

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN ASTRONOMIA

LA MATERIA OSCURA NELL'UNIVERSO

Relatore Chiar.mo

Prof. Luca Ciotti

Co-relatore Chiar.mo

Prof. Corrado Bartolini

Tesi di Laurea presentata da

Luca Ciotti **Silvio Bolognesi**

SESSIONE TERZA
Anno Accademico 2014-2015

Indice:

INTRODUZIONE	Pag	3
Premessa		4
Prime evidenze della materia oscura. C'è qualcosa che non va...		5
CAPITOLO 1: Materia oscura nelle galassie		6
1.1 La materia oscura esiste davvero! Quanta materia luminosa c'è?		
Il peso della luce		6
1.2 Le curve di rotazione delle galassie.		
Materia oscura nelle galassie a spirale		7
1.3 Aloni galattici. Possibili distribuzioni di materia oscura.		
Polar-Ring Galaxy		9
1.4 Le ultime novità sulla materia oscura		10
1.5 La materia oscura esiste. Scoperta enorme ragnatela		13
1.6 Esperimento Pamela		19
1.7 Perché la materia oscura deve esistere		21
1.8 Qual è la differenza sostanziale fra materia oscura e energia oscura		22
1.9 Quanta materia oscura esiste?		23
1.10 Dove si trova la materia oscura?		24
1.11 Concetto di massa		24
1.12 Proprietà della materia		27
1.13 Proprietà fondamentali della materia oscura		27
1.14 Fasi della materia oscura		28
1.15 Antimateria		29
1.16 Generalità sulla materia oscura		30
1.17 Evidenze della materia oscura. La rotazione delle Galassie		32
1.18 Lente gravitazionale in un gruppo di galassie		32
1.19 Teorie Alternative		34
1.20 Riferimenti all'immaginario moderno		35
1.21 Distanza delle stelle dal centro di una galassia		37
1.22 Galassie a spirali barrate. Teoria di Peebles e Ostriker. , criterio di sopravvivenza galattico ed effetto Warp		38
1.23 Involucri stellari oscuri: galassie ellittiche. Esplorazione a raggi X		39
1.24 Galassie nane (e misteriose!). Materia oscura in abbondanza		40
CAPITOLO 2: Materia oscura in ammassi e superammassi		41
2.1 Sempre più materia oscura... Teorema del viriale cosmico.		41
2.2 Lo sbaglio dell'ammasso del Cancro.Falsificabilità secondo K. Popper		43
2.3 Stiamo precipitando verso la Vergine? Anisotropia dipolare della radiazione cosmica di fondo		44
2.4 I sette samurai e il Grande Attrattore.		45

2.5 Le lenti gravitazionali	46
Einstein e le nuove frontiere dell'esplorazione celeste	
CAPITOLO 3: Evidenze cosmologiche sulla materia oscura	49
3.1 Troppa materia oscura	49
Spillar, Loh. Misurando la curvatura del cielo	
Geometrie non euclidee	
3.2 Se l'Universo è piatto... Il parametro C e le teorie cosmologiche	50
3.3 Il rapporto barioni-fotoni. Nucleosintesi primordiale	51
CAPITOLO 4: Possibili candidati per la materia oscura	54
4.1 Che cosa è la materia oscura?	54
Materia oscura barionica: MACHOs	
Pianeti, nane brune, pulsar, polveri interstellari e buchi neri	
4.2 La materia oscura calda: veloce come la luce.	55
La grande saga dei neutrini	
4.3 La materia oscura fredda: particelle esotiche	56
Assioni e Monopoli magnetici	
4.4 WIMP: l'ultima speranza. Freddo, freddissimo	58
4.5 L'energia oscura (accenni)	59
E se il vuoto non fosse vuoto?	
4.6 Cold collisionless dark matter	60
CAPITOLO 5	
CONCLUSIONI: Ultime novita' sulla materia oscura	62
5.1 Hubble e la prima mappa della materia oscura	62
5.2 Verso l'infinito e oltre	62
5.3 Ulteriore approfondimento sulla materia ed energia oscure	62
5.4 Ricerche di materia oscura dallo spazio	63
5.5 Alpha Magnetic Spectrometer	64
5.6 Lancio di un satellite cinese	64
5.7 Riepilogo	64
Bibliografia	65

INTRODUZIONE

"... Guardare le stelle mi fa sempre sognare così come lo fanno i puntini neri che rappresentano le città e villaggi su una cartina. Perché, mi chiedo, i puntini luminosi del cielo non possono essere accessibili come quelli sulla cartina della Francia? Come prendiamo il treno per andare a Tarascona o a Rouen, così prendiamo la morte per raggiungere le stelle...."

(Vincent Van Gogh, lettera al fratello Theo del 1888).

Premessa

Personalmente mi sento molto affascinato dalla volta celeste, con ciò che mostra e ciò che invece ancora nasconde. Il cielo non è altro che la testimonianza presente del mistero in cui l'uomo è immerso.

Sviluppando questa mia passione per l'astronomia e il fascino per l'ignoto proprio di tutti noi, ho scelto di trattare di uno dei grandi misteri che nemmeno la scienza più moderna riesce ancora a comprendere nella sua pienezza.

La materia oscura ha una cruciale importanza a livello cosmologico, sul destino dell'Universo, eppure rimane appena intravista, per ora, dalle nostre osservazioni. Analizzare la storia di questa ricerca significa, in parte, percorrere gli ultimi passi dell'umanità verso il cuore del mondo. Nel '900 si fa avanti la concezione che ciò che esiste non è semplicemente quello che vediamo. In arte, letteratura, filosofia la mente comincia ad andare oltre ciò che appare. La ricerca della materia oscura in campo astronomico rappresenta il culmine scientifico di queste concezioni sulla realtà.

La presente tesi tratterà delle prove che gli astronomi posseggono sull'esistenza della materia oscura nei grandi spazi cosmici.

La trattazione avrà un'impostazione soprattutto di tipo qualitativo, eccedendo l'analisi quantitativa di questi problemi le mie attuali conoscenze.

Un'analisi quantitativa molto esauriente dei metodi per determinare la quantità di materia oscura nel disco e nell'alone galattico, nonché nelle galassie a spirale, in quelle ellittiche e in quelle nane, è stata fatta nella tesi di laurea di Marina Zamagni, anno accademico 1996-97 sotto la guida dei Prof. Alessandro Braccesi e Luca Ciotti

La sola descrizione delle osservazioni e delle scoperte basterà a dare un quadro complessivo su ciò che oggi sappiamo sulla presenza di materia oscura nel cosmo, lasciando, ovviamente, molti interrogativi per il futuro.

Analizzerò prima strutture più piccole come le galassie (capitolo 1), per poi passare a strutture a larga scala come ammassi e superammassi di galassie (capitolo 2). Seguirà una piccola trattazione di carattere cosmologico (capitolo 3) e degli accenni sulle particelle elementari che potrebbero comporre la materia oscura (capitolo 4).

A contorno di questo nucleo centrale ho posto due parti in ordine cronologico.

La tesi infatti si apre con le prime evidenze sulla materia oscura del 1933, e si chiude con le ultime scoperte della primavera 2013.

Prime evidenze della materia oscura

c'è qualcosa che non va

Le prime evidenze della materia oscura furono trovate da Kapteyn (1922) Jeans (1922) Lindblad (1926) confrontando il rapporto massa /luminosità nei dintorni del Sole con quello calcolato dai modelli stellari .

Anche Zwicky notò che c'era qualcosa che non andava...

Le prime prove dinamiche dell'esistenza di materia invisibile o "oscura" risalgono agli anni '30. L'astronomo Fritz Zwicky (1933), del California Institution of Technology, a cui si devono molti sviluppi di fondamentale importanza nell'astrofisica, esaminò gli elementi dell'ammasso di galassie (456 elementi) della costellazione della Chioma di Berenice, situato a 350 di milioni di anni luce da noi. Studiò i movimenti delle singole galassie componenti l'ammasso paragonandoli con la legge di Hubble, nota dal 1929. Con sua sorpresa notò che gli spostamenti verso il rosso dovuti alla recessione delle galassie variavano di molto fra i vari componenti dell'ammasso: vi erano galassie con velocità relative notevoli.

Quando stimò la massa totale del sistema sommando il materiale galattico luminoso, trovò qualcosa di inaspettato: le singole galassie avevano una velocità maggiore della presumibile velocità di fuga dovuta all'attrazione gravitazionale dell'ammasso stesso.

