

MATERIA OSCURA

nascosta nelle stelle

Il modello di oscillazione stellare degli autori di questo articolo suggerisce che la modulazione di frequenza osservata in un campione di stelle dello Sloan Digital Sky Survey sia dovuta ad un addensamento di assioni, ne fissa il range di massa e lancia un nuovo capitolo della cosmologia della dark matter



Ignazio Licata

È un fisico teorico, direttore dell'ISEM di Palermo, autore di circa 150 pubblicazioni. Tra i suoi libri recenti "De Sitter Projective Relativity", Springer, 2017, e "Piccole Variazioni sulla Scienza", Dedalo, 2016.

Fabrizio Tamburini

Astrofisico teorico, è resident scientist presso lo ZKM di Karlsruhe (Germania). I suoi settori di ricerca sono: ottica quantistica, relatività generale, buchi neri e astrofisica di oggetti compatti. Ha scoperto il modo di misurare la rotazione dei buchi neri con le vorticità elettromagnetiche.

“**D**io vide che la luce era cosa buona e separò la luce dalle tenebre” (Genesi, 1). Se accettiamo la suggestione biblica, potremmo dire che la materia oscura sta alla nuova cosmologia di precisione come la materia visibile sta alla cosmologia tradizionale ottica. La strumentazione sofisticata di satelliti come COBE, WMAP, Planck e Chandra - per citare solo alcuni tra i più noti - ha permesso infatti di trasformare la vecchia “massa mancante” di Fritz Zwicky e Vera Rubin in un problema ben definito che riguarda circa il 26.8% della materia dell’universo, e contiene informazioni preziose sulla sua origine e destino. I vincoli teorici imposti da quello che qui chiameremo globalmente Modello Cosmologico Standard (modello standard delle particelle, SM, Standard Model, e relatività generale, General Relativity) hanno fatto retrocedere rapidamente l’idea che l’ipotesi della materia oscura (DM, Dark Matter) potesse essere elusa con materia barionica “ordinaria” troppo poco luminosa per poter essere rivelata, o con complicate modifiche ad hoc della teoria gravitazionale.

Senza Dark Matter sarebbe impossibile spiegare non soltanto le curve di rotazione delle galassie e degli ammassi galattici, ma anche un numero elevatissimo di effetti del tipo “lente gravitazionale”, come nel caso esemplare dell’ormai famoso *Bullet Cluster* (2006), la collisione tra due ammassi galattici, dove le nubi di gas si sono separate dalle galassie cui appartene-

vano. Il gas che avvolge una galassia contiene in genere molta più materia della galassia stessa, e nel caso di una collisione appare anche molto caldo e ricco di emissioni di raggi X, ma l’effetto lente gravitazionale è concentrato ancora intorno agli ammassi, in una misura straordinariamente più grande di quanto non sia possibile considerando soltanto la materia visibile! Osservazioni di questo tipo mostrano chiaramente che senza materia oscura sarebbe impossibile rendere conto di formazione, dinamica e stabilità delle strutture cosmiche. Ricordiamo che un problema connesso a quello della DM è l’energia oscura, legata in qualche modo ancora non del tutto chiaro alla costante cosmologica e responsabile dell’accelerazione dell’universo, accertata fin dal 1998. Questa rappresenta il 68.3% della massa-energia totali dell’universo, e dunque una valutazione del contributo alla densità di massa-energia dato dalla materia oscura è decisivo anche per una storia cosmologica della materia che sembra ormai lontana dal vecchio palloncino termodinamico del big bang e dai modelli semplificati di Friedmann.

Infine, tornando al versetto biblico, stiamo scoprendo che anche il modo in cui la materia ordinaria visibile e la materia oscura si sono separate caratterizza in modo ancora difficile da apprezzare le prime fasi dell’universo e la distribuzione tipicamente reticolare e filamentosa delle strutture che si osserva in tutte le scale di interesse astrofisico.

Un abbozzo di mappa

Sebbene non ci sia ancora un accordo generale sull'identità della materia oscura, è possibile tracciarne un identikit affidabile, almeno nella misura in cui scegliamo di affidarci agli scenari teorici consolidati. Contrariamente a quello che si pensa, il fisico è piuttosto diffidente verso le facili conversioni di paradigma, e tende pragmaticamente a salvare non soltanto i fenomeni, ma anche le teorie che più hanno più dato prova di fecondità. Dalle teorie di nucleosintesi primordiale sappiamo che la materia oscura non può essere materia ordinaria, altrimenti la densità di quest'ultima sarebbe almeno sette volte maggiore. È dunque "un qualcos'altro" che interagisce molto poco con la materia barionica.

