tutti lo studio delle curve di rotazione delle galassie a spirale. La velocità di rotazione di una stella all’interno di una galassia, stando ai calcoli basati sulla gravità newtoniana, decresce all’aumentare della distanza r dal bulge galattico centrale come $\frac{1}{r^2}$, infatti la velocità radiale di un corpo in rotazione è data da:

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

dove G è la costante di gravitazione universale e $M(r)$ è la massa inclusa dal centro della galassia alla distanza dal centro r . Ciò che si osserva è che invece la velocità radiale reale resta circa costante al variare del raggio (figura 1.1). La discrepanza fra i due andamenti, può essere spiegata ipotizzando la presenza di un grande alone di materia oscura attorno alla galassia osservata.

Si può stimare l’abbondanza di tale componente sconosciuta calcolando il rapporto massa su luce M/L , cioè il rapporto fra la massa gravitazionale presente, causata dal movimento delle stelle, e la luminosità osservata. Si calcola che il rapporto M/L fra

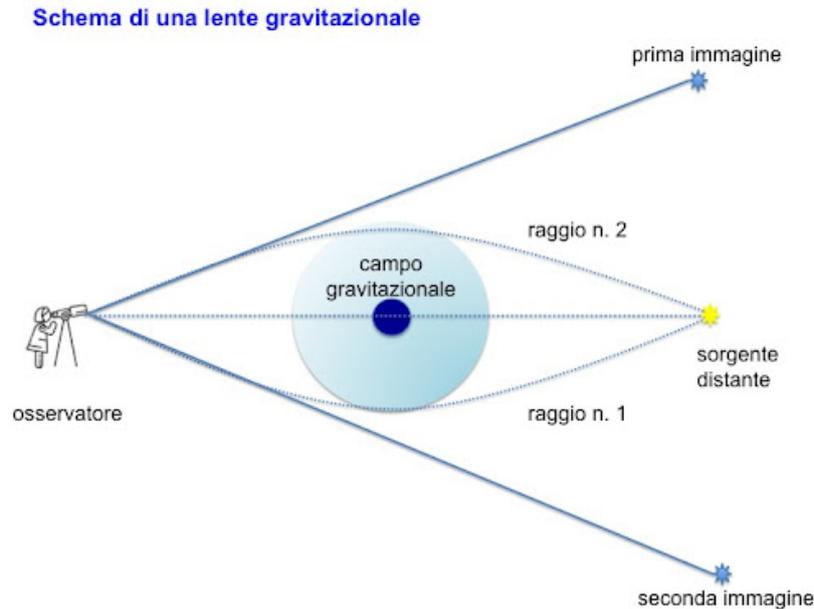


Figura 1.2: Riproduzione schematica del fenomeno di lensing gravitazionale

materia totale in una galassia e materia visibile che emette radiazione elettromagnetica è circa pari a 10 e cioè la materia non visibile è 10 volte più abbondante di quella visibile che compone una singola galassia.

1.1.2 Lensing gravitazionale

Un'altra possibile prova a supporto dell'ipotesi dell'esistenza della materia oscura deriva dallo studio del lensing gravitazionale. Il fenomeno del lensing gravitazionale è spiegato dalla teoria della Relatività Generale di Einstein, la quale prevede che lo spazio-tempo, in presenza di un forte campo gravitazionale, venga deformato. La curvatura dello spazio tempo implica che i fotoni, che percorrono una traiettoria rettilinea, seguano tale curvatura e si muovano apparentemente su traiettorie curve. Osservazioni astronomiche hanno permesso di ottenere immagini di oggetti celesti molto distanti dalla Terra, i quali appaiono fortemente deformati: ciò è dovuto alla deflessione dei raggi luminosi provenienti dall'oggetto osservato e si può quindi dedurre la presenza, fra sorgente e osservatore, di una grande massa intermedia che funge da "lente" dell'oggetto che si sta osservando. I fasci luminosi provenienti dalla sorgente lontana subiscono una distorsione che ha come effetto l'ingrandimento della sorgente; inoltre, poichè la luce viene emessa in tutte le direzioni, diversi fasci di luce provenienti dalla stessa sorgente subiscono diverse distorsioni e danno origine a immagini multiple dello stesso oggetto. Il fenomeno di lensing gravitazionale è schematicamente descritto in figura 1.2.



Figura 1.3: Lensing gravitazionale prodotto dall'ammasso galattico MACSJ0138.0-2155 che permette di osservare la galassia MRG-M0138, distante più di 10 miliardi di anni luce dalla Terra. L'immagine è ottenuta combinando otto diversi filtri a infrarossi installati sul telescopio spaziale Hubble (ESA/Hubble & NASA, A. Newman, M. Akhshik, K. Whitake(HST))

In figura 1.3 è riportato un esempio di lensing gravitazionale; nell'immagine, in particolare, si osservano forme molto allungate della sorgente luminosa, chiamati archi gravitazionali, che sono l'effetto della deformazione dei fasci luminosi quando sorgente e lente sono quasi perfettamente allineati. Conoscendo l'immagine non deformata dell'oggetto osservato è possibile stimare l'entità della massa della lente, la quale, però, risulta molto superiore alla massa della materia visibile che si trova fra sorgente e osservatore. Questa differenza in massa è perciò attribuita alla presenza della materia oscura non visibile.

1.1.3 Bullet Cluster

Il Bullet Cluster, anche conosciuto come l'oggetto 1E 0657-56, è dato da due ammassi galattici che collidono. Gli ammassi (cluster) di galassie sono formati prevalentemente da stelle (2%), gas caldo (5-15%) e materia oscura e ognuna di queste componenti interagisce diversamente durante la collisione. In particolare le stelle nelle galassie non interagiscono fra loro a causa della bassa sezione d'urto che implica una bassa probabilità di collisione, mentre le nubi di gas caldo, che costituiscono strati molto densi composti di materia barionica, interagiscono frenandosi a vicenda ed emettono grande quantità di energia che può essere osservata come radiazione X. L'effetto di lensing gravitazionale delle galassie lontane provocato dal Bullet Cluster permette di ricostruire la distribuzione spaziale della massa all'interno del cluster. In figura 1.4 si osserva chiaramente che

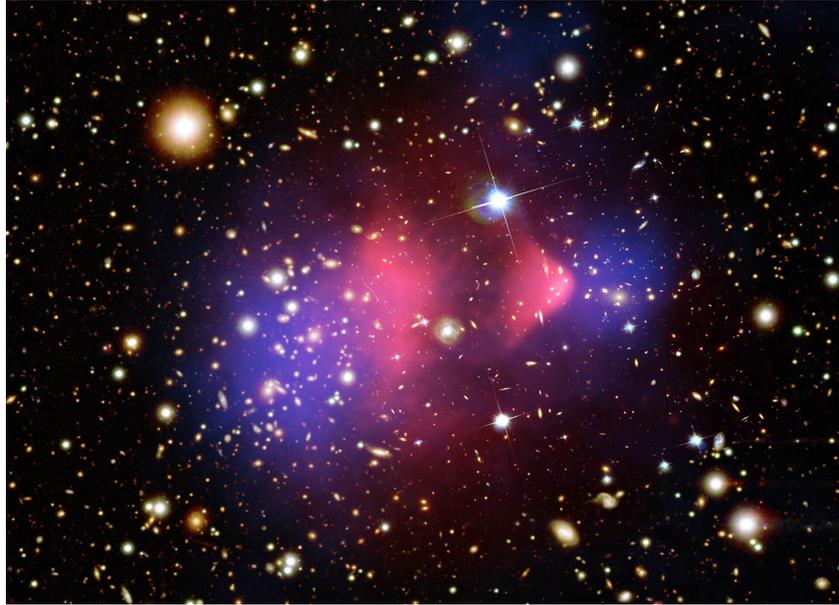


Figura 1.4: L'immagine composta mostra l'ammasso galattico 1E 0657-56, chiamato Bullet Cluster. Le zone rosa, ottenute grazie al telescopio a raggi X Chandra della NASA, individuano la presenza di materia barionica. In arancione e bianco compaiono le immagini in ottico delle galassie ottenute con il telescopio spaziale Hubble, mentre le zone in blu rappresentano la distribuzione della massa totale presente stimata, in ampia parte composta di materia oscura. (X-ray: NASA/CXC/CfA/M.Markevitch, Optical and lensing map: NASA/STScI, Magellan/U.Arizona/D.Clowe, Lensing map: ESO WFI)

la distribuzione di materia totale (in blu), per lo più materia oscura, nel Bullet Cluster è quasi totalmente separata dalla regione centrale in cui si ha concentrazione di materia barionica (in rosa). Il Bullet Cluster costituisce una prova molto forte a sostegno della esistenza della materia oscura ed evidenzia, inoltre, che questa interagisce in modo completamente diverso rispetto alla materia barionica.

1.1.4 CMB

L'esistenza della materia oscura è supportata da considerazioni di carattere cosmologico. Quanto sappiamo sull'Universo attuale è racchiuso nel modello cosmologico Λ CDM che attualmente è il più accreditato ed è formulato matematicamente a partire dalla Relatività Generale di Einstein. Questo modello è basato sulla esistenza della materia oscura fredda (CDM) e della energia oscura (Λ) che svolgono un ruolo essenziale nella formazione e nella evoluzione dell'Universo.

Le osservazioni che hanno portato alla elaborazione del modello cosmologico provengono dallo studio della radiazione cosmica di fondo (CMB), una radiazione in microonde che permea tutto l'Universo ed è quasi totalmente omogenea e isotropa (a meno di una parte su 100000). La temperatura della CMB risulta essere di 3 K, indipendentemente dalla direzione di osservazione.

La CMB è una radiazione fossile che è stata emessa circa 380000 anni dopo il Big Bang quando l'Universo si trovava a una temperatura di circa 3000 K. Il momento di emissione segna il confine fra due fasi differenti: Universo opaco e Universo trasparente. Nella fase precedente alla CMB (corrispondente all'età dell'Universo compresa fra 0 e 380000 anni) la temperatura era molto elevata e dunque l'Universo era molto denso ed energetico; questo implica che i fotoni avevano energia sufficiente per produrre coppie di particelle e antiparticelle che a loro volta si annichilivano di nuovo in un fotone. I continui scambi energetici fra materia e radiazione implicano che i fotoni avessero un libero cammino medio molto breve non riuscendo quindi a viaggiare fino a noi: materia e radiazione erano accoppiate e l'Universo era opaco.

Conseguentemente al raffreddamento dell'Universo, l'energia dei fotoni si abbassò fino alla soglia di produzione delle coppie particella-antiparticella; a questo punto materia e radiazione si disaccoppiarono e i fotoni divennero liberi di viaggiare fino a noi: l'Universo divenne trasparente. Questa separazione è segnata dunque dalla emissione della prima radiazione, appunto la CMB, il segnale più antico che è possibile osservare e che costituisce un limite spaziale e temporale in quanto non è possibile indagare regioni più profonde della superficie corrispondente alla sua emissione detta "superficie di ultimo scattering".

Tuttavia la CMB apre nuovi interrogativi, soprattutto dovuti alla sua "eccessiva" omogeneità. Si ipotizza che nei primi istanti dopo il Big Bang, l'Universo primordiale fosse molto piccolo e caldo; circa 10^{-35} s dopo l'esplosione il modello cosmologico attuale prevede sia iniziata una fase di espansione esponenziale dovuta al dominio della costante cosmologica Λ , la quale individua l'energia oscura, su materia e radiazione. La fase di rapidissima espansione, chiamata inflazione, ha portato le dimensioni dell'Universo primordiale ad aumentare di un fattore pari a circa $10^{25} - 10^{30}$ in pochissimo tempo. Questo giustifica l'omogeneità della CMB: zone che oggi osserviamo molto distanti fra loro avrebbero avuto modo di comunicare in epoche precedenti all'inflazione. Inoltre la rapidità della crescita ha portato ad uno svuotamento di materia e alla creazione di un vuoto omogeneo, solo successivamente riempito di materia. In questa fase di riempimento, tuttavia, la materia si è disposta seguendo l'omogeneità precedentemente creatasi e che oggi osserviamo.

L'ipotesi dell'inflazione spiegherebbe anche la piattezza dello spazio-tempo che emerge dagli studi della CMB. La geometria dell'Universo è descritta dalla Relatività Generale

e in particolare dalla metrica di Friedmann:

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)\left[\frac{dr^2}{1+kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin(\theta)^2 d\phi^2)\right] \quad (1.3)$$

dove $a(t)$ è detto fattore di scala o fattore di espansione e k è detto costante di curvatura e può assumere solo tre valori: $k=0,+1,-1$. In base al valore di k si determina la geometria spaziale dello spazio-tempo. Infatti per $k=+1$ la metrica si ridurrebbe a quella di una superficie sferica, con r limitato, compreso fra 0 e 1 escluso, e si avrebbe un Universo chiuso e limitato spazialmente; per $k=-1$ la metrica si ridurrebbe a quella di una superficie iperboloidale, senza limitazioni spaziali e si avrebbe quindi un Universo aperto; per $k=0$ invece la metrica si ridurrebbe a quella euclidea che descrive un Universo piatto. Se l'Universo è piatto allora k deve essere esattamente pari a zero.

Le equazioni di Einstein che descrivono lo spazio-tempo, ipotizzando che esso possa essere pensato come un fluido omogeneo e isotropo caratterizzato da densità di energia ρ e pressione p , possono essere riscritte nella forma $\Omega = 1 + \frac{k}{H^2 a^2}$ dove Ω è detto parametro di densità ed è definito come rapporto tra la densità reale (osservata) dell'Universo e la densità critica, ossia come $\Omega = \frac{8\pi G \rho}{3H^2}$, H è la costante di Hubble che descrive l'espansione dell'Universo e k è il parametro che compare nella equazione 1.3. Tale relazione è detta equazione di Friedmann, e appare evidente il legame fra i valori dei parametri Ω e k .

Se $k=0$ allora $\Omega=1$ e quindi la densità ρ deve eguagliare la densità critica $\rho_{critica} = \frac{3H^2}{8\pi G}$. Tuttavia, calcolando la massa a partire dagli oggetti che si riescono ad osservare, costituiti di materia barionica, la densità dell'Universo ρ risulta essere solo circa il 5% del totale. Il restante 95% della massa-energia dell'Universo è di origine ignota e non barionica. È necessario perciò ammettere l'esistenza della cosiddetta materia oscura e della energia oscura, che si stima costituiscano rispettivamente il 26% e il 69% del totale, garantendo che $\rho = \rho_{critica}$ e che dunque l'Universo sia geometricamente piatto.

La stima delle abbondanze delle diverse componenti dell'Universo si è ottenuta attraverso lo studio delle anisotropie della CMB. Le anisotropie della CMB (figura 1.5) sono state misurate dalla missione Planck raggiungendo un livello di precisione di 10^{-5} . Planck ha registrato variazioni di temperatura nella radiazione emessa, le quali sono in relazione con fluttuazioni della distribuzione della materia. Tali fluttuazioni di densità della materia presente nell'Universo sono essenziali per la formazione delle strutture che si osservano. Infatti, la materia collassa su se stessa aggregandosi, ma la quantità di massa barionica non è sufficiente a spiegare la formazione e la crescita delle strutture a partire dalla fine del periodo della ricombinazione, fase in cui elettroni e protoni si uniscono a formare idrogeno neutro, rendendo necessaria l'ipotesi dell'esistenza della materia oscura.

È possibile ricostruire la quantità di materia oscura e barionica a partire dallo studio dello spettro di potenza angolare, in figura 1.6.