Dalla fisica sappiamo che la velocità di fuga è quel valore della velocità che permette ad una massa in moto di sfuggire al campo gravitazionale a cui è legata. Può essere calcolata ipotizzando che un corpo, sparato come un proiettile, parta da una velocità iniziale (che poi sarà la sua velocità di fuga) ed arrivi a distanza infinita con velocità nulla. Utilizzando il principio di conservazione dell'energia, uguagliamo la misura dell'energia totale iniziale (energia potenziale sottratta a quella cinetica) e finale (zero, per le supposizioni fatte). Si ottiene una formula esatta per un centro di massa unico, deve invece subire variazioni differenziali per un massa diffusa delle galassie. Zwicky misurò infatti che la velocità del moto di ben otto galassie era di 1019 ± 360 km/s (una buona approssimazione del valore moderno di 1082 km/s ottenuto da Colless e Dunn nel 1996) paragonata ad una velocità di fuga di soli 706 ± 267 km/s.

L'ammasso della Chioma avrebbe dovuto non essere stabile eppure esso è un gruppo di galassie situato in una zona compresa fra duecento e quattrocento milioni di anni luce dalla Terra, il quale dà l'impressione di essere ben compatto e "duraturo".

Secondo i dati elaborati da Zwicky i suoi componenti avrebbero dovuto disperdersi in poco tempo. Poiché la velocità di fuga dipende dalla massa del sistema che genera il campo gravitazionale, Zwicky (1937) dovette ammettere che l'ammasso della Chioma deve necessariamente contenere più materia rispetto alla semplice materia luminosa, pena negare la stabilità dell'ammasso stesso. Per una velocità di fuga di 1000 km/s la densità media dell'ammasso della Chioma sarebbe dovuta essere 400 volte maggiore di quella derivata dalla sola materia luminosa. Introducendo più massa la velocità di fuga aumenta e le velocità delle singole galassie rientrano in questo nuovo limite.

Bisogna considerare una grande imprecisione dovuta alla costante di Hubble (la quale è poco conosciuta ancora oggi, figuriamoci a soli 4 anni dalla sua

scoperta!), ma il dato di Zwicky (1933) resta significativo in quanto per la prima volta, trovò incongruenze di carattere gravitazionale fra la materia osservate e i suoi effetti. Dati dello stesso tipo furono raccolti, Smith (1936) trovò che l'ammasso della Vergine (l'ammasso di galassie più vicino al nostro Gruppo Locale) avrebbe dovuto possedere una massa ancora maggiore di quelle di Zwicky.

Scrive lo stesso Zwicky (1933): "Se questa superdensità sarà confermata arriveremo alla sconvolgente conclusione che nell'ammasso della Chioma la materia oscura è presente con una densità molto maggiore rispetto alla materia luminosa. Da queste considerazioni segue che la grande velocità di dispersione nella Chioma (e in altri ammassi di galassie) rappresenta un problema irrisolto".

CAPITOLO 1

MATERIA OSCURA NELLE GALASSIE

1.1 La materia oscura esiste davvero! Quanta materia luminosa c'è? Il peso della luce

Per scoprire come finirà l'Universo occorre pesarlo. La modalità umana di affacciarsi al cielo è l'osservazione. E noi osserviamo la luce, non la massa. Per stimare la densità di materia nell'Universo dobbiamo operare qualche conversione teorica, ipotizzando che una data quantità di luce sia emessa da una corrispettiva quantità di materia. Quanto più accurata sarà questa conversione, tanto migliore sarà la stima del peso dell'Universo che effettueremo. Occorre quindi misurare la luce, e poi operarne la conversione in massa.

La prima parte del compito, la misurazione, sembrerebbe la più semplice. Infatti, per capire quanto potente è l'emissione reale della fonte luminosa rispetto a quella che ci appare dobbiamo conoscere la distanza di questa da noi osservatori. Inoltre, supponendo che la luce si diffonda uniformemente in tutte le direzioni (ma già sappiamo, grazie alla relatività, che non è proprio così) possiamo calcolare la potenza totale emessa, basandoci sul fatto che

l'intensità diminuisce in ragione del quadrato della distanza. Interi libri sono stati dedicati al problema della distanza. Se accettiamo la legge di Hubble, possiamo arrivare alla distanza di galassie lontane misurandone il Red Shift, grazie all'effetto Doppler. La costante di Hubble è conosciuta con una certa incertezza. Esprimiamo questa incertezza col termine h , da moltiplicare per un valore fissato di riferimento H_0 della costante. Questa tecnica viene integrata con una certa conoscenza che abbiamo accumulato sulle stelle: osservandone il colore, la classe spettrale è possibile localizzare la stella nel diagramma HR. Risaliamo quindi, almeno in modo approssimativo alla dimensione delle stelle, e quindi alla loro emissione luminosa intrinseca.

Gli astronomi riescono quindi a determinare le masse e le età relative delle stelle del diagramma HR. Ciò ci permette di valutare la "massa" in base alla luminosità per quanto riguarda le stelle. Anche per le Galassie possediamo una certa classificazione in base alla luminosità e quindi alla materia luminosa contenuta.

Dobbiamo però aggiungere un altro componente alla materia luminosa... Le stelle si formano per aggregazione di gas diffuso negli spazi cosmici. Questo gas può talvolta essere talmente caldo da emettere luce. Mettiamo ora tutto insieme: arriviamo finalmente ad una stima della materia luminosa visibile in date lunghezze d'onda. Pare che in un cubo di un milione di parsec (circa tre milioni di anni luce) di lato ci sia un "equivalente di luce medio" di circa 200 h milioni di stelle luminose quanto il Sole. La stima, come vediamo, dipende da h , il fattore di incertezza sulla nostra conoscenza delle distanze nell'Universo. Essendo la stima in funzione della luminosità solare, dobbiamo sapere quanta massa in media in una galassia emette una luminosità pari a quella solare. Risulta, data l'influenza del gas cosmico, che la massa media necessaria ad emettere la luce solare è maggiore della massa solare.

Più precisamente l'equivalente solare di luce media è prodotto da circa 25 h masse solari di materiale galattico. La densità di massa luminosa è pari a 4,5 h miliardi di masse solari per megaparsec cubico. Abbiamo ottenuto un limite inferiore di massa. La massa è almeno questa, ma come vedremo, è molto molto maggiore.

1.2 Le curve di rotazione delle galassie Materia oscura nelle galassie a spirale

L'analisi delle curve di rotazione, di cui discuterò ora, è stata ed è ancora la vera grande prova a supporto dell'esistenza della materia oscura. Con queste scoperte gli astronomi hanno dovuto ammetterne l'esistenza, o almeno cercare di giustificarne l'inesistenza.

Gli elementi di un sistema in rotazione intorno ad una massa (una galassia, un sistema planetario etc...) possono essere disposti su un grafico che riporti sull'asse delle ascisse la distanza dal centro di massa attorno al quale sono in rotazione.

La teoria della gravitazione classica di Newton e le leggi di Keplero prevedono una curva con un andamento decrescente. Uguagliando infatti la forza gravitazionale della legge di Newton e la forza centripeta si ha:

$$G M m/d^2 = mv^2/d \quad (1.2.1)$$

da cui $v = (GM)^{1/2} d^{-1/2}$

essendo G la costante di gravitazione universale ed M la massa del corpo attorno al quale ruotano gli elementi di massa m , d la distanza di m da M . Ponendo $d=x$ (variabile indipendente) e $v=y$ (variabile dipendente) la curva data avrà un andamento $y=x^{-1/2}$. Secondo le attuali teorie gravitazionali quindi, le curve di rotazione degli elementi di un sistema planetario o di una galassia dovrebbero avere questo andamento.

Applichiamo ora questi principi al sistema solare. Vediamo che i risultati che avevamo previsto teoricamente per gli 8 pianeti in orbita attorno al Sole sono pienamente verificati.

Una volta trovata la curva di rotazione siamo in grado, dalle formule sopra elencate e dalla terza legge di Keplero di risalire a M , ovvero la massa maggiore (nel Sistema Solare il Sole, in una galassia il nucleo). Le curve di rotazione ci permettono quindi di pesare l'Universo: non abbiamo più bisogno di affidarci a stime visive, possiamo usare la gravità che scandaglia tutta la materia dotata di massa. I guai cominciarono, appunto, quando gli astronomi cercarono di disegnare le curve di rotazione di una galassia. Una delle prime curve di rotazione tracciata fu quella della Via Lattea. Come ormai è noto, la Via Lattea è una galassia a spirale barrata comune, ovvero del tipo di galassie che formano il 70% dei sistemi dell'Universo. Sappiamo che il Sole, ed il nostro sistema solare, orbita, in uno di questi bracci a spirale, attorno al nucleo della galassia (in cui è contenuto almeno un buco nero). Misurando la velocità del Sole attorno al nucleo della Galassia, possiamo, tramite una curva di rotazione, stimare la massa della Galassia stessa. Troviamo che la massa inclusa nella rotazione solare è dell'ordine di $10^{11}M$ (masse solari).

Anche le misure tramite la luminosità, illustrate nel paragrafo precedente, suggeriscono che nella nostra galassia ci sia più o meno quella massa.