Da ciò segue un altro tratto caratteristico tutt'altro che banale: interagisce anche molto poco con sé stessa. Strutture come il *Bullet Cluster* mostrano che le nubi di materia oscura si attraversano l'una con l'altra senza effetti notevoli, e lo studio della radiazione cosmica di fondo mostra che non costituiva un ingrediente attivo del plasma primordiale, cosa che ci impedisce per adesso di fissarne l'origine in una fase cosmologica precisa. A causa di questa tendenza "isolazionista", dev'essere anche "fredda", il che significa che durante i processi di formazione delle strutture la velocità dei componenti della Dark Matter era piuttosto lontana da quella della luce, più elusiva dunque dei "caldi" neutrini.

Del resto sono proprio queste caratteristiche "fredde" che danno al cielo l'aspetto che osserviamo, favorendo certe modalità di raggruppamento ed impedendone altre. Il numero di candidati si restringe, almeno per quello che riguarda lo sfondo teorico: Le WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*), oggetti massivi che interagiscono debolmente con la materia), sono collocate piuttosto comodamente dentro il modello standard; altri candidati, con nomi che fanno impallidire il quark di Joyce e Gell Mann, si pongono decisamente sul versante di un drastico ampliamento dello SM,



Scontro tra ammassi e evidenza della materia oscura (Bullet Cluster).

e appartengono al complesso scenario delle teorie SUSY, fondate sul concetto di supersimmetria. L'assione, il protagonista della nostra ricerca, sta in un certo senso proprio sul bordo di queste due possibilità, cosa che lo rende estremamente affascinante. Va detto infine che nessuno di questi candidati si è mai presentato con chiarezza in laboratorio.

Dialogo costruttivo

Einstein sosteneva che agli occhi di un epistemologo un fisico teorico può apparire un opportunista senza scrupoli, intendendo, tra le altre cose, che la genesi di una teoria è sempre più complessa di come può essere ricostruita "dopo". E che i "dati" non parlano mai da soli! Chi scrive (I.L.) è costretto perciò ad entrare in una dimensione aneddotica per raccontare come la costruzione del modello Tamburini - Licata di oscillazione stellare possa rientrare perfettamente in questa categoria artigianale, con una buona dose di *serendipity!*

Un'amicizia scientifica è fatta di un numero enorme di scambi di articoli e idee con ogni mezzo e ad ogni ora, finché non ci si imbatte in qualcosa di interessante che prende la forma di una domanda e innesca una successione di possibili risposte, fino ad arrivare a qualcosa che produce lavoro effettivo. Qualche mese fa Fabrizio Tamburini attirò la mia attenzione su

un articolo di due astronomi, Borra e Trottier, che analizzando 2 milioni e mezzo di corpi celesti registrati nell'ambito dello *Sloan Digital Sky Survey*, avevano scoperto segnali simili a quelli dei lampi di un laser in 234 stelle che emettevano impulsi di luce con la stessa periodicità, circa 1,65 picosecondi. Si tratta di stelle appartenenti, secondo la classificazione spettrale di Yerkes, a una ristretta famiglia tra le classi spettrali F2 e K1, dunque molto simili al nostro Sole. Eliminata l'ipotesi di errore umano, l'anomalia venne subito adottata dal progetto SETI per la ricerca di forme di vita intelligenti extraterrestri, che ha avuto negli ultimi anni una forte sponsorizzazione da parte di studiosi come Paul Davies e Stephen Hawking, e anche nuovi finanziamenti dal fisico e mecenate russo Yuri Milner. L'idea SETI piace ad entrambi, ma c'era qualcosa nella regolarità di questi segnali che ci faceva pensare più al fascino arcaico del "codice cosmico" che alla comunicazione intelligente tra specie extraterrestri. In quel periodo stavamo discutendo di modelli di stelle bosoniche nell'ambito di alcuni lavori sui buchi neri, e abbiamo ipotizzato che l'emissione di queste stelle fosse legata ad un nucleo bosonico costituito da particelle di piccola massa e grande stabilità. Cosa che ci porta immediatamente all'identikit appena tracciato della Dark Matter.

Da buoni fisici "opportunisti" abbiamo scelto l'assione, perché è il più semplice e il più antico candidato al ruolo. La sua storia è interessante, e in realtà è forse proprio per questo che l'abbiamo preferito alle più esotiche WIMPs. Fu teorizzato nel 1977 da Helen Quinn e Roberto Peccei per spiegare la violazione della simmetria CP (carica elettrica e parità destra/sinistra) nelle interazioni forti. E fu battezzato così da Frank Wilczek, che prese l'ispirazione da una nota marca di detersivi. Contributi teorici importanti arrivarono da nomi del calibro di Steven Weinberg, Gerard 't Hooft e Luciano Maiani. Insomma, qualcosa di solidamente radicato nella microfisica. Inoltre ci affascinava la proprietà degli assioni di creare agglomerati bosonici freddi, che è esattamente quello che si richiede a un buon candidato della Dark Matter per dividere luce e tenebra in modo congruente con le osservazioni.