Lo spettro di potenza è stato ottenuto misurando la deviazione ΔT della temperatura misurata da Planck, dal valore medio a diverse scale angolari. ΔT al variare della

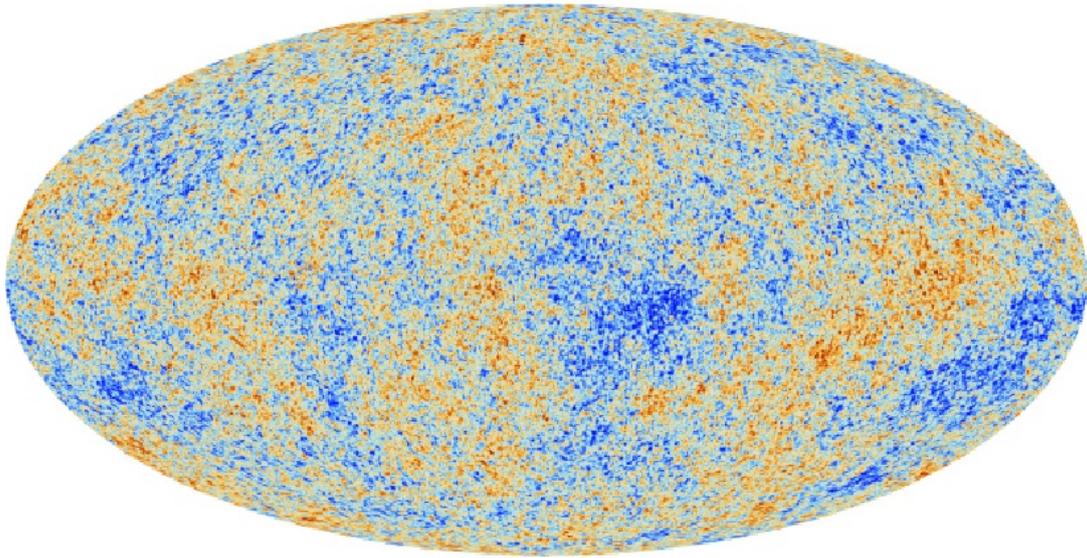


Figura 1.5: Mappa della radiazione cosmica di fondo (CMB) osservata dalla missione Planck. I differenti colori indicano le fluttuazioni di temperatura registrate

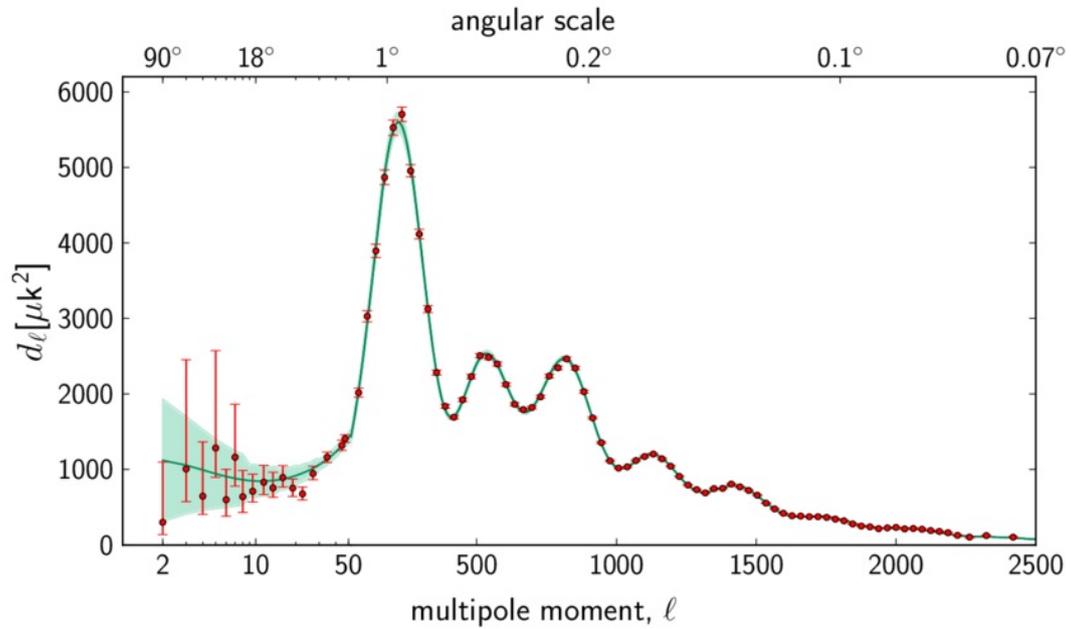


Figura 1.6: Spettro di potenza misurato dalla missione Planck al variare della scala angolare (in rosso) su cui è stato eseguito il fit con i parametri cosmologici ricavati dal modello Λ CDM (in verde)

direzione di osservazione n è esprimibile come combinazione lineare in armoniche sferiche Y_{lm} :

$$\Delta T(n) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(n) \quad (1.4)$$

dove i moduli quadrati dei coefficienti lineari $|a_{lm}|^2$ sono proporzionali ai valori di potenza C_l (punti rossi in figura 1.6). Sui punti ottenuti poi è stato eseguito il fit (curva verde in figura 1.6) con i parametri cosmologici teorici ricavati dal modello Λ CDM relativi alle densità di materia barionica e di materia oscura.

Dallo studio dei picchi ottenuti si possono ricavare stime delle abbondanze di materia oscura e materia barionica nell'Universo, in particolare dal rapporto fra le altezze dei primi due picchi si può dedurre la densità della massa barionica, mentre dal rapporto fra il secondo e terzo picco la densità totale della materia. Ciò ha permesso di dedurre che la materia oscura è circa cinque volte più abbondante della materia barionica.

Dunque molteplici evidenze indicano che la materia oscura è presente nell'Universo e che occupa un'importante posizione nella comprensione dei meccanismi che ne regolano l'evoluzione, avendo un ruolo cruciale nella formazione delle strutture.

1.2 Composizione della materia oscura

L'ipotesi più accreditata è che la materia oscura sia costituita da particelle di natura non barionica che si sono originate nel Big Bang. Tali particelle, non interagendo né elettromagneticamente né tramite interazione forte, devono avere carica elettrica e di colore neutra e, per essere sopravvissute fino ad oggi, devono essere stabili o con tempo di vita medio confrontabile con l'età dell'Universo; inoltre devono avere un basso tasso di interazione con la materia ordinaria, confrontabile con l'intensità della interazione debole.

Si può ipotizzare inoltre che la materia oscura sia composta da particelle interagenti solo per gravità, infatti, la struttura che costituisce lo scheletro dell'Universo è compatibile con una struttura quasi reticolare, composta da zone molto dense intervallate con ampie zone vuote, che si origina nel tempo dall'interazione puramente gravitazionale fra particelle. Interagendo gravitazionalmente queste particelle devono avere massa non nulla, per cui si avrebbe una materia oscura detta "fredda", oppure particelle relativistiche, per cui si avrebbe una materia oscura detta "calda".

Considerazioni di carattere cosmologico e astrofisico hanno portato a favorire una materia oscura fredda, dunque massiva, e alla costruzione del modello cosmologico attualmente più accreditato noto come Λ CDM, dove Λ , costante cosmologica, indica l'energia oscura e CDM sta per Cold Dark Matter, appunto materia oscura fredda.

Nessuna particella appartenente al Modello Standard corrisponde però a tutti i requisiti e perciò nessuna particella nota è un buon candidato come costituente della materia oscura. Alcuni scienziati hanno ipotizzato che la componente di materia mancante, che

viene chiamata materia oscura, fosse di natura barionica, composta da corpi massivi che non emettono luce, come residui di stelle morte, nane brune o stelle di neutroni, che si trovano negli aloni galattici. Questi oggetti sono indicati con l'acronimo MACHOS (MAssive Compact Halo Objects), tuttavia la massa di tali oggetti riesce a giustificare circa il 20% della massa attribuita alla materia oscura [2].

Considerando l'ipotesi che la materia oscura sia costituita da particelle, fra le possibilità ci sono gli assioni, ipotetiche particelle scalari introdotte per spiegare l'assenza della violazione CP nella interazione forte. Gli assioni sono particelle neutre elettricamente e in grado di interagire debolmente con la materia ordinaria. Inoltre gli assioni sarebbero in grado di trasformarsi in due fotoni e viceversa. La massa prevista risulta piuttosto piccola e si colloca nel range fra 10^{-6} eV/c² e 10^{-2} eV/c².

Una delle ipotesi è che tali particelle possano essere le cosiddette WIMPs, Weakly Interacting Massive Particles, le quali sono particelle formatesi nell'Universo primordiale, neutre, stabili, che interagiscono a livello della forza debole o meno con la materia ordinaria e che hanno masse dell'ordine di $10 - 1000$ GeV/c². Il successo dell'ipotesi dell'esistenza delle WIMPs è dovuto al cosiddetto "miracolo delle WIMPs" secondo cui, stimando la sezione d'urto di tali particelle dell'ordine di 10^{-39} cm⁻², tipica per l'interazione debole, si ottiene esattamente la densità stimata per la materia oscura nell'Universo (circa pari al 26%).

Se le WIMPs esistono, la densità degli aloni di materia oscura è tale per cui è possibile rivellarle direttamente tramite processi di diffusione elastica con un bersaglio costituito da nuclei di materia ordinaria dei quali si misura l'energia di rinculo. La rivelazione diretta è un approccio per cui si ha una sensibilità di rivelazione confrontabile con quella raggiunta dai collisori di particelle come il Large Hadron Collider (LHC), tuttavia per cercare le WIMPs con i collisori è necessario ipotizzarne a priori le proprietà. La rivelazione diretta sarebbe inoltre in grado di determinare la massa di queste particelle sconosciute e dunque di fornire informazioni utili per ottenere risultati significativi a LHC.

1.3 Teorie alternative

Alcuni scienziati propongono teorie alternative alla esistenza di materia ed energia oscura e tentano di giustificare le osservazioni fatte superando la Relatività Generale. Fra queste troviamo la teoria MOND e la teoria TeVes.

Teoria MOND

La teoria MOND (MOdified Newtonian Dynamics) fu introdotta negli anni '80 dal fisico Mordehai Milgrom e afferma che le osservazioni fatte sulle curve di rotazione delle galassie a spirale possono essere spiegate apportando modifiche alla legge di gravitazione di Newton.

Secondo Milgrom la massa che viene classificata come materia oscura viene dedotta dalle anomalie delle curve di rotazione delle galassie a spirale nell'ipotesi che valga la seconda legge di Newton e che la forza gravitazionale dipenda dalla distanza dal centro galattico come $1/r^2$.

Se invece si ipotizza che, nel limite di piccole accelerazioni, l'inerzia diventi quadratica nell'accelerazione, è possibile giustificare la piatezza asintotica delle curve di rotazione. L'ipotesi alternativa alla materia oscura, dunque, è che vi sia un'accelerazione caratteristica (chiamata a_0) al di sotto della quale le equazioni di Newton non possono più essere applicate e vanno modificate nel modo opportuno.

Milgrom propone di sostituire la seconda legge di Newton con la seguente relazione:

$$m\mu\left(\frac{a}{a_0}\right) = F \quad (1.5)$$

dove m è la massa gravitazionale di un corpo (equivalente a quella inerziale), F è la forza applicata al corpo, a è la sua accelerazione reale, mentre a_0 l'accelerazione caratteristica; μ è una funzione che è pari a x per $x \ll 1$, e pari a 1 se $x \gg 1$. Perciò per $a \gg a_0$ è valida la legge newtoniana originale, mentre per $a \ll a_0$ si ha una gravità modificata.

Il successo della teoria di Milgrom nella previsione delle curve di rotazione delle galassie è evidente dal confronto con le curve ricavate dal modello Λ CDM. Nonostante il successo della teoria, la MOND non è applicabile a tutte le curve di rotazione e non è predittiva, cioè non fornisce un modello di formazione delle strutture come invece fa il modello Λ CDM e, poiché propone il superamento delle leggi relativistiche, non ha successo in altre osservazioni di carattere astrofisico come il fenomeno del lensing gravitazionale.

Teoria TeVeS

La teoria TeVeS (Tensor Vector Scalar theory) è stata elaborata dal fisico Jacob Bekenstein e propone una modifica delle equazioni di Einstein che convergono a quelle di Newton e MOND nei regimi "classici" di alte e basse accelerazioni. A differenza della MOND, la TeVeS non esula dalla Relatività Generale, ma la modifica e riesce a superare alcuni limiti della teoria MOND, ad esempio la previsione del lensing gravitazionale. La massa nascosta viene attribuita a particelle, in particolare neutrini sterili massivi, con proprietà tensoriali, vettoriali e scalari, che interagiscono con lo spazio-tempo. La TeVeS riproduce correttamente le curve di rotazione delle galassie e gli effetti di lensing gravitazionale. L'esistenza di queste particelle resta però oggetto di ricerca.

Capitolo 2

La rivelazione diretta della materia oscura

Le particelle di materia oscura possono essere rivelate in maniera indiretta a partire dallo studio dei segnali emessi durante una loro interazione. Due particelle di materia oscura possono interagire annichilandosi in una particella appartenente al Modello Standard, e viceversa due particelle del Modello Standard possono interagire e formare una particella di materia oscura. Questo ultimo processo dovrebbe poter essere riprodotto in esperimenti al Large Hadron Collider (LHC), tuttavia queste particelle riescono a sfuggire alla rivelazione e ciò che si potrebbe osservare sarebbe soltanto una parte di energia mancante associabile a queste particelle. Al momento non sono stati raggiunti risultati rilevanti attraverso gli esperimenti a LHC.

Un'altra interazione possibile fra particelle di materia oscura e di materia ordinaria è il processo di scattering, nel quale particelle di materia oscura interagiscono con particelle ordinarie usate come bersaglio, rilasciando un'energia che può essere osservata. In particolare, questa interazione produce il rinculo dei nuclei che compongono il bersaglio e, stimando la massa delle WIMPs dell'ordine del GeV, l'energia di rinculo dei nuclei dovrebbe essere dell'ordine dei keV. In questo caso si parla di rivelazione diretta.

La rivelazione diretta della materia oscura si basa sull'osservazione di eventi di scattering di particelle di materia ordinaria indotti dalla interazione con particelle di materia oscura e in particolare dalle WIMPs. A causa della scarsa energia prodotta da questa interazione e a causa della sezione d'urto estremamente piccola stimata per tali particelle di materia oscura (dell'ordine di 10^{-42} cm²), il numero di eventi attesi è molto basso. I rivelatori devono perciò essere costruiti in maniera molto accurata in modo da consentire un elevato potere di discriminazione dei fenomeni di background. Inoltre è necessaria una grande sensibilità che può essere raggiunta impiegando grandi volumi di materiale bersaglio.

L'interazione produce generalmente due tipi di segnali rivelabili e che sono i segnali di scintillazione e di ionizzazione, mentre la piccola componente di calore prodotto

non è generalmente osservabile. La detezione simultanea dei segnali di ionizzazione e scintillazione permette di identificare l'interazione primaria che ha generato i segnali e le caratteristiche della particella incidente. Inoltre è possibile combinare le informazioni ricavate dai due segnali per localizzare nello spazio tridimensionale il punto in cui è avvenuta l'interazione primaria con una precisione millimetrica.

Segnale di scintillazione

Il meccanismo di scintillazione si verifica in presenza dell'interazione di una particella con gli atomi di un materiale scintillatore e comporta l'emissione di un fotone. Infatti, quando una particella attraversa uno scintillatore, interagendo con gli atomi che lo compongono, cede ad essi parte della propria energia; se la particella ha energia sufficiente, uno o più elettroni possono essere emessi da atomi ionizzati, altrimenti, se l'energia non è sufficiente, gli elettroni sono semplicemente eccitati su di un livello energetico più alto. A seguito dell'eccitazione un elettrone si trova in uno stato instabile e ritorna, più o meno immediatamente, sul livello energetico iniziale, emettendo un fotone di energia pari alla differenza tra i due livelli. Negli scintillatori questa diseccitazione produce fotoni nello spettro del visibile o nell'ultravioletto che possono essere rivelati da dispositivi come i fotosensori.

Un materiale scintillatore deve essere trasparente rispetto ai fotoni prodotti al suo interno e, nel caso della rivelazione della materia oscura, il materiale deve essere completamente radio-puro, in modo da minimizzare effetti di background. In generale, nella rivelazione della materia oscura, tali materiali possono essere o gas nobili allo stato liquido, come argon e xenon, oppure cristalli, come NaI o BaF₂.

Segnale di ionizzazione

Se l'energia che la particella incidente rilascia nel materiale che forma il bersaglio è sufficiente, gli atomi possono essere ionizzati e rilasciare quindi elettroni liberi, diventando ioni positivi. Le particelle prodotte, cariche negativamente, in presenza di un campo elettrico esterno, vengono allontanate dagli ioni positivi da cui sono stati generate minimizzando gli effetti di ricombinazione e provocando segnali che possono essere rivelati. In presenza di forti campi elettrici (kV/cm) si ha una moltiplicazione a valanga di elettroni prodotti e quindi del segnale osservato.

2.1 L'impiego dei gas nobili negli esperimenti di rivelazione diretta

I gas nobili liquefatti sono materiali largamente impiegati in esperimenti di rivelazione diretta come materiali bersaglio all'interno di grandi rivelatori. Infatti, questi materiali

| | Xe | Ar |
|---|-----------------------|-----------------------|
| Z | 54 | 18 |
| A | 131 | 40 |
| Temperatura allo stato liquido | 166 K | 87 K |
| Densità allo stato liquido | 3.1 g/cm ³ | 1.4 g/cm ³ |
| Soglia di ionizzazione | 64 e/keV | 42 e/keV |
| Soglia di scintillazione | 46 γ /keV | 40 γ /keV |
| Lunghezza d'onda della luce di scintillazione | 178 nm | 128 nm |
| Radio-purezza | Intrinsecamente puro | ³⁹ Ar |

Tabella 2.1: Proprietà fisiche e chimiche di xenon e argon

sono naturalmente stabili e largamente omogenei, trasparenti rispetto alla luce prodotta da scintillazione interna e puri o comunque facilmente purificabili. I gas nobili sono ottimi scintillatori e hanno inoltre buona mobilità elettronica, proprietà questa che li rende buoni ionizzatori. In generale possono essere impiegati in vaste quantità senza perdita del segnale o inomogeneità del mezzo.