Ora, misurando le velocità di oggetti più lontani in orbita attorno alla galassia (come galassie più piccole, o ammassi globulari) mi aspetto di trovarli sulla curva ottenuta tramite le misurazioni sul Sole.

La curva di rotazione (CR) galattica si ricava dall'analisi delle velocità radiali di grandi nubi di monossido di Carbonio (CO), nebulose planetarie (PNs), Cefeidi in orbita attorno al nucleo della Via Lattea.

Essa è nota con una certa precisione solo fino a 15 kpc dal centro. Dopo il raggiungimento di un massimo attorno a 5 kpc dal centro, la CR galattica si mantiene approssimativamente piatta per distanze superiori (Fich e Tremaine 1991, Amaral et al. 1996).

I dati raccolti non si conciliano assolutamente con le predizioni newtoniane per le quali la data curva di rotazione dipende da una distribuzione di massa tutta concentrata nel disco galattico. O abbiamo sbagliato teoria gravitazionale, oppure la massa della Galassia non può essere solo quella, e soprattutto, non è concentrata nella galassia stessa!

La velocità orbitale di questi oggetti rimane pressapoco costante a distanze quasi maggiori di dieci volte quella del Sole dal centro galattico.

A queste distanze la densità delle stelle è scesa quasi a zero.

Gli astronomi hanno tracciato le curve di moltissime altre galassie a spirale

ritrovando gli stessi risultati (vediamo in esempio NGC 2403). Per le galassie a spirale ci si aspetta un rapido aumento della velocità, finché le distanze si mantengono all'interno del disco galattico, e poi una diminuzione con l'andamento prima indicato. Le posizioni suggeriscono quindi la presenza di massa dove non ci sono stelle, massa dove i telescopi non vedono nulla!

Le esperienze di Zwicky vennero rianalizzate: nacque ufficialmente la materia oscura. Queste analisi portano a concludere che nella regione della nostra galassia analizzata si può inferire l'esistenza di una quantità di massa almeno dieci volte maggiore della massa associata a tutta la materia visibile nella Galassia.

Non solo: questa massa è distribuita sino a distanze almeno dieci volte maggiori di quelle occupate dalla materia visibile. Il risultato è sconcertante.

1.3 Aloni galattici

Possibili distribuzioni di materia oscura e Polar-Ring Galaxy

Sicuri che nei dintorni delle galassie a spirale la materia oscura esiste, gli astronomi cominciarono ad ipotizzarne la distribuzione.

Quella progressione quasi lineare mostrata dalle curve di rotazione è quanto mai scomoda. Vediamo come potrebbe essere spiegata. Facciamo un'ipotesi riportata da L. Krauss. Supponiamo che nel nostro Sistema Solare vi sia una quantità considerevole di polvere. Disegnando la curva di rotazione per il nostro sistema planetario non possiamo non tenerne conto.

Supponiamo inoltre che questa polvere diminuisca di densità rapidamente, in funzione del quadrato della distanza. Che cosa potremmo prevedere per la velocità di rivoluzione di pianeti?

La relazione di Newton sarebbe ovviamente ancora valida, ma ora dovremmo utilizzare in questa relazione non solamente la massa del Sole, bensì la massa del Sole più la polvere contenuta all'interno dell'orbita di ogni pianeta che analizziamo.

Ipotizziamo persino, per semplicità, che la polvere sia talmente tanta da rendere trascurabile la massa del Sole. Proviamo a tracciare la curva di rotazione.

Se la densità della polvere diminuisce in funzione del quadrato della distanza, è semplice mostrare che la massa totale della polvere racchiusa all'interno di ogni sfera incentrata su questa distribuzione continuerà ad aumentare in proporzione diretta alla distanza dal centro (certo: la densità è un rapporto fra massa e volume, se questa diminuisce in funzione di una distanza al quadrato, velocità lineare costante indipendentemente dalla distanza. Nella formula della velocità esposta nel paragrafo precedente, infatti se la massa è esprimibile in funzione della distanza al primo grado, queste si elidono lasciando solamente delle costanti all'interno della radice quadrata).

$$v = \frac{\text{Cost} \times d^{1/2}}{d^{1/2}} \quad (1.3.1)$$

Questo esempio scelto non a caso, potrebbe giustificare quelle curve di rotazione rilevate per la galassie a spirale. Ovviamente in una galassia non è presente così tanta polvere o materiale interstellare da giustificare un cambio così vistoso della curva.

La massa mancante, o materia oscura, che sappiamo essere presente nelle vicinanze (e non solo tanto vicino) di un disco galattico potrebbe disporsi in funzione del quadrato della distanza dal nucleo della galassia.

Un'analisi quantitativa molto esauriente dei metodi per determinare la quantità di materia oscura nel disco e nell'alone galattico, nonché nelle galassie a spirale, in quelle ellittiche e in quelle nane, è stata fatta nella tesi di laurea di Marina Zamagni, anno accademico 1996-97 sotto la guida dei Prof. Alessandro Braccesi e Luca Ciotti.

1.4 Le ultime novita' sulla materia oscura

Tracce di una particella leggera di materia oscura sono state trovate nel bagliore dei raggi gamma nel cuore della Via Lattea. Le tracce della massa apparente della particella con segnali provvisori di materia oscura sono state ottenute in due esperimenti diretti per la rilevazione effettuati in laboratorio, ma i ricercatori avvertono che altre fonti convenzionali, come le pulsar, potrebbero in realtà essere responsabili della luce dei raggi gamma.

La Via Lattea si pensa che potrebbe essere inondata di materia oscura, una sostanza non ancora identificata, che costituisce oltre l'80% della materia dell'Universo. Anche se la materia oscura è stata rilevata dalla sua forza gravitazionale su stelle e galassie, molte delle sue proprietà fondamentali sono ancora sconosciute.

Un modo per studiare la materia oscura è quello di cercare la luce dei raggi gamma prodotti quando le particelle si incontrano e si annientano l'una con l'altra, producendo una cascata di altre particelle e radiazioni.

Dal momento che le particelle di materia oscura interagiscono raramente, il posto migliore per cercare questa luce è al centro di galassie, dove le concentrazioni di particelle di materia oscura sono più fitte.

"Il centro della Via Lattea sembra essere acceso con la luce dalla distruzione della materia oscura" dice Dan Hooper del Fermi National Accelerator Laboratory a Batavia, Illinois, e Lisa Goodenough della New York University a New York City.

In una nuova analisi, dopo due anni di dati raccolti dal telescopio orbitante della NASA Fermi, la squadra ha trovato la prova di un eccesso di luce nei raggi gamma emessi dall'interno di una galassia distante 100 milioni di anni luce.

Gli scienziati affermano che la luce è troppo luminosa, energica, per essere spiegata soltanto dalle fonti note di raggi gamma.

"Siamo ad un punto dove abbiamo un chiaro segnale di quello che noi pensiamo possa essere la materia oscura, senza alcuna spiegazione alternativa", afferma Hooper.

Questa non è la prima volta che la luce dei raggi gamma è stata attribuita alla materia oscura. Il satellite europeo INTEGRAL, che è stato lanciato nel 2002, ha anche rivelato inaspettatamente la brillante radiazione di raggi gamma proveniente dal centro galattico.

I raggi gamma hanno avuto un eccesso di energia di 511 keV. Che potrebbe essere stato prodotto dall'annichilazione tra gli elettroni e le loro controparti di antimateria, i positroni, che a loro volta potrebbero essersi annichiliti nella materia oscura. Ma il bagliore si è dimostrato difficile da interpretare e le convenzionali sorgenti astrofisiche come le esplosioni stellari e le stelle di neutroni sono ritenute ancora probabili indiziati.

I raggi gamma nel presunto eccesso di Fermi sono 10.000 volte più potenti e possono derivare dal decadimento di particelle a vita breve, come i leptoni tau, prodotti nelle annichilazioni di materia oscura. Hooper dice che il segnale di Fermi è molto più difficile da spiegare con le sorgenti astronomiche: "Oltre la materia oscura, non conosciamo alcun meccanismo per creare questo segnale".

Analizzando lo spettro dei raggi gamma prodotti dal centro galattico, la squadra ha previsto che la luce verrebbe prodotta da particelle di materia oscura che hanno una massa compresa fra gli 7,3 e i 9,2 GeV, circa 8 volte la massa di un protone.

"Le particelle devono essere comprese tra circa 10 e 1000 GeV in per spiegare l'abbondanza che vediamo oggi" afferma Hooper.

Curiosamente, questa massa corrisponde a quella calcolata dagli esperimenti con le collisioni delle particelle effettuate dagli scienziati. All'inizio di quest'anno, l'esperimento del Coherent Neutrino Technology (Cogent), con sede nella miniera di ferro Soudan in Minnesota, ha mostrato che la particella di materia oscura avrebbe proprio una massa compresa fra 7 e 11 GeV.