Detto questo, è iniziato il lavoro vero. All'inizio abbiamo provato a studiare l'atmosfera intorno alle stelle, puntando sul processo di conversione di un assione in due fotoni, ma si è rivelata presto una via senza uscita, e ci siamo resi pure conto del perché. Avevamo replicato i criteri di ricerca sperimentale nei laboratori, come il rivelatore ADMX (*Axion Dark Matter Experiment*), invece dovevamo cercare qualcosa di prettamente astrofisico, che ci avrebbe detto qualcosa anche sulla difficoltà di trovare questi oggetti negli acceleratori e negli esperimenti a terra. Abbiamo così affrontato il difficile compito di costruire un modello di oscillazione stellare, in pratica studiare come "respira" una stella fermionica con un core bosonico. Le scelte modellistiche possibili sono molte, e abbiamo passato un paio di mesi a valutare cosa avremmo dovuto inserire nel modello e cosa lasciare fuori. Alla fine è stato proprio lo schema più semplice che ha iniziato a dare risultati. E sono arrivati uno dopo l'altro, a catena, mostrando un insperato concatenamento di tessere del mosaico. Secondo il modello che

è stato poi pubblicato il mix fermionico/bosonico inizia a oscillare e la frequenza e ampiezza delle oscillazioni dipendono dalla massa dell'assione, che risulta in accordo con le frequenze osservate da Borra e Trottier. In altre parole avevamo trovato il primo metodo astrofisico per rivelare la materia oscura!

Il valore di massa trovato corrisponde a quello calcolato da Borsany et al., pubblicato in un articolo su *Nature* nel 2016 basato su raffinatissime simulazioni su reticolo della suscettività del vuoto nella cromodinamica quantistica. In modo non "premeditato" il nostro risultato astrofisico intercettava i valori che derivano dalla teoria quantistica dei campi ad interazione forte. Infine, la struttura stessa del modello rispondeva alla domanda più inquietante, quella che ci aveva accompagnato durante tutto il percorso: perché un numero così esiguo di stelle, appartenenti a quelle classi spettrali? Per avere un mix bosonico che oscilla nel modo previsto e mostra un'emissione in frequenza così definita è necessario che si realizzino alcune condizioni molto vincolanti: un limite inferiore di massa critica e un core idrodinamicamente

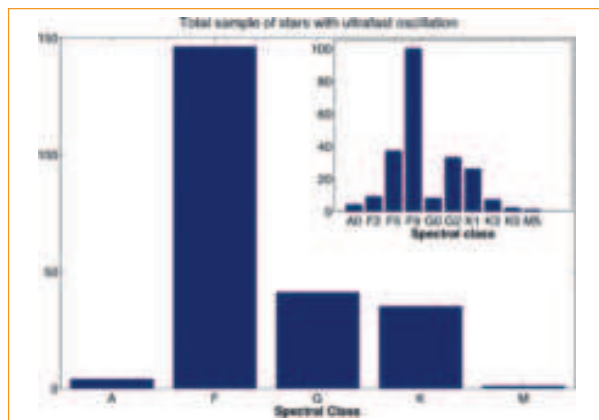
stabile. Stelle più piccole verosimilmente hanno "mangiato" assioni ma il clustering bosonico non si realizza; in stelle più grosse il fenomeno può essere coperto dalla turbolenza. A questo punto abbiamo scritto rapidamente l'articolo, lo abbiamo mandato a *Physica Scripta*, e ci siamo tuffati in altre cose. Dopo qualche settimana i commenti entusiasti dei referees ci hanno definitivamente convinti di aver colpito nel segno.

Cercando una teoria

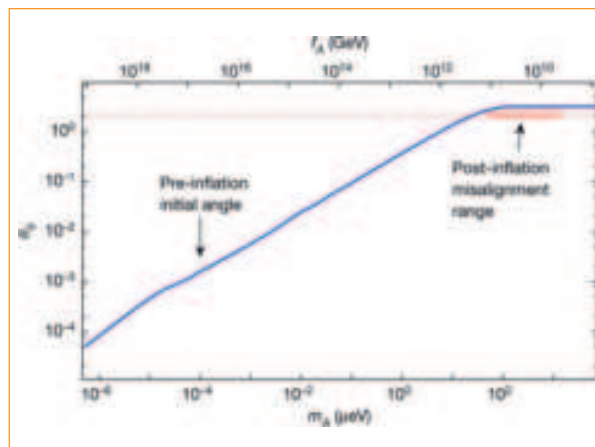
È difficile raccontare la soddisfazione che può derivare da un lavoro di questo tipo. Durante una celebre chiacchierata Fred Hoyle e Richard Feynman si trovarono d'accordo che la gioia di una scoperta dura poco, poi ci sono nuove avventure e le celebrazioni e i premi nulla hanno a che fare con quel momento di intimo e profondo appagamento. Forse hanno ragione, ma nel momento in cui scrivo queste note l'entusiasmo non si è ancora spento. Perché soprattutto nella vita di un teorico abituato a lavorare su questioni fondazionali, raramente capita di mettere a punto un modello così chiaro, semplice e direttamente testabile dal futuro lavoro degli astro-



Helen Quinn e Roberto Peccei, qui in una foto recente, hanno teorizzato l'assione.



