
La Materia Oscura

Marco Cirelli CNRS & Sorbonne Université, Parigi, Francia

La Materia Oscura costituisce l'84% del contenuto totale di materia dell'Universo: sappiamo che esiste, possiamo indovinare alcune delle sue proprietà, ma non abbiamo la più pallida idea di che cosa sia davvero. Scoprirlo è una delle grandi sfide della cosmologia e della fisica delle particelle dei nostri giorni.

Osservando il cielo stellato, a occhio nudo o utilizzando un telescopio, siamo confrontati a un'immensità di materia: i giganteschi pianeti del sistema solare, le centinaia di miliardi di stelle della Via Lattea, le sconfinato nebulose interstellari, le centinaia di miliardi di altre galassie, ciascuna con altrettante stelle, nebulose, pianeti...

Eppure, la materia che riusciamo in qualche modo a vedere, perché emette o riflette luce di qualsiasi frequenza, non è che una piccola parte di quello che l'Universo realmente contiene. Utilizzando altre tecniche di osservazione (di cui parleremo in dettaglio in seguito), le osservazioni astronomiche degli ultimi 80 anni circa ci hanno dimostrato che la maggior parte della materia contenuta nell'Universo è invisibile. Più precisamente, secondo le ultime stime ricavate dalla CMB (vedi sotto), questa materia invisibile è 5.4 volte più abbondante rispetto alla materia visibile, cioè costituisce l'84% del contenuto totale di materia dell'Universo.

Oscura?

La qualifica di Oscura si addice a questa materia in una duplice accezione. In primo luogo, perché si tratta di un tipo di materia che non emette e non riflette alcuna radiazione elettromagnetica (luce visibile, raggi X o altro) e che quindi in quanto tale è 'tecnicamente' oscura. In questo senso si potrebbe anche parlare di 'materia trasparente'. In secondo luogo, la materia è Oscura perché la sua natura è sconosciuta e misteriosa: l'aggettivo oscuro esprime di fatto la nostra ignoranza.

Le manifestazioni dell'esistenza della Materia Oscura

Le prove dell'esistenza della Materia Oscura sono molteplici e provengono da sistemi astrofisici di dimensioni molto differenti tra loro. I sistemi più piccoli, relativamente parlando, sono le galassie a spirale. A taglia intermedia ci sono gli ammassi di galassie. E alle dimensioni più grandi concepibili c'è l'evoluzione dell'Universo nella sua interezza. La Materia Oscura gioca un ruolo fondamentale a tutte queste scale.

Le curve di rotazione galattiche

Le galassie a spirale, come per esempio la nostra Via Lattea, hanno la forma di un disco appiattito, con un rigonfiamento centrale molto massivo e ricco di stelle (detto bulge) e una serie di 'bracci' più o meno serrati che danno loro, appunto, la

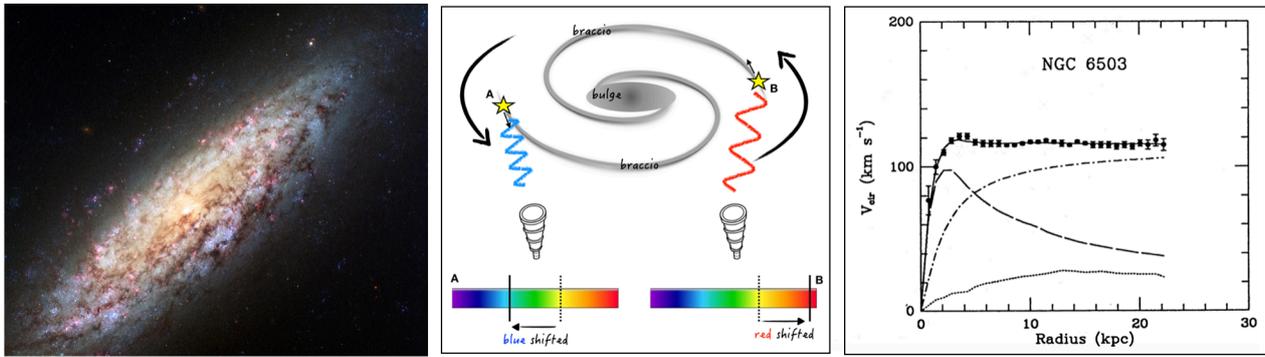


Figura 1: La galassia a spirale NGC 6503 (a sinistra, da un'immagine del telescopio spaziale Hubble) e a destra la sua 'curva di rotazione', misurata da Begeman et al. (1991). Il grafico della curva di rotazione rappresenta la velocità di rotazione attorno al centro della galassia di varie stelle (punti sperimentali) in funzione della loro distanza r dal centro (qui indicata con 'radius' in ascissa e misurata in kiloparsec, l'unità di misura astronomica che corrisponde a circa 3262 anni-luce). La linea tratteggiata corrisponde alla predizione $v_{cir} \sim 1/r$ in presenza della sola massa visibile (vedi testo). La linea continua corrisponde al contributo (subdominante) del gas diffuso. La linea a punto-e-tratteggio corrisponde al contributo della Materia Oscura che è necessario per fittare i dati. Al centro, uno schema che illustra l'effetto Doppler ottico, utilizzato per misurare le velocità di rotazione.

