

Xenon, noblesse oblige

Rivelatori innovativi per la ricerca di materia oscura

di Marco Selvi



Lo xenon (Xe) è un gas nobile e, come tutti i gas nobili, è particolarmente restio a legarsi chimicamente con altri elementi. Per questo motivo rappresenta un ottimo materiale per le ricerche di eventi rari in cui è necessaria un'altissima purezza del materiale, per evitare di rovinare la misura con le contaminazioni radioattive residue. Un campo attualmente di grande interesse, in cui si cercano eventi estremamente rari, è la ricerca diretta di materia oscura.

Numerose e differenti osservazioni sperimentali, sia su scala galattica che cosmologica, ci dicono che nell'universo primordiale e in quello attuale deve essere presente una forma di materia capace di avere forti effetti gravitazionali (tali da spiegare sia le piccole variazioni angolari osservate nella temperatura della radiazione cosmica di fondo, sia l'attuale velocità di

rotazione delle galassie), ma nello stesso tempo non interagire con la radiazione elettromagnetica, in quanto non si osserva emissione di luce collegata alla sua presenza. Tale forma di materia è chiamata "materia oscura", a sottolineare il fatto che non emette luce, ma anche la nostra attuale ignoranza sulla sua natura. Infatti, nessuna delle particelle del modello standard che sono state studiate in dettaglio negli ultimi decenni hanno caratteristiche tali da potersi comportare come la materia oscura: nemmeno i neutrini, troppo leggeri e veloci. Uno dei modelli più accreditati prevede che la nostra galassia sia permeata da materia oscura sotto forma di Wimp (particelle massive debolmente interagenti), con una densità equivalente inferiore a un protone per cm^3 . Le Wimp si muovono attorno a noi con un moto di "agitazione termica" con velocità

a.
L'esperimento Xenon1t nella sala B dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso. A sinistra si può vedere l'immagine del criostato, contenente la camera a proiezione temporale a xenon liquido/gassoso, situato al centro del grande serbatoio di acqua che agisce da schermo e da rivelatore di muoni cosmici. A destra si trova la "palazzina" che ospita i vari sistemi ausiliari necessari all'esperimento: dall'alto verso il basso il sistema di raffreddamento e purificazione, il sistema di acquisizione dati, il serbatoio di recupero dello xenon e la colonna di distillazione.

di circa 200 km/s. Se le Wimp sono dotate di interazione debole, come quella responsabile dei decadimenti radioattivi nei nuclei atomici, allora possono effettuare un urto elastico con i nuclei dei materiali utilizzati per i rivelatori e produrre un segnale. La difficoltà sta nel fatto che tali segnali sono molto deboli in termini di energia depositata ed estremamente rari a causa della piccola probabilità di interazione delle Wimp. Per questo motivo i rivelatori devono essere molto sensibili e “silenziosi”, in modo da ridurre al minimo i segnali spuri dovuti alla radioattività naturale. E qui entra in gioco l’elevata purezza dei gas nobili, fra cui lo xenon.

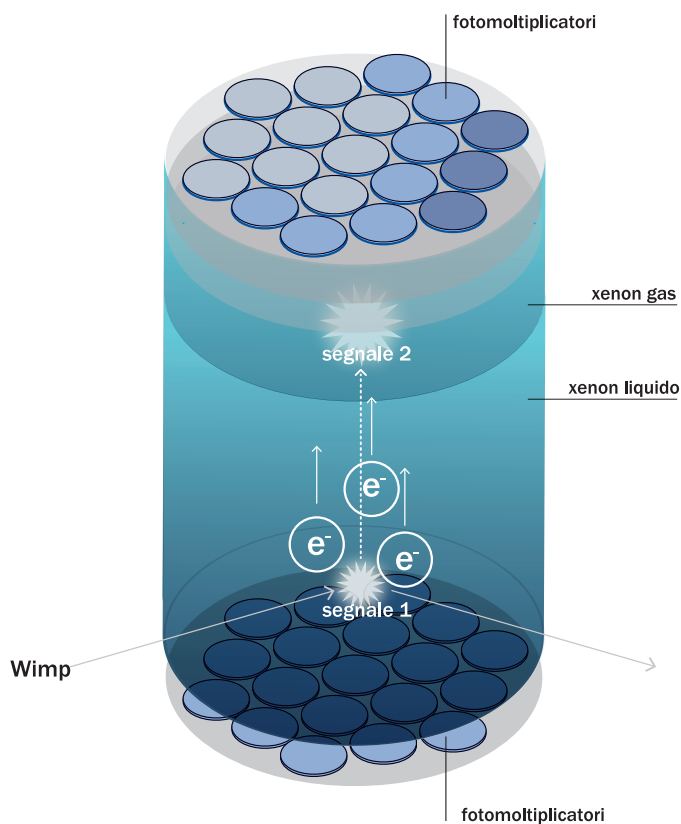
Lo xenon è presente in quantità molto ridotte nell’atmosfera terrestre, circa una parte su 20 milioni. Per questo motivo la sua estrazione tramite distillazione è lunga e complicata e il suo costo finale è molto elevato (dell’ordine del migliaio di euro al kg, con fluttuazioni ampie e rapide, che lo rendono anche oggetto di speculazioni finanziarie). I suoi utilizzi principali sono nel campo della medicina e dell’illuminazione (per esempio per i famosi fari allo xenon delle auto di “fascia alta”, oggi superati dall’uso dei Led). Più di recente, il mercato è trainato dal settore aerospaziale legato alle telecomunicazioni, dove lo xenon è utilizzato come propulsore dei motori che servono per aggiustare la traiettoria dei satelliti. La produzione mondiale annua è di qualche decina di tonnellate.

