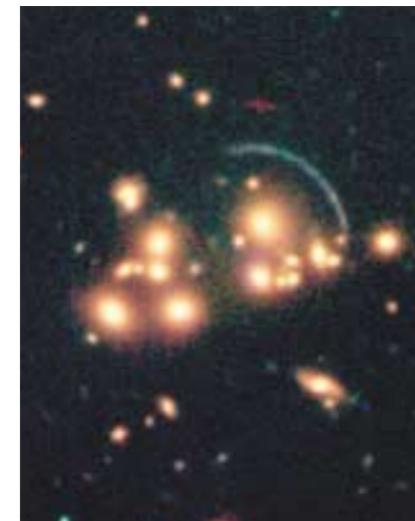


# Bagliori dalla MATERIA OSCURA

**Nonostante gli sforzi degli astronomi, gran parte della materia dell'universo continua a sfuggire alle loro osservazioni. E non sappiamo nemmeno di che cosa sia fatta**

**di Patrizia Caraveo e Marco Roncadelli**



*L'ASTRONOMIA di Raffaello (1508), affresco cheorna la Stanza della Segnatura nei Palazzi Vaticani, raffigura il cielo di Roma al momento dell'ascesa al soglio pontificio di papa Giulio II. Nell'immagine ottenuta dal Very Large Telescope dell'ESO (a fianco), è chiaramente visibile l'arco blu prodotto dall'effetto di lente gravitazionale su una galassia dell'ammasso CL2244-02.*

**O**ggi, come 10.000 anni fa, l'uomo si pone domande sull'universo che lo circonda. Come si è formato, qual è la sua struttura, di che cosa è fatto? Una volta il problema era di competenza dei filosofi. Oggi rispondere a queste domande è privilegio degli astronomi, che utilizzano gli osservatori più potenti e i rivelatori più sensibili per sondare le profondità del cielo. I risultati di lavori lunghi e minuziosi sono, a volte, stupefacenti. Teorie accettate possono essere rimesse in forse da una nuova evidenza sperimentale. Non a caso i cosmologi sono «sempre in errore, mai in dubbio». A parte le battute, agli scienziati viene richiesta oggettività di giudizio unita a una buona dose di inventiva e di capacità di mettersi sempre in discussione. L'infinitamente grande cerca la sua spiegazione nell'infinitamente piccolo, e l'astronomia si fonde con la fisica delle particelle elementari, regalando all'umanità una delle più affascinanti avventure del pensiero.

Per capire come e di che cosa sia fatto l'universo gli astronomi devono fare accurati lavori di censimento degli oggetti celesti, cercando di misurare la distanza e di assegnare loro una massa. In questo sono aiutati dalla meravigliosa semplicità delle leggi della fisica, che noi supponiamo si applichino a tutto l'universo. Le sorprese, per fortuna, vengono subito a ricordarci che siamo molti lontani dall'aver le idee chiare. Se pensiamo che studiare il cosmo attraverso l'astronomia radio, ottica, X e gamma possa fornirci un quadro completo del nostro universo ci sbagliamo grossolanamente. Da decenni sappiamo che la materia luminosa - quella che «vediamo» perché emette radiazione elettromagnetica, cioè luce, onde radio, raggi X e gamma - è solo una frazione insignificante di tutta la materia che esercita un'azione gravitazionale. Questo è il famoso problema della «materia oscura», una delle sfide più entusiasmanti dell'astrofisica attuale.

Materia oscura è certamente un nome evocativo, visto che stiamo parlando di qualcosa che è contemporaneamente di natura ignota e di difficile individuazione. Non diversamente dai buchi neri, la materia oscura sfugge alle nostre osservazioni dirette. Sappiamo con certezza che c'è soltanto perché ne vediamo gli effetti sulla materia luminosa.

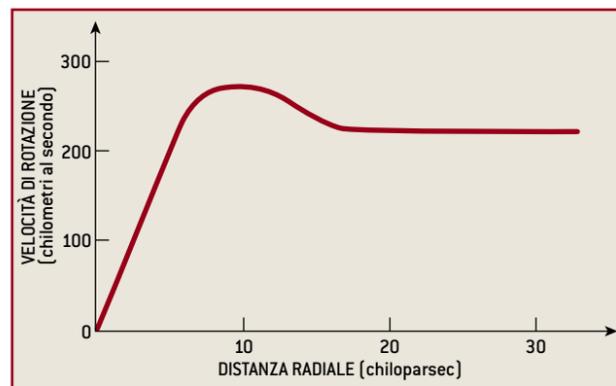
Iniziamo allora chiedendoci come ci si possa rendere conto dell'esistenza della materia oscura. La risposta non è univoca, poiché si applicano metodologie diverse secondo gli oggetti che si considerano. Alcune di queste saranno descritte in seguito, ma vogliamo sottolineare fin d'ora che parte di ciò che diremo si basa su una scoperta di Christian Doppler. Nel 1842 egli osservò che il suono emesso da una sorgente in movimento appare, a un osservatore fermo, di frequenza superiore quando l'oggetto si avvicina e di frequenza inferiore se l'oggetto si allontana. È il famoso effetto Doppler, valido per qualunque fenomeno ondulatorio, dal fischio di un treno in corsa alla radiazione elettromagnetica. Se applicato alle righe presenti negli spettri degli oggetti celesti, esso permette di determinare la velocità della sorgente di radiazione rispetto a noi.