caratteristica forma a spirale. Le osservazioni mostrano che queste galassie ruotano attorno al loro asse centrale, come giostre per bambini. Lo sappiamo perché possiamo osservare, nella luce emessa dalle stelle che compongono i bracci, il cosiddetto effetto Doppler ottico, esatto analogo del familiare effetto acustico che modifica ad esempio il suono di un clacson che si avvicina o si allontana: la frequenza della luce emessa dalle stelle che ruotano in direzione opposta alla nostra direzione di osservazione viene spostata verso il rosso ('redshift') mentre quella delle stelle che ruotano verso la direzione di osservazione verso il blu ('blueshift'). In base alla quantità di spostamento verso il rosso o verso il blu della luce emessa possiamo misurare la velocità di rotazione di una data stella attorno al centro, e quindi tracciare una *curva di rotazione* della galassia stessa, come quella rappresentata in figura 1. La sorpresa che ci riservano tutte o quasi le curve di rotazione galattiche finora misurate è di essere *piatte*, ossia la velocità $v_{cir}(r)$ in funzione della distanza dal centro resta grossomodo costante. Questo è sorprendente perché la fisica Newtoniana di base ci insegna che per un oggetto celeste di massa m in orbita ad una distanza r attorno a una quantità di massa $M(r)$ inclusa all'interno di r , la forza 'centrifuga' apparente deve essere compensata dalla forza 'centripeta' di attrazione

gravitazionale

$$\frac{m v_{cir}^2(r)}{r} = G_N \frac{m M(r)}{r^2}, \quad (1)$$

dove G_N è la costante di gravitazione universale. Se, come è vero per le galassie a spirale, la stragrande maggioranza della massa M è concentrata nel *bulge* centrale, l'equazione (1) implica immediatamente

$$v_{cir} = \left(G_N \frac{M}{r} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

cioè la velocità di rotazione a grandi r dovrebbe diminuire con la distanza come $1/\sqrt{r}$, e non restare costante. Per parlare di un sistema ben più familiare, è come se le osservazioni mostrassero che tutti i pianeti del sistema solare ruotano attorno al Sole con la stessa velocità di Mercurio: Keplero di rivolterebbe nella tomba, e Nettuno dovrebbe schizzare via come un proiettile!

A meno di dichiarare il fallimento della legge di gravitazione di Newton (e vedremo che anche questa possibilità, per quanto speculativa, è stata considerata) non resta che una possibilità: dedurre che nelle galassie esiste una gran quantità di materia, invisibile, che fornisce una forza di attrazione gravitazionale aggiuntiva. Questa materia è quella che chiamiamo Materia Oscura. Un semplice integrale dell'eq. (1) ci permette anche

di dedurre* che, quantomeno in prima approssimazione, questa materia è distribuita come un gas diffuso di densità $\propto 1/r^2$: molto denso al centro della galassia e diluito alla periferia.

L'astronoma americana Vera Rubin (1928-2016) è stata tra i primi a misurare con precisione le curve di rotazione delle galassie a spirale, in particolare la galassia di Andromeda. I suoi lavori più marcati datano dell'inizio degli anni '70, in collaborazione con Kent Ford (1931-), e contribuirono in modo determinante a convincere la comunità astrofisica della reale esistenza di una 'massa mancante'.

La dinamica degli ammassi di galassie

L'immagine in figura 2, pubblicata nel 2006 e composta sovrapponendo le osservazioni di vari telescopi, mostra una zona remota dell'Universo che è stata teatro di un evento spettacolare: circa 150 milioni di anni fa, due ammassi di galassie sono entrati in rotta di collisione l'uno con l'altro e si sono scontrati, in una specie di urto frontale di proporzioni gigantesche su un'immaginaria autostrada cosmica. In questo caso, l'ammasso più piccolo (detto 'bullet', proiettile) viaggiava da sinistra a destra nell'immagine e ha perforato, per così dire, l'ammasso più grande (il 'bersaglio') che viaggiava da destra a sinistra. Per questo il sistema è chiamato 'bullet cluster', o 'ammasso del proiettile'. Le galassie, visibili come punti lu-



Figura 2: Il 'bullet cluster', ammasso proiettile. [Diritti immagine: NASA/CXC/CfA/STScI/ESO-WFI/Magellan/U.Arizona]

* Dall'eq. (1) deduciamo che, se v_{cir} è costante, $M(r) = \int dV \rho(r) \sim r$, dove $dV = r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi$ è l'elemento di volume e ρ è la densità di materia, e quindi $\rho(r) \sim 1/r^2$.

minosi nell'immagine, non sono state particolarmente influenzate dalla collisione: hanno certo sentito il richiamo gravitazionale dell'altro ammasso ma hanno sostanzialmente continuato la loro corsa, quali corpi puntiformi su queste scale gigantesche. Oltre alle galassie, un ammasso contiene anche enormi nebulose diffuse, che sono costituite principalmente di idrogeno gassoso e che riempiono lo spazio tra una galassia e l'altra. Queste nubi, in falso colore rosso, hanno invece percepito la presenza l'una dell'altra: le molecole dei gas hanno interagito elettromagneticamente, le nubi si sono scaldate per attrito, hanno rallentato e stanno ora emettendo l'energia in eccesso sotto forma di raggi X, che rileviamo coi telescopi in orbita. Fino a qui, nulla di inatteso in questo sistema. La sorpresa consiste nel fatto seguente. Col metodo delle lenti gravitazionali, consistente nel rilevare la deviazione dei raggi luminosi di una sorgente di sfondo come predetto dalla Relatività Generale di Einstein (vedi fig. 3), ci accorgiamo della presenza di altre due grandi 'nubi' di materia, assolutamente invisibili sia nell'ottico che in altre lunghezze d'onda elettromagnetiche, ma ben presenti e di taglia addirittura superiore a quella delle nubi di gas, e che si sono passate attraverso nella collisione senza risentire di alcun effetto. Sono rappresentate dagli aloni blu in figura e si tratta di nubi di Materia Oscura. Il 'bullet cluster' è quindi un sistema astrofisico particolarmente utile e prezioso: come conseguenza della collisione cataclismatica avvenuta nel passato, la materia oscura (in blu) è spazialmente separata dalla materia ordinaria (in rosso) e questo permette di metterne in evidenza l'esistenza in modo decisamente convincente.