Nella maggior parte degli esperimenti di rivelazione diretta vengono impiegati lo xenon e l'argon allo stato liquido (LXe e LAr). In tabella 2.1 sono riportate le principali proprietà dei due materiali.

Lo xenon ha elevata densità, è intrinsecamente radio-puro poiché non ha isotopi instabili (ad eccezione dello ¹³⁶Xe che però ha un tempo di dimezzamento τ di circa 10²¹ anni), ed ha un efficiente potere auto-schermante nei confronti della radiazione esterna. Tuttavia, non essendo particolarmente abbondante nell'atmosfera, ha un costo più elevato dell'argon.

2.1.1 L'argon

L'argon è il terzo elemento più abbondante presente in atmosfera dopo l'azoto e l'ossigeno, e occupa circa lo 0.94% dell'intero volume. Considerando l'argon totale presente in atmosfera, l'isotopo più abbondante per il 99.604% del totale è l'isotopo ⁴⁰Ar che è anche stabile, ma ci sono anche altri isotopi stabili come ³⁸Ar per il 0.063% e ³⁶Ar per il 0.335%. Tuttavia, è presente anche una frazione di ³⁹Ar, un isotopo instabile con un tempo di dimezzamento pari a 296 anni che, decadendo in ³⁹K tramite decadimenti β , può compromettere e oscurare l'interazione di una ipotetica particella di materia oscura con l'argon. Si calcola che l'attività media dell'isotopo ³⁹Ar in atmosfera è inferiore a 0.005 dpm/l di argon totale. [3]

L'isotopo ³⁹Ar è prodotto nell'atmosfera per interazione con i raggi cosmici provenienti dallo spazio, per questo, l'argon impiegato nella costruzione del rivelatore non può essere estratto direttamente dall'atmosfera, come invece lo xenon. Per minimizzare il

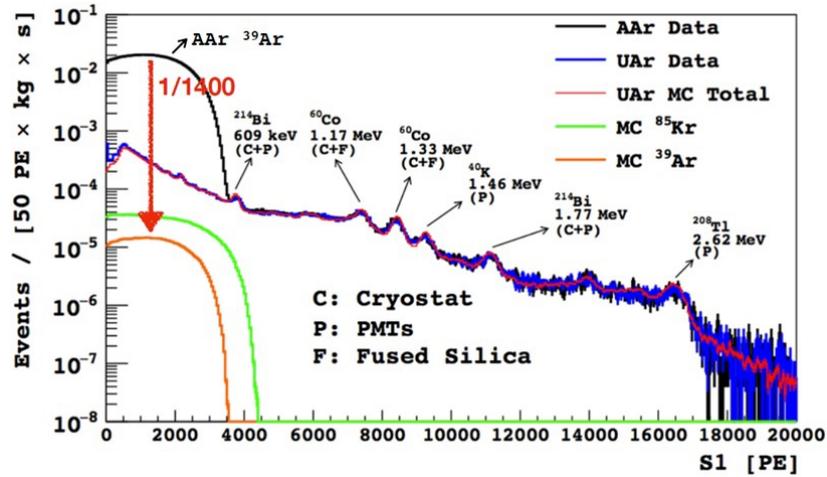


Figura 2.1: Riduzione della presenza di ^{39}Ar nell'UAr (blu) rispetto all'AAr(nero) [5]

più possibile fonti di instabilità, l'argon viene estratto dal sottosuolo, dove è protetto dai raggi cosmici e quindi è depleto da ^{39}Ar di un fattore circa mille.

Ciò che rende l'argon un ottimo materiale bersaglio negli esperimenti di rivelazione diretta è l'elevato potere di discriminazione fra i rinculi degli elettroni e dei nuclei che possono essere provocati dalle interazioni con particelle provenienti dall'esterno del rivelatore.

2.1.2 Argon sotterraneo

L'argon impiegato in esperimenti di rivelazione diretta, in cui è necessario un basso background, deve essere radio-puro e quindi viene estratto dal sottosuolo in cui è presente nella sua forma più stabile.

Come si può notare in figura 2.1, la presenza dell'isotopo instabile ^{39}Ar nell'argon atmosferico (AAr) è molto superiore a quella che si ha nell'argon sotterraneo (UAr) e in particolare in UAr la percentuale di ^{39}Ar è inferiore allo 0.07% della percentuale di ^{39}Ar in AAr.

L'estrazione avviene da pozzi di CO_2 in Colorado. Successivamente l'argon estratto viene sottoposto ad una ulteriore purificazione in modo che siano garantite la massima purezza chimica e la stabilità. Questa fase avviene tramite distillazione criogenica nell'impianto ARIA situato in Sardegna. La purezza dell'argon in seguito alla distillazione viene garantita da analisi che avvengono al Canfranc Underground Laboratory in Spagna. Solo a questo punto può essere impiegato come materiale bersaglio nel rivelatore [4].

2.2 TPC

Attualmente sono già in funzione o in costruzione numerosi esperimenti che mirano alla rivelazione della materia oscura in maniera diretta e si basano sull'utilizzo di una comune tecnologia chiamata camera a proiezione temporale (Time Projection Chamber, TPC). La TPC costituisce la parte centrale del rivelatore ed è un grande volume contenente il materiale bersaglio che è tipicamente un gas nobile allo stato liquido, in particolare argon o xenon.

La TPC è in grado di rivelare entrambi i segnali di scintillazione e ionizzazione che vengono prodotti in seguito alla interazione con una WIMP e che insieme individuano con precisione la posizione in cui l'interazione è avvenuta nelle tre dimensioni spaziali e l'intensità con cui si è verificata. Studiando entrambi i segnali è possibile identificare gli eventi di rinculo di elettroni e dei nuclei del bersaglio.

Tipicamente vengono costruite TPC a doppia fase che consistono in TPC in cui il materiale bersaglio è presente in due fasi distinte: una liquida e una gassosa. La fase gassosa occupa solo una piccola frazione dell'intero volume nella parte superiore della TPC e le due fasi sono separate da una sottile griglia, detta griglia di estrazione, mantenuta ad un certo potenziale elettrico.

Le due superfici inferiore e superiore della TPC hanno una certa differenza di potenziale e fungono rispettivamente da catodo e anodo generando un campo elettrico interno. Perciò nella TPC si possono individuare due campi elettrici di differente intensità che si trovano in regioni con diverse costanti dielettriche. Tra il catodo e la griglia di estrazione, quindi nel volume occupato dalla fase liquida, viene generato un campo elettrico, chiamato campo di estrazione, che allontana gli elettroni liberi formati nel processo di ionizzazione mandandoli alla deriva ed evitando quindi effetti di ricombinazione delle cariche. Grazie a questo campo elettrico gli elettroni possono uscire dalla fase liquida ed entrare nella fase gassosa. Per garantire l'uniformità della deriva elettronica, la TPC è circondata da una gabbia metallica.

Tra la griglia di estrazione e l'anodo, nella frazione di volume occupato dalla fase gassosa, si determina dunque un'altra differenza di potenziale che genera il campo elettrico chiamato di elettroluminescenza.

Entrambe le superfici superiore e inferiore della TPC sono dotate di fotosensori in grado di misurare la luce di scintillazione prodotta dall'interazione diretta della WIMP. Quando una WIMP interagisce con una particella di argon produce un segnale luminoso di scintillazione primaria detto S1 che viene rivelato dai rivelatori presenti ai capi della TPC. Allo stesso tempo l'interazione determina la ionizzazione degli atomi di argon liquido (LAr), producendo elettroni liberi. Questi elettroni vengono spinti verso l'alto con un moto di deriva causato dal campo elettrico di estrazione; in corrispondenza della griglia di estrazione gli elettroni vengono spinti nell'argon gassoso (GAr) dove vengono accelerati dal campo elettrico di elettroluminescenza. Qui gli elettroni liberi eccitano il gas ionizzandolo e generando altri elettroni con un processo a valanga, i quali producono

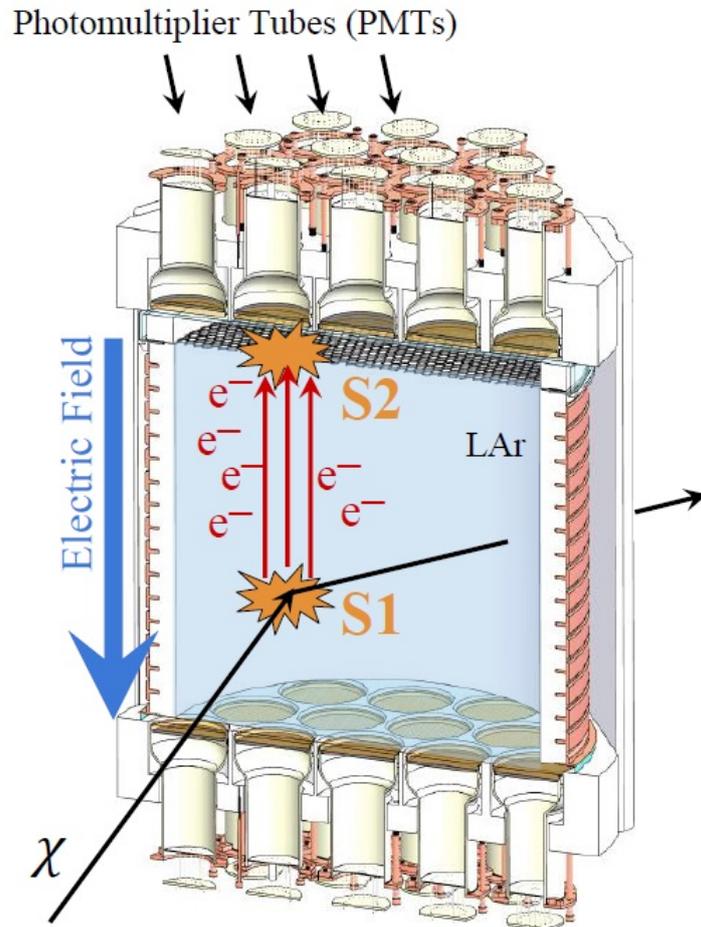


Figura 2.2: Riproduzione grafica della TPC in DarkSide-50. χ rappresenta la particella incidente che impatta con un atomo di LAr producendo il segnale S1 e elettroni liberi e^- che successivamente producono il segnale S2 in GAr [6]

fotoni di scintillazione secondaria S2 mediante il processo di elettroluminescenza. Poiché per ogni elettrone estratto il segnale di scintillazione secondaria produce centinaia di fotoni, il segnale S2 è fortemente amplificato. Il meccanismo di emissione di S2 è del tutto analogo a quello descritto per S1 nella fase liquida e, nell'argon, i fotoni generati in entrambi i casi hanno lunghezza d'onda pari a $\lambda = 128$ nm (tabella 2.1).

In figura 2.2 è sintetizzato il funzionamento di una TPC a doppia fase e in particolare la TPC dell'esperimento DarkSide-50 in funzione presso i laboratori LNGS.

Poiché S1 e S2 vengono prodotti con un certo intervallo di tempo luno dall'altro e rivelati dagli stessi sensori, è possibile determinare con precisione millimetrica la posizione verticale in cui è avvenuta l'interazione WIMP-Ar studiando la differenza fra i tempi di ricezione. La posizione orizzontale è invece ricavata con precisione dell'ordine

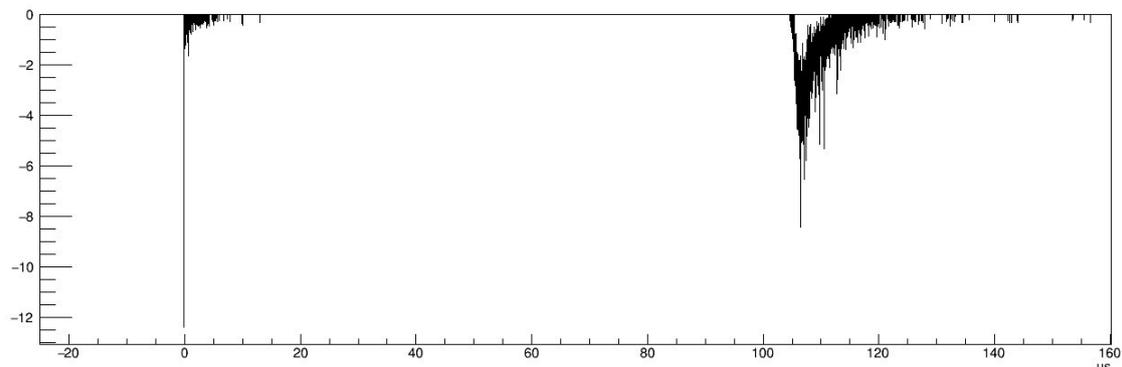


Figura 2.3: Curva corrispondente ai segnali S1 (a sinistra) e S2 (a destra) prodotti nell'interazione WIMP-Ar nella TPC: i due segnali vengono prodotti con un certo intervallo di tempo corrispondente al tempo di diffusione degli elettroni nell'argon liquido e al tempo di produzione a valanga degli elettroni in fase gassosa [6]

del centimetro mediante lo studio della distribuzione della luce rivelata dai fotosensori. L'intensità del segnale di scintillazione è proporzionale all'energia di interazione per cui è possibile risalire ad essa analizzando le ampiezze dei segnali prodotti.

Il segnale S1 viene rivelato istantaneamente dai sensori posti sulla superficie inferiore della TPC, ed è un segnale rapido, corrispondente al primo picco in figura 2.3; gli elettroni invece impiegano un certo tempo di diffusione per raggiungere la griglia di estrazione ed entrare nella fase gassosa e produrre il segnale S2. Il meccanismo di produzione a valanga degli elettroni in fase gassosa rende il segnale S2, secondo picco in figura 2.3, un segnale meno rapido e meno piccato.

Essere in grado di localizzare con precisione l'evento osservato è essenziale per eseguire la fiducializzazione del volume. Infatti, gli eventi che vengono localizzati nel volume attivo vicino ai bordi della TPC, vengono esclusi perché potrebbero essere dovuti ad effetti di background.

2.2.1 Pulse Shape Discrimination

Una caratteristica molto importante nella scelta del materiale bersaglio è il potere di discriminazione fra eventi riguardanti il nucleo e gli elettroni. L'argon in particolare ha ottime proprietà in questo senso.

La distinzione fra rinculi nucleari e rinculi elettronici è permessa dalla tecnica di Pulse Shape Discrimination (PSD) che consiste nello studio delle diverse forme nei segnali di scintillazione primaria dovuti a un evento piuttosto che all'altro. Nell'argon, infatti, una scintillazione primaria produce due segnali differenti nella interazione con i nuclei (scintillazione nucleare) e con gli elettroni (scintillazione elettronica).

Il segnale di scintillazione S1 è infatti prodotto nella diseccitazione di atomi (eccitoni) precedentemente eccitati dalla interazione con altre particelle. Per l'argon liquido vengono prodotti due stati eccitati, uno di singoletto e uno di tripletto, rispettivamente se l'interazione riguarda i nuclei o gli elettroni; gli stati eccitati di tripletto e singoletto decadono in stati di energia inferiore in tempi molto diversi: $\tau_1 = 7.0 \pm 1.0$ ns per lo stato di singoletto e $\tau_2 = 1.6 \pm 0.1$ μ s per lo stato di tripletto.

La frazione di eccitoni che decade più velocemente è misurata usando il parametro f_{90} , definito come la frazione di luce di scintillazione osservata nei primi 90 ns dal segnale S1. Il valore di f_{90} dipende dalla intensità di S1 e di possono visualizzare le distribuzioni f_{90} nel piano (f_{90} , S1). In figura 2.4 sono riportate le differenti distribuzioni f_{90} per rinculi nucleari (NR) e per rinculi elettronici (ER), in particolare $f_{90}=0.7$, per rinculi nucleari, mentre per rinculi elettronici $f_{90}=0.3$. A causa della bassa sezione d'urto stimata per le WIMPs, gli eventi di interesse sono eventi di interazione nucleare, mentre gli eventi elettronici dipendono dalla presenza di ^{39}Ar che, decadendo tramite decadimenti β , produce elettroni che costituiscono un segnale di background. Nel caso di interazione di WIMPs nell'argon liquido, si può notare che per elevate intensità del segnale S1 le due distribuzioni sono totalmente separate e quindi i segnali di rinculo sono facilmente distinguibili (figura 2.4). La distanza fra le due distribuzioni è detta capacità di discriminazione ed è propria del materiale utilizzato.