Una volta raffreddato alla temperatura di -95° C, lo xenon si presenta allo stato liquido, con una densità tre volte maggiore di quella dell’acqua: è quindi piuttosto semplice ottenere grandi masse di rivelatore in spazi relativamente compatti.

Come si è visto a partire dalla fine degli anni ’60, con i primi lavori pionieristici condotti dal premio Nobel (del 1968) Luis Walter Alvarez, lo xenon liquido presenta ottime proprietà come rivelatore di particelle. Viene utilizzato per esempio nel calorimetro elettromagnetico dell’esperimento Meg, che cerca un decadimento rarissimo del muone, oppure in campo medico nella Pet (tomografia a emissione di positroni, dall’inglese *positron emission tomography*) per la rivelazione dei due fotoni di alta energia generati a seguito dell’annichilazione del positrone.

Negli ultimi decenni, l’utilizzo dello xenon nell’ambito della ricerca di eventi rari è stato portato alla piena maturità dagli studi di Tadayoshi Doke (in Giappone) e dell’italiana Elena Aprile.

Il rivelatore Xenon1t, guidato dalla stessa Aprile e in funzione nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs) dell’Infn dalla fine del 2016, è costituito da una “camera a proiezione temporale” cilindrica con diametro e altezza di circa 1 metro e contenente circa 2 tonnellate di xenon liquido. Se una Wimp interagisse con un nucleo di xenon, l’energia depositata produrrebbe sia emissione di luce (scintillazione) sia produzione di elettroni liberi (ionizzazione). Tramite un campo elettrico, gli elettroni sono fatti migrare verso l’alto, fino all’interfaccia fra lo xenon liquido e gassoso. Qui un ulteriore campo elettrico, più intenso, li estrae e li accelera nel gas, generando un secondo segnale luminoso. Tramite sensori di luce molto sensibili è possibile rivelare entrambi i segnali e ricostruire così diverse proprietà dell’interazione:



b.
Schema del funzionamento della camera a proiezione temporale a xenon (o argon) liquido/gassoso: a seguito della interazione di una Wimp con un nucleo del liquido si genera un primo segnale luminoso e sono prodotti elettroni liberi. Grazie al campo elettrico applicato, gli elettroni si spostano in alto verso la regione gassosa. Qui un ulteriore campo elettrico, ancora più intenso, li estrae e li accelera, generando un secondo segnale luminoso. Entrambi i segnali luminosi sono rivelati tramite fotosensori posti nella parte inferiore e superiore del rivelatore. Combinando questi segnali si può ricostruire con buona precisione l’energia depositata nel rivelatore, la posizione e la natura della particella che ha interagito.



c.
L'esperimento DarkSide-50, presso la sala C dei Lngs. L'immagine è scattata all'interno del serbatoio di acqua che serve da schermo per la radioattività ambientale e da rivelatore di muoni cosmici. La sfera centrale racchiude un ulteriore rivelatore a scintillazione liquido per riconoscere e scartare gli eventi prodotti dai neutroni generati nei materiali circostanti. La camera a proiezione temporale ad argon liquido/gassoso, non visibile in questa immagine, si trova all'interno della sfera immersa nello scintillatore.

la sua posizione, l'energia depositata e anche la natura della particella che ha interagito. Combinando queste informazioni, si possono selezionare gli eventi attribuiti alle Wimp: interazioni singole, preferibilmente al centro del rivelatore, di bassa energia e di tipo "rinculo nucleare" (interazioni in cui si osserva l'energia depositata da un nucleo colpito da una Wimp). In questo modo si può rimuovere la gran parte delle interazioni dovute al fondo radioattivo (principalmente, piccole tracce di altri gas nobili, kripton e radon, che sono mescolati allo xenon) e selezionare i candidati Wimp. La schermatura di roccia di almeno 1000 metri dei laboratori sotterranei del Gran Sasso assorbe quasi tutta la radiazione cosmica, che alla superficie terrestre renderebbe di fatto impossibile la misura. Il rivelatore è ulteriormente schermato da una vasca d'acqua di 10 metri di diametro e altezza, al centro della quale è posto il criostato che mantiene freddo e liquido lo xenon e al