Una particella di materia oscura in un intervallo analogo potrebbe essere responsabile anche per il segnale registrato da DAMA, un esperimento di materia oscura progettato sotto una montagna presso il Gran Sasso d'Italia. Per anni, DAMA ha registrato un segnale annuale che è più forte nel mese di giugno rispetto a dicembre, in coerenza con l'idea dei fisici, del segnale che si aspetterebbero se il Sistema Solare si stesse muovendo in una nube di particelle di materia oscura.

Queste evidenze mostrano realmente tracce di materia oscura? Simona Murgia dell'Università di Stanford in California, dice che è troppo presto per dirlo. La

collaborazione ufficiale con FERMI ha anche riportato la prova sperimentale di un eccesso di radiazioni di raggi gamma verso il centro della galassia, ma la fonte non è chiara.

Per determinare se la Via Lattea è incandescente con la luce creata quando le particelle di materia oscura sono annientate, gli astrofisici devono prima eliminare tutte le fonti conosciute di raggi gamma per vedere se esiste una fonte extra per le radiazioni.

Ma la stima del contributo di sorgenti astrofisiche convenzionali è difficile. La galassia interiore è il più luminosa dei raggi gamma nella regione del cielo, dice Stefano Profumo della University of California, Santa Cruz. Le abbondanti particelle cariche che colpiscono i fotoni e il gas interstellare producono un forte bagliore diffuso di raggi gamma. Le singole fonti, come le pulsar e resti di supernova, possono anche brillare con raggi gamma.

"Siamo lontani dal punto in cui l'annichilazione della materia oscura è l'unica spiegazione", dice Profumo.

Hooper ammette che il segnale non può essere preso come un rilevamento definitivo della materia oscura.

"Per un caso davvero interessante, quello che ci serve sarebbero segnali indipendenti, ma legati da esperimenti che puntano tutti ad una soluzione comune", dice Jonathan Feng teorico della University of California, Irvine. "Non credo ancora che ci siamo, ma visti i progressi attesi sperimentalmente nei prossimi mesi e anni, andiamo incontro ai tempi entusiasmanti per l'identificazione della materia oscura."

Come studiare un filamento di materia oscura

Un gruppo di scienziati è riuscito a identificare un filamento della materia oscura che permea l'Universo, analizzando gli effetti che il suo campo gravitazionale produce sulla radiazione luminosa

Un filamento di materia oscura è stato portato, paradossalmente, alla luce. Ad annunciarlo è un gruppo di ricercatori guidati da Jörg Dietrich della University Observatory Munich e della University of Michigan. Come è stato possibile osservare l'invisibile? Analizzando i deboli segnali gravitazionali prodotti dal filamento stesso, quello che connette il superammasso Abell 222/223 come spiegano gli scienziati su Nature.

La materia oscura infatti non è, per definizione, osservabile: non emette cioè radiazioni elettromagnetiche, ma è comunque in grado di esercitare degli effetti gravitazionali sulla luce delle galassie (che invece si possono vedere). Indizio che ne proverebbe la sua esistenza (sebbene la temperatura della stessa materia oscura rimanga ancora un mistero in astronomia). Questa materia oscura sarebbe presente nell'Universo sotto forma di una sorta di scheletro, una rete filamentosa che connette grandi strutture massive. In questo modello si crede che gli ammassi galattici si trovino ai punti di intersezione dei filamenti - che conterebbero più della metà di tutta la materia

- sebbene queste strutture non siano mai state osservate davvero.

Ma con il lavoro del team di Dietrich qualcosa invece comincerebbe a vedersi: in particolare quello messo in evidenza è il filamento che connette i due componenti principali del superammasso Abell 222/223. Scovarlo però non è stato così semplice.

Per farlo i ricercatori sono ricorsi a una speciale tecnica usata in astronomia, quella delle lenti gravitazionali. In pratica si tratta di osservare indirettamente un oggetto, analizzando cioè come il suo campo gravitazionale faccia deviare la luce emessa dalle galassie. E dal momento che anche la materia oscura, pur invisibile, ha un campo gravitazionale, la lente gravitazionale può servire come un valido strumento per portarla alla luce. Gli scienziati hanno quindi analizzato la distorsione luminosa di oltre 40mila galassie lontane e sono riusciti così a osservare il filamento che connette i due ammassi di galassie Abell 222 e Abell 223, come mostrato nell'immagine (dove l'ombreggiatura blu indica la densità della materia).

Studiando le caratteristiche della luce analizzata, i ricercatori sono riusciti a calcolare forma e dimensioni del filamento, individuando una struttura con una massa compresa tra le 6.5×10^{13} e le 9.8×10^{13} volte quella del Sole. Le analisi effettuate con il telescopio spaziale XMM-Newton hanno inoltre evidenziato come il filamento emetta anche raggi X, indicando la presenza di una piccola parte di materia visibile costituita di gas caldo.

Come ha dichiarato all'Inaf Massimo Meneghetti dell' Osservatorio Astronomico di Bologna la scoperta potrebbe avere importanti ripercussioni nel mondo scientifico: "Osservare questi filamenti di materia oscura attorno agli ammassi può rappresentare un'ulteriore prova del fatto che abbiamo ben compreso come si formano le strutture cosmiche".

1.5 La materia oscura esiste: scoperta enorme "ragnatela"

Se la si potesse vedere assomiglierebbe a un'immensa ragnatela che da un capo all'altro occuperebbe una porzione di cielo di 270 milioni di anni luce (un anno luce corrisponde a circa 9 mila miliardi di chilometri): ma nessuno la può vedere, perché si tratta di "materia oscura", una materia che si sa che esiste, ma di cui non si conosce la composizione, perché risulta invisibile a ogni tipo di lunghezza d'onda. Gli astronomi la cercano da anni, ne ipotizzano la composizione, ma nulla al momento lascia trapelare di cosa sia realmente fatta. E' per questo che la sua esistenza è stata addirittura messa in dubbio. Ma ora c'è la conferma della sua realtà.

Il lavoro è stato pubblicato sulla rivista *Astronomy and Astrophysics* da un gruppo di ricerca canadese e francese coordinato dall'Istituto di astrofisica di Parigi. Spiega Ludovic Van Waerbeke, dell'Università della British Columbia: "Il risultato è senza precedenti, una pietra miliare per l'astronomia". Avere la

certezza che esiste la materia oscura significa infatti, lavorare in una certa direzione per comprendere la storia e il destino dell'Universo.

Ma come è possibile aver visto la "materia oscura" se questa risulta invisibile? Gli astronomi hanno usato un trucco che offre la natura.

Sfruttando la fotocamera digitale più grande del mondo di cui è dotato il telescopio Canada-France-Hawaii Telescope (Cfht) posto sul monte Mauna Kea nelle Hawaii, i ricercatori hanno analizzato migliaia di immagini per individuare gli "effetti gravitazionali" della materia oscura sulla luce visibile, un fenomeno chiamato effetto della "lente gravitazionale debole". In altre parole la luce che arriva sulla Terra da galassie lontane, mentre viaggia nello spazio, è deviata dalla "materia oscura" a causa della sua massa.

Confrontando migliaia di immagini è possibile posizionare in tal modo la sua distribuzione nello spazio e verificarne la quantità, ossia proprio la sua massa.

Con questa scoperta giunge la conferma di ciò che si ipotizzava da tempo: la materia visibile che compone l'Universo - tutti i pianeti, le stelle e gli oltre 120 miliardi di galassie - costituiscono solo il 5%. Il resto, il 95%, non si sa cosa sia, ci è "oscuro". Il 68% di questa "oscurità" è "energia oscura", il 27% è la materia oscura di cui gli astronomi canadesi e francesi hanno scoperto l'esistenza.

I dubbi che l'Universo non sia composto solo da ciò che vediamo emersero attorno agli anni '70, quando gli astronomi cominciarono a notare che c'era qualcosa nel nostro Universo che non filava esattamente con le leggi della fisica. Scoprirono, infatti, che applicando le leggi della forza di gravità note fino ad allora, le galassie a spirali, quelle cioè che hanno forma come la Via Lattea, avrebbero dovuto ruotare a una velocità tale che si sarebbero dovute sbriciolare già da tempo, spargendo le stelle per ogni dove. Se si considerano, infatti, gli astri che stanno nelle parti più esterne delle galassie, che si muovono a una velocità di circa 150-200 chilometri al secondo, e si ipotizza che le galassie stesse siano composte solo dalla materia che vediamo, le stelle in questione le avrebbero già dovute abbandonare da tempo. La loro forza centrifuga, infatti, avrebbe dovuto prendere il sopravvento sulla gravità. Ma questo non succede.