Anche nell'argon non purificato, i rinculi nucleari, che sono eventi di interesse, dovrebbero poter essere studiati separatamente dai rinculi elettronici prodotti negli atomi di ^{39}Ar grazie alla netta separazione fra le due distribuzioni, tuttavia, a causa della grande massa di argon impiegata nell'esperimento di rivelazione, si avrebbe un segnale molto intenso dovuto al rinculo degli elettroni che oscurerebbe il segnale di interesse. Per questo è necessario impiegare argon purificato da isotopi instabili, fonti di radioattività naturale.

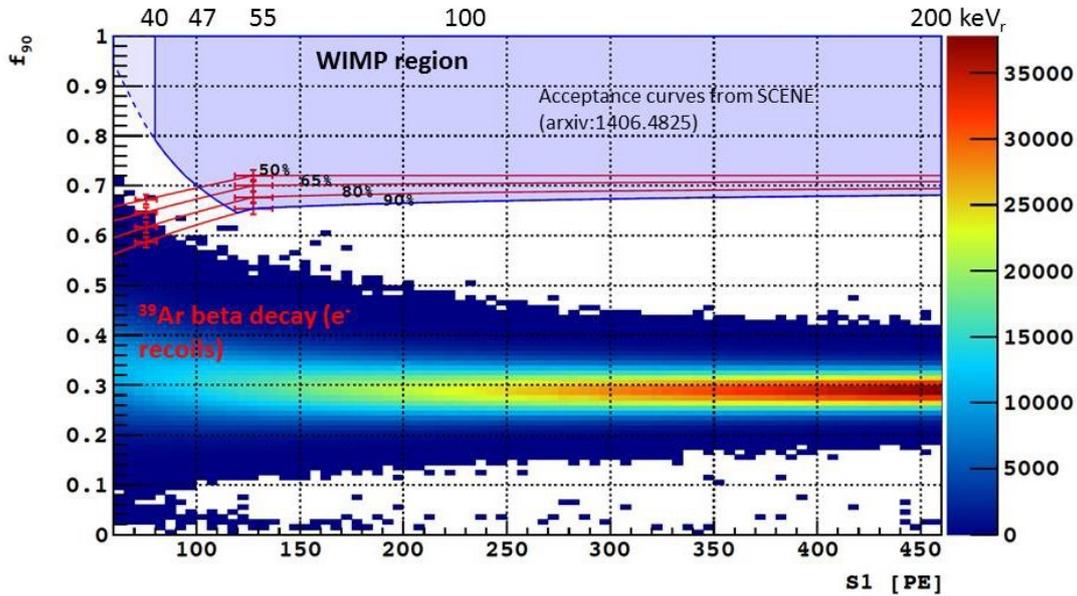


Figura 2.4: Distribuzioni del parametro di discriminazione f_{90} in funzione del segnale di scintillazione $S1$. I rinculi elettronici corrispondono alla popolazione attorno a $f_{90}=0.3$, mentre la regione superiore, evidenziata in azzurro, corrisponde alla regione di ricerca della materia oscura; le linee in rosso indicano le linee di accettazione per i rinculi nucleari [7]

2.3 Stato dell'arte

Ad oggi sono numerosi i progetti di ricerca nel settore della materia oscura alcuni di essi sono già in funzione e stanno acquisendo dati, mentre molti altri sono in fase di costruzione e progettazione.

Sostanzialmente le modalità di indagine impiegate sono le stesse e si basano sulla costruzione di una camera a proiezione temporale per cui il rivelatore è identificabile con il materiale bersaglio impiegato. I vari esperimenti si differenziano invece per il tipo di scintillatore utilizzato, nel tipo di fotosensori utilizzati e nelle dimensioni del rivelatore.

I vari studi non hanno rivelato, ad oggi, alcun evento significativo, contribuendo a tracciare sempre più stringenti limiti di esclusione, e quindi a ridurre sempre di più il range dei valori di sezioni d'urto e di masse nel quale si deve concentrare la ricerca delle WIMPs. I migliori risultati ottenuti da alcuni esperimenti in corso sono riportati in figura 2.5.

In figura 2.5 vengono sintetizzati i contributi dei rivelatori che hanno raccolto o stanno raccogliendo dati per la caratterizzazione delle WIMPs. Ognuna delle curve caratterizza la sensibilità raggiunta dal rivelatore e quindi evidenzia la necessità di costruire

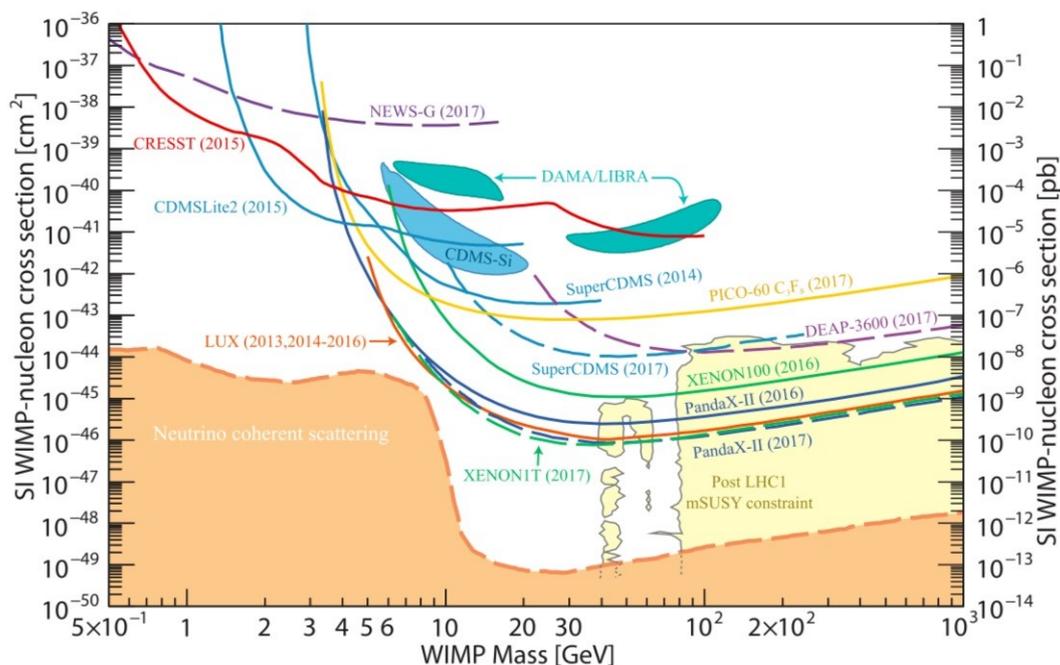


Figura 2.5: Sezione d’urto delle WIMPs in funzione della massa. Le curve rappresentano i migliori limiti di esclusione ottenuti dagli esperimenti attualmente in corso [8]

rivelatori più grandi e sensibili, in grado di esplorare regioni nelle quali si dovrebbero osservare eventi significativi e dunque rivelare le WIMPs.

Tuttavia esiste un limite inferiore alla sensibilità di rivelazione ed è il cosiddetto “neutrino floor”, corrispondente alla sezione d’urto dei neutrini prodotti dal Sole; al di sotto del neutrino floor (il limite della zona arancione in figura 2.5) eventi di scattering dovuti a neutrini o dovuti alle WIMPs non sarebbero distinguibili per cui riducendo il livello di sensibilità del rivelatore al di sotto di questo limite non sarebbe più possibile osservare le WIMPs in modo diretto.

Di seguito si prendono in esame alcuni dei principali esperimenti di rivelazione diretta della materia oscura costruiti presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS).

XENON

Il progetto XENON prevede la costruzione di una serie di esperimenti che impiegano lo xenon liquido (LXe) nella rivelazione di materia oscura in volumi sempre crescenti. XENON100 e XENON1T sono già in funzione presso i LNGS, mentre ha appena iniziato a prendere dati XENONnT.

XENON100, in funzione dal 2012, è costituito da una TPC a doppia fase con 161 kg di LXe e ha permesso di diminuire il limite superiore sulla sezione d’urto di scattering

delle WIMPs a $2 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$ a $55 \text{ GeV}/c^2$ e livello di confidenza del 90% [9]

XENON1T acquisisce dati dal 2016 ed è costituito da una TPC a doppia fase che ospita circa 2 t di LXe, mentre XENONnT ne contiene fino a 8 t, permettendo di raggiungere una più ampia sensibilità.

DAMA/LIBRA

L'esperimento DAMA/LIBRA, anch'esso condotto ai LNGS, è basato sull'utilizzo del cristallo NaI come scintillatore e ha prodotto curve di esclusione chiuse (figura 2.5) che identificano quindi regioni nelle quali sembra si sia registrato un vasto numero di interazioni. Tuttavia, i dati ottenuti da DAMA/LIBRA non sono confermati da nessun altro esperimento in corso, anche operante nella stessa regione, provocando interpretazioni contrastanti fra i ricercatori.

DarkSide-50

L'esperimento DarkSide-50 è ugualmente costruito ai LNGS sotto 3800 metri di roccia, in un luogo, dunque, particolarmente favorevole poiché permette di ottenere una forte riduzione dei segnali di background provenienti da fattori atmosferici come i raggi cosmici.

Il rivelatore è in funzione dall'agosto del 2015 e fino ad ora ha collezionato una grande quantità di dati, contribuendo al perfezionamento della tecnica di rivelazione diretta mediante l'utilizzo di argon liquido.

DarkSide-50 è costituito essenzialmente da tre parti: la camera a proiezione temporale a due fasi (TPC), il Liquid Scintillator Veto (LSV) e il Water Cherenkov Veto (WCV). Una riproduzione dell'intero apparato è riportata in figura 2.6.

La TPC è il cuore del rivelatore e il suo funzionamento è descritto nel paragrafo 2.2. Nel caso di DarkSide-50 è un volume cilindrico di 36.5 cm in altezza e 36.5 cm di diametro, riempito con (46.4 ± 0.7) kg di argon prevalentemente allo stato liquido (LAr). L'argon gassoso (GAr) è prodotto invece dalla ebollizione del LAr tramite un sistema capace di mantenere costanti i livelli delle due fasi. Su entrambe le superfici superiore e inferiore della TPC, sono installati 19 fotomoltiplicatori in grado di osservare i segnali di scintillazione prodotti nell'interazione WIMP-Ar. L'intera camera è contenuta in un criostato costruito in acciaio inossidabile e si trova all'interno del LSV.

LSV e WCV costituiscono il sistema di veto che circonda la TPC. In particolare, LSV è un volume sferico di 4 m di diametro racchiuso in un guscio di acciaio inossidabile e riempito con 30 t di precipitato di boro liquido che si comporta come uno scintillatore. La funzione principale di questa parte dell'apparato è rivelare neutroni provenienti dall'esterno che produrrebbero segnali di background.

La parte più esterna è il WCV che ha la funzione di schermare segnali di background esterno e di rivelare i muoni che provenienti dai raggi cosmici. Questa componente del

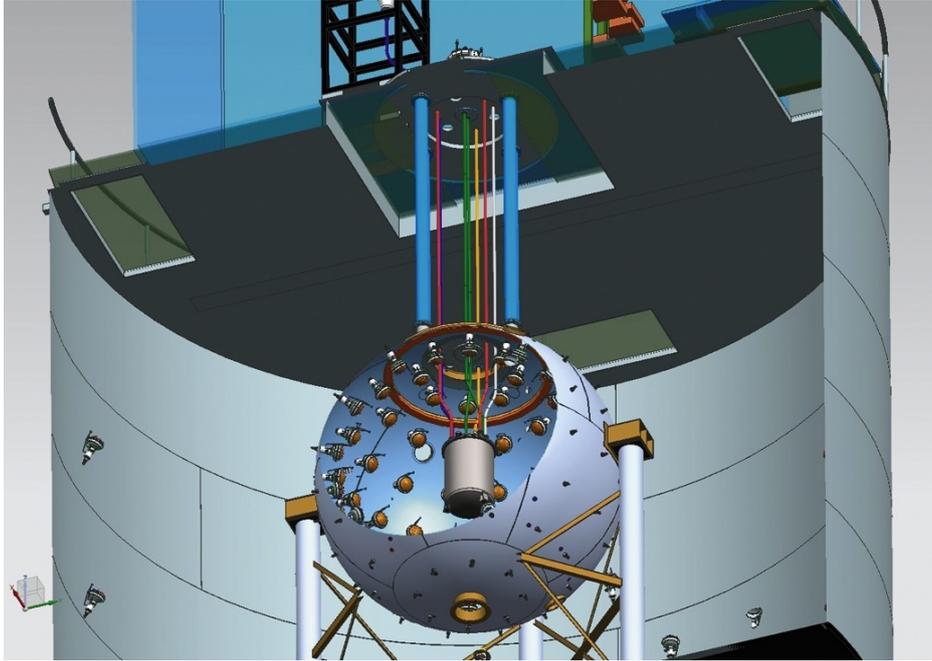


Figura 2.6: Riproduzione grafica di DarkSide-50 in cui si possono individuare, a partire dal centro, i rivelatori TPC, LSV e WCV [7]

veto è un cilindro in acciaio inossidabile di 10 m in altezza e 11 m di diametro, che contiene 1000 t di acqua ultrapura.

I dati raccolti negli ultimi anni da DarkSide-50 dimostrano una grande capacità di rigetto rispetto agli eventi di background e di discriminazione fra eventi nucleari ed elettronici. Inoltre, si è potuta testare con successo la tecnica di localizzazione tridimensionale della interazione. [10]

DarkSide-50 ha contribuito ad estendere la regione di esclusione al di sotto dei limiti precedenti. L'analisi dei risultati ottenuti con DarkSide-50 negli ultimi anni, attraverso la tecnica PSD (vedi paragrafo 2.2.1), ha permesso di confinare la sezione d'urto delle WIMPs per masse dell'ordine di $100 \text{ GeV}/\text{cm}^2$ a valori superiori a $1.1 \times 10^{-44} \text{cm}^2$ (figura 2.8). Per quanto riguarda le WIMPs con massa dell'ordine di $1.8\text{-}6 \text{ GeV}/\text{cm}^2$ l'analisi è stata fatta sul segnale S2; utilizzare S2, invece che S1, permette infatti di abbassare la soglia di rivelazione a più bassa energia, quindi per valori di massa inferiore (figura 2.7).

La sensibilità del rivelatore non è però confrontabile con quella di rivelatori più grandi come XENON1T, rendendo evidente la necessità di costruire nuovi esperimenti che abbiano una maggiore massa sensibile e quindi maggiore risoluzione (figura 2.8). Ecco perché il progetto DarkSide sta lavorando alla costruzione di DarkSide-20k che conterrà una massa fiduciale di ben 20 t di LAr.

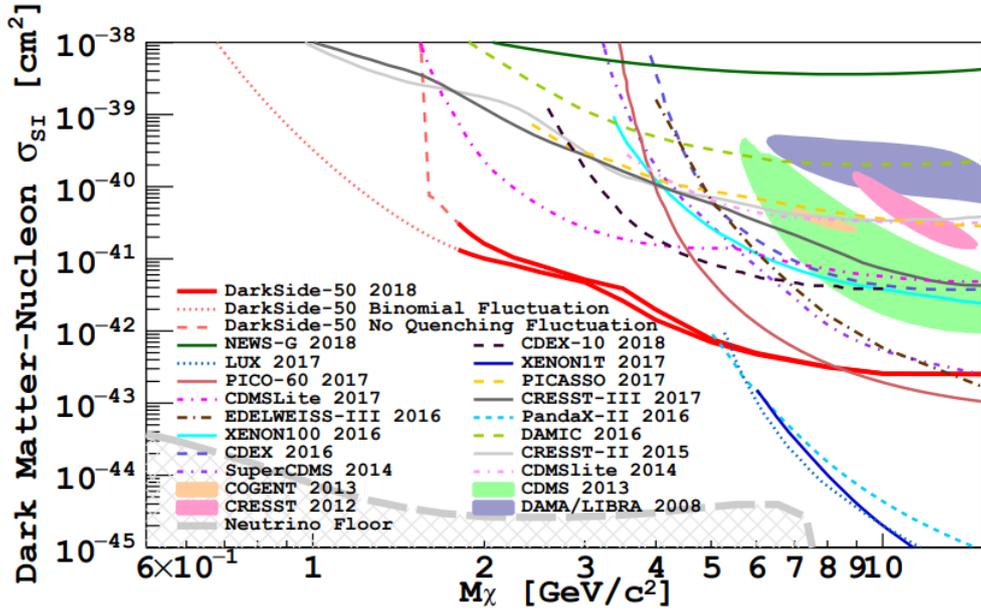


Figura 2.7: Limiti superiori per la sezione d'urto delle particelle di materia oscura con bassi valori di massa, ottenuti con DarkSide-50 e analizzati con la tecnica PSD sul segnale S2 [10]

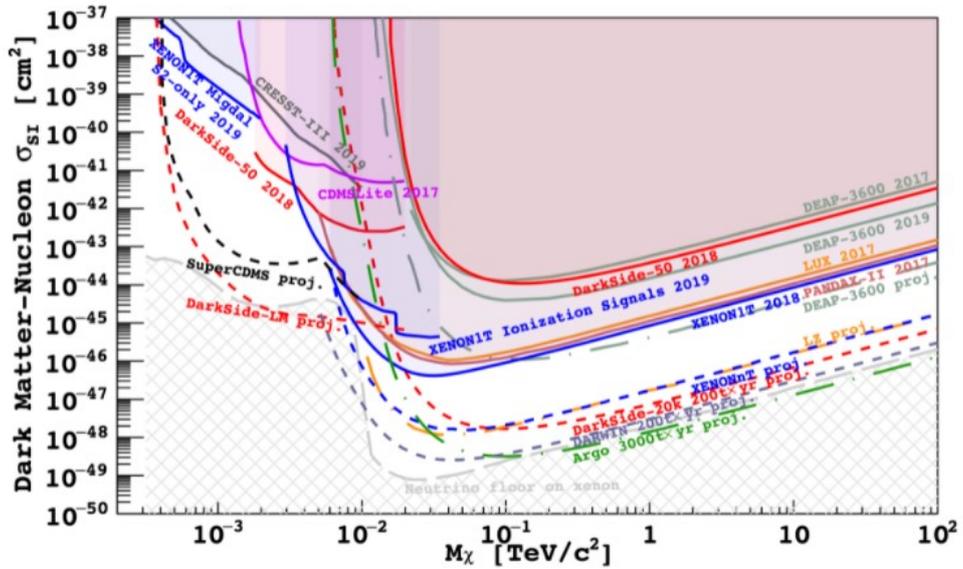


Figura 2.8: Confronto fra le sensibilità dei rivelatori attualmente in funzione (linea continua) e dei progetti futuri (linea tratteggiata)

Capitolo 3

DarkSide-20k

DarkSide-20k (DS-20k) fa parte del progetto DarkSide, una serie di esperimenti concepiti per operare presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) che mirano alla rivelazione diretta della materia oscura attraverso rivelatori che utilizzano argon liquido all'interno di una TPC a doppia fase. Esperimenti già operativi come DarkSide-50 hanno permesso di progettare DarkSide-20k, un rivelatore di maggiori dimensioni e sensibilità.

