



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TORINO

UNIVERSITÉ
FRANCO
ITALIENNE

UNIVERSITÀ
ITALO
FRANCESE



SORBONNE
UNIVERSITÉ

From gamma rays to radio waves: Dark Matter searches across the spectrum

Elena Pinetti

This dissertation is submitted for the degree of
Philosophiae Doctor

August 2021

Scuola di dottorato dell'Università di Torino

École doctorale Physique en Île-de-France

Supervisors: Prof. Nicolao Fornengo
Dr. Marco Cirelli



SOMMARIO

Una delle questioni aperte più affascinanti della fisica moderna è la materia oscura (MO). Ad oggi, le prove della sua esistenza sono solo di natura gravitazionale, ossia sono legate all'impatto gravitazionale della presenza di MO nell'Universo. Ne sono un esempio le curve di rotazione delle galassie a spirale, la dinamica degli ammassi di galassie, la struttura su larga scala dell'Universo, il fondo cosmico a microonde (CMB), ma anche gli effetti di lente debole e forte. La possibilità più accreditata è che la MO sia una nuova forma di materia, ma la sua natura rimane un enigma. In particolare, se la MO è costituita da nuove particelle elementari o da altri oggetti esotici macroscopici, ci si aspetta che produca segnali caratteristici della fisica delle particelle che ne rivelino la natura. Le evidenze osservative della presenza di MO nell'Universo sono discusse nel capitolo [1](#).

L'argomento di questa tesi riguarda la rivelazione indiretta di particelle di MO, basata sull'idea che l'annichilazione o il decadimento della MO potrebbe produrre una grande varietà di messaggeri astrofisici. I messaggeri che ci aspettiamo sono raggi cosmici carichi, neutrini e fotoni. E' importante sottolineare che diversi messaggeri richiedono diverse tecniche di rivelazione e procurano diversi tipi di informazioni. Ad esempio, neutrini e fotoni conservano l'informazione sulla posizione delle sorgenti che li hanno emessi, essendo particelle neutre, invece i raggi cosmici carichi vengono deviati dai campi magnetici presenti nelle galassie. Tuttavia, i raggi cosmici carichi sono anch'essi segnali preziosi per studiare i candidati di MO e l'antimateria è particolarmente interessante poiché è associata a uno fondo astrofisico relativamente basso a Terra. Inoltre, diversi messaggeri ci permettono di studiare diversi candidati di MO, ossia particelle con un diverso intervallo di masse e tipi di interazioni. Di conseguenza è necessario adottare un approccio multimessaggero. A questo proposito, il capitolo [2](#) introduce varie tecniche di rivelazione, con particolare attenzione alla ricerca indiretta con i fotoni.

Esistono diversi modi per cercare un segnale indiretto da MO. La Parte [I](#) si concentra su un metodo molto promettente chiamato tecnica della correlazione incrociata. Tale tecnica ha lo scopo di correlare due caratteristiche distintive della MO: un segnale elettromagnetico, che è una manifestazione della natura particellare della MO, e un tracciante gravitazionale della distribuzione di materia nell'Universo. Se la correlazione incrociata tra queste due osservabili producesse un segnale positivo, ciò sarebbe la prova che la materia invisibile di cui misuriamo gli effetti gravitazionali è effettivamente formata da nuove particelle elementari. Nel nostro lavoro

abbiamo calcolato per la prima volta il segnale di correlazione incrociata tra il fondo non risolto di raggi γ (UGRB) e la linea a 21 cm emessa dell'idrogeno neutro (HI). Nello specifico, abbiamo stimato il contributo dell'UGRB prodotto sia dagli eventi di annichilazione delle particelle di MO sia dalle sorgenti astrofisiche, in particolare BL Lacertae (comunemente noti come BL Lac), radio quasar a spettro piatto, nuclei galattici attivi disallineati e galassie ad alta formazione stellare. Per quanto riguarda la distribuzione di HI nell'Universo, può essere misurata utilizzando la tecnica della mappatura di intensità. Si tratta di un metodo all'avanguardia utilizzato per mappare la temperatura di brillanza della riga a 21cm. Tali fotoni sono prodotti da una transizione energetica dell'HI che può verificarsi quando l'elettrone e il protone di un atomo di HI hanno entrambi spin parallelo. Poiché l'HI risiede principalmente all'interno di aloni di MO, la linea a 21 cm costituisce un promettente tracciante gravitazionale della distribuzione di materia nell'Universo. Infatti, la precisa informazione sul redshift fornita dalla tecnica di mappatura dell'intensità può aiutarci a far emergere il contributo di MO dal fondo astrofisico dominante. Per quanto riguarda gli esperimenti di riferimento, abbiamo considerato il telescopio spaziale a raggi γ FERMI-LAT per l'UGRB, mentre abbiamo fatto riferimento al radio telescope Square Kilometre Array (SKA) e al suo precursore MEERKAT per la mappatura dell'intensità dell'HI. La combinazione di FERMI-LAT e SKA ha le potenzialità per rivelare un segnale di origine astrofisica con un rapporto segnale-rumore superiore oltre 5σ . Inoltre, questa combinazione di rivelatori sarà in grado di escludere le particelle massive a interazione debole (WIMP) con una sezione d'urto di annichilazione termica fino a una massa DM di 150 GeV, con un livello di confidenza del 95%. Inoltre, abbiamo mostrato che la combinazione di due telescopi di nuova generazione per i raggi γ e la mappatura dell'intensità dell'HI sarebbe sensibile fino alla scala del TeV, consentendoci di studiare l'intera finestra di massa delle WIMP.

