

# Un vento leggero

## Assioni per spiegare la materia oscura

di Giovanni Carugno



a.

Il detersivo che ha dato nome all'assione.

Tra le tante particelle che sono state ipotizzate per spiegare la composizione della misteriosa materia oscura (vd. p. 31, ndr), una - l'assione - ha la peculiarità di essere stata introdotta fin dagli anni '70 in un contesto del tutto indipendente, per risolvere un problema fondamentale della teoria delle interazioni forti: la possibile violazione della simmetria per inversione temporale (cioè dell'invarianza rispetto al cambiamento di direzione del tempo). All'interno della teoria dei campi che descrive l'interazione forte tra i quark e i gluoni (la cromodinamica quantistica), fa capolino un termine che introduce un'asimmetria tra passato e futuro. Tale termine avrebbe come diretta conseguenza sperimentale la presenza di un "dipolo elettrico" sul neutrone

(ovvero uno squilibrio nella distribuzione spaziale delle cariche elettriche presenti nel neutrone), che non è mai stato osservato. Nei processi governati dalla forza forte, dunque, la natura non manifesta una preferenza nella direzione del tempo e in qualche modo deve essersi protetta dalla comparsa di quel termine asimmetrico. In che modo? La soluzione più "elegante" fu proposta da Roberto Peccei e Helen Quinn nel 1976 e poi sistematizzata all'interno della teoria dei campi da Steven Weinberg e Frank Wilczek. L'idea di base è di introdurre un nuovo campo e una nuova particella, che Wilczek battezzò assione (*axion* in inglese), prendendo spunto dal nome di un detersivo (la nuova particella, per così dire, puliva lo "sporco" delle interazioni forti). Dell'assione si presume

che abbia una massa ben più piccola della massa dell'elettrone, che sia elettricamente neutro, che abbia una vita media superiore all'età dell'universo (13,8 miliardi di anni), che interagisca con la materia ordinaria in maniera molto debole e che non possieda spin. L'assione dovrebbe essere stato prodotto in maniera copiosa nei primi istanti dopo il Big Bang, per poi pervadere l'universo a mo' di un fluido, analogamente a ciò che è accaduto al gas di fotoni primordiali che oggi costituiscono la radiazione cosmica di fondo. Ma, diversamente da questi fotoni, gli assioni hanno una massa e potrebbero quindi dar conto della massa mancante dell'universo, la materia oscura, di cui abbiamo molte evidenze indirette.

La teoria non prevede esattamente la massa dell'assione ma stabilisce che essa sia correlata alla costante di accoppiamento dell'assione con la materia e la radiazione: tanto più la massa dell'assione è piccola, tanto più debole è la sua interazione con la materia e la radiazione (e tanto più risulta difficile la ricerca sperimentale della particella). Attualmente, l'intervallo di massa degli assioni è stato ristretto sperimentalmente tra i microelettronvolt e le decine di millielettronvolt (miliardi di volte inferiore alla massa dell'elettrone). Gli ingredienti che servono per lanciarsi alla ricerca di questa particella sono una sorgente con caratteristiche predicibili e un rivelatore, in cui osservare un segnale attraverso un meccanismo dettato dalla teoria che predice le modalità di interazione dell'assione con la radiazione e la materia. Le sorgenti in uso per la ricerca degli assioni sono di natura cosmologica, stellare e di laboratorio.

Ipotizzando che la materia oscura sia interamente composta da assioni di origine cosmologica, questi dovrebbero formare un fluido di densità dell'ordine delle migliaia di miliardi di particelle per centimetro cubo (per una massa assionica di  $10^{-4}$  eV), rispetto al quale il sistema solare si muoverebbe con una velocità di centinaia di chilometri al secondo. Se potessimo osservare gli assioni, dunque, li vedremmo come una sorta di fiume che ci

viene addosso. Attualmente, due sono gli esperimenti messi in campo per rivelare il "vento di assioni" cosmologici.

Nell'esperimento americano Admx (Axion Dark Matter Experiment) gli assioni, interagendo con un campo magnetico prodotto da magneti superconduttori di intensità superiore a 10 tesla (al limite delle tecnologie attuali), sono convertiti in fotoni all'interno di una cavità elettromagnetica. A causa dell'esiguo numero di fotoni prodotti nella banda di osservazione dettata dalle caratteristiche della cavità a microonde sono necessari amplificatori che operano in regime quantistico, basati su dispositivi superconduttori (cosiddetti Squid) sviluppati dal gruppo di Berkeley appositamente per questo esperimento. Tutto l'apparato, inoltre, deve essere tenuto a temperature di millikelvin per ridurre il rumore termico di fondo.