Ma procediamo con ordine, esaminando prima le singole galassie, per poi passare agli ammassi di galassie e quindi all'intero universo osservabile.

## La massa delle galassie

In prima approssimazione, l'astronomia stima la massa di una galassia in base alla sua luminosità: galassie più luminose contengono più stelle, e quindi sono più massicce di quelle meno luminose. Si ha così una misura diretta della massa luminosa delle galassie. Esistono però altri metodi, più generali, per valutare la massa complessiva di una galassia: essi sfruttano il movimento di rotazione che coinvolge tutte le sue stelle, tipico delle «galassie a spirale». Non diversamente dai pianeti del sistema solare, le stelle e le nubi di gas che compongono tali galassie sono animate da un moto di rotazione e descrivono orbite più o meno circolari intorno al centro. In questo moto la velocità di ogni stella dipende, oltre che dalla distanza dal centro, dalla frazione di massa galattica presente all'interno della sua orbita. Quindi lo studio sistematico di tali moti ci permette di misurare la massa complessiva delle galassie a spirale. Il grafico delle velocità misurate in funzione della distanza dal centro è chiamato curva di rotazione galattica.

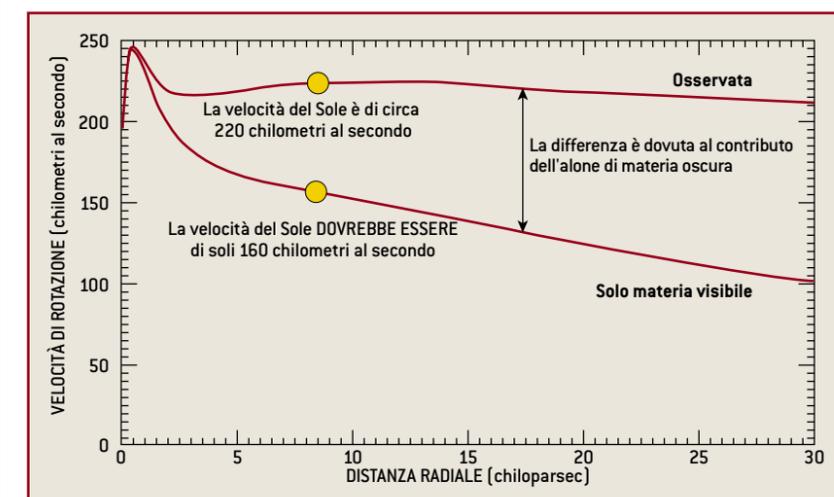
Esaminando gli spettri di parecchie stelle di una galassia a spirale, selezionate in modo da avere distanze progressivamente crescenti dal centro, ci aspettiamo di trovare che la curva di rotazione dapprima cresca, all'aumentare della distanza dal centro, e poi, una volta inglobata tutta la massa della galassia, diminuisca. In altri termini, ci aspettiamo che le stelle ai bordi della galassia si muovano più lentamente di quelle più interne, in analogia con quanto avviene per i pianeti del sistema solare. Invece la natura ci riserva una sorpresa: dopo una crescita lineare - in corrispon-



LA GALASSIA DI ANDROMEDA (*in alto*), è uno spettacolare esempio di galassia a spirale. La curva di rotazione (*qui sopra*) evidenzia come il valore della velocità cresca fino a un massimo, per poi diminuire. Al contrario delle attese, però, procedendo verso il margine esterno la velocità si attesta su un valore costante. Il fenomeno si spiega ipotizzando che in quelle regioni si trovi una grande quantità di materia non luminosa. Lo stesso accade per le altre galassie a spirale, come la nostra Via Lattea.