Gli ammassi di galassie ci forniscono un'altra prova importante dell'esistenza della Materia Oscura: studiando in dettaglio i movimenti delle galassie all'interno di un ammasso ci si rende conto che la massa totale del sistema è di gran lunga superiore alla massa visibile contenuta in tutte le galassie. Questa 'massa mancante' è di fatto la Materia Oscura. Fu proprio utilizzando questo metodo che essa fu ipotizzata per la prima volta, nei lavori pionieristici e visionari dall'astronomo Fritz Zwicky negli anni '30 del 1900. L'argomento è di nuovo molto semplice. All'interno di un ammasso le galassie non sono immobili: ciascuna possiede un moto proprio

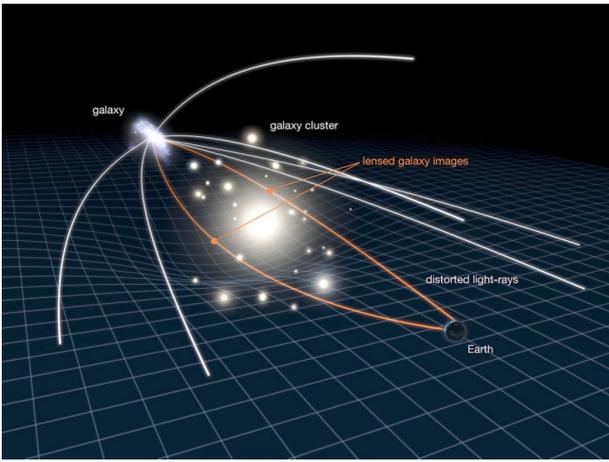


Figura 3: Schema del fenomeno di lente gravitazionale: l'immagine di una galassia sullo sfondo arriva distorta all'osservatore a causa del fatto che le traiettorie dei raggi luminosi vengono deviate dalla massa collocata nel mezzo, che deforma lo spazio-tempo. Dal grado di distorsione si può ricostruire la quantità e la distribuzione della massa che agisce da lente. Il metodo funziona anche se non conosciamo l'aspetto reale della galassia sullo sfondo. [Diritti immagine: NASA/ESA]

e si sposta rispetto alle altre pur restando duramente legata all'ammasso stesso, a causa dell'attrazione gravitazionale fornita da tutte le altre. Esiste un delicato equilibrio tra le velocità proprie, che tenderebbero a smembrare il gruppo allontanando le singole galassie, e l'attrazione gravitazionale, che tenderebbe a concentrarle tutte in un punto. La formulazione fisica di questo concetto intuitivo prende il nome di *teorema del viriale*. Il teorema afferma che l'energia cinetica totale K del sistema, cioè la somma delle energie di movimento delle singole galassie, deve essere grossomodo uguale all'energia potenziale gravitazionale V totale, affinché il sistema possa essere stabile su tempi cosmologici:

$$\langle K \rangle = -\frac{1}{2} \langle V \rangle. \quad (3)$$

In un ammasso idealizzato fatto di $N \gg 1$ galassie di massa m a uguale distanza r , questo permette di determinare la massa totale Nm a partire dalla velocità v e la dimensione tipica r

$$N \frac{m v^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{N^2}{2} G_N \frac{m^2}{r} \Rightarrow Nm = \frac{2 r v^2}{G_N}. \quad (4)$$

Zwicky osservava l'ammasso di galassie nella co-

stellazione della Chioma di Berenice, consistente di circa 800 galassie in moto con velocità proprie dell'ordine di 1000 km/s. Applicando il teorema del viriale, Zwicky dedusse una massa totale di $10^{14} M_\odot$, dove $M_\odot \simeq 2 \times 10^{30}$ kg è la massa del Sole. D'altro canto, misurò che ognuna delle 800 galassie conteneva stelle e gas per circa $10^9 M_\odot$, il che implicava un totale di materia visibile di 'soli' $800 \times 10^9 M_\odot = 8 \times 10^{11} M_\odot$. Secondo i conti, l'ammasso conteneva quindi più di 100 volte più materia di quella visibile nelle galassie! Osservazioni più raffinate hanno poi mostrato che la stima ottenuta da Zwicky era in realtà esagerata. Le misure moderne indicano che la materia invisibile è soltanto circa 40 volte più abbondante di quella visibile. In ogni caso, la prova è convincente e il problema posto da Zwicky più di 80 anni fa è ancora in cerca di una soluzione.

L'evoluzione dell'Universo dall'infanzia al presente

Le ultime prove dell'esistenza della Materia Oscura (e la determinazione delle sue proprietà) ci vengono dalla cosiddetta *cosmologia di precisione*. Si tratta delle ultime prove in termini di ordine temporale con cui sono stata investigate, ma in realtà sono le più importanti e più decisive da un punto di vista quantitativo. D'altro canto, qui l'aspetto intuitivo viene meno: per capire tutti i dettagli bisognerebbe ripercorrere un intero corso di cosmologia dell'Universo primordiale e di formazione delle strutture. Si tratta di fatto di analizzare l'immagine dell'intero Universo osservabile, e della sua evoluzione, per dedurne gli ingredienti che esso contiene e le loro proprietà.