Così gli astronomi si chiesero se c'era qualcosa che impediva al fenomeno di verificarsi, un qualcosa che tratteneva la materia visibile impedendole di allontanarsi. Fu così che riscoprirono quanto aveva già ipotizzato dall'astronomo Fritz Zwicky (1933). Questi, studiando il comportamento degli ammassi di galassie della Vergine e della Chioma, ipotizzò che per spiegare i movimenti delle stelle che si vedevano vi doveva essere 400 volte più materia rispetto a quella che si poteva desumere dalla luce delle stelle visibili. Zwicky chiamò quella massa mancante "materia oscura" e nessuna definizione poteva calzare meglio di quella.

Ma la domanda d'obbligo con le quali si scontrano gli astronomi è ovvia: cos'è questa materia oscura e quanta ce n'è in più rispetto alla materia

visibile? Le ipotesi si sprecano, anche se molte si stanno perdendo per strada, lasciando spazio soprattutto a quelle che vogliono la "materia oscura" composta da "assioni" o da "neutralini", particelle subatomiche la cui esistenza è ancora tutta da dimostrare.

Altre ipotesi sostengono che, almeno in parte, la materia oscura potrebbe essere costituita da "nane brune", ossia oggetti che non sono mai diventati vere e proprie stelle per la ridotta quantità di idrogeno di cui sono composte che ha impedito l'innescò delle reazioni nucleari che trasformano l'idrogeno in elio.

Sulla quantità di "materia oscura" è importante conoscere il valore della sua massa, perché esso potrebbe aiutarci a capire il destino dell'Universo.

La grado. Secondo i dati di Clowe e il suo gruppo, aggiornati da Mark Peplow (2013), la materia visibile assomma a solo il 4.9% della massa dell'universo **la** materia oscura corrisponderebbe invece al 26.8% della massa dell'universo. Il restante 68.3% sarebbe composto da «energia oscura» che spiega l'accelerazione dell'espansione dell'universo, ora in atto. Secondo Sean Carroll, cosmologo dell'Università di Chicago, questi dati dimostrano «oltre ogni ragionevole dubbio» l'esistenza della materia oscura.

NEW YORK - Astronomi statunitensi avrebbero provato l'esistenza della «materia oscura», la sostanza invisibile e misteriosa che costituirebbe l'essenziale della massa dell'Universo. Se la scoperta fosse confermata, la storia dell'universo andrebbe riscritta. Doug Clowe, un astronomo dell'Università dell'Arizona, ritiene che questa sia «la prima diretta testimonianza che la materia oscura esista». Insieme ad alcuni suoi colleghi ha pubblicato i risultati in un numero dell'Astrophysical Journal. Utilizzando un insieme di telescopi a terra oltre i satelliti Nasa a raggi X Chandra e il telescopio spaziale Hubble, gli studiosi hanno attentamente seguito l'ammasso 1E0657-56 (noto anche come «ammasso proiettile»), prodotto della collisione avvenuta circa 100 milioni di anni fa tra due ammassi di galassie (l'evento più energetico avvenuto nell'universo dopo il big bang), riscontrando che la maggiore forza gravitazionale dovuta allo scontro si riscontrava in un'area che appariva relativamente sgombra. In pratica lo scontro ha provocato la separazione della materia visibile da quella «invisibile», cioè la materia oscura.

MATERIA OSCURA - Secondo gli astronomi, l'esistenza della materia oscura spiega per esempio il fatto che i bracci delle galassie a spirale non se ne vadano per proprio conto. La presenza di energia oscura Ce n'è così tanta da impedire che esso si espanda per sempre e lo faccia ricadere su se stesso .

GRAVITÀ - L'esistenza della materia oscura è però messa in dubbio da altri scienziati, secondo i quali è la forza dovuta alla gravità a dover essere rivista, in modo particolare negli spazi intergalattici. «Non è detto che anche la legge della gravità debba essere riconsiderata», ha detto Carroll, anche se le attuali

ricerche confermerebbero che le leggi di gravità scoperte da Newton funzionano anche negli ammassi di galassie.

La collaborazione XENON ha recentemente pubblicato nuovi risultati sulla ricerca di materia oscura provenienti dall'analisi di 11 giorni di dati presi tra Ottobre e Novembre 2009 con il rivelatore XENON 100. L'articolo, pubblicato sulla rivista Physical Review Letters, mostra come l'elemento XENON 100 sia attualmente il rivelatore di materia oscura con le migliori prestazioni dal punto di vista del fondo radioattivo, e mette in discussione la possibilità che risultati di altri esperimenti (tra i più recenti quello pubblicato in febbraio dall'esperimento CoGeNT) siano causati da particelle WIMP (Weak Interacting Massive Particles).

Il rivelatore XENON 100 si trova ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN, il più grande e meglio attrezzato laboratorio sotterraneo del mondo. XENON 100 è finanziato dall'ente statunitense NSF (National Science Foundation) e da altre istituzioni europee.

XENON 100 utilizza, per la ricerca della materia oscura, circa 160 kg di Xenon liquido, alla temperatura di -90° C. Lo scopo di questo strumento è rivelare i deboli urti delle particelle di materia oscura con i nuclei di Xenon. Sensibilissimi rivelatori di luce (fotomoltiplicatori), immersi nel liquido, sono in grado di rivelare anche i minimi segnali di luce derivanti da questi urti, e con una tecnica particolare è possibile distinguerli da altri segnali causati dalla radioattività ambientale. Proprio per ridurre al minimo questa fonte di "rumore", XENON 100 si trova nei laboratori INFN, al di sotto dei 1400 metri di roccia di Monte Aquila, nel Parco Nazionale del Gran Sasso. Tale spessore consente di ridurre il flusso della radiazione cosmica di un milione di volte.

Tuttavia, ciò non è ancora sufficiente per raggiungere la sensibilità richiesta da un esperimento di questo tipo. XENON 100 è pertanto ulteriormente schermato da strati di piombo, polietilene e rame, e tutti i materiali scelti per la sua costruzione sono stati accuratamente selezionati per minimizzarne la radioattività. Grazie a questa estrema attenzione è stato possibile raggiungere le prestazioni illustrate nell'articolo pubblicato il 4 maggio 2010.

XENON 100 è in funzione da Ottobre 2009; da Gennaio 2010 è in presa dati "cieca", ovvero i dati non verranno analizzati fino ad una data stabilita. I risultati presentati con l'articolo a Physical Review Letters sono quindi preliminari.

Non mancano modelli teorici e l'unico modo per scegliere quello più valido è procedere secondo il metodo scientifico insegnatoci da Galileo: ovvero effettuare degli esperimenti.

Centinaia di fisici in tutto il mondo hanno raccolto la sfida, e sono impegnati in vari esperimenti dedicati a svelare il mistero.

Per svolgere queste ricerche è però necessario proteggersi, come detto sopra, dalla radioattività ambientale, e in particolare dalla radiazione cosmica, presente dovunque sulla superficie terrestre. Per questo i rivelatori di materia oscura vengono installati in ambienti sotterranei sotto grandi spessori di roccia, che garantiscono un'adeguata riduzione del flusso di raggi cosmici.

Non sorprende quindi che ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN siano presenti ben quattro esperimenti di materia oscura, tutti in presa dati: CRESST, DAMA, WArP e XENON 100. Ognuno di essi utilizza tecniche o materiali diversi e tutti sono in gara per una scoperta che potrebbe rivoluzionare la nostra conoscenza dell'Universo.

L'INFN sta impegnando molte risorse su questo fronte di ricerca. In particolare gli esperimenti DAMA e WArP sono frutto di questo sforzo. DAMA utilizza 250 kg di cristalli di purissimo NaI (ioduro di sodio), mentre WArP utilizza circa 150 kg di Argon liquido (a circa -180°C) e, con una tecnica simile a quella utilizzata da XENON 100, cerca di individuare gli urti della materia oscura con nuclei dell'Argon.

L'esperimento DAMA invece, già da anni osserva un effetto di variazione annuale del suo segnale, indipendente da qualunque modello, in accordo con quanto ci si aspetta dal moto della Terra attraverso l'alone di materia oscura. Sempre il metodo scientifico ci insegna però che ulteriori conferme sperimentali sono necessarie, anche con altri metodi di osservazione.

L'attività di ricerca sulla materia oscura è molto vivace anche in altri laboratori. Tra i risultati più recenti, quello presentato nel febbraio 2010 dall'esperimento CoGeNT, che utilizza cristalli di Germanio e si trova nella miniera di Soudan, nel Minnesota. CoGeNT ha pubblicato un segnale positivo che potrebbe essere compatibile con la scoperta di WIMP di massa relativamente leggera.