## IN SINTESI

- La materia luminosa, quella che emette radiazione elettromagnetica, è solo una frazione insignificante di tutta la materia presente nell'universo.
- Studiando le galassie a spirale, si osserva che la velocità di rotazione delle stelle situate nelle parti esterne è maggiore del previsto. Ciò è giustificabile solo supponendo che in queste regioni sia presente una grande quantità di materia non luminosa.
- Anche l'indagine degli ammassi di galassie conferma, sia attraverso la spettroscopia ottica sia osservando gli effetti di lente gravitazionale, la presenza di materia che sfugge all'osservazione diretta.
- Secondo le osservazioni della missione Boomerang, il parametro che misura la densità cosmica dovrebbe essere uguale a 1, ma la materia ordinaria (luminosa e non) contribuisce appena per il 5 per cento.
- Gli astronomi hanno proposto diversi candidati come possibili costituenti della materia oscura: tra essi stelle non luminose, come le nane brune, le evanescenti WIMPs e un'esotica forma di materia chiamata «quintessenza».



CONFRONTO TRA LA CURVA DI ROTAZIONE MISURATA DELLA VIA LATTEA (*in alto*) e quella che ci saremmo aspettati se la galassia fosse costituita dalla sola materia visibile. La velocità del Sole, in questo caso, sarebbe solo di 160 chilometri al secondo. La materia non luminosa, responsabile di questa discrepanza, è stimata in  $10^{12}$  masse solari, contro le  $7 \times 10^{10}$  masse solari di quella luminosa.

denza della regione centrale - la curva di rotazione si stabilizza su un valore costante all'aumentare della distanza dal centro. Benché sia impossibile trovare due galassie con curve di rotazione identiche, è sorprendente constatare che praticamente tutte le curve di rotazione misurate hanno lo stesso andamento qualitativo. Cosa si nasconde dietro questo comportamento?

Per spiegare la curva di rotazione piatta delle galassie a spirale dobbiamo supporre che nelle loro regioni esterne esista una significativa quantità di materia non luminosa, in grado di compensare la diminuzione della velocità che ci aspetteremmo dalla sola materia luminosa. Com'è distribuita la materia oscura? Sfortunatamente le osservazioni non ci permettono di dare una risposta univoca. Dobbiamo procedere a ritroso, ipotizzando diverse distribuzioni di materia oscura e studiando l'andamento delle corrispondenti curve di rotazione. Si ha il comportamento piatto osservato supponendo che la componente luminosa di una galassia a spirale sia circondata da un alone sferoidale di materia oscura. Nel caso della Via Lattea - che è una tipica galassia a spirale brillante - la materia oscura viene stimata intorno a  $10^{12}$  masse solari, che va confrontata con una massa luminosa di  $7 \times 10^{10}$  masse solari. Ciò significa che la quantità di materia oscura è almeno 10 volte superiore a quella della materia luminosa.

## Il problema degli ammassi

L'esistenza di materia oscura negli ammassi di galassie è nota fin dal 1933, quando Fritz Zwicky studiò i moti nell'ammasso di galassie nella costellazione che porta il poetico nome di Chioma di Berenice. Possiamo riassumere così la sua strategia: in un sistema autogravitante isolato (quale un ammasso) vale il teorema del viriale, secondo il quale l'energia potenziale gravitazionale del sistema (proporzionale alla sua massa complessiva) deve essere uguale al doppio dell'energia cinetica totale dei costituenti (le galassie nel caso degli ammassi). Lo si può capire in modo intuitivo: se dominasse l'energia cinetica, il sistema si espanderebbe, mentre - in caso contrario - tenderebbe a collassare; una condizione di equilibrio è possibile solo se l'energia cinetica è metà dell'energia potenziale. La velocità delle galassie che compongono l'ammasso è calcolabile sulla base dello spostamento Doppler delle righe presenti negli spettri galattici, per cui è immediato stimare la massa complessiva. Nel caso di Chioma si trova una massa totale di  $9,6 \times 10^{14}$  masse solari, contro una massa luminosa di  $1,4 \times 10^{13}$  masse solari. Dunque la quantità di materia oscura è 60 volte maggiore di quella della materia luminosa.

Alla stessa conclusione si può giungere per una via diversa,

sfruttando l'emissione di raggi X degli ammassi. Negli anni settanta si è scoperto che gli ammassi di galassie emettono raggi X con energia dell'ordine di 10 chiloelettronvolt. Lo studio dello spettro della radiazione X ha anche chiarito l'origine di tale emissione. Si tratta della radiazione di *Bremsstrahlung* (letteralmente «radiazione di frenamento») che gli elettroni di un gas ionizzato emettono quando vengono accelerati (decelerati) dal campo elettrostatico di uno ione del gas. Tale scoperta ha dimostrato che gli ammassi di galassie contengono anche un gas ionizzato - alla temperatura di circa 10 milioni di gradi - la cui massa risulta essere di circa  $10^{14}$  masse solari, quindi ben maggiore della massa luminosa. Ma questa scoperta ha un'implicazione ancora più importante. Dallo studio dell'emissione X è possibile concludere che la quantità complessiva di materia presente nell'ammasso è in accordo con le stime ottenute utilizzando il teorema del viriale.