Istogramma delle classi spettrali che presentano oscillazioni ultrarapide (Tamburini-Licata).



Assioni durante l'era pre e post inflazionaria (Borsanyi e co.).

nomi. Piuttosto quello che ci chiediamo con Fabrizio e altri amici che ci hanno seguiti in questi mesi convulsi è in quale tipo di teoria troverà posto questo modello.

Abbiamo ricordato che l'assione, tra i candidati per la Dark Matter, sta in bilico tra il modello standard e le nuove prospettive *beyond standard model*. Ciò significa rispondere anche alla domanda sul ruolo cosmologico dell'assione e sulla fase della sua comparsa. Anche restando all'interno del modello Standard, fissare una risposta a questa domanda si rivelerà un'impresa collettiva assai difficile. Infatti, come è facile immaginare, gli scenari possibili sono molti perché coinvolgono i parametri fine tuned sia delle teorie unificate che della cosmologia. Sarà necessario disporre di

nuovi vincoli su entrambi i rami della teoria e test di estrema precisione.

È possibile però fin da ora tracciare a grandi linee le caratteristiche emergenti di questo tipo di teoria e gli aspetti essenziali dello scenario cosmologico e della genealogia dell'assione. Il lavoro di Borsanyi e colleghi citato, ad esempio, fissa la comparsa dell'assione a cavallo tra una manciata di istanti prima o dopo l'era inflazionaria. Quando il falso vuoto libera la sua energia e il meccanismo di Higgs fissa le masse particellari, l'assione fa la sua comparsa. Nel lavoro del gruppo tedesco-spagnolo viene anche definito un caratteristico angolo assionico che definisce l'entrata in scena di questa elusiva particella. Questo è coerente con altri approcci che descrivono l'assione come una componente

del bosone di Higgs, ed esplorano le profonde connessioni con il neutrino e il dilatone.

Utilizzando una metafora, si può dire che quando è iniziata la fase inflazionaria si è prodotta la materia che in gran parte osserviamo anche oggi, mentre lo spazio si espandeva e l'orizzonte cosmologico prendeva forma. Di questa violenta attività della fornace cosmica i neutrini rappresentano il fumo leptonic e l'assione una sorta di carbone primordiale. Naturalmente il modello standard potrebbe rivelare falle inaspettate (a tutt'oggi sembra abbastanza solido), e sarebbe allora la volta di altre teorie come le SUSY, che in alcuni casi ipotizzano un assione *ultralight* oppure lo sostituiscono con un'altra particella come il *neutralino*. Come nel caso dei misteri ancora irrisolti del neutrino, per muoversi in questo labirinto sarà necessaria una collaborazione ancora più forte tra fisica delle particelle e cosmologia di precisione. In attesa di una teoria, il modello qui descritto suggerisce che l'assione, se esiste, data la sua natura schiva, difficilmente potrà essere rivelato con esperimenti terrestri, ma piuttosto rivolgendosi l'attenzione al cielo e al suo ruolo nella grande storia dell'universo. Future osservazioni astronomiche mirate alle emissioni impulsive delle stelle riusciranno forse a dare ulteriore supporto alla nostra congettura sugli assioni nel core stellare. ■

UN PO' DI BIBLIOGRAFIA

- Fabrizio Tamburini, Ignazio Licata, Can the periodic spectral modulations observed in 236 Sloan Sky Survey stars be due to dark matter effects?, *Physica Scripta*, vol.92, n.9 (2017), preprint:arXiv:1611.02586 [astro-ph.SR]
- Borsanyi, S., Fodor, Z., Guenther, J., et al., Calculation of the axion mass based on high-temperature lattice quantum chromodynamics, *Nature*, 539 (2016), preprint: arXiv:1606.07494 [hep-lat]
- G. Ballesteros, J. Redondo, A. Ringwald, C. Tamarit, Standard Model—axion—seesaw—Higgs portal inflation. Five problems of particle physics and cosmology solved in one stroke, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, August 2017, preprint: arXiv:1610.01639 [hep-ph]
- Richard Panek, Il 4% dell'universo. La storia della scoperta della materia oscura e dell'energia oscura, Codice edizioni, Torino.2012