Molti altri candidati di MO stanno ricevendo una crescente attenzione. Tra questi spiccano le particelle sub-GeV che sono oggetto della Parte II. I messaggeri astrofisici che ci aspettiamo in questo caso sono elettroni e positroni, neutrini e fotoni. Il campo magnetico solare devia le particelle cariche con un'energia cinetica inferiore al GeV e quindi i telescopi spaziali in orbita attorno alla Terra non hanno accesso agli elettroni e ai positroni. I neutrini a bassa energia provenienti dalla MO sono di difficile rivelazione a causa del fondo di neutrini solari. I raggi γ rappresentano un segnale interessante da considerare, ma sfortunatamente FERMI-LAT, che è il più potente tra i recenti rivelatori di raggi γ , non è sufficientemente sensibile nell'intervallo energetico di interesse. A questo proposito, una delle sfide nella rilevazione indiretta di MO con una massa dell'ordine del sub-GeV è il cosiddetto "gap MeV": c'è una scarsità di dati recenti e con una buona sensibilità nell'intervallo di energia tra 1 MeV e centinaia di MeV. Di conseguenza, dobbiamo trovare modalità alternative per studiare i candidati di MO che hanno massa in questa finestra energetica. Nel nostro lavoro abbiamo proposto di studiare la MO con massa dell'ordine del sub-GeV osservando fotoni con energie molto inferiori rispetto alle masse delle particelle che desideriamo studiare. In particolare, gli elettroni e i positroni prodotti dalle particelle di

MO possono fare scattering Compton inverso sui campi di radiazione a bassa energia nella Galassia (CMB, luce infrarossa da polvere, luce stellare nella banda ottica) e dare origine a raggi X. Questa emissione secondaria rientra nell'intervallo di energia coperto dai dati INTEGRAL che abbiamo usato per determinare i limiti conservativi sulla sezione d'urto di annichilazione della MO. Abbiamo considerato tre canali di annichilazione (elettrone, muone e pione) e abbiamo derivato limiti competitivi per particelle di MO con una massa compresa tra 150 MeV e 1.5 GeV.

Infine, gli ammassi di galassie sono anche di particolare interesse per le ricerche di MO. Si pensa che siano collegati da filamenti diffusi, che rappresentano il fulcro della Parte III. Queste strutture connettive sono caratterizzate da un'emissione molto debole, quindi sono estremamente difficili da rivelare con i nostri attuali telescopi. Si pensa che i filamenti contengano del gas caldo e dei campi magnetici che inducono l'accelerazione dei raggi cosmici e l'emissione di radiazione di sincrotrone. Un metodo spesso adottato per studiare i filamenti deboli è lo "stacking" delle immagini. Questa tecnica consiste nel fare la media su numerose immagini ripetute degli stessi oggetti astrofisici. Il vantaggio è che il numero di fotoni provenienti dalle sorgenti astrofisiche ("valore vero") rimane relativamente costante, a differenza del rumore di fondo la cui media su più immagini converge a zero. Di conseguenza, la tecnica dello stacking ci consente di aumentare il rapporto segnale-rumore, se applicata a oggetti astrofisici approssimativamente statici. Poiché la posizione dei filamenti non è nota a priori, è necessario un tracciatore per individuare la posizione degli ammassi di galassie. A questo proposito, le galassie rosse luminose (LRG) sono preziosi tracciatori della struttura su larga scala poiché di solito si trovano in prossimità dei centri degli ammassi. Lo Sloan Digital Sky Survey ha catalogato oltre un milione di queste galassie. Pertanto, si possono considerare coppie fisiche di LRG vicine come tracciatori di cluster vicini, potenzialmente collegati da filamenti. Nel nostro lavoro abbiamo adottato le mappe radio dei cataloghi GLEAM e OVRO-LWA per effettuare lo stacking di coppie di LRG. Abbiamo trovato il primo segnale dell'emissione radio da stacking proveniente da filamenti di grande dimensione (1–15 Mpc), che collegano coppie di LRG vicine. Il segnale è compatibile con l'emissione di sincrotrone dalla rete cosmica, pertanto costituisce la prova diretta di uno dei capisaldi della nostra attuale comprensione della struttura su larga scala nell'Universo. In particolare, l'eccesso rivelato nel segnale radio può essere interpretato come radiazione di sincrotrone originata da particelle di MO. Abbiamo scoperto che i candidati con una massa di circa 5–10 GeV che decadono in coppie elettrone-positrone possono produrre un segnale compatibile con le osservazioni. Al contrario, i decadimenti di tipo adronico e gli eventi di annichilazione sono sfavoriti. Le temperature di luminosità osservate associate ai filamenti possono essere utilizzate per ricavare i limiti sulla vita media della MO. In particolare, abbiamo ottenuto dei limiti competitivi per masse nell'intervallo 3–10 GeV e per campi magnetici superiori a 130 nGauss.

Infine, la Parte IV trae le conclusioni e offre una panoramica di potenziali sviluppi futuri.