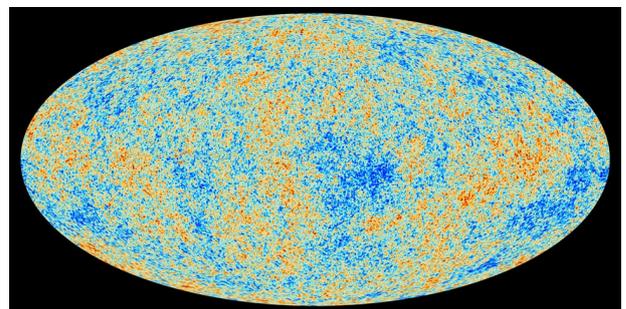


Figura 4: La radiazione cosmica di fondo (CMB). [Diritti immagine: ESA/Planck Collaboration]

La prima immagine dell'Universo a nostra disposizione è quella della *radiazione cosmica di fondo a microonde* (o *Cosmic Microwave Background*,

CMB), in figura 4, costituita dai fotoni liberatisi dal plasma primordiale 380,000 anni dopo il Big Bang e giunti oggi fino a noi. Nell'immagine sono mostrate le variazioni di temperatura media della CMB rilevate sulla volta celeste: i 'pixels' rossi rappresentano punti di osservazione del cosmo da cui i fotoni ci arrivano ad una temperatura leggerissimamente superiore a quella media di 2.725 gradi Kelvin; i 'pixels' blu quelli per cui la temperatura è leggerissimamente inferiore. L'immagine mostra quindi che il plasma primordiale da cui si liberarono i fotoni non era completamente omogeneo: aveva dei microscopici grumi, delle zone leggermente più dense (e delle zone leggermente meno dense), che sono all'origine delle differenze di temperatura. La distribuzione e la densità di queste inomogeneità della mappa della CMB ci permettono un accesso diretto alle condizioni in cui si trovava l'Universo primordiale. I risultati di tale analisi ci permettono di fare una scoperta straordinaria: l'Universo primordiale non conteneva solo materia normale, e cioè atomi di idrogeno che interagivano coi fotoni in modo stretto, ma anche un diverso e sconosciuto tipo di materia, caratterizzata dal fatto di non risentire per niente della presenza dei fotoni. Questa materia, ovviamente, è la Materia Oscura. In altre parole, se l'Universo contenesse solo materia normale (idrogeno, per semplicità), la distribuzione dei grumi nel plasma primordiale e quindi la disposizione delle variazioni calde e fredde della radiazione di CMB sarebbero completamente diverse da quelle osservate. La presenza della Materia Oscura ha come risultato un grado di granulosità superiore, in senso statistico, a quello di un Universo contenente solo materia ordinaria. Nelle inomogeneità della CMB è quindi presente l'impronta inequivocabile della Materia Oscura.

Un ultimo passo è necessario per apprezzare appieno il ruolo della Materia Oscura nel plasmare l'evoluzione dell'Universo, ed è il seguente. Che ne è dei grumi di densità che la Materia Oscura ha efficacemente contribuito a creare? La risposta è che essi sono di fatto il seme all'origine delle *grandi strutture cosmiche* (galassie, ammassi di galassie, super-ammassi di galassie) di cui l'Universo attuale è costituito. Nel corso dei miliardi di anni, ogni grumo microscopico presente nel fluido primordiale ha attratto materia

grazie alla forza di gravità ed è cresciuto, lentamente ma inesorabilmente, fondendosi con altri grumi, richiamandone altri ancora e senza sosta creando strutture sempre più grandi. Il processo di collasso gravitazionale ha trasformato le microscopiche sovra- e sotto-densità primordiali in giganteschi 'ammassi', 'super-ammassi', 'filamenti' e 'muri', alternati da grandi zone vuote e rarefatte, secondo quella che è stata chiamata la 'ragnatela' o l' 'impalcatura' cosmica. Questo processo è ricostruito fedelmente tramite simulazioni numeriche (vedi figura 5) e il risultato corrisponde perfettamente, in senso statistico, alle osservazioni della distribuzione di strutture nell'Universo osservabile. Capiamo quindi come la Materia Oscura sia il catalizzatore principale dell'esistenza delle grandi strutture cosmiche. Si può dimostrare che, in assenza di Materia Oscura, l'Universo avrebbe un aspetto molto diverso: il processo di accrescimento sarebbe molto meno efficiente, l'Universo avrebbe molte meno strutture e molta meno ricchezza di dettagli, in disaccordo flagrante con le osservazioni.

Di cosa si tratta (e non si tratta)?

Le osservazioni astrofisiche e cosmologiche appena discusse ci permettono di identificare alcune proprietà che la Materia Oscura, qualsiasi cosa essa sia, deve possedere. Le più fondamentali tra queste proprietà sono tre:

- Deve essere un tipo di materia *molto poco interagente*, sia con la materia ordinaria che con se stessa, come ci hanno insegnato ad esempio le osservazioni delle collisioni tra ammassi di galassie.
- Deve avere una agitazione termica molto ridotta, ossia essere costituita da corpi che si muovono lentamente. Se così non fosse, invece di attrarsi l'un l'altra le particelle scapperebbero via secondo un moto caotico e le grandi strutture non si formerebbero. In gergo, si dice che si deve trattare di materia 'fredda', cioè non relativistica, al momento dell'inizio della formazione delle Large Scale Structures (LSS) e in tutta l'evoluzione seguente. In formule $p \ll M \forall z < z_{LSS}$, dove p è la quantità di moto media delle particelle di Materia Oscura, M la loro massa e