Questo rivelatore di ultima generazione nasce dalla collaborazione di 59 istituzioni, coinvolgendo più di 400 ricercatori da 14 Paesi in tutto il mondo: Brasile, Canada, Cina, Grecia, Italia, Messico, Polonia, Regno Unito, Romania, Russia, Spagna, Svizzera e Stati Uniti.

DS-20k inizierà ad operare ai LNGS a partire dai prossimi anni e sarà caratterizzato da un bassissimo background che consentirà di raggiungere la sensibilità per una sezione d'urto di interazione WIMP-nucleo di $7.4 \times 10^{48} \text{ cm}^2$ ($6.9 \times 10^{47} \text{ cm}^2$) per WIMPs di massa pari a $1 \text{ TeV}/c^2$ ($10 \text{ TeV}/c^2$), stimando un livello di background pari a quello raggiunto da DarkSide-50.

La parte più esterna dell'apparato, è composta da una camera cubica che contiene circa 700 t di argon atmosferico (AAr) e che funge da schermo rispetto a particelle di background. Al suo interno c'è la camera di veto, la quale è in grado di distinguere collisioni WIMP-Ar da eventi non di interesse come collisioni fra argon e neutroni prodotti per radioattività naturale o per interazione con i raggi cosmici.

Il cuore dell'esperimento è la TPC. In DS-20k, la TPC è una grande camera ottagonale di 350 cm di altezza ed una distanza tra le pareti interne di 355 cm, che contiene una massa attiva di circa 50 t di argon sotterraneo (UAr) ultra-purificato. Sulle superfici superiore e inferiore della TPC sono installati dei fotomoltiplicatori al silicio (SiPM).

Rispetto a DarkSide-50 che contiene una massa attiva di LAr (46.4 ± 0.7) kg, DarkSide-20k ne conterrà un totale di circa 50 t.

L'argon sotterraneo (UAr) sarà estratto dall'impianto Urania in Colorado e successivamente sarà sottoposto a ulteriore purificazione nell'impianto ARIA in Sardegna (sezione 2.1.2).

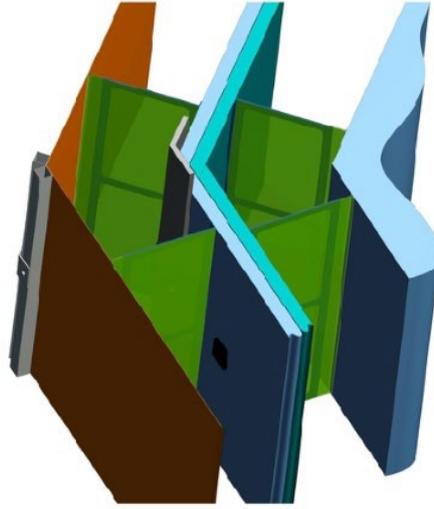


Figura 3.1: Riproduzione della composizione del sistema di veto che avvolge la TPC in cui da sinistra a destra troviamo: superfici riflettenti, volume esterno di AAr liquido, pannelli acrilici drogati con Gd su cui sono installate le unità VDU (rettangolino nero), volume attivo di AAr liquido interno e TPC

Inoltre, il criostato in acrilico per l'argon liquido, invece che il criostato in acciaio inossidabile utilizzato in DS-50, permette di collocare i SiPM fuori dalla TPC e quindi di ridurre al minimo le sorgenti interne di background.

La TPC è circondata da un sistema di veto (figura 3.1) composto da tre volumi concentrici. Il volume più interno, che costituisce una prima parte di veto attivo, contiene circa 300 t di argon atmosferico liquido in uno spessore di circa 40 cm; il secondo volume è un guscio spesso 10 cm composto da materiale acrilico drogato con gadolino al 4%. Questo guscio di materiale passivo ha lo scopo di modulare la velocità dei neutroni che, prodotti sia per interazione con l'AAr che con i raggi cosmici, vengono assorbiti dal gadolino provocando l'emissione di raggi gamma. I raggi gamma producono luce di scintillazione nell'argon liquido, per questo, su entrambe le superfici dello strato in acrilico, sono installate circa 3000 piastre, chiamate VDU (Veto Detection Units), contenenti SiPM in grado di rivelare segnali di scintillazione. Il terzo e più esterno volume che compone il veto è un secondo volume di argon atmosferico spesso circa 40 cm. Tutto il sistema di veto deve essere otticamente isolato dall'esterno e, per massimizzare la raccolta di luce di scintillazione, viene coperto con materiali riflettenti che riducono al minimo sorgenti esterne di background.

In figura 3.2 è riportata una riproduzione schematica del rivelatore complessivo.

Quando avviene una interazione WIMP-Ar, nella TPC vengono prodotti segnali luminosi di scintillazione che sono rivelati attraverso sistemi di fotorivelazione installati sulle superfici superiore ed inferiore della TPC.

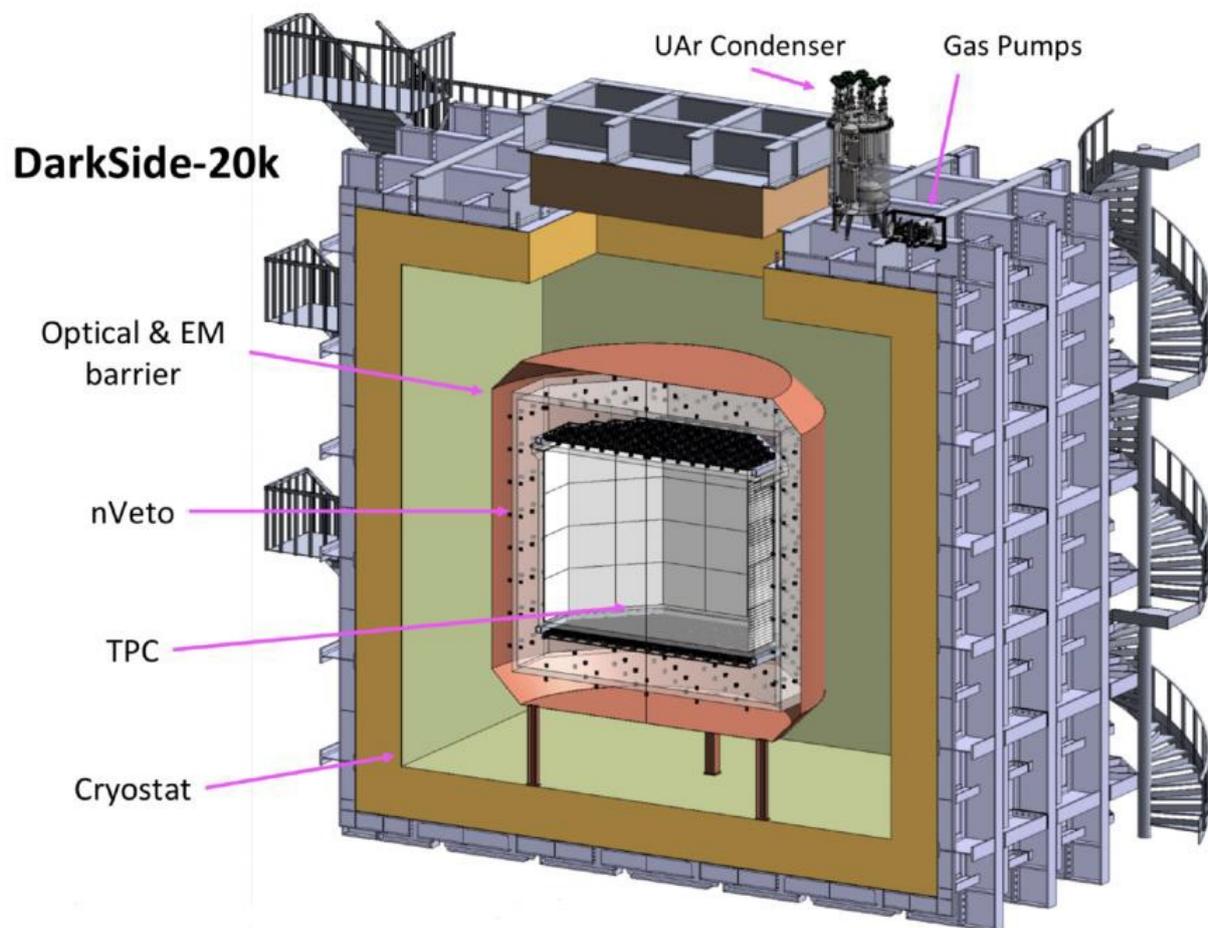


Figura 3.2: Illustrazione di DS-20k in cui sono rappresentati il criostato esterno, la camera di veto e la TPC

La luce prodotta dalla scintillazione dell'argon è emessa a una lunghezza d'onda di 128 nm, cioè nello spettro ultravioletto VUV (Vacuum UltraViolet), tuttavia i fotosensori che raggiungono una maggiore efficienza in questa banda hanno una efficienza al massimo del 15%. Per questo motivo si usano materiali chiamati WaveLength Shifters (WLS), che assorbono la radiazione incidente in VUV, riemettendola isotropicamente con una lunghezza d'onda maggiore. La radiazione finale ha una lunghezza d'onda per cui può essere rivelata da fotosensori convenzionali, sensibili a radiazione nella banda dell'ottico, tipicamente alle lunghezze d'onda del blu, come i fotomoltiplicatori al silicio, SiPM. In DarkSide-20k è impiegato come WLS il TPB (1,1,4,4-tetraphenyl-1,3-butadiene), il quale emette radiazione a 420 nm, quindi nell'ottico-blu, dove i SiPM hanno maggiore sensibilità [11].

La rivelazione dei segnali luminosi di scintillazione, prodotti nella TPC dalle interazioni, avviene ad opera di fotomoltiplicatori al silicio SiPM, installati sulle superfici inferiore e superiore della TPC. Al contrario dei fotosensori PM utilizzati in DS-50, i SiPM hanno elevate efficienza e risoluzione, permettendo un minore background [12].

Questi fotosensori hanno dimensioni di $11.7 \times 7.9 \text{ mm}^2$ e sono organizzati in gruppi di 24 a formare dispositivi chiamati PDM (Photo Detection Modules) ognuno dei quali copre un'area di $5 \times 5 \text{ cm}^2$ e opera come un singolo canale (figura 3.3a). Un PDM è costituito, più in particolare, da una matrice di 24 SiPM e da una struttura in plastica che contiene una scheda di elettronica chiamata FEB (Front End Board).

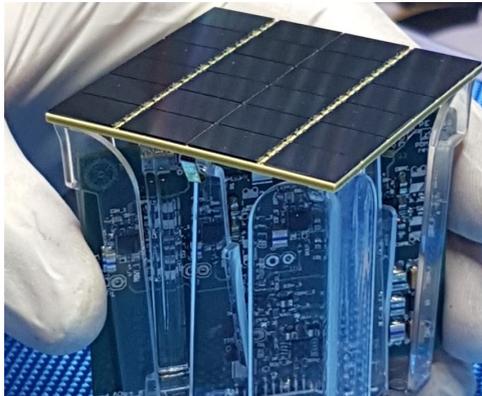
I PDM sono montati su supporti in rame delle dimensioni di $25 \times 25 \text{ cm}^2$ chiamati Motherboards. Ogni Motherboard ospita 25 PDM costituendo un'unità PDU (Photo Detection Unit) (figura 3.3b). In totale nel rivelatore, o meglio sulle superfici superiori e inferiori della TPC, sono presenti dunque 344 PDU, circa 8200 PDM (corrispondenti ad altrettanti canali) e circa 200000 SiPM.

3.1 Il sistema di fotorivelazione

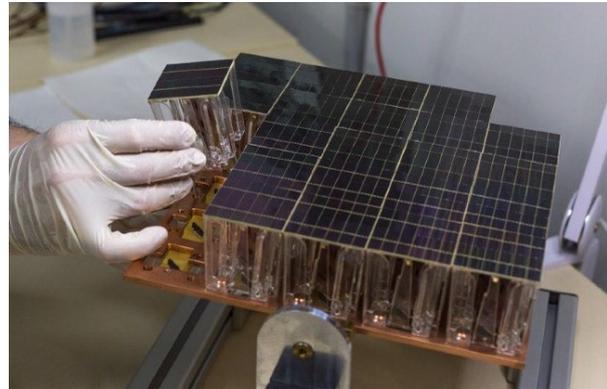
La sezione dell'INFN di Bologna sta lavorando al progetto DarkSide-20k, sviluppando in particolare, le tecnologie di rivelazione della luce mediante SiPM e di trasmissione ottica del segnale al di fuori della TPC. L'attività del gruppo di Bologna si concentra dunque su test e assemblaggio delle singole componenti dei dispositivi PDM e PDU, nonché sulla progettazione e costruzione di alcune componenti fondamentali nell'apparato di rivelazione.

Nella realizzazione, si deve tenere presente che tutte le componenti devono avere il più basso livello possibile di radioattività naturale e quindi devono essere costruite con materiali radio-puri; inoltre è necessario che tutto il sistema lavori in modo efficiente nelle condizioni di criogenia a cui si trova l'argon liquido (87 K, tabella 2.1).

I fotoni emessi nel processo di scintillazione vengono captati dai SiPM che sono in grado di trasformare il segnale ottico in segnale elettrico. Questo segnale è trasmesso in



(a) .



(b)

Figura 3.3: a) Immagine di un PDM. La superficie è formata da 24 SiPM, mentre nella parte inferiore in plastica è contenuta la FEB. b) Immagine di una PDU formata dalla Motherboard su cui sono montati 25 PDM

input alla FEB, la scheda elettronica che si trova all'interno del PDM e che ha il compito di sommare i segnali provenienti dai 24 SiPM che occupano la superficie del PDM per dare in output un singolo segnale elettrico, corrispondente a un singolo canale. Il segnale uscente dalla FEB è un segnale differenziale.

Le FEB costituiscono la componente elettronica fondamentale dell'intero apparato di trasmissione e lo schema logico è riportato in figura 3.4.

La superficie di ogni PDM, composta da 24 SiPM, è suddivisa in 4 quadranti di 6 SiPM ciascuno. I segnali prodotti in ogni quadrante arrivano in input nella FEB (in figura 3.4 i segnali di input sono due nella parte destra e due nella parte a sinistra) e passano attraverso un amplificatore di transimpedenza (TIA) con elevata larghezza di banda e basso rumore. I segnali amplificati vengono poi sommati per dare un unico segnale che, grazie ad un trasmettitore differenziale, esce in forma differenziale dalla FEB. La trasmissione differenziale del segnale consiste nella duplicazione di un segnale singolo e nella successiva trasmissione dei due segnali in maniera speculare. Questo permette di eliminare eventuali disturbi elettromagnetici che potrebbe determinarsi: infatti un ipotetico segnale di disturbo agirebbe allo stesso modo su entrambi i segnali, annullandosi automaticamente.