Il risultato pubblicato da XENON 100 è particolarmente interessante anche perché sembrerebbe mettere in dubbio la possibilità che CoGeNT abbia osservato urti elastici di WIMP. Anche il segnale di DAMA, se interpretato nello stesso modo, è difficilmente conciliabile con l'attuale risultato di XENON 100. Tuttavia la complessità dell'argomento e le numerose incertezze sperimentali lasciano ancora aperte tutte le ipotesi. Molto lavoro è ancora necessario per chiarire il mistero.

Questo è infatti solo un inizio. Come ricordato prima, l'esperimento WArP avrà interessanti risultati nei prossimi anni, e anche XENON 100 pubblicherà, molto presto, i risultati dell'analisi dei mesi di dati che sta accumulando. Una scoperta potrebbe essere dietro l'angolo e i Laboratori del Gran Sasso ne saranno in ogni caso protagonisti.

Da molte misure si riesce a stimare che nell'Universo vi siano almeno 100 miliardi di galassie e che ciascuna di esse sia in media composta di circa 100 miliardi di stelle!

Questa enorme quantità di materia è in realtà poca cosa quando la si confronta con la materia oscura, sia essa materia oscura "ordinaria" oppure "esotica". Il Telescopio Spaziale Hubble ha mostrato che nel cielo, in una dimensione angolare pari a quella sotto cui è vista la Luna, vi sono milioni di galassie".

L'ammontare nell'Universo di materia ordinaria o *barionica* (cioè costituita di protoni e neutroni), sia visibile che oscura, può essere stimata sulla base della quantità relativa di deuterio e di elio presente oggi e presente circa tre minuti dopo il Big Bang. Se allora vi fosse stata molta materia barionica, le collisioni fra nucleoni prima, e fra nuclei poi, sarebbero state molto probabili nei primi attimi dell'Universo e la frazione di deuterio dovrebbe essere ora molto piccola

perché i nuclei di deuterio danno luogo ad elio; se invece la materia barionica fosse poca, allora la quantità di deuterio dovrebbe essere relativamente più abbondante.

Dalle misure più recenti delle attuali quantità relative di deuterio e di elio, si deduce che la materia barionica presente nell'Universo sia circa solo un settimo di quella necessaria per tenere legate le stelle nelle galassie e le galassie negli ammassi. Con metodi indiretti gli astrofisici hanno inoltre stimato che la materia barionica che non emette luce visibile sia circa 9 volte quella che emette luce visibile.

Di cosa è composta? Si tratta di enormi nubi di gas nei grandi ammassi di galassie, di " buchi neri " provenienti dal collasso di stelle e anche di buchi neri massicci al centro delle galassie , di stelle "morte" (nane bianche, stelle di neutroni), di oggetti di dimensioni planetarie, indicati con il nome generico di MACHO (MAssive Compact Halo Objects), ecc..

Da quanto detto finora, risulta chiara la necessità di ipotizzare l'esistenza di materia oscura non barionica.

Si pensa che l'Universo contenga un gran numero di neutrini, particelle ben note nel campo della fisica delle particelle elementari, che sarebbero stati prodotti nelle prime fasi di vita dell'Universo. Essi sono un po' "particelle fantasma" perché hanno carica elettrica nulla e raramente interagiscono con la materia ordinaria.

Misure di precisione effettuate con acceleratori di particelle hanno mostrato l'esistenza di tre tipi diversi di neutrini.

Gli esperimenti Kamiokande e Superkamiokande in Giappone Macro al Gran Sasso, e Soudan 2 negli Stati Uniti hanno presentato risultati sui cosiddetti "neutrini atmosferici", risultati che suggeriscono fortemente che un neutrino di un tipo può trasformarsi in un neutrino di un altro tipo (oscillazioni dei neutrini); questo può avvenire solo se i neutrini hanno massa non nulla. Si arriva alla stessa conclusione anche per i neutrini provenienti dal sole (esperimenti Homestake negli USA, GALLEX al Gran Sasso, SNO in Canada, ...). La massa stimata per i neutrini è però molto piccola; moltiplicandola per il gran numero di neutrini presenti nell'Universo si ottiene un contributo alla massa totale dell'Universo poco meno della materia visibile.

Il contributo di neutrini dotati di massa non cambia quindi la situazione, tanto più che il loro effetto è ridotto dal fatto che, possedendo una velocità molto prossima a quella della luce, possono giocare un ruolo solo nel tenere legati grandissimi ammassi di galassie, ma non i normali ammassi, né tanto meno le stelle in una galassia. Anche se non è stato possibile rivelarli sperimentalmente, si pensa che la loro energia media sia grande rispetto alla massa e quindi la loro velocità sarebbe circa quella della luce. Si dice che i neutrini costituiscono parte della materia oscura calda.

Sembra inoltre necessario ipotizzare che negli aloni delle galassie vi siano particelle di massa relativamente grande che viaggino con una tipica velocità galattica, di circa un millesimo della velocità della luce (si parla di materia oscura fredda).

I fisici cercano da tempo di produrre tali particelle agli acceleratori di alta energia, ma finora non ne hanno osservate, il che potrebbe implicare che debbano essere molto massive; tali ricerche proseguiranno agli acceleratori futuri aventi energie molto maggiori.

D'altra parte i fisici astroparticellari cercano tali particelle nella radiazione cosmica, utilizzando sofisticati rivelatori dove tali particelle dovrebbero interagire. Data la rarità di queste possibili interazioni occorre ridurre al minimo ogni tipo di fondo, quale quello legato ai raggi cosmici carichi, e alla radioattività ambientale. I rivelatori devono quindi essere localizzati in laboratori sotterranei.

Ma quali potrebbero essere queste fantomatiche particelle massive che viaggiano così lentamente? I fisici teorici ne hanno ipotizzate parecchie.

La più strana è forse il neutralino che sarebbe la particella supersimmetrica elettricamente neutra con massa più bassa. La predizione dell'esistenza di super-particelle (s-particelle) è basata su una possibile simmetria bosone-fermione, che dice che ad ogni particella con spin semintero (come l'elettrone, i quarks, i neutrini, ...) deve corrispondere una s-particella avente spin intero (s-elettrone, s-quark, s-neutrino, ...); analogamente ad ogni particella ordinaria con spin intero (es. il fotone) deve corrispondere una s-particella con spin semintero (es. il fotino). Il candidato più accreditato per spiegare la materia oscura fredda è il neutralino, una s-particella che può essere considerata come un miscuglio di s-particelle che sono partner supersimmetriche del fotone, del bosone Z⁰ e di due bosoni di Higgs.

Un'altra possibilità potrebbe essere costituita dai nucleariti, agglomerati di quarks u, d ed s. Gli ordinari nuclei atomici sono costituiti da protoni e neutroni a loro volta costituiti di quarks u, d. Nei nucleariti non vi sarebbe l'equivalente dei protoni e neutroni, ma i quarks u,d,s, sarebbero liberi di muoversi all'interno di tutto il nuclearite. I nucleariti avrebbero densità più elevata dei nuclei ordinari e sarebbero stabili anche per masse molto più elevate di quelle dei nuclei di uranio.

Un'altra possibilità potrebbe essere costituita da monopoli magnetici, ipotetiche particelle dotate di carica magnetica. Essi possono essere accelerati nel campo magnetico galattico e avere quindi uno spettro di velocità.

Vi sono anche altri candidati: per es. gli assioni, ipotizzati per rimuovere un problema del Modello Standard delle particelle. Gli assioni avrebbero massa piccolissima, ve ne sarebbero tantissimi e avrebbero una velocità di circa un millesimo della velocità della luce; essi vengono cercati tramite rivelatori funzionanti come ricevitori di microonde.

1.6 L'esperimento "Pamela"

L'esperimento Pamela (a cui partecipa un gruppo dei LNF), a bordo di un satellite russo ha osservato nello spazio vicino un'anomala quantità di antimateria che potrebbe essere un segnale dell'esistenza della materia oscura, enigmatica materia che si ipotizza largamente presente nel nostro universo (23 per cento del totale).