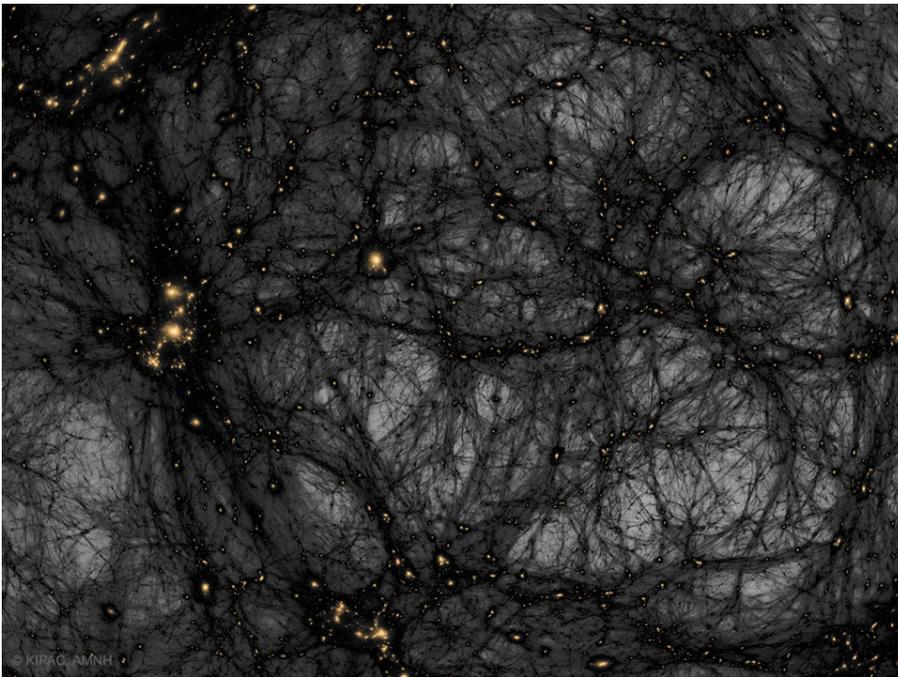


Figura 5: La distribuzione della Materia Oscura in una porzione di Universo. Immagini come questa, realizzata in questo caso dal gruppo di Tom Abel dell'Università di Stanford simulando il moto di 10^9 particelle di Materia Oscura sui alcuni dei più potenti clusters di calcolo esistenti, mostrano la cosiddetta ragnatela cosmica fatta di ammassi e filamenti che costituiscono l'impalcatura dell'Universo. Nei 'nodi' della ragnatela, più densi, si accumula per gravità la materia normale che forma stelle, nebulose e galassie (in giallo nell'immagine), uniche sorgenti di luce nell'oscurità cosmica. [Diritti immagine: Tom Abel & Ralf Kaehler (KIPAC, SLAC), AMNH]

z il redshift che parametrizza il tempo dell'Universo (per esempio, $z = 0$ è il presente, $z \simeq 1100$ è la formazione della CMB).[†]

- Deve trattarsi di un tipo di materia *non soggetta a decadimento* o disintegrazione naturale: la Materia Oscura era presente nel caotico brodo dell'Universo primordiale ed è ancora presente nelle galassie osservate oggi, a conferma del fatto che la sua 'vita media' è lunghissima o addirittura infinita.

Riassumendo, cerchiamo un tipo di materia invisibile, poco interagente, fredda e stabile.

Nel corso degli ultimi decenni si sono ipotizzati un gran numero di possibili candidati che rispondano a questi criteri. Se ci dimentichiamo per un attimo delle prove cosmologiche (CMB e LSS), una delle prime ipotesi che viene naturalmente formulare è che la Materia Oscura possa essere costituita di una popolazione galattica di un gran numero di bizzarri corpi celesti. Per esempio: asteroidi compatti troppo piccoli per essere rilevati, pianeti sfuggiti dalla loro orbita e troppo scuri per essere visti, cadaveri di stelle spente o buchi neri vaganti senza una meta nello spazio... Questo tipo di corpi celesti, denominati collettivamente 'MACHOs' per 'MAssive Compact Ha-

lo Objects', avrebbero le proprietà richieste. Per esempio, una popolazione di buchi neri vaganti sarebbe fatta di oggetti per definizione invisibili, poco interagenti in quanto remoti e isolati, lenti a causa della loro grande massa e immutabili in quanto stadio terminale dell'evoluzione stellare. I MACHOs sono stati infatti attivamente cercati negli anni '80 e '90, usando il fenomeno delle lenti gravitazionali: se l'Universo è riempito di questi oggetti, di tanto in tanto uno di essi passerà davanti ad una stella della nostra galassia, causando una deformazione dell'immagine e dell'intensità luminosa percepita. Le ricerche però sono state infruttuose e hanno prodotto stringenti limiti superiori all'abbondanza di questi corpi, che non possono quindi costituire la Materia Oscura (un'eccezione è però discussa nell'ultima sezione di questo articolo).

Convinti quindi che non si possa trattare di oggetti astrofisici macroscopici, rivolgiamo l'attenzione alle particelle elementari. L'idea è che una grande quantità di gas diffuso fatto di particelle con le buone proprietà possa rendere conto della massa mancante. Rapidamente però, ci troviamo di nuovo in un vicolo cieco: tenendo in conto tutte le evidenze discusse nel capitolo precedente, incluse ora anche quelle di natura cosmologica, ci si rende presto conto che nessuna delle particelle conosciute e recensite dal Modello Standard della fisica delle particelle elementari (la teoria per antonomasia del mondo subatomi-

[†]In fisica delle particelle si usano unità in cui la velocità della luce c è adimensionale (e posta uguale a 1). Quindi il momento p e la massa M sono quantità dimensionalmente congrue.

co) ha le proprietà richieste. I *neutrini* sono le particelle che arrivano più vicine al traguardo: sono particelle senza carica elettrica (quindi non interagenti con la radiazione elettromagnetica), interagenti solo tramite la forza nucleare debole e stabili. Tuttavia, manca loro la proprietà di freddezza: le misure cosmologiche ci indicano che la loro massa è molto piccola e quindi l'energia termica che essi acquisiscono a contatto col bagno termico dell'Universo primordiale invalida la condizione $p \ll M$.

In questo senso, i fisici ritengono che il problema della Materia Oscura sia uno degli indizi più concreti dell'esistenza di una 'fisica nuova', che vada oltre il Modello Standard.