Le 25 FEB di ogni PDU sono alimentate dalle stesse linee di alimentazione che sono integrate all'interno di dispositivi chiamati fingerstrips, circuiti stampati multistrato che usano il kapton come isolante al posto della più comune fibra di vetro, non adatta per DS-20k perché non radio-pura. Ogni fingerstrip è montata su un supporto meccanico in rame che ha il ruolo di stabilizzare la PDU, e insieme costituiscono quella che viene chiamata Motherboard (in figura 3.5).

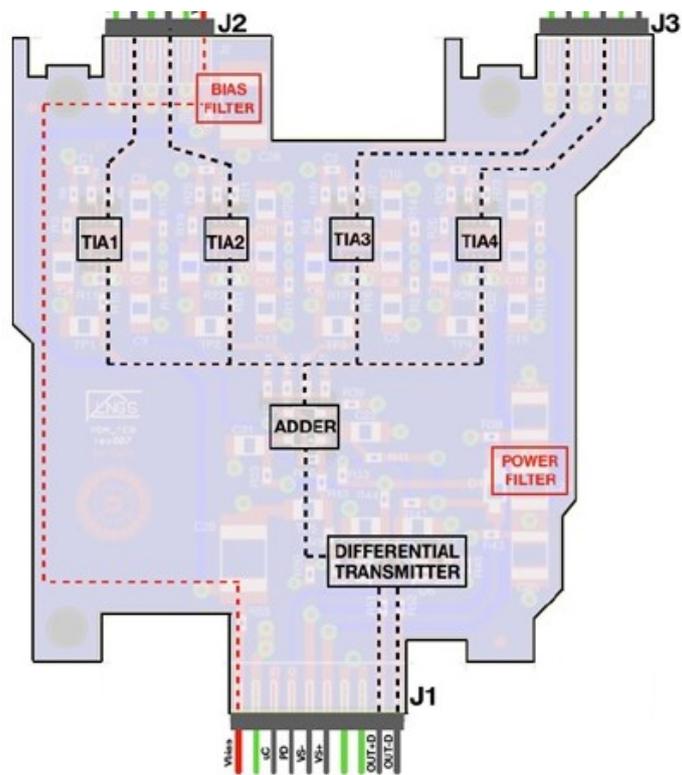


Figura 3.4: Schema del circuito interno a una FEB

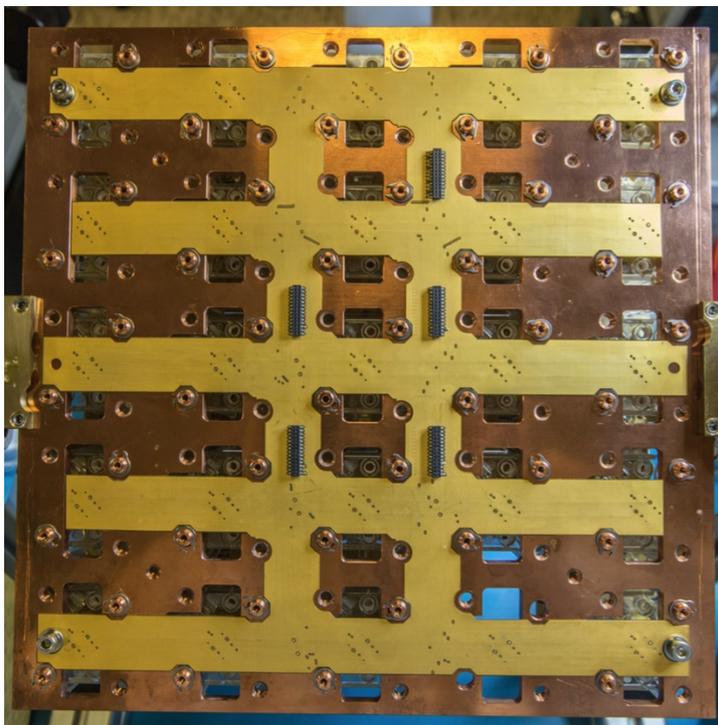


Figura 3.5: Fotografia di una Motherboard in cui si distinguono il supporto in rame e la fingerstrip di colore giallo. Dalla parte opposta del supporto di rame sono montati i 25 PDM che costituiscono la PDU.

Oltre ad alimentare le FEB che compongono una PDU, le fingerstrips trasmettono i segnali differenziali sul retro della PDU dove è alloggiata la scheda di trasmissione (in figura 4.1), la quale, convertendo il segnale elettrico in segnale ottico, è l'elemento da cui ha inizio la trasmissione del segnale.

Il sistema che si occupa della trasmissione del segnale dall'interno all'esterno del rivelatore è chiamato Opto-Link.

Capitolo 4

Opto-Link: Componenti del sistema di trasmissione

L'Opto-Link è il sistema di trasmissione ottica dei segnali analogici generati dai SiPM e trasmessi al sistema di acquisizione, ed è composto da: trasmettitore, fibra ottica e ricevitore. Il segnale iniziale viene prodotto nell'argon liquido all'interno del criostato quindi è necessario che tutte le componenti del sistema, ad esclusione del ricevitore, operino a freddo. Il ricevitore è esterno al criostato, quindi deve lavorare a temperatura ambiente. Le fibre ottiche, d'altra parte, hanno il compito di trasportare il segnale dall'interno all'esterno quindi devono poter lavorare sia a freddo che a caldo.

Il trasmettitore è composto dal circuito costruito sullo schema riportato in figura 4.1. L'input è costituito da due segnali ottenuti dalla conversione del segnale differenziale uscente dalla PDM; questi vengono sommati in un primo stage, poi il segnale viene amplificato e convertito in corrente per mezzo di un amplificatore a transconduttanza. La corrente viene quindi utilizzata per modulare la luce prodotta dal LED.

Al LED è connessa la fibra ottica che trasmette il segnale al ricevitore, il quale converte il segnale ottico in segnale elettrico tramite un fotodiodo montato all'altro capo della fibra ottica.

Nei seguenti paragrafi, si analizzeranno nel dettaglio le singole componenti dell'apparato di trasmissione.

4.1 LED

Il LED (Light Emitting Diode) è un diodo che emette luce al passaggio di corrente. Il principio di funzionamento è quello di un diodo, che è essenzialmente una giunzione p-n polarizzata in maniera diretta. Una giunzione p-n si ottiene mettendo a contatto due regioni drogate in maniera differente (una p e l'altra n) di uno stesso semiconduttore, generando così il moto dei portatori di carica maggioritari (cariche positive, le lacune,

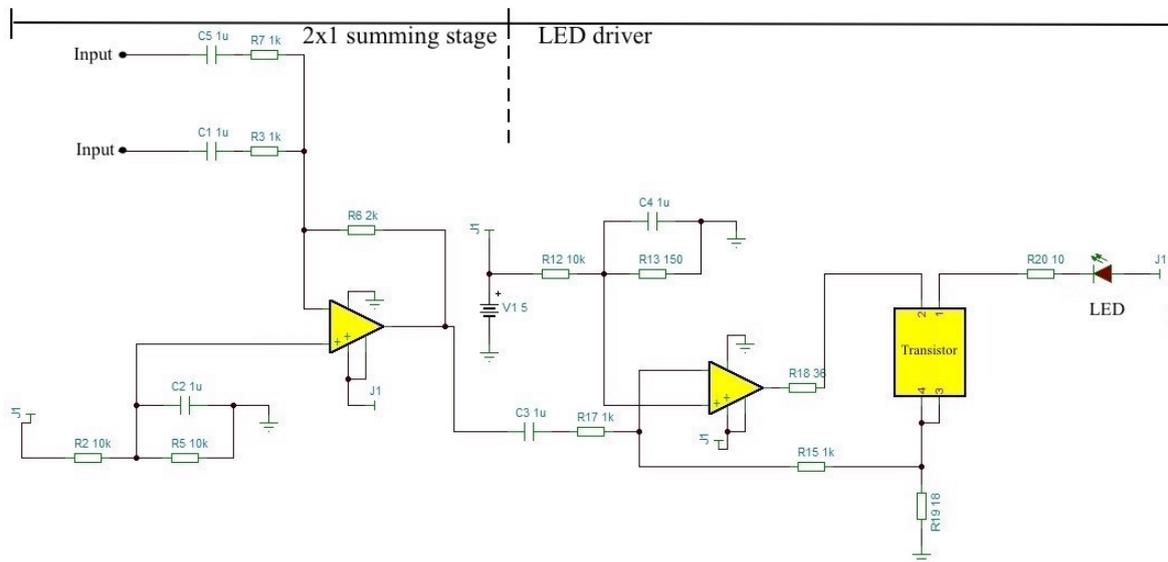


Figura 4.1: Schema del circuito di trasmissione

nella regione p e cariche negative, gli elettroni, nella regione n) attraverso la giunzione. Questo moto di cariche induce processi di ricombinazione delle due regioni (cioè elettrone e lacuna si neutralizzano) e si originano quindi cariche scoperte, in particolare una carica netta positiva della regione n e una carica netta negativa nella regione p, le quali producono un campo elettrico che contrasta il moto delle cariche fino ad arrestarlo.

Se ai capi della giunzione si applica una certa differenza di potenziale la giunzione si dice polarizzata e prende il nome di diodo. La polarizzazione della giunzione può essere fatta collegando il terminale positivo alla regione p e il terminale negativo alla regione n, e in questo caso la giunzione è polarizzata direttamente, oppure al contrario, e in questo caso la giunzione è polarizzata inversamente.

In caso di polarizzazione inversa il diodo si comporta come una resistenza: infatti, il moto dei portatori di carica maggioritari è nullo, mentre il moto dei portatori di carica minoritari provoca una debole corrente inversa I_0 , detta corrente inversa di saturazione, la quale non dipende dalla tensione di polarizzazione applicata ma solo dal numero di portatori minoritari generati per effetto termico nelle due regioni.

In caso di polarizzazione diretta invece il diodo è in conduzione e i portatori maggioritari attraversano la giunzione generando corrente I . L'andamento della corrente diretta non è lineare rispetto alla tensione applicata.

L'ingresso di cariche maggioritarie attraverso la giunzione induce processi di ricombinazione durante i quali è rilasciata energia nel semiconduttore utilizzato nella giunzione. Tale energia può essere rilasciata, a seconda del semiconduttore, in maniera non radiativa, sotto forma di calore, oppure, in maniera radiativa, sotto forma di radiazione

luminosa. La quantità di energia emessa dipende dal semiconduttore utilizzato e, in particolare, dalla differenza energetica fra la banda di conduzione, in cui si trova l'elettrone libero, e la banda di valenza, in cui l'elettrone è legato al singolo atomo per effetto della ricombinazione.

Nel caso dei LED l'energia viene rilasciata radiativamente ed è quindi utilizzata per produrre fotoni che tipicamente hanno frequenze della banda dell'ottico/infrarosso, dipendentemente dal semiconduttore di costruzione. Nella costruzione di LED si impiegano semiconduttori ottenuti da leghe metalliche di altri materiali, tra i quali di particolare interesse sono le leghe GaAs (arseniuro di gallio).

In DarkSide-20k saranno utilizzati LED a InGaAs che producono una luce di lunghezza d'onda $\lambda = 1300$ nm, quindi in infrarosso.

4.2 Fibra ottica

Le fibre ottiche sono mezzi di trasmissione che permettono al segnale di viaggiare ad alte velocità, confrontabili con la velocità della luce, sfruttando il meccanismo di riflessione dei raggi luminosi. Un raggio luminoso incidente sulla superficie di separazione di due mezzi con differente indice di rifrazione viene in parte trasmesso e in parte riflesso secondo la legge di Snell:

$$n_1 \sin(\alpha_1) = n_2 \sin(\alpha_2) \quad (4.1)$$

dove α_1 indica l'angolo formato dalla direzione incidente con la direzione ortogonale alla superficie di separazione fra i due mezzi, α_2 indica l'angolo formato fra la direzione del raggio trasmesso e la normale alla stessa superficie, n_1 e n_2 sono invece rispettivamente gli indici di rifrazione del materiale da cui proviene il raggio, e in cui viene trasmesso. Dall'equazione 4.1 deriva che, se $n_1 > n_2$, α_2 aumenta fino al raggiungere il valore $\pi/2$, in corrispondenza del quale si ha riflessione totale e rifrazione nulla. Per $\alpha_2 = \pi/2$, $\alpha_1 = \alpha_{critico} = \arcsin(n_2/n_1)$ che può essere considerato come un valore critico dell'angolo di incidenza poiché per $\alpha_1 > \alpha_{critico}$ il raggio incidente viene completamente riflesso.

Una fibra ottica è un filamento di materiale vetroso, caratterizzato da un certo indice di rifrazione n_1 , che è chiamato core, il quale è circondato da uno strato di un materiale differente caratterizzato da un altro indice di rifrazione n_2 , che è chiamato cladding. Il core e il cladding sono rivestiti da altri due strati coassiali di materiale polimerico isolante chiamati buffer e jacket, i quali hanno la funzione di proteggere la fibra dal contatto con l'esterno e da stress di natura meccanica.

Il segnale ottico, dunque, viaggia essenzialmente nel core per riflessione totale determinata dalla differenza fra gli indici di rifrazione del core e del cladding e dalla inclinazione del raggio trasmesso.

Perché si possa realizzare la situazione per cui un raggio incida sempre con lo stesso angolo sulla superficie di rifrazione, questo deve essere introdotto nella fibra con una certa inclinazione massima $\theta = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_0^2}}$ con n_0 indice di rifrazione del mezzo esterno

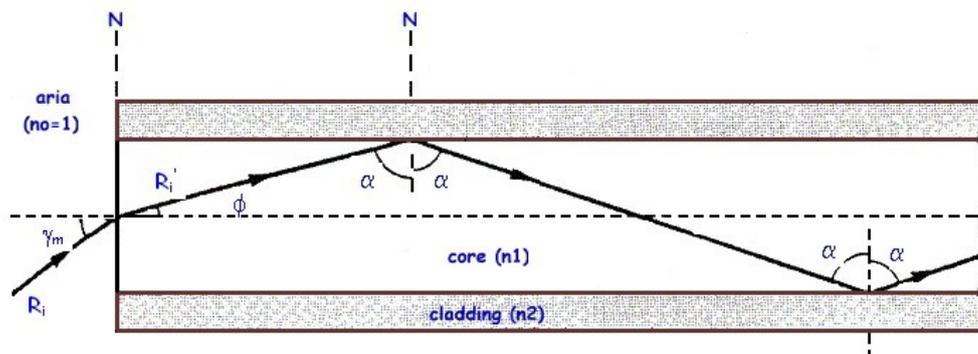


Figura 4.2: Schema di funzionamento di una fibra ottica in cui α è l'angolo di incidenza limite e γ_m rappresenta l'apertura del cono di accettazione

alla fibra. θ definisce un limite di accettazione, ovvero l'inclinazione massima che può avere il raggio incidente perché possa essere trasmesso nella fibra. L'angolo θ determina quindi l'apertura di un cono detto cono di accettazione. Se un raggio incidente si trova al di fuori del cono di accettazione, l'angolo di incidenza sulla superficie core-cladding è minore dell'angolo critico $\alpha_{critico}$ e il raggio si perde per rifrazione nel cladding.

Si può definire l'apertura nominale $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. Questa grandezza costituisce un parametro caratteristico per la fibra ottica.

Il raggio luminoso in ingresso nella fibra ottica è prodotto esternamente ad essa quindi in un mezzo di indice di rifrazione n_0 (generalmente aria, nel caso di DarkSide-20k argon liquido) per cui subisce inizialmente una parziale attenuazione e una variazione dell'angolo di incidenza.

Le fibre ottiche possono essere classificate in fibre single-mode o multi-mode. Le differenze fra di esse riguardano i tempi e le modalità con cui i raggi luminosi viaggiano attraverso di esse. Nel caso delle fibre single-mode i raggi luminosi viaggiano in un core dal diametro molto piccolo e seguono una traiettoria sostanzialmente rettilinea, parallelamente all'asse della fibra; il vantaggio è l'assenza di dispersione e la minimizzazione del tempo di trasmissione. Nel caso delle fibre multi-mode i raggi interni possono viaggiare in modi differenti grazie al fatto che il diametro del core è molto più grande rispetto al caso precedente. Nonostante si vada incontro a dispersione del segnale, le fibre multi-mode, avendo un diametro superiore, permettono una connessione migliore con il LED e con il fotodiodo.

Un segnale che viaggia attraverso una fibra ottica può andare incontro a perdite che possono essere deformazioni, se il segnale in uscita è deformato rispetto al segnale in ingresso, oppure attenuazioni, se la potenza del segnale in uscita è ridotta rispetto a quella del segnale in ingresso. Si può definire il coefficiente di attenuazione $dB = 10 \log_{10} \frac{P_0}{P}$, con P_0 potenza del segnale in ingresso e P potenza del segnale in uscita.