Lo studio, pubblicato sulla rivista scientifica Nature, è stato realizzato da un team internazionale coordinato dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Pamela, (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light - nuclei Astrophysics), è frutto di una collaborazione tra l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, l'Agenzia Spaziale Russa e istituti di ricerca russi, con la partecipazione dell'Agenzia Spaziale Italiana e il contributo delle agenzie spaziali e università tedesche e svedesi. Questo strumento, composto da un magnete e da molteplici rivelatori di particelle, orbita da circa tre anni attorno alla Terra, a un'altezza tra 350 e 600 chilometri, per studiare i raggi cosmici e, in particolare, la loro componente di antimateria. I raggi cosmici sono particelle accelerate a velocità vicine a quella della luce, probabilmente in seguito agli effetti di esplosioni di supernove lontane o di altri fenomeni violenti nel cosmo; sono formati soprattutto da protoni, nuclei di atomi di elio, o più pesanti, ed elettroni. Tuttavia, tra le particelle più rare si trovano anche particelle di antimateria - identiche alle particelle di materia ma con carica opposta - e tra queste, in particolare, antielettroni, chiamati anche positroni, e antiprotoni. risultati pubblicati su Nature evidenziano un'anomalia nel rapporto tra il numero di positroni e il numero di elettroni rivelati. Questa abbondanza di positroni può trovare una spiegazione plausibile in un segnale di materia oscura, ma non è da escludere che si tratti di particelle provenienti da pulsar o da altre sorgenti astrofisiche. L'ipotesi è che le particelle di materia oscura presenti nella nostra galassia, interagendo fra loro, si annichilino o decadano, producendo sciami di particelle secondarie di alta energia e, in particolare, coppie protone-antiprotone ed elettrone-positrone che Pamela sta intercettando. "Questi dati, insieme a quelli pubblicati sul rapporto antiprotoni su protoni in febbraio su Physical Review Letters, rappresentano uno dei più importanti contributi di questi ultimi anni alla conoscenza del mistero della materia oscura, permettendo di restringere in modo molto significativo il campo delle ipotesi sulla sua natura", spiega Piergiorgio Picozza dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e Università di Roma Tor Vergata, coordinatore dell'esperimento Pamela. Spaziale Internazionale alla fine del prossimo anno".

Per molto tempo si e' pensato che ogni oggetto presente nel nostro universo.... fosse visibile e che quindi inviasse in tutte le direzioni luce propria (o riflessa a seconda della sua natura), che, raggiunta la Terra, conseguentemente potesse essere rilevata e studiata, cercando di ottenere da essa tutte le informazioni possibili sull'oggetto che la emette, oppure su proprietà generali del Cosmo. Questo è ancora vero, infatti il compito principale dell'astronomo non è solo quello di raccogliere luce, attraverso telescopi sia da terra che dallo spazio, ma è anche, e soprattutto, quello di ottenere da quanto è visibile informazioni su tutto quello che ancora non vediamo e non conosciamo del nostro Universo.

Proprio in seguito all'analisi della luce proveniente dal cosmo in 50 anni di osservazione, oggi sappiamo che più del 90% della materia presente nel cosmo è composta da oggetti o da particelle che non possono essere viste: in altri termini, la maggioranza della materia cosmica non emette luce (o meglio *radiazione*), quindi può essere rilevata solo dagli effetti che essa provoca sulla materia visibile.

Questa "massa mancante" è chiamata **materia oscura**, un nome che tiene conto appunto della sua fondamentale caratteristica: l'invisibilità.

1.7 Perché la materia oscura deve esistere?

Storicamente ci sono due ragioni fondamentali che hanno costretto gli astronomi a ipotizzare l'esistenza di un quantitativo notevole di materia non visibile. Le vediamo relativamente all' "ambiente" cosmico che ha prodotto i fenomeni evidenziati; in entrambi i casi, la nostra conoscenza dei meccanismi di azione della forza gravitazionale impone l'esistenza della materia oscura per poterli spiegare in modo corretto.

Nel cosmo esistono moltissime galassie che nella maggior parte dei casi non si presentano distribuite in modo isolato l'una dalle altre, ma sono disposte in strutture più grandi che ne contengono anche numerose in uno spazio che possiamo definire ristretto, anche se copre distanze inimmaginabili, dell'ordine di centinaia di Mpc. Queste strutture sono gli *ammassi di galassie* e fra un ammasso e l'altro esistono immensi vuoti cosmici che occupano in realtà l'80% dello spazio conosciuto: la struttura della distribuzione della materia visibile si presenta "a nido d'api", dove le galassie sono prevalentemente disposte su piani bidimensionali che separano fra di loro regioni sostanzialmente prive di materia luminosa.

A causa della forza di attrazione gravitazionale, le galassie all'interno di uno stesso ammasso si muovono con una loro propria velocità. Studiando i valori di queste velocità, gli studiosi hanno stabilito che sono troppo alti, di circa un fattore da 10 a 100 volte superiore, rispetto a quelli che si otterrebbero se la massa dell'ammasso fosse solo quella visibile. Ne consegue che deve esistere un quantitativo di materia non visibile, ma "attivo" gravitazionalmente che giustifica quei valori di velocità misurati.

Quelle galassie la cui forma è definita *a spirale* hanno un nucleo centrale molto denso e dei lunghi bracci avvolti intorno ad esso, che seguono il verso di rotazione dell'intera struttura. Ogni oggetto appartenente alla galassia ruota con una sua velocità intorno al centro; il valore di essa dipenderà abbastanza intuitivamente dalla distanza dell'oggetto dal centro della galassia e dalla massa che la costituisce.

Se la nostra comprensione della gravità è corretta, ad una massa galattica più grande corrisponderanno velocità maggiori. Studiando questi valori si trova che le velocità misurate sono troppo grandi per giustificare il quantitativo di

materia luminosa presente nella galassia; ne segue, ancora, che deve esistere un quantitativo notevole di materia "attiva" solo gravitazionalmente che, aumentando la massa galattica, provoca il valore osservato delle velocità degli oggetti presenti.

Chiediamoci:

1.8 Qual è la differenza sostanziale tra "materia oscura" ed "energia oscura"?

C'è sempre una correlazione stretta tra materia ed energia, perché la materia è costituita da una massa e sappiamo per Einstein che la massa è una forma di energia, ma come spiegare la netta separazione?

Una è MATERIA: non si sa di che tipo, ma crea deformazioni nello spazio-tempo identicamente alla materia ordinaria (ad esempio si pensa addirittura che esistano galassie interamente formate solo da materia oscura)

L'altra è ENERGIA: non si sa perché esista e come agisca, ma accelera l'espansione dell'universo.

Appurato che l'ENERGIA oscura concorre alla "massa mancante" e quindi in buona parte concorre agli effetti gravitazionali, la materia oscura è una cosa "reale", cioè prima o poi si riuscirà a vederla. Per esempio, oltre alla materia ordinaria non luminosa, potrebbe essere formata dalla materia WIMP, cioè particelle che interagiscono pochissimo con la materia barionica e solo tramite interazione gravitazionale e forse interazione debole (se si riuscisse a scoprire i gravitoni, questo campo potrebbe subire uno studio che ne dimostri chiaramente le caratteristiche della materia oscura, ma per ora è fantasia visto che non si riescono a rilevare nemmeno le onde gravitazionali).

La MATERIA oscura è tutto quell'insieme di materia ordinaria, energia (anche l'ENERGIA oscura concorre in maniera determinante agli effetti gravitazionali della MATERIA oscura), materia non ordinaria o non ancora rilevata che inevitabilmente causa effetti gravitazionali. La materia oscura per adesso NON si VEDE, ma deve esserci, e prima o poi verrà rilevata con l'affinarsi di strumenti e con la scoperta di nuovi tipi di particelle (ad esempio i partners supersimmetrici, se esistono).

L'ENERGIA oscura, invece, è una possibile SPIEGAZIONE del fatto che è stata notata sperimentalmente l'espansione ACCELERATA del cosmo. Visto che l'universo si sta espandendo sempre più velocemente, deve esserci un "qualcosa" che causa pressione gravitazionale negativa. Cioè, pensa alla forza forte e alla forza elettromagnetica coulombiana tra i protoni di un nucleo. Da una parte c'è una forza molto forte che attira i nucleoni fra loro, ma agisce a corto raggio, dall'altra una forza più debole che tende a farli separare, ma agisce all'infinito. Il risultato è che a distanze nucleari "vince" la forza forte e i nucleoni stanno assieme, ma a distanze più elevate "vince" la forza elettromagnetica e i nucleoni si allontanano. Ritornando al discorso, da una

parte (equivalenza massa energia) l'energia oscura, ammesso che esista, tende a far rallentare l'espansione, dall'altra parte visto che possiede una pressione gravitazionale negativa tende a far espandere il cosmo. Il risultato è che su scala cosmologica la componente espansiva si fa preponderante e l'universo si espande accelerando. Sempre ammesso che questo meccanismo sia davvero così. Cioè, in pratica, per non chiamarla "forza misteriosa che accelera l'universo, ma di cui non ne sappiamo una cippa" l'hanno chiamata ENERGIA oscura.

In minima parte potrebbe essere materia ordinaria in equilibrio termico con l'ambiente circostante, tale per cui i nostri strumenti non riescono a rilevarla tramite elettromagnetismo. Ma in buona parte dovrebbe essere materia esotica (WIMP, e tutte le particelle NON barioniche). Le particelle WIMP (anch'esse non barioniche ovviamente) sembrerebbero le candidate ideali perché dovrebbero interagire SOLO con l'interazione gravitazionale e con l'interazione debole (e quindi NON emettono o assorbono alcuna radiazione elettromagnetica). Interagendo solo con queste due interazioni, sono particelle altamente elusive (probabilmente ancora più elusive dei neutrini, che già si conoscono ed è un miracolo riuscire a farne interagire uno con la materia ordinaria) e quindi, possedendo sezioni d'urto pari a frazioni di yoctobarn sono talmente poco interagenti con la materia barionica che è DIFFICILISSIMO (altamente improbabile) rilevarne qualcuna.