Negli ultimi decenni, sono stati proposti una moltitudine di candidati. Le idee spaziano da particelle chiamate *neutralini* predetti dalla Super-Simmetria (la teoria che, tra le altre cose, prevede di associare una nuova particella, detta partner super-simmetrico, ad ognuna di quelle conosciute) a particelle di *Kaluza-Klein* ipotizzate dalle teorie che prevedono che lo spazio-tempo abbia più di 4 dimensioni, da un nuovo tipo di neutrini pesanti, detti *sterili*, a un tipo di particelle estremamente leggere, dette *assioni*, che potrebbero risolvere una delle inquietanti incongruenze del Modello Standard, cioè il cosiddetto *strong CP problem*.

Ricerche sottoterra, nello spazio e in laboratorio

Le osservazioni cosmologiche (discusse precedentemente) ci hanno portato alla convinzione che la Materia Oscura è presente in forma di 'gas diffuso' di particelle esotiche nelle galassie, inclusa quindi in particolare la nostra Via Lattea. Il sistema solare, la Terra, noi stessi siamo immersi in questo gas. A causa delle debolissime interazioni con la materia ordinaria, le particelle di Materia Oscura passano attraverso i corpi celesti, i pianeti, la roccia, senza praticamente alcun disturbo. Per avere un'idea concreta, la teoria ci dice che se la Materia Oscura è costituita per esempio di neutralini super-simmetrici di una massa di 100 GeV ,[‡] in ogni singolo istante ci sono

[‡]In unità 'naturali', la massa è misurata in unità di energia come l'electronVolt e le sue potenze. Un protone ha una

circa 3 particelle in un volume di un litro, e ciascuna di essa sta passando in una direzione casuale con una velocità tipica (distribuita secondo una curva di Maxwell-Boltzmann) di 220 km al secondo. Un modo di ricercare la Materia Oscura è quindi quello di mettere tutto in atto per cercare di afferrare una di queste particelle di passaggio, o almeno vederne gli effetti in qualche modo.

Affinché questo sia possibile, una cosa deve però essere vera: la Materia Oscura deve *aver una qualche interazione*, per quanto flebilissima, con la materia ordinaria (oltre all'interazione gravitazionale). Come abbiamo visto precedentemente, questo è ammesso dalle osservazioni cosmologiche: esse ci dicono che la Materia Oscura deve essere 'molto poco interagente' con la materia ordinaria, ma nulla vieta l'esistenza di una debole interazione. Anzi, in realtà la maggior parte delle teorie di fisica delle particelle predicono che questo sia il caso. Ad esempio, una classe molto ampia di teorie predicono che la Materia Oscura interagisca attraverso la forza nucleare debole (Materia Oscura di tipo *WIMP: Weakly Interacting Massive Particles*).

Un altro indizio che deve guidare la ricerca sperimentale è la *massa* prevista delle particelle di Materia Oscura. È importante realizzare che l'astrofisica e la cosmologia non danno alcuna indicazione su questo punto, ma solo sulla quantità totale di Materia Oscura contenuta in una galassia, un ammasso o una zona d'Universo. È invece dalle teorie di fisica delle particelle che possono venire delle previsioni. Ma la gamma di valori possibili resta estremamente vasta (vedi figura 6). Le strategie di ricerca sono quindi molto diversificate.

Ricerca diretta

Una grande categoria di ricerche è la cosiddetta *ricerca diretta* della Materia Oscura. L'idea è semplice: le particelle di Materia Oscura che attraversano la Terra hanno una probabilità piccolissima ma non nulla di interagire con la materia normale; si appronta quindi un rivelatore ultrasensibile, lo si posiziona in un ambiente ben schermato dai raggi cosmici ordinari e si aspetta che una particella di Materia Oscura colpisca il nucleo di un atomo del rivelatore, producendo un *rinculo*

massa di circa 1 GeV.

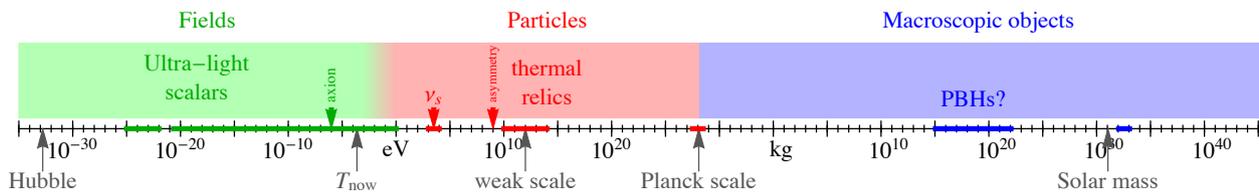


Figura 6: Range di masse possibili per la Materia Oscura, e alcuni candidati notevoli. Se la Materia Oscura è costituita di particelle (come plausibile) i candidati di maggiore interesse si collocano tra $\sim 10^{-6}$ eV (assioni) e 100 TeV (limite superiore di candidati prodotti come 'reliquie' dell'evoluzione termica dell'Universo). Le frecce nella porzione bassa della figura indicano qualche grandezza di riferimento: l'inverso della dimensione dell'Universo attuale osservabile (Hubble) corrisponde a una massa piccolissima, mentre la massa solare a quella dei candidati esotici più pesanti.

nucleare e quindi un flebilissimo segnale. Esperimenti di questo tipo sono installati in alcune delle miniere più profonde della Terra, e anche ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso, in Abruzzo. Nonostante il gigantesco schermo naturale fornito dalla roccia, il rumore di fondo è comunque ancora troppo elevato per poter essere sensibili agli eventi rarissimi causati dalla Materia Oscura (che possono arrivare a un singolo evento di rinculo per anno!) e quindi altre strategie di discriminazione devono essere ideate. Una si basa sul fatto che il disco della Via Lattea ruota attorno al suo asse, immerso nell'alone di Materia Oscura che, per quel che ne sappiamo, resta statico. Il sistema solare è di fatto quindi immerso in un 'vento' di particelle di Materia Oscura che sembrano provenire dalla direzione di avanzamento. In aggiunta, la Terra gira attorno al Sole su un piano non troppo dissimile da quello della Galassia. Quando la direzione del moto della Terra è allineata e sommata a quella del Sole, il vento di Materia Oscura sembrerà avere un'intensità maggiore. Quando invece la Terra, nel periodo opposto dell'anno, gira le spalle alla direzione del vento, l'intensità di quest'ultimo apparirà minore. Si cerca quindi una *modulazione annuale* del segnale.