cui interno è posizionato il rivelatore. Durante un periodo di acquisizione dati di circa 280 giorni, Xenon1t non ha osservato eventi compatibili con le caratteristiche delle Wimp e ha potuto così presentare a maggio 2018 i risultati in termini di limite superiore alla probabilità di interazione di queste particelle. Tale limite è risultato essere il migliore al mondo grazie alla grande massa di Xenon1t e alla sua piccolissima contaminazione radioattiva. La fase successiva del progetto, Xenonnt (contenente 6 t di xenon nel volume attivo), è già in fase di realizzazione e sarà messo in funzione entro il 2019 sempre presso i Lngs, con l'obiettivo di migliorare di un fattore 10 la capacità di osservare le Wimp. Una tecnica analoga è utilizzata anche dai rivelatori per la materia oscura che utilizzano come elemento nobile l'argon al posto dello xenon. L'argon è naturalmente più abbondante nell'atmosfera, e quindi è molto meno caro, ma contiene un isotopo radioattivo,

l'argon-39 (^{39}Ar), che richiede di essere rimosso con tecniche particolari (vd. approfondimento). Essendo meno denso dello xenon ha una minore efficacia di schermaggio dalla radiazione esterna. A sua volta però l'argon presenta una capacità unica di riconoscere le interazioni elettromagnetiche della contaminazione radioattiva, grazie alla struttura temporale del segnale luminoso emesso. Il rivelatore attuale, DarkSide-50, installato nella sala C dei Lngs, contiene circa 50 kg di argon liquido. Il progetto futuro DarkSide-20k ne conterrà circa 20 tonnellate e sarà in funzione nei primi anni '20. Nel prossimo futuro quindi l'Infra continuerà a essere alla frontiera della ricerca di materia oscura operando i rivelatori Xenonnt e DarkSide-20k ai Lngs, con una sinergia unica che in caso di scoperta delle Wimp permetterà di studiarne in dettaglio le proprietà, grazie alla possibilità di rivelare le interazioni su due bersagli differenti, xenon e argon: *noblesse oblige!*

Il progetto Aria

1.
Vista dall'alto dell'area mineraria di Seruci, in Sardegna, dove sarà realizzata Aria, la colonna di distillazione per purificare l'argon dell'esperimento DarkSide-20k.



L'esperimento DarkSide ha in progetto la realizzazione di un grande rivelatore per la ricerca di materia oscura, costituito da più di 20 tonnellate di argon, presso i Lngs. L'argon estratto normalmente dall'atmosfera contiene una piccola frazione dell'isotopo radioattivo argon-39, prodotto dall'interazione dei raggi cosmici e responsabile di un decadimento per secondo per ogni kg di materiale: troppo elevato per esperimenti che puntano alla ricerca di segnali rari, come quelli attesi negli esperimenti alla ricerca della materia oscura. L'obiettivo del progetto Aria è quindi la purificazione dell'argon dal suo isotopo radioattivo (l'argon-39), tramite la tecnica della distillazione isotopica. La distillazione è un processo comunemente usato per separare due sostanze tramite il loro differente punto di ebollizione (ad esempio, per estrarre con un alambicco l'alcool etilico durante la produzione della grappa!). Nel caso dell'argon i due isotopi hanno caratteristiche molto

simili, per cui è necessario un "alambicco" molto particolare. L'infrastruttura per la selezione dell'argon consisterà infatti di una torre criogenica alta 350 metri, installata in un pozzo dell'area mineraria di Seruci, nella zona del Sulcis-Iglesiente, in Sardegna. La torre sarà costituita da 28 moduli collaudati al Cern e poi trasportati nei cantieri di Nuraxi Figus, dove saranno parzialmente assemblati in superficie per i primi test propedeutici all'installazione dell'intera colonna all'interno del pozzo. La torre di distillazione di Aria, oltre a selezionare l'argon-40, permetterà la sperimentazione e lo sviluppo della nuova tecnologia per la successiva produzione su larga scala di isotopi stabili di interesse commerciale, come il carbonio-13 (^{13}C), l'azoto-15 (^{15}N) e l'ossigeno-18 (^{18}O), che trovano impiego in medicina e hanno un mercato internazionale di grande rilievo.

Biografia

Marco Selvi è ricercatore Infn della Sezione di Bologna. Si occupa da circa 20 anni di ricerca di eventi rari presso i Lngs (neutrini da supernova e materia oscura). Fa parte della commissione scientifica Infn per le astroparticelle. È responsabile nazionale per l'Infn dell'esperimento Xenon.

Link sul web

https://www.sciencedaily.com/news/space_time/dark_matter/
<http://www.xenon1t.org>
<http://darkside.lngs.infn.it>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2019.26.8