Inoltre le fibre ottiche risentono di perdite dovute a sollecitazioni meccaniche e dire-

zionali; in particolare le curvature provocano una dispersione del raggio incidente perché modificano l'angolo di incidenza del segnale ottico. Tale effetto di dispersione è chiamato di macro-bending.

Per minimizzare le dispersioni dovute a disallineamenti e per assicurare maggiore protezione, generalmente le fibre vengono inserite in un sottile tubo rigido chiamato ferrula.

Le fibre utilizzate in DarkSide-20k sono fibre multi-mode costituite da materiali intrinsecamente radio-puri, mentre la ferrula è costruita in rame purificato, quindi radio-puro. Nel rivelatore, le due estremità della fibra sono collegate ad un LED con un connettore SMA e ad un fotodiodo con un connettore LC.

4.3 Fotodiodo

Un fotodiodo è un particolare tipo di diodo che è in grado di convertire il segnale ottico in segnale elettrico e si comporta quindi come un foto-rivelatore che converte fotoni in corrente elettrica.

La giunzione p-n del diodo è esposta alla luce esterna per mezzo di una finestra trasparente. I fotoni che colpiscono la giunzione rilasciano nel semiconduttore di cui è composta una certa quantità di energia che, se è superiore alla energia di separazione fra la banda di valenza e di conduzione del materiale, è in grado di rompere il legame fra l'elettrone e l'atomo producendo così una coppia elettrone-lacuna (l'elettrone passa dalla banda di valenza alla banda di conduzione). I portatori di carica generati vengono allontanati rapidamente grazie al potenziale applicato ai capi del diodo in polarizzazione inversa, evitando così effetti di ricombinazione e producendo un aumento nella conduttività del dispositivo. Infatti, il valore della corrente inversa di saturazione non dipende dalla tensione applicata al diodo, ma soltanto dalla concentrazione di portatori di carica minoritari nelle due regioni. Nel fotodiodo la concentrazione di cariche minoritarie è incrementata dalla produzione di nuove coppie per mezzo dei fotoni incidenti.

Nella costruzione di un fotodiodo è necessario che solamente la giunzione sia esposta alla luce perché, lontano dalla giunzione, le coppie foto-prodotte avrebbero modo di ricombinarsi neutralizzandosi, mentre, in corrispondenza della giunzione, queste coppie possono propagarsi attraverso di essa generando corrente.

In assenza di luce si osserva comunque una piccola corrente inversa detta dark current che è dovuta alla presenza di portatori minoritari nel diodo; esponendo la giunzione alla luce, la corrente inversa aumenta proporzionalmente alla energia dei fotoni incidenti fino ad un valore massimo, detto corrente di saturazione.

La corrente totale in uscita dal fotodiodo può dunque essere scritta come somma del contributo della dark current e della corrente foto-prodotta di cui, in generale, il primo contributo costituisce un fattore di rumore rispetto al segnale ottico trasmesso, correlato al secondo contributo.

Il fotodiodo è un dispositivo usato come ricettore di segnali ottici, per esempio in uscita da una fibra ottica.

Tipicamente i fotodiodi possono essere costituiti da semiconduttori come Si o Ge oppure da leghe metalliche, fra cui GaP (fosforo di gallio), InAsSb (indio, arsenio e antimonio) o InGaAs (indio, arsenio e gallio). In base al materiale scelto si hanno differenti proprietà e diversi range di frequenze per cui il fotodiodo ha sensibilità.

I fotodiodi InGaAs hanno sensibilità in un range di frequenze da 500 a 2600 nm, quindi nel vicino infrarosso (NIR), e hanno elevata sensibilità; sono molto rapidi nella conversione del segnale in elettrico con una dark current estremamente bassa.

In DarkSide-20k saranno utilizzati proprio fotodiodi InGaAs, sensibili alla luce emessa dal LED poiché costituito nello stesso materiale.

Il segnale di output del fotodiodo, in voltaggio, è quindi acquisito dal sistema di acquisizione dati DAQ.

4.4 Test di laboratorio

I test svolti in laboratorio hanno portato alla caratterizzazione dei principali componenti del sistema di Opto-Link: LED, fotodiodi e fibre ottiche.

Per effettuare le misurazioni è stato costituito un setup sperimentale che vuole riprodurre il sistema di trasmissione come verrà costruito nel rivelatore reale.

4.4.1 Caratterizzazione del LED

Il LED, collegato al circuito di trasmissione, e connesso alla fibra ottica deve lavorare in argon liquido, quindi a 87 K, mentre il fotodiodo e l'apparato di ricezione lavorano a temperatura ambiente, quindi a caldo.

Per creare condizioni di lavoro simili alle reali, si utilizza un criostato riempito di azoto liquido (LN) che si trova alla temperatura di 77 K, del tutto simile a quella del LAr. Il LED viene alimentato con una tensione costante e regolabile, in modo da poter studiare la risposta del sistema ad un input conosciuto.

Sono stati studiati i comportamenti di due differenti tipi di LED InGaAs, il LED EI6C-8000-E della LuxNet (LED 1), e il LED LDT-125-TO56LR della OSI LaserDiode (LED 2).

Per entrambe le tipologie sono stati studiati diversi campioni e per testare la risposta del sistema di trasmissione, è stata fatta variare la corrente di input al LED fra 0 mA e 100 mA. La luce prodotta, trasmessa dalla fibra ottica viene quindi osservata dal fotodiodo e il voltaggio in output viene visualizzato e acquisito da un oscilloscopio.

In questo modo è possibile vedere come variano la tensione di uscita V e la potenza ottica P del segnale ricevuto rispetto alla corrente di ingresso I nel sistema. La stessa

procedura è stata effettuata sia a caldo, cioè a temperatura ambiente, che a freddo, cioè in LN.

Inoltre, per minimizzare le perdite di segnale, è necessario studiare nel dettaglio la distribuzione di luce emessa dal LED e migliorare così l'accoppiamento con la fibra ottica. Mappare infatti il segnale di uscita dal LED permette di determinare la posizione in cui la potenza ottica in uscita è massima e massimizzare, quindi, l'efficienza della connessione.

È necessario considerare che il segnale emesso dal LED subisce già in partenza una perdita. La fibra ottica ha una sezione tale per cui riesce a vedere soltanto una porzione del segnale luminoso emesso dal LED che ha, invece, una sezione di circa 10 volte superiore alla sezione della fibra. Poiché il profilo dell'intensità luminosa emessa dal LED non è uniforme ma è piccato in corrispondenza del suo centro, la perdita dovuta alla differenza fra le sezioni è piccola, purché però la fibra sia allineata al meglio con il punto corrispondente al picco di potenza: maggiore è questo disallineamento, maggiore risulta la perdita di segnale.

Per ottenere una mappatura tridimensionale del segnale in uscita dal LED è stato utilizzato un banco ottico, il quale permette di fare misurazioni con precisione micrometrica. In particolare, è stato studiato l'accoppiamento fra LED e fibra ottica per cui il LED è stato montato su un supporto fisso e alimentato con una corrente di 50 mA, mentre l'ingresso della fibra ottica è stato montato su un supporto mobile posizionato di fronte al LED, come si vede in figura 4.3. L'altro capo della fibra è stato collegato al sistema di ricezione, quindi al fotodiodo, il quale è a sua volta collegato all'oscilloscopio. Il supporto mobile è stato fatto spostare sul piano (x, y) perpendicolare all'uscita del LED a una distanza z dal LED fissata, per 50 spostamenti nella direzione x e 50 spostamenti nella direzione y , con passo di $10 \mu\text{m}$. In ogni punto è stato quindi acquisito il segnale misurato con l'oscilloscopio, ottenendo una griglia di 50×50 misurazioni.

La stessa procedura è stata quindi ripetuta a diversi valori di z : fra 0 e 2.5 mm per il LED 1 e fra 0 e 5.5 mm per il LED 2.

Gli spostamenti sono stati resi automatici attraverso un programma LabVIEW già implementato e modificato.

Le misurazioni eseguite hanno permesso di trovare la posizione nello spazio tridimensionale in cui si registra il massimo valore di potenza emessa dal LED e quindi per cui si minimizza la perdita di segnale.

I risultati ottenuti dalle misurazioni, prima a caldo e poi a freddo, di tensione V (in blu) e di potenza P (in rosso) in uscita, osservate dall'apparato di ricezione, al variare della corrente I in input al LED, sono riassunti in figura 4.4.

Nel caso in figura le misurazioni si riferiscono al campione di LED, denominato come numero 4, dei LED 1. Si osserva che, facendo lavorare il LED a freddo, come accadrà in DarkSide-20k, l'andamento della potenza ottica in funzione della corrente diventa lineare, e l'efficienza del LED aumenta di un fattore 3.5-4.5.

La linearità dell'andamento in potenza è una caratteristica rilevante, in quanto permette di ricostruire l'intensità dell'interazione che ha prodotto il segnale luminoso.

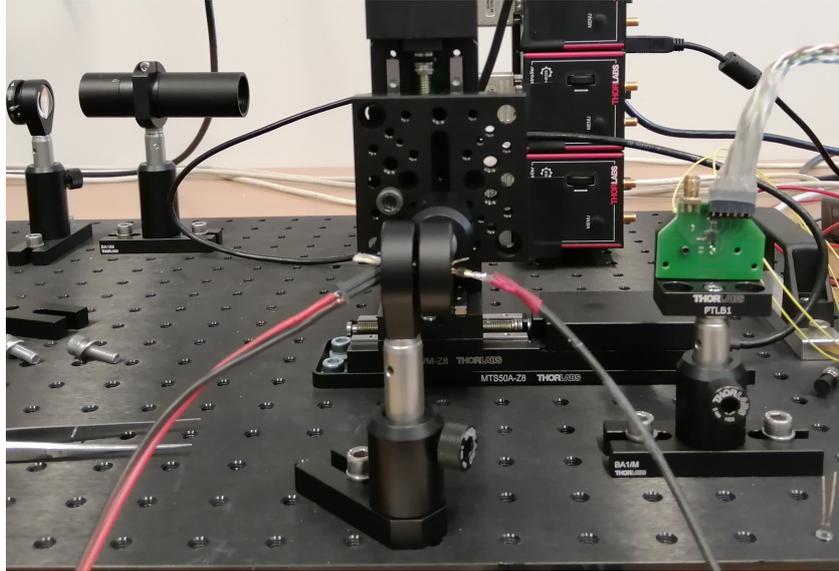


Figura 4.3: Fotografia del setup sperimentale utilizzato per mappare il segnale di uscita del LED e la risposta del sistema di trasmissione. A sinistra, sul supporto fisso, il LED, connesso all'alimentazione, a destra, sul supporto mobile, la fibra ottica, collegata al sistema di ricezione

Le misure ottenute con il banco ottico hanno permesso di ottenere la mappatura tridimensionale del segnale luminoso del LED.

Al variare di z , cioè della distanza fra LED e ingresso della fibra ottica, sono state ottenute le mappe bidimensionali, sul piano (x, y) , sei delle quali sono riportate in figura 4.5. I colori indicano i valori di potenza misurata in ogni punto, normalizzati al massimo valore di potenza misurato pari a $56.9 \mu\text{W}$ e riportati in scala logaritmica.

Si nota che l'ampiezza della superficie illuminata diminuisce all'aumentare di z . Per il LED 1, con z compreso fra 0.5 e 1.2 mm (i relativi grafici non sono in figura, l'effetto descritto è debolmente visibile nel plot relativo alla distanza $z=0.8$ mm) il fascio di luce presenta una zona centrale con potenza molto bassa, circondata da una corona circolare con potenza più elevata. Per z superiori a 1.2 mm il fascio è ben allineato e risulta avere massima potenza per $z=1.6$ mm.

Per il LED 2, invece, la distanza ottimale è $z=4.8$ mm, e corrisponde a una potenza inferiore. Per questo motivo è stato scelto di utilizzare il LED 1 nel sistema di trasmissione.

Fissata la posizione z e trovata la posizione in x corrispondente al massimo di potenza misurata, si fa variare la posizione lungo la direzione y , con lo scopo di trovare un margine di tolleranza per la quale si mantiene un buon allineamento attorno al valore ottimale lungo la direzione y . Il risultato è una gaussiana centrata nella posizione ottimale di y ($y=0$). Per $z=1.6$ mm, scelta come distanza ottimale, la gaussiana ottenuta, a destra in

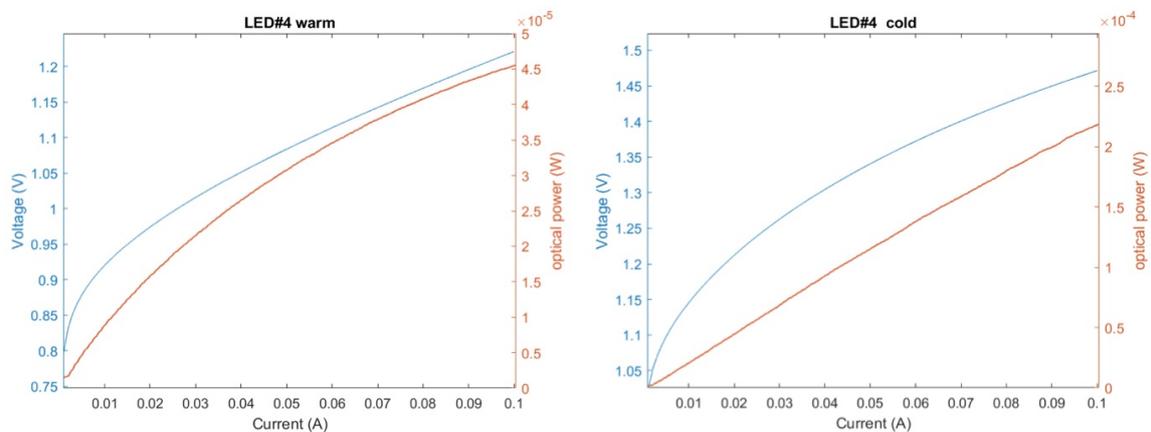


Figura 4.4: Caratteristiche I - V (in blu) e caratteristiche I - P (in rosso) per il LED n.4 misurate a caldo, a destra in figura, e a freddo, a sinistra in figura

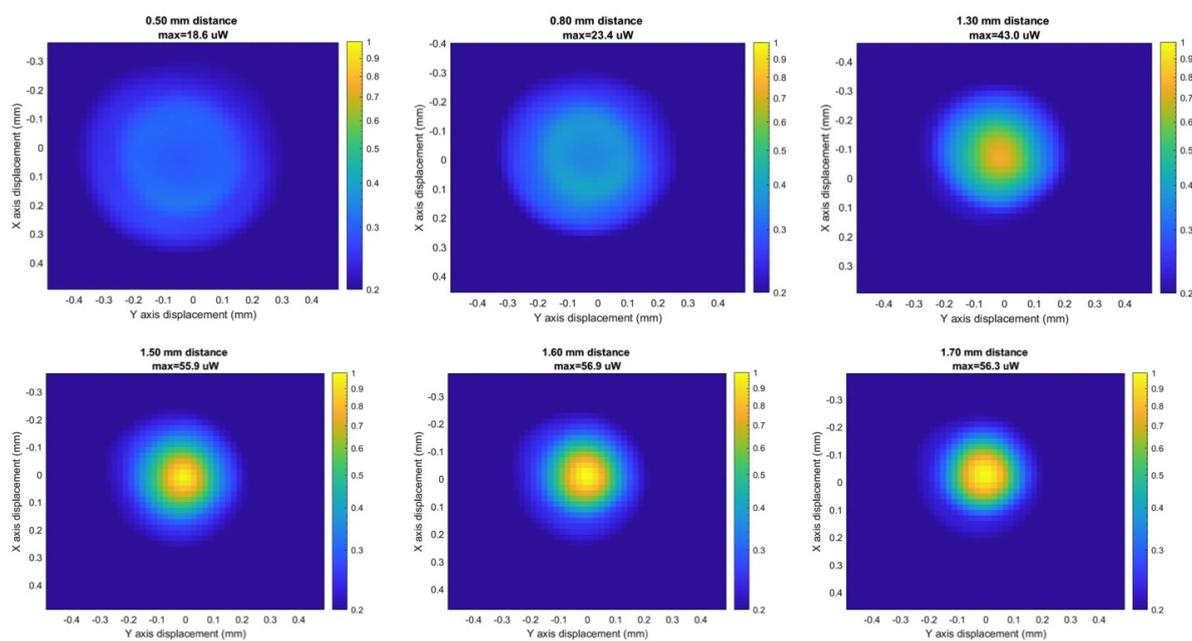


Figura 4.5: Mappe della potenza ottica sul piano (x, y) a diversi valori di z per il LED 1. Ad ogni punto è associato un colore in base al valore di potenza misurato. La scala dei colori è stata attribuita normalizzando al massimo valore di potenza misurato, pari a $56.9 \mu\text{W}$ per $z=1.6 \text{ mm}$