Un'ulteriore conferma è stata ottenuta recentemente attraverso l'effetto di lente gravitazionale. Secondo la teoria einsteiniana della gravità, una distribuzione di massa provoca la curvatura dello spazio. La propagazione della luce viene quindi distorta in presenza della materia, che agisce come una lente moltiplicando, ingrandendo o deformando l'immagine della sorgente. Dopo i primi studi di sorgenti puntiformi, le cui immagini risultavano moltiplicate dalla presenza di una galassia sulla linea di vista, sono state osservate distorsioni dell'immagine di una sorgente estesa. Le galassie vengono deformate e lo studio della deformazione permette di determinare la massa della lente gravitazionale. Immagini di ammassi di galassie hanno evidenziato la presenza di parecchie galassie distorte, non appartenenti a essi. Si tratta di galassie che fanno da sfondo all'immagine, molto più lontane da noi dell'ammasso in questione. La loro luce viene deflessa dall'ammasso che trova sul suo cammino e ciò permette di avere una stima della massa complessiva di molti ammassi.

## L'universo

Informazioni importanti su quantità e qualità della materia oscura si ottengono dallo studio delle proprietà globali dell'universo. Dobbiamo quindi fare una breve incursione nel campo della cosmologia, utilizzando il modello cosmologico standard, che emerge dalla teoria einsteiniana della gravità sotto l'ipotesi che lo spazio sia omogeneo e isotropo. Evidentemente tali proprietà si riferiscono a osservazioni effettuate su scala cosmica, di gran lunga maggiore delle dimensioni di un ammasso di galassie.

Secondo il modello cosmologico standard, l'universo è uno spazio con curvatura costante, che può unicamente espandersi o contrarsi durante la sua evoluzione. Ma se lo spazio è omogeneo e isotropo, non può esistere alcun «centro dell'universo» rispetto al quale avvenga l'espansione o la contrazione. Questo apparente paradosso può essere compreso immaginando che l'universo sia simile alla superficie di un pallone che venga gonfiato o sgonfiato. La superficie esterna del pallone è l'analogo bidimensionale di uno spazio a curvatura costante positiva, mentre quella interna corrisponde a uno spazio a curvatura negativa.

L'universo si è espanso fin dalla sua origine nel big bang, avvenuto intorno a 15 miliardi di anni fa: e tale espansione si manifesta nel moto di allontanamento reciproco delle galassie ipotizzato da Edwin Hubble nel 1929. Nell'ambito del modello cosmologico standard, l'espansione cosmica è sempre decelerata, a causa dell'attrazione gravitazionale fra gli oggetti che lo compongono. Sia la geometria dell'universo sia la sua evoluzione dipendono dalla quantità di materia che esso contiene. È conveniente esprimere la corrispondente densità cosmica media in termini del parametro di densità cosmica  $\Omega$ , definito come il rapporto tra la densità misurata e la cosiddetta «densità critica», caratteristica di un universo a curvatura nulla, cioè descritto dalla geometria euclidea che ben conosciamo. Se la densità media è

bassa rispetto a quella critica, si ha  $\Omega < 1$ : la curvatura spaziale è negativa e l'espansione continuerà per sempre. Viceversa, se la densità media è maggiore di quella critica,  $\Omega > 1$ : la curvatura è positiva e a un certo momento l'universo inizierà a contrarsi, fino a raggiungere uno stato singolare simmetrico al big bang. Una terza possibilità corrisponde al caso  $\Omega = 1$ . In questo caso la densità media è esattamente uguale a quella critica: allora l'universo è spazialmente piatto - cioè euclideo - e il tasso di espansione si ridurrà progressivamente a zero.

## Quanta materia c'è, nell'universo?

Cominciamo col censire tutta la materia luminosa. Si tratta di atomi simili a quelli dei quali siamo fatti noi, costituiti da protoni e neutroni, che tecnicamente sono chiamati barioni. La densità dei barioni luminosi corrisponde a un valore di  $\Omega$  non superiore a 0,005. Tuttavia abbiamo visto che la materia oscura gioca un ruolo preponderante sia a livello delle galassie sia dei loro



L'ESISTENZA DI MATERIA OSCURA NEGLI AMMASSI DI GALASSIE, come l'ammasso della Vergine, riprodotto in questa fotografia, fu dedotta già nel 1933 in base allo studio delle velocità delle galassie appartenenti all'ammasso. Il fenomeno è stato poi confermato con le osservazioni dei raggi X emessi dagli ammassi.