La sensibilità è massimizzata facendo uso di un sistema risonante in cui la frequenza di risonanza della cavità è calibrata sull'ipotetica massa dell'assione, e viene fatta variare per coprire un intervallo di masse adeguato. Questo approccio, sviluppato nel corso degli ultimi trent'anni, permette di esplorare regimi di masse assioniche corrispondenti a frequenze dei fotoni fino a un gigahertz. Nel prossimo futuro si punta a coprire domini di frequenza/massa più elevate.



b.  
L'esperimento Admx nell'Università di Washington.





Un approccio alternativo a quello americano è stato proposto da Riccardo Barbieri, che ha suggerito di studiare l'interazione degli assioni con elettroni polarizzati. Il "vento assionico" è caratterizzato da un campo magnetico efficace di intensità bassissima, dell'ordine di  $10^{-22}$  tesla, oscillante a una frequenza che dipende dalla massa dell'assione. Investendo un rivelatore con elettroni polarizzati, questo "vento" farebbe ruotare gli spin elettronici. L'idea è alla base del progetto Quax (QUaerere AXion), una ricerca volta a studiare la fattibilità di un magnetometro che funzioni a frequenze delle microonde e che sia sensibile a campi magnetici miliardi di miliardi di volte meno intensi del campo magnetico terrestre. Raggiungere una sensibilità per campi a radiofrequenza di  $10^{-22}$  tesla renderebbe l'apparato Quax il magnetometro più sensibile finora realizzato, con possibili applicazioni nei campi della biofisica e della medicina e nel settore della strumentazione avanzata. Un'altra possibile sorgente di assioni sono le stelle. I fotoni presenti al loro interno, di energia elevata (corrispondente alle frequenze dei raggi X), attraverso l'interazione con il plasma circostante possono produrre copiosamente assioni. Questo processo si traduce in una perdita di energia della stella, e ne influenza la vita media. Studiando l'evoluzione stellare si possono porre limiti molto stringenti sulla massa e sull'accoppiamento dell'assione. È possibile quindi usare il Sole come sorgente di assioni, puntando un rivelatore verso la nostra stella e sfruttando lo stesso principio dell'esperimento americano Admx per convertire gli assioni solari in raggi X. È ciò che fa l'esperimento Cast (Cern Axion Solar Telescope), in fase di presa dati al Cern. Anche esperimenti che cercano candidati diversi di materia oscura possono fornire indicazioni

sull'esistenza dell'assione, dal momento che hanno soglie di rivelazione di energia molto basse, dell'ordine del keV. Gli esperimenti operanti presso il Laboratorio Nazionale del Gran Sasso (Dama, Borexino, Xenon, Cuore) hanno pubblicato dei limiti sulla possibile presenza di assioni provenienti dal Sole. Questa ricerca si può estendere a sorgenti di natura astrofisica, e in questo ambito l'esperimento Fermi ha recentemente fornito un limite superiore per la massa assionica.

Un'ultima possibilità è cercare di generare e rivelare gli assioni direttamente in laboratorio, usando sorgenti laser molto intense, campi magnetici di alta intensità e rivelatori a singolo fotone che presentino un livello di segnali casuali estremamente basso. L'assione viene generato in una regione di spazio e fatto riconvertire in un fotone in una regione adiacente, rivelandone così la presenza. Il capostipite di tale linea di ricerca è stato l'esperimento PVLAS, poi seguito da Alps (Any Light Particle Search), presso i laboratori di DESY ad Amburgo. Un progetto di ricerca e sviluppo è in corso in Italia sotto la sigla Stax per usare sorgenti di alta intensità di microonde e sviluppare un rivelatore in grado di riconoscere un singolo fotone nel dominio delle decine di gigahertz.

Lo sforzo nel perseguire la ricerca dell'assione, oltre a essere dettato da motivazioni di carattere teorico, nell'ambito sia delle interazioni fondamentali sia della cosmologia, offre la possibilità di sviluppare nuovi strumenti e tecnologie che sicuramente avranno ricadute nella diagnostica biomedica e nel campo di nuovi materiali superconduttori, e ci avvicinano al limite del mondo quantistico, dove risiede la nostra visione più avanzata della natura.

#### Biografia

**Giovanni Carugno** è ricercatore Infn presso la Sezione di Padova. Insegna presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Padova ed è coordinatore nazionale degli esperimenti Quax e Axioma.

c.  
La collaborazione Cast al Cern, davanti all'omonimo esperimento.