Ricerca indiretta

Un'altra grande categoria di ricerche prende il nome di *ricerca indiretta* della Materia Oscura. L'idea di base è, di nuovo, semplice. La maggior parte delle teorie prevedono che la Materia Oscura esista sotto forma di particelle e di antiparticelle. Questo è vero per tutte le particelle della materia ordinaria, ed è quindi naturale aspettarsi che sia il caso anche nel settore oscuro. L'alone

della Galassia sarebbe quindi formato da un'uguale quantità delle une e delle altre. Se una particella incontra una antiparticella, avviene un processo di *annichilazione* in cui la Materia Oscura e l'anti-Materia Oscura cessano di esistere e si trasformano in uno spray di particelle di materia ordinaria, cioè elettroni, positroni, protoni, antiprotoni, neutrini, raggi gamma... Questi vagano poi nella Galassia e possono raggiungere, con un po' di fortuna, i nostri rivelatori in orbita (per esempio l'esperimento AMS installato sulla Stazione Spaziale Internazionale) o al suolo (per esempio il telescopio a raggi gamma H.E.S.S.). Riuscire a registrare un tale flusso di particelle rappresenterebbe quindi un segnale inequivocabile della presenza della Materia Oscura nella Galassia.

Produzione agli acceleratori

L'ultima grande classe di ricerche è quella agli *acceleratori di particelle*, quali il Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra. All'LHC la collisione di due protoni crea quello che si può definire un mini-Big Bang, nel quale si formano particelle nuove e diverse, e tra queste particelle potrebbero esserci delle particelle di Materia Oscura. Avremmo in questo modo prodotto in laboratorio, in condizioni controllate, la sostanza che riempie le galassie e regge l'Universo: un trionfo dell'ingegnosità umana... Un 'problema' concreto di questo tipo di ricerche è che le particelle di Materia Oscura interagiscono pochissimo con la materia, come abbiamo già detto, e quindi non lasciano tracce negli strumenti degli esperimenti ATLAS e CMS installati all'LHC. Come rivelarne dunque la produzione e come studiarle? La soluzione sta nell'analizzare le particelle



Figura 7: Visione d'insieme degli strumenti per la ricerca della Materia Oscura. In senso orario: il rivelatore AMS installato sulla Stazione Spaziale Internazionale, l'esperimento DAMA/Libra ai Laboratori sotterranei Nazionali del Gran Sasso, il telescopio H.E.S.S. in Namibia, l'esperimento CMS al CERN di Ginevra. [Diritti immagini: NASA, DAMA Collaboration, CERN/CMS, H.E.S.S. Collaboration]

visibili, e in particolare la quantità di moto con cui emergono dalla collisione. Se sono emesse tutte in una direzione preferenziale, ne deduciamo che delle particelle invisibili (la Materia Oscura!) sono emesse nella direzione opposta, in modo da bilanciare. Più precisamente, si dice quindi che si cerca un ammanco nella distribuzione delle particelle visibili nel piano trasversale all'asse di collisione.

Al momento attuale, a parte qualche intrigante caso non confermato, le ricerche dirette, indirette e agli acceleratori non hanno ancora trovato un segnale inequivocabile di Materia Oscura. Gli esperimenti continuano, estendendo gli studi verso regioni dello spazio di parametri non ancora sondate (masse più grandi o più piccole, interazioni ancora più deboli o ancora più esotiche).

Non trascurare alcuna ipotesi

Anche se l'ipotesi che la Materia Oscura sia costituita di nuove particelle elementari è di gran lunga la più accreditata nella comunità dei fisici, per tutta la serie di buone ragioni discusse sopra, è importante non tralasciare nessuna possibilità alternativa, almeno fino a che non si sia trovata una soluzione convincente.

Una ipotesi alternativa attualmente molto discussa riprende l'idea dei *buchi neri*. Come abbiamo visto precedentemente, l'idea che essi possano costituire la Materia Oscura è in contraddizione con: i) le ricerche dirette di MACHOs nell'alone galattico attraverso il fenomeno delle lenti gravitazionali e ii) col fatto che la CMB ci informa che nell'Universo primordiale era presente un tipo di materia radicalmente diverso dagli atomi di materia ordinaria (dopotutto i buchi neri, per

quanto oggetti esotici, sono formati a partire dal collasso di stelle e nubi fatte di atomi normali). È possibile aggirare queste contraddizioni? Sì, se consideriamo buchi neri che siano: i) di dimensioni tali da non generare l'effetto di lente gravitazionale (troppo piccoli o troppo grandi), e ii) generati ben prima della CMB e delle più precoci osservazioni cosmologiche. Si tratta dei cosiddetti *Buchi Neri Primordiali*, creati nei primissimi istanti dopo il Big Bang e in seguito completamente disaccoppiati dal resto della materia. Se avessero una massa di qualche decina di masse solari (cosa ancora marginalmente ammessa dai vincoli astrofisici, inclusi quelli dall'effetto di lente gravitazionale), potrebbero essere i buchi neri delle cui fusioni gli interferometri LIGO/VIRGO hanno rilevato le onde gravitazionali nel 2015 (premio Nobel per la fisica del 2017). Le discussioni sono in pieno svolgimento e studi ulteriori sono necessari per verificare se quantità, distribuzione e proprietà di questi corpi sono davvero quelle adeguate per spiegare la Materia Oscura.