## GLI AUTORI

**PATRIZIA CARAVEO** si è laureata in fisica all'Università di Milano nel 1977. Dopo un periodo al Goddard Space Flight Center della NASA e al Centre d'Etudes Atomiques di Saclay, è approdata all'Istituto di fisica cosmica del CNR di Milano. Ha collaborato a missioni spaziali internazionali dedicate all'astrofisica delle alte energie ed è coinvolta nella missione europea Integral, in quella della NASA Swift e in quella italiana AGILE, che partiranno tra il 2002 ed il 2003. **MARCO RONCADELLI** si è laureato in fisica all'Università di Pavia nel 1978 ed è stato allievo del Collegio Ghislieri. Ha svolto attività di ricerca presso il Max-Planck-Institut di Monaco di Baviera, il CERN, l'ICTP di Trieste e la Scuola Normale Superiore di Pisa. Attualmente lavora all'INFN a Pavia. Si è occupato di questioni fondamentali della meccanica quantistica, di fisica teorica delle particelle elementari e di astrofisica della materia oscura.

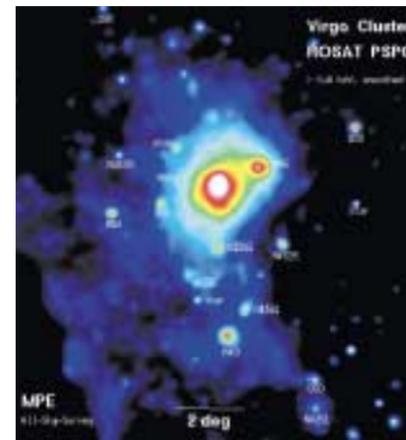
## Gli «abitanti» più elusivi dell'universo

**L**e WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*) sono nuove particelle elementari predette da varie estensioni del modello di Glashow-Weinberg-Salam, che descrive le interazioni forti, deboli ed elettromagnetiche fra particelle elementari. La classe più promettente di questi modelli è costituita dalle teorie di superstringa. A causa della loro debole interazione con la materia ordinaria, le WIMPs presenti nella Via Lattea sono di difficile individuazione. Per di più, il loro effetto all'interno di un rivelatore può facilmente essere confuso con l'interazione prodotta dai neutroni dei raggi cosmici. Al fine di eliminare questi ultimi, gli esperimenti vengono condotti sotto una montagna o sottoterra. Un tale esperimento - chiamato DAMA e attualmente in corso nel Laboratorio Nazionale del Gran Sasso dell'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN) - ha osservato un segnale consistente con quanto ci si aspetta per le WIMPs.

Tuttavia soltanto dopo un'eventuale conferma da parte di altri esperimenti (alcuni dei quali saranno condotti al Gran Sasso) sapremo se le WIMPs sono state effettivamente scoperte. Un metodo indiretto per la rivelazione delle WIMPs si basa sull'individuazione di particelle in cui esse si annichilano, quali neutrini di alta energia, antiprotoni, positroni e raggi gamma. Va detto infine che il metodo concettualmente più semplice per dimostrare l'esistenza delle WIMPs è di produrle in laboratorio, ma per farlo è necessario attendere l'entrata

in funzione del Large Hadron Collider del CERN di Ginevra, che sarà operativo non prima del 2006. Va però sottolineato che quest'ultima strategia non sostituisce gli esperimenti sotterranei, perché la rivelazione *in loco* resta l'unico modo per conoscere la rilevanza astrofisica delle WIMPs.

L'AMMASSO DELLA VERGINE in un'immagine ai raggi X prodotta dal satellite ROSAT. Lo studio delle emissioni X degli ammassi ha mostrato che essi contengono gas ionizzato in quantità pari a circa  $10^{14}$  masse solari, un valore superiore alle stime della massa della materia luminosa.



ammassi. Dobbiamo quindi trovare una strategia per valutare la densità di tutta la materia, indipendentemente dal fatto che la «vediamo» oppure no.

Lo studio della radiazione cosmica di fondo, che permea l'universo come resto fossile del big bang, ci offre la possibilità di misurare  $\Omega$ . Solo di recente si è raggiunta una precisione strumentale tale da permettere di decodificare la grande quantità di informazioni che la radiazione cosmica di fondo ci offre sulle proprietà globali dell'universo. In particolare, i dati raccolti dalla missione Boomerang implicano  $\Omega = 1$ . Si tratta di un risultato di straordinaria importanza, perché da un lato ci dice che viviamo in un universo euclideo, dall'altro che la materia luminosa è insignificante rispetto a quella invisibile. Gli stessi dati possono anche essere utilizzati per stimare la densità di tutti i barioni: essa corrisponde a un valore di  $\Omega$  pari a circa 0,05 (questo risultato trova conferma nella teoria della nucleosintesi basata sul modello cosmologico standard).