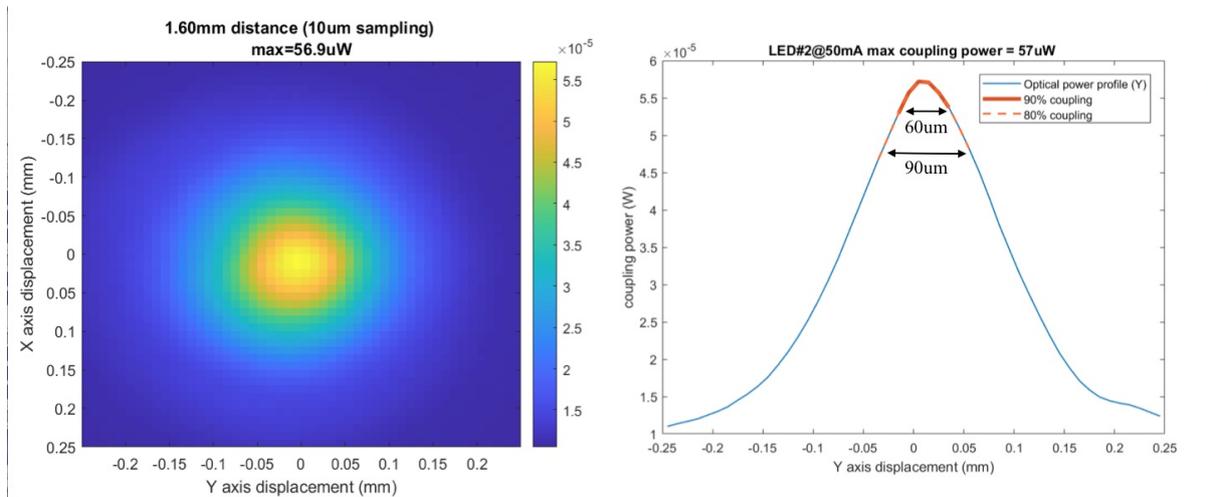


Figura 4.6: A sinistra, mappa della potenza ottica sul piano (x, y) alla distanza fissata $z=1.6$ mm. A destra, andamento della potenza ottica in funzione di y , a z e x (nel grafico "um" sta per μm)

figura 4.6, evidenzia che a una distanza di $60 \mu\text{m}$ dal valore ottimale si ha un allineamento del 90%, mentre a una distanza di $90 \mu\text{m}$ dal valore ottimale dell'82%. Sulla base di queste considerazioni è stato fissato il margine di tolleranza a $50 \mu\text{m}$ dal valore ottimale.

4.4.2 Confronto fra fibre ottiche

Nei test effettuati in laboratorio, sono stati confrontati i comportamenti di due diverse fibre ottiche: fibra JTFLH e fibra FBP. Entrambe le fibre sono prodotte dalla ditta Molex, ma in materiali diversi e con caratteristiche differenti, come riportato in tabella 4.1. I materiali utilizzati nella costruzione della fibra sono tutti intrinsecamente radio-puri quindi adatti per essere utilizzati in DarkSide-20k.

Le fibre hanno un connettore SMA ad un estremo e un connettore LC all'altro. Il primo viene accoppiato al LED, mentre il secondo al fotodiodo. La fibra ottica è stata quindi collegata al sistema di trasmissione e ricezione e sono state studiate le risposte dell'intero sistema in diverse condizioni: tutto il sistema a caldo, il LED a freddo e la fibra ottica a caldo, il LED e la fibra ottica a freddo.

I valori di potenza ottenuti, misurati con l'oscilloscopio, sono riportati in figura 4.7.

| | Fibra JTFLH | Fibra FBP |
|-------------------------------------|-------------|-----------|
| Diametro core (μm) | 200 | 200 |
| Diametro cladding (μm) | 230 | 220 |
| Diametro buffer (μm) | 500 | 239 |
| Materiale core | S. F. S. | S. F. S. |
| Materiale cladding | Acrylate | S. F. S. |
| Materiale buffer | Acrylate | Polyimide |
| Apertura numerica | 0.37 | 0.22 |

Tabella 4.1: Confronto fra parametri caratteristici delle fibre JTFLH e FBP. S.F.S. è una abbreviazione per Synthetic Fused Silica

Inizialmente è stata utilizzata la fibra JTFLH e, misurando la potenza ricevuta, si è osservato che il segnale perde circa il 30% della potenza misurata a caldo (punti in azzurro in figura 4.7) se la fibra viene immersa in azoto liquido (punti in viola in figura 4.7).

Utilizzando la fibra FBP, invece, si ha un guadagno in potenza (punti in rosso in figura 4.7), immergendo tutto il sistema freddo, superiore a quello raggiunto con la fibra JTFLH a caldo.

La perdita del segnale causata dalla fibra ottica in condizioni di criogenia può essere attribuita al fenomeno del micro-bending, dovuto all'azione del buffer a freddo. Gli strati più esterni che circondano la fibra sono composti di materiali plastici che, a temperature criogeniche, si restringono esercitando una compressione sugli strati interni della fibra. La superficie di separazione fra cladding e core presenta microscopiche imperfezioni e non è quindi del tutto liscia ed omogenea. Quando gli strati più esterni che compongono il buffer schiacciano quelli più interni, cladding e core, queste imperfezioni aumentano, determinando la variazione degli angoli di incidenza della luce interna. L'angolo reale della luce può essere inferiore a quello di incidenza critica provocando la perdita di una frazione di radiazione che viene invece rifratta.

Lo spessore del buffer determina, quindi, la variazione degli angoli di rifrazione interna e, in particolare, maggiore è lo spessore degli strati esterni, maggiore sarà la perdita del segnale a freddo. Infatti, la fibra JTFLH ha un buffer di spessore pari a $270 \mu\text{m}$, molto superiore rispetto alla fibra FBP pari a $19 \mu\text{m}$, e tale differenza giustifica la grande variazione di potenza registrata. Per questo motivo è stato scelto di utilizzare la fibra FBP in DarkSide-20k.

4.4.3 Progettazione del connettore ottico

I test eseguiti, e in particolare la mappatura tridimensionale del segnale emesso dal LED (sezione 3.1.2), hanno permesso di progettare un nuovo connettore LED-fibra che minimizzi le perdite di segnale. Il connettore progettato è costituito da una cavità che ospita il LED e da una parte cilindrica cava delle dimensioni della ferrula che circonda

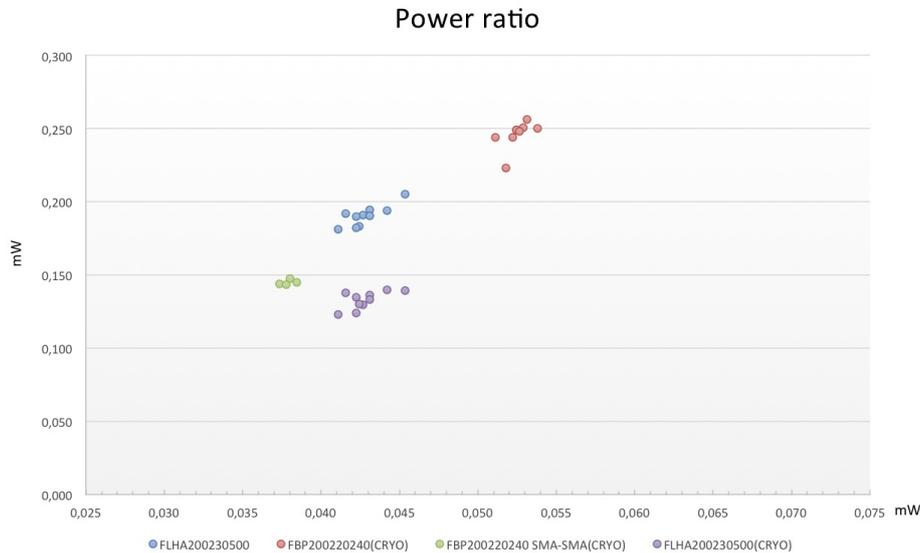


Figura 4.7: Potenza rivelata a freddo (in ordinata) in funzione della potenza rivelata a caldo (in ascissa). I punti in azzurro sono relativi al caso di LED a freddo e fibra JTFLH a caldo; in punti in viola sono relativi al caso di LED e fibra JTFLH a freddo, mentre i punti in rosso sono relativi al caso di LED e fibra FBP a freddo

la fibra ottica, dove si avvita il connettore SMA della fibra stessa. Dalla parte del LED sono stati effettuati due buchi per mezzo dei quali è possibile avvita il connettore al circuito di trasmissione, assicurando maggiore stabilità meccanica.

La distanza a cui vengono mantenuti fibra ottica e LED nel connettore è pari a 1.8 mm, 0.2 mm più grande rispetto alla distanza ottimale misurata. La connessione ottica in DarkSide-20k avverrà, infatti, in argon liquido e non nell'aria, come nei test. Poiché l'argon liquido ha un indice di rifrazione superiore all'aria, la distanza focale subisce un incremento stimato circa di 0.2 mm e che deve essere preso in considerazione nella costruzione del connettore.

La realizzazione del connettore è stata quindi affidata all'officina meccanica dell'INFN di Bologna, che ha prodotto diversi prototipi di connettori realizzati in alluminio e in rame. Il materiale scelto deve essere però radio-puro, o almeno purificabile, perciò il rame è un buon materiale, in quanto purificabile da ogni impurità.

Una volta costruiti i connettori, questi sono stati sottoposti a test di verifica e di stabilità. Nei test di stabilità il LED è stato inserito nel connettore, mentre la fibra è stata svitata e riavvitata molte volte di seguito, da diverse persone, e ogni volta è stata misurata, sia a caldo che a freddo, la tensione di uscita.

Notando una variabilità di circa il 12%, il LED è stato saldato al connettore facendo in modo di ottenere un allineamento massimo con la fibra ottica. In questo modo la

variabilità si riduce a circa il 3%. In figura 4.8 si vedono i connettori realizzati in rame e in alluminio, mentre nella parte di destra un connettore in rame con il LED inserito saldato al connettore stesso.



Figura 4.8: Fotografia dei connettori progettati e realizzati in rame e alluminio. A destra un connettore in rame con il LED saldato.

4.5 Prototipo di trasmissione

Al termine di tutti i test effettuati, sono stati definiti i componenti del sistema di trasmissione Opto-Link per DarkSide-20k.

Il circuito di trasmissione (figura 4.1) riceve in input i segnali dal modulo PDM e li utilizza per accendere il LED.

I LED impiegati saranno quelli del tipo EI6C-8000-E della LuxNet (in sezione 4.4.1 denominati LED 1), costruiti in InGaAs.

La fibra ottica scelta sarà la fibra FBP multi-mode della Molex, con diametri 200/220/239 μm corrispondenti a core/cladding/buffer. I due strati più interni saranno realizzati in Synthetic Fused Silica, mentre il buffer in Polyimide.

Il fotodiodo utilizzato sarà di tipo FCI-InGaAs-500 della OSI Optoelectronics con area attiva di diametro pari a 500 μm .

Conclusioni

Provare l'esistenza della materia oscura è uno degli principali obiettivi della ricerca scientifica e significherebbe svelare uno dei più profondi misteri che avvolgono l'origine e l'evoluzione dell'Universo.

Nonostante le molte evidenze a sostegno della sua esistenza, sia sul piano teorico che osservativo, ad oggi, nessuno dei rivelatori costruiti e degli esperimenti in corso ha prodotto risultati significativi nella identificazione di possibili costituenti della materia oscura.

In questo contesto, il programma di ricerca DarkSide-20k punta alla ricerca diretta di materia oscura presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Grazie alle dimensioni e alla grande quantità di massa di argon che ospiterà al suo interno, sarà in grado di raggiungere livelli di sensibilità molto più alti degli altri esperimenti in funzione fino ad oggi.

La realizzazione di un rivelatore di ultima generazione come DarkSide-20k è un processo complesso che necessita di molto tempo e risorse.

In questo lavoro ci si è concentrati sulla trasmissione del segnale prodotto dal sistema di rivelazione all'interno della TPC, all'apparato di acquisizione dati all'esterno del rivelatore. Il sistema sviluppato, chiamato Opto-Link, è una tecnologia innovativa realizzata per rispondere alle caratteristiche richieste da DarkSide-20k, quindi un sistema realizzato con materiali perfettamente radio-puri, per minimizzare il background naturale, in grado di lavorare in maniera ottimale alle temperature criogeniche dell'argon liquido, di minimizzare le perdite di segnale e di conservarne invariata la forma, permettendo la ricostituzione spaziale e il calcolo della intensità della interazione iniziale che ha prodotto il segnale stesso.

I test di laboratorio, effettuati sia a freddo che a caldo, hanno permesso la caratterizzazione degli elementi essenziali che costituiscono il sistema di Opto-Link e la realizzazione di un prototipo di trasmissione del segnale ottico per DarkSide-20k.

Un punto cruciale per l'Opto-Link è l'ottimizzazione delle connessioni ottiche fra LED e fibra e fra fibra e fotodiode. Grazie allo studio dettagliato dei segnali emessi dal LED e della risposta del sistema di trasmissione, è stato infatti progettato un connettore ottico che massimizzi l'efficienza e l'allineamento per la connessione fra LED e fibra. Restano ancora da studiare alcuni punti importanti per migliorare ulteriormente le prestazioni

dell'Opto-Link, come la progettazione di un connettore ottico più efficiente fra fibra e fotodiode.

Una volta che tutte le componenti del rivelatore saranno state testate e assemblate, DarkSide-20k sarà in grado di vedere se le WIMPs costituiscono realmente la materia oscura, e potrà certamente dare un contributo rilevante nel delineare le caratteristiche di queste particelle ancora sconosciute, riducendo notevolmente i limiti superiori per le masse e le sezioni d'urto.

Le tecnologie innovative sviluppate per la ricerca della materia oscura rappresentano un perfezionamento di tutte quelle già messe alla prova in situazioni precedenti e troveranno vasta applicazione in molteplici campi, sia nella ricerca scientifica che a scopo industriale.

Bibliografia

- [1] Begeman, K. G., Broeils, A. H., & Sanders, R. H. (1991). Extended rotation curves of spiral galaxies: Dark haloes and modified dynamics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* , 249(3), 523-537.
- [2] Alcock, C., Allsman, R. A., Alves, D. R., Axelrod, T. S., Becker, A. C., Bennett, D. P., ... & Welch, D. (2000). The MACHO project: Microlensing results from 5.7 years of Large Magellanic Cloud observations. *The Astrophysical Journal*, 542(1), 281.
- [3] Loosli, H. H., & Oeschger, H. (1968). Detection of ^{39}Ar in atmospheric argon. *Earth and Planetary Science Letters*, 5, 191-198.
- [4] Back, H. O., Alexander, T., Alton, A., Condon, C., de Haas, E., Galbiati, C., ... & Pordes, S. (2012). First commissioning of a cryogenic distillation column for low radioactivity underground argon. *arXiv preprint arXiv: 1204.6061*.
- [5] Zuzel, G., Agnes, P., Albuquerque, I. F. M., Alexander, T., Alton, A. K., Asner, D. M., ... & Vogelaar, B. (2017). The DarkSide experiment: Present status and future. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 798, No. 1, p. 012109). IOP Publishing.
- [6] Stanford, C. J. (2017). Alphas and surface backgrounds in liquid argon dark matter detectors. *Doctoral dissertation, Princeton University*.
- [7] Agnes, P., Alexander, T., Alton, A., Arisaka, K., Back, H. O., Baldin, B., ... & Zuzel, G. (2015). First results from the DarkSide-50 dark matter experiment at Laboratori Nazionali del Gran Sasso. *Physics Letters B* , 743, 456-466.
- [8] Aalseth, C. E., Agnes, P., Alton, A., Arisaka, K., Asner, D. M., Back, H. O., ... & Yu, B. (2015). The DarkSide multiton detector for the direct dark matter search. *Advances in High Energy Physics*, 2015.
- [9] Buß, A. (2016). Characterization of the Münster dual phase xenon TPC and of a newly developed magnetically driven piston pump. *Doctoral dissertation, Master thesis, April 2016. 24, Munter University*.

- [10] Agnes, P., Albuquerque, I. F. M., Alexander, T., Alton, A. K., Araujo, G. R., Asner, D. M., ... & Rossi, N. (2018). Low-mass dark matter search with the DarkSide-50 experiment. *Physical review letters*, 121(8), 081307.
- [11] Kuźniak, M., & Szelc, A. M. (2021). Wavelength shifters for applications in liquid argon detectors. *Instruments*, 5(1), 4.
- [12] Carnesecchi, F. (2020). Light detection in DarkSide-20k. *Journal of Instrumentation*, 15(03), C03038.