Un'ipotesi più radicale prende spunto dall'osservazione, estremamente importante, che le manifestazioni avverate della Materia Oscura hanno tutte e solo a che fare con la gravità. La domanda sorge allora spontanea: invece di postulare l'esistenza di una massa mancante, non sarebbe forse il caso di chiedersi se è *la legge di gravità che deve essere modificata?* Non sarebbe la prima volta nella storia dell'astronomia e della scienza che ci si trova di fronte a un caso del genere. Intorno al 1840, gli astronomi erano alle prese con un mistero: l'orbita del pianeta Urano, all'epoca il pianeta più lontano del sistema solare, mostrava delle irregolarità in contraddizione con le leggi della meccanica celeste Newtoniana. Questo portò Urbain Jean Joseph Le Verrier, astronomo dell'Osservatorio di Parigi, a postulare l'esistenza di un 'pianeta mancante' la cui influenza gravitazionale spiegava le anomalie nell'orbita di Urano. E effettivamente un tale pianeta, Nettuno, fu scoperto nel 1846 da Johann Gottfried Galle, un astronomo di Berlino, quasi esattamente nel punto indicato dai calcoli di Le Verrier. Poco più tardi, fu il pianeta Mercurio a attirare l'attenzione degli astronomi: anche il suo moto mostrava una anomalia non predetta dalla gravità Newtoniana (la precessione del perielio). Le Verrier, sicuro del fatto suo, la interpretò come dovuta

all'esistenza di un altro pianeta, chiamato Vulcano, molto vicino al Sole. Nonostante decenni di ricerche e anche qualche falsa scoperta, Vulcano non fu mai trovato. Fu invece Einstein che dimostrò come l'anomalia fosse dovuta ad una correzione della gravità Newtoniana, importante in vicinanza di un corpo estremamente massivo come il Sole e perfettamente predetta dalla teoria della Relatività Generale. L'analogia con la situazione attuale è evidente: le 'anomalie' nelle curve di rotazione galattiche, nella dinamica degli ammassi di galassie e in cosmologia sono dovute a una nuova Materia (Oscura), come nel caso di Nettuno, o sono un segnale del fallimento ancora non compreso delle leggi di gravità, come nel caso di Mercurio?

Una proposta in quest'ultima direzione è quella della teoria MOND (*MOdified Newtonian Dynamics*), elaborata a partire dagli anni '80 dal fisico israeliano Mordehai Milgrom. In modo empirico, la teoria propone che al di sotto di una certa accelerazione critica $a_* \sim 10^{-10} \text{ m/s}^2$ (tipica delle stelle periferiche delle galassie a spirale) l'usuale legge di Newton $F = ma$ diventi $F = ma^2/a_*$. La dipendenza quadratica è scelta ad arte in modo che le curve di rotazione galattiche diventino piatte a grande distanza dal bulge centrale:

$$G_N \frac{m M(r)}{r^2} = F = \begin{cases} ma & a > a_* \\ ma^2/a_* & a < a_* \end{cases}, \quad (5)$$

$$v(r) = \begin{cases} (GM(r)/r)^{1/2} & \text{Newton} \\ (GM(r)a_*)^{1/4} & \text{MOND} \end{cases}. \quad (6)$$

Per quanto semplice e suggestiva, la teoria MOND non ha la capacità di spiegare le manifestazioni ascrivibili alla Materia Oscura su scale più grandi delle galassie. Anche le versioni più elaborate non riescono a spiegare al tempo stesso le curve di rotazione galattiche, la dinamica degli ammassi, la CMB e la formazione delle grandi strutture. Anche se non possiamo ovviamente escludere a priori che in futuro magari venga scovata la modificazione 'giusta' della gravità, non è per niente banale che un'ipotesi relativamente semplice quale quella di aggiungere una particella nuova alla lista di quelle conosciute possa risolvere problemi su scale così disparate. Ragion per cui la comunità resta in grande maggioranza convinta della bontà dell'idea della particelle aggiuntiva.

Non è inusuale in astrofisica e cosmologia che ipotesi apparentemente strampalate (ma in realtà basate su solidi indizi osservativi) si rivelino poi esatte. Si pensi ai neutrini, un altro tipo di particella elusiva e capace di attraversare la Terra senza interagire, ipotizzati nel 1930 da Wolfgang Pauli quasi per disperazione[§] e rivelati solo nel 1956. Si pensi al caso del bosone di Higgs, ipotizzato nel 1964 come conseguenza di una sostanza misteriosa (il campo di Higgs) che permea l'intero Universo e confermato solo nel 2012. La storia della fisica ci insegna che spesso, quando si tratta di penetrare i concetti più fondamentali della Natura, bisogna fare prova di audacia nelle proposte e di pazienza nell'attendere le risposte.



- [1] Gianfranco Bertone e Dan Hooper: "A History of Dark Matter", *arXiv* **1605.04909** (2016).
- [2] Stefano Profumo: *An Introduction to Particle Dark Matter*. World Scientific, Singapore (2017).
- [3] Marco Cirelli, Alessandro Strumia e Jure Zupan: "Dark Matter", *Review in preparazione* (2019).



Marco Cirelli: è ricercatore in fisica teorica delle particelle e astroparticelle presso il Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) francese e svolge attualmente la sua ricerca all'Università della Sorbona.

[§]Per rimediare all'apparente non conservazione dell'energia nel processo di decadimento radioattivo β^- , Pauli ipotizzò che l'energia mancante fosse portata via da una particella invisibile.