La conclusione è sconvolgente: da un lato, il 95 per cento della massa dell'universo è costituita da materia oscura non barionica. Dall'altro, il 90 per cento dei barioni è oscuro. Che forma assumono i barioni oscuri? Ma, soprattutto, di che cosa è fatto il resto dell'universo, ovvero la maggior parte della materia? Si tratta di un ulteriore, gravissimo colpo all'antropocentrismo.

Quattro secoli fa abbiamo dovuto accettare di non essere al centro del cosmo. Ora scopriamo di essere fatti di una materia che costituisce una minuscola frazione dell'universo che ci circonda.

## WIMPs e quintessenza

Un costituente della materia oscura non barionica sono le WIMPs (si veda la finestra qui a fianco). La loro esistenza è necessaria per spiegare la formazione delle strutture cosmiche, quali le galassie e i loro ammassi. Quindi è naturale supporre che la materia oscura presente negli aloni galattici e negli ammassi di galassie sia costituita prevalentemente da WIMPs, oltre che dai barioni oscuri. Si può dimostrare che in tale scenario  $\Omega$  vale circa 0,3: le WIMPs sono più abbondanti dei barioni, ma non bastano per rendere l'universo euclideo.

Apparentemente la soluzione di questo dilemma sembra banale: sarebbe sufficiente immaginare che le WIMPs mancanti fossero diffuse nello spazio cosmico. In realtà - come talvolta accade - la natura è più fantasiosa di chi la studia, perché c'è ragione di ritenere che le WIMPs non esauriscano tutta la materia non barionica. Uno studio delle proprietà globali dell'universo, basato sull'osservazione di un campione di stelle estremamente lontane (perché siano visibili devono essere molto brillanti e sono state scelte le cosiddette supernove di tipo Ia), ha mostrato che l'universo attuale si sta espandendo in modo accelerato.

A prima vista, sembra di essere di fronte a un paradosso, perché sappiamo che nell'ambito del modello cosmologico standard l'espansione cosmica è necessariamente decelerata, a causa della mutua attrazione gravitazionale esercitata dalla materia in esso contenuta. Dobbiamo forse concludere che il modello cosmologico standard sia sbagliato?

La situazione è meno drammatica di quanto possa apparire. Si può «salvare» il modello - con i suoi straordinari successi - ipotizzando l'esistenza di un nuovo tipo di materia oscura diffusa nell'universo, a patto che possieda proprietà radicalmente diverse da quelle che attribuiamo alla materia ordinaria. Non sapendo bene di che cosa si tratti, è stata chiamata con il nome aristotelico di «quintessenza». Sia i comuni barioni sia le WIMPs sono caratterizzati da una pressione positiva: se sono posti all'interno di un palloncino, questo tende a espandersi sotto l'effetto della pressione corrispondente. Al fine di spiegare l'accelerazione dell'universo è invece necessario che la quintessenza si comporti in modo opposto: se racchiusa in un palloncino, questo tenderebbe a con-

## Il futuro dell'astronomia gamma è AGILE

**A**GILE è la prima delle piccole missioni scientifiche dell'Agenzia spaziale italiana, e sarà dedicata all'astronomia gamma, uno dei nuovi campi dell'astronomia moderna, nata e sviluppatasi nell'era spaziale poiché l'atmosfera è opaca ai fotoni gamma. Fotoni di energia così elevata devono essere rivelati uno per uno con una camera a scintille, uno strumento derivato dalla fisica delle particelle, capace di far materializzare il fotone e di misurarne energia e direzione d'arrivo.

Oggi l'astronomia gamma non dispone di nessuno strumento in orbita. Il Compton Observatory della NASA ha finito la sua missione e nulla del genere è previsto prima del 2006, quando andrà in orbita GLAST. Tra pochi mesi l'Agenzia spaziale europea (ESA) lancerà Integral, un osservatorio dedicato a coprire l'intervallo tra l'astronomia X e l'astronomia gamma. Ci aspettiamo grandi cose da Integral, ma molti quesiti resteranno senza risposta se non si potrà spingere lo studio anche alle energie più elevate, dove possiamo

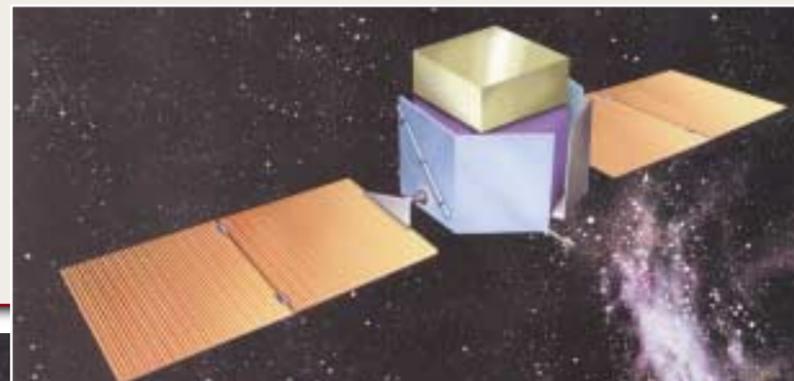
trovare la firma dell'interazione della materia con i raggi cosmici, dell'accelerazione delle particelle e dell'annichilazione delle WIMPs.

AGILE si propone di riaprire la finestra sull'universo dell'astronomia gamma di alta energia. Strumento innovativo e compatto, nato dalla collaborazione tra CNR e INFN, può fare più e meglio di quanti lo hanno preceduto. Il tracciatore di fotoni gamma sarà associato a due altri rivelatori: sotto, un piccolo calorimetro dedicato alla misura dell'energia dei raggi gamma; sopra (Super), il primo piano del silicio agirà in accoppiata con una maschera ad apertura codificata, formando un rivelatore indipendente sensibile ai raggi

X. Super-AGILE allargherà il campo di azione della missione ai raggi X.

Un piccolo osservatorio al servizio della comunità astrofisica che ha l'ambizione di dare un contributo alla soluzione di alcuni problemi che EGRET ha lasciato aperti. È da AGILE (e poi da GLAST) che ci aspettiamo un valido aiuto nella comprensione della materia oscura. Da mappe gamma più dettagliate pensiamo di poter ricavare informazioni sugli ammassi oscuri dei quali abbiamo parlato nel testo.

D'altro lato anche le WIMPs dovrebbero lasciare una firma leggibile nei fotoni gamma di più alta energia. È lì che si concentreranno l'attenzione e le speranze dei cacciatori di astroparticelle.



Cortesia Agenzia spaziale italiana

trarsi. In altri termini, la quintessenza deve avere una pressione negativa. Di fatto, si può dimostrare che tale pressione dà luogo a una «gravità repulsiva», che quindi accelera l'espansione cosmica. Lo studio delle supernove la dà anche un risultato quantitativo: il contributo della quintessenza a  $\Omega$  è di circa 0,65. Adesso il valore di  $\Omega$ , dato dalla somma dei contributi dovuti ai barioni, alle WIMPs e alla quintessenza, è  $0,05 + 0,3 + 0,65$ , cioè proprio 1, in accordo con il risultato della missione Boomerang. Sfortunatamente sulla natura della quintessenza non sappiamo altro.

### Barioni oscuri e raggi gamma

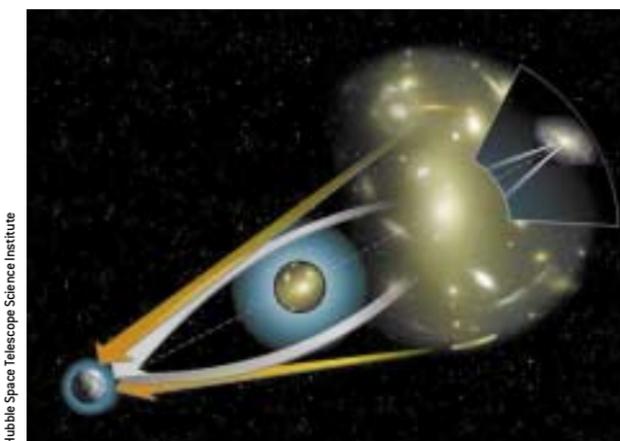
Occupiamoci infine della natura della materia oscura barionica, che - per quanto meno esotica delle WIMPs e della quintessenza - non è meno interessante ed elusiva. Benché siano state avanzate varie ipotesi riguardo alla sua composizione, la più naturale è che si tratti di stelle o nubi di gas presenti negli aloni galattici, che non riusciamo a «vedere» perché la radiazione emessa è troppo debole.

Una classe di candidati comprende le stelle ordinarie alla fine della loro fase evolutiva, quali nane bianche, stelle di neutroni e buchi neri. Studi recenti hanno però escluso tale possibilità: se così fosse, gli aloni galattici conterebbero una quantità eccessiva di «metalli» (elementi più pesanti dell'elio), prodotti durante l'evoluzione stellare. Il problema non si presenta se si suppone che la materia oscura barionica sia formata da «nane brune»:



Hubble Space Telescope Science Institute

UNA SPETTACOLARE LENTE GRAVITAZIONALE osservata da Hubble nell'ammasso di galassie Abell 2218. La deformazione e la moltiplicazione degli oggetti che si trovano oltre l'ammasso è prodotta dalla distorsione della luce dovuta al campo gravitazionale dell'ammasso stesso. Tramite questo fenomeno si possono individuare oggetti opachi (ovvero «oscuri») grazie alla distorsione che producono sulla luce di oggetti più lontani.



Hubble Space Telescope Science Institute

corpi celesti con massa di poco inferiore a un decimo della massa solare, troppo piccoli perché si inneschino le reazioni termoneucleari che rendono luminose le stelle ordinarie. Quindi non c'è modo di osservare le nane brune. Il loro meccanismo di formazione implica che siano raggruppate in ammassi oscuri contenenti anche gas freddo - in prevalenza idrogeno molecolare - sotto forma di nubi. È notevole che la teoria standard che spiega la formazione degli ammassi globulari (agglomerati sferoidali di centinaia di migliaia di stelle) predica anche l'esistenza di tali ammassi oscuri nella regione più esterna degli aloni galattici, proprio dove sappiamo che deve trovarsi la materia oscura.

Come fare a individuarne la presenza? Nella prima metà degli anni novanta, la scoperta dell'effetto di microlente gravitazionale sembrava offrire lo strumento ideale per scoprire le nane brune presenti nell'alone oscuro della Via Lattea. Anche qui alla base del fenomeno c'è la deflessione della luce che si produce quando una nana bruna incrocia la linea di vista di una stella puntiforme dello sfondo. Solo che - a differenza di quanto avviene per le galassie - le immagini multiple sono troppo vicine per venire osservate singolarmente, ma la loro sovrapposizione provoca un'amplificazione della luminosità della stella in esame. Benché eventi di microlente siano stati effettivamente osservati, la loro interpretazione si è rivelata più complessa del previsto. Sicuramente le nane brune non esauriscono la materia oscura dell'alone, che presumibilmente contiene anche nubi di gas barionico freddo.

### BIBLIOGRAFIA

JUNGMAN G., KAMIONKOWSKI M. e GRIEST K., *Supersymmetric Dark Matter*, in «Physics Reports», 267, p. 195, 1996.  
 DE PAOLIS F., INGROSSO G., JETZER PH. e RONCADELLI M., *Gamma Ray Astronomy and Baryonic Dark Matter*, in «Astrophysical Journal», 510, p. L103, 1999.  
 DE BERNARDIS P. e altri, *A Flat Universe from High-Resolution Maps of the Cosmic Microwave Background Radiation*, in «Nature», 404, p. 955, 2000.  
 BERGIA S., *Dialogo sul sistema dell'universo*, McGraw-Hill, Milano, 2002.  
 RONCADELLI M., *Aspetti astrofisici della materia oscura* (di prossima pubblicazione presso Bibliopolis, Napoli, 2002).  
 Per la missione Agile si veda <http://www.ifctr.mi.cnr.it/Agile>

I miraggi gravitazionali potrebbero non essere l'unica arma a disposizione dei cacciatori di materia oscura barionica. Infatti le nubi di gas freddo sfuggono facilmente ai radioastronomi, ma non possono evitare che i protoni di alta energia - presenti nei raggi cosmici - producano raggi gamma nell'urto con i protoni dei loro nuclei. Se queste nubi fossero responsabili di una frazione non trascurabile alla materia oscura presente nell'alone galattico, l'intensità della loro emissione gamma dovrebbe essere rivelabile con gli strumenti attuali. A questo proposito è importante sottolineare che la limitata risoluzione angolare dei rivelatori gamma non permette di distinguere l'emissione proveniente da nubi raggruppate in ammassi oscuri da un fondo diffuso. D'altra parte, un'analisi statistica sofisticata può permettere di determinare se un flusso gamma provenga dall'alone galattico o se sia invece di origine extragalattica. Nel 1998 tale analisi è stata effettuata sull'emissione gamma osservata dal rivelatore EGRET a bordo del satellite CGRO lanciato dalla NASA. Il risultato sembra indicare che si tratta effettivamente di un'emissione dovuta all'alone galattico, ma in casi come questi la prudenza è d'obbligo.

Saranno le prossime missioni di astronomia gamma a dirci quanto questi ragionamenti siano corretti. Prima volerà la missione italiana AGILE (si veda la finestra nella pagina a fronte), poi GLAST, uno strumento molto più ambizioso, nel quale l'Italia ha un ruolo importante. Studiando i loro dati, è auspicabile che la materia che non vediamo diventi un po' meno oscura.

L'AMMASSO GLOBULARE G1, costituito da circa 300.000 stelle al termine della loro vita, si presenta come una grande sfera. In alto, un'immagine artistica di AGILE, il satellite dell'ASI per l'astronomia a raggi X e gamma.