1.9 Quanta materia oscura esiste?

Secondo la teoria della Relatività Generale di Einstein, che è oggi la teoria fondamentale attraverso la quale spieghiamo l' "aspetto" del nostro Universo fino alle distanze più lontane, esiste una quantitativo di materia prestabilito all'interno del volume cosmico, detto *densità critica*, che fa da discriminante fra le varie forme del Cosmo e il suo possibile futuro evolutivo. E' allora estremamente importante valutare (anche se non è affatto immediato, perché non basta "pesare" la materia che vediamo) la massa totale dell'Universo per conoscere se essa è maggiore, uguale o minore del quantitativo fissato dalle equazioni della relatività.

Per questo confronto, gli scienziati usano un numero fondamentale, detto *parametro di densità* (Ω), dato dal rapporto fra il quantitativo di materia reale misurabile all'interno dell'Universo e il quantitativo "critico" definito da Einstein nelle sue equazioni.

Se Ω è uguale a 1, allora la materia presente nel cosmo è esattamente uguale alla quantità prevista dalla relatività generale e la gravitazione fra le strutture permette una continua espansione dello spazio così come accade oggi e l'Universo è detto *piatto*; se Ω è minore di 1 significa che la quantità totale di materia non è sufficiente per permettere alla forza di gravità di agire fra le strutture e quindi il suo destino è un'espansione eterna, l'Universo è allora *aperto*; se Ω è maggiore di 1, vale il discorso inverso, la massa totale cosmica presente è sufficiente ad innescare (in futuro) il meccanismo del

collasso gravitazionale fino a ritornare ad una situazione analoga a quella del Big Bang iniziale (*Big Crunch*) e l'Universo è *chiuso*.

I fisici teorici prediligono un valore di $\Omega = 1$, per una serie di ragioni che sono da ricercare nei modelli di formazione ed evoluzione del cosmo oggi più accreditati. Infatti, le conseguenze di un valore $\Omega = 1$ sono che l'Universo è piatto e la geometria che lo descrive è quella euclidea. Tenendo presente che alcune considerazioni teoriche e alcuni studi su dati osservativi e ultimamente i risultati di Boomerang sembra confermino questo valore, è necessario che i contributi a Ω provenienti dai diversi "tipi" di materia cosmica esistenti diano, sommati tra loro, proprio 1.

Misurando il contributo al parametro di densità dato dalla materia luminosa, e quindi visibile, si ottiene $\Omega_{\text{mat.}} = 0.05$, che, come si vede, è un valore decisamente al di sotto della soglia data da 1. Allora un quantitativo cospicuo di materia deve essere invisibile; in realtà non sembra che ci siano evidenze sperimentali che giustifichino un valore di molto superiore a $\Omega_{\text{mat.oscura}} \sim 0.35$. Il restante 70% di massa sembra sia costituito da quella che alcuni scienziati chiamano *energia oscura* forse dovuta alla presenza della *costante cosmologica Lambda*, un famoso numero introdotto da Einstein nelle sue equazioni per ovviare ad un "inconveniente" (allora di difficilissima gestione) prima che Hubble scoprisse l'espansione dell'Universo.

La costante cosmologica dal punto di vista fisico è infatti una forza che "bilancia" la forza di gravità e, data la sua origine misteriosa, da quando è comparsa l'espansione dell'Universo lo scopo principale dei fisici è stato quello di dimostrare che sia uguale a 0. Il problema è che recentemente ci sono prove abbastanza convincenti (per, esempio lo studio delle esplosioni di quelle stelle denominate Supernovae di tipo Ia) del fatto che questo numero non sia nullo, ma che anzi contribuisca al valore del parametro di densità per un fattore dell'ordine di 0.6, 0.7. Esattamente quanto manca per raggiungere $\Omega = 1$.

1.10 Dove si trova la materia oscura?

La maggior parte degli astronomi è concorde nel ritenere che esiste materia oscura intorno ai nuclei delle galassie, in un alone che si estende per circa il doppio delle sue dimensioni visibili. Questo accade per esempio anche nella nostra galassia, la Via Lattea, dove le Nubi di Magellano, due nostre galassie satellite di forma ellittica visibili nell'Emisfero Sud, hanno un moto influenzato dalla presenza dell'alone di materia oscura, tanto che è possibile ritenere che esso si estenda per oltre 30000 anni luce al di là di esse.

In generale possiamo dire che dove c'è materia visibile, c'è anche un certo quantitativo di materia oscura. Il problema è che se ci fossero sistemi celesti dove sia presente soltanto materia oscura, sarebbe impossibile individuarli direttamente a causa della loro invisibilità; possiamo solo sperare che siano vicini a sistemi visibili in modo da poterne osservare gli effetti su di essi. Ne

consegue che il quantitativo di materia oscura dovuto a questi sistemi ci è del tutto sconosciuto.

1.11 Concetto di materia

Il termine "**materia**" deriva dall'equivalente latino *materia*, ma può essere ricondotto direttamente anche al termine latino *mater*, che significa *madre*. L'etimologia del termine lascia quindi intuire come la materia possa essere considerata il fondamento costituente di tutti i corpi e di tutte le cose: la sostanza prima di cui tutte le altre sostanze sono formate.

In fisica classica, con il termine *materia*, si indica genericamente qualsiasi cosa che abbia massa e che occupi spazio; oppure, alternativamente, la sostanza di cui gli oggetti fisici sono composti, escludendo quindi l'energia, che è dovuta al contributo dei campi di forze.

Questa definizione, sufficiente per la fisica macroscopica, oggetto di studio della meccanica e della termodinamica, non si adatta bene alle moderne teorie nel campo microscopico, proprie della fisica atomica e della subatomica, secondo cui lo spazio occupato da un oggetto è prevalentemente vuoto e l'energia è equivalente alla massa.

In questi ambiti, si può invece adottare la definizione che la materia è costituita da una certa classe di particelle, che sono le più piccole e fondamentali entità fisicamente rilevabili: queste particelle sono dette fermioni e seguono il principio di esclusione di Pauli, il quale stabilisce che non più di un fermione può esistere nello stesso stato quantistico. A causa di questo principio, le particelle che compongono la materia non si trovano tutte allo stato di energia minima e per questa ragione è possibile creare strutture stabili di assemblati di fermioni.

Particelle della classe complementare, dette bosoni, costituiscono invece i campi. Essi possono quindi essere considerati gli agenti che operano gli assemblaggi dei fermioni o le loro modificazioni, interazioni e scambi di energia. Una metafora non del tutto corretta da un punto di vista fisico, ma efficace e intuitiva, vede i fermioni come i mattoncini che costituiscono la materia dell'universo, e i bosoni come le colle o i cementi che li tengono assieme per costituire la realtà fisica.

Definizione teorica

Tutto ciò che occupa spazio e ha massa è conosciuto come materia. In fisica, non c'è un largo consenso per una comune definizione di materia, in parte perché la nozione di "occupare spazio" è mal definita e addirittura inconsistente nel quadro della meccanica quantistica. I fisici non definiscono con precisione cosa si deve intendere per materia, preferendo invece utilizzare e rivolgersi ai concetti più specifici di massa, energia e particelle.

La materia è definita da alcuni fisici come tutto ciò che è composto da fermioni elementari. Questi sono i leptoni, come ad esempio gli elettroni, e i quark, inclusi quelli up e down che costituiscono i protoni e i neutroni. Dato che elettroni, protoni e neutroni si aggregano insieme a costituire atomi, questi fermioni da soli costituiscono tutta la sostanza elementare che forma tutta la materia ordinaria. La proprietà rilevante dei fermioni è che essi hanno spin semi-intero (per esempio $1/2, 3/2, 5/2, \dots$) e quindi devono seguire il principio di esclusione di Pauli, che vieta a due fermioni di occupare lo stesso stato quantistico. Questo sembra corrispondere all'elementare proprietà di impenetrabilità della materia e all'antico concetto di occupazione dello spazio.

Secondo questa visione, non sono materia la luce (costituita da fotoni), i gravitoni e i mesoni (a parte i muoni, tipi di leptoni chiamati con ambiguità mesoni prima che la distinzione fra di loro fosse chiara). Questi hanno spin intero ($0, 1, 2, 3, \dots$), non seguono il principio di esclusione di Pauli e quindi non si può dire che occupino spazio nel senso sopra menzionato. Ciò nonostante hanno tutti energia per cui (in accordo con l'equivalenza relativistica massa-energia) hanno anche massa. Sotto questa definizione esistono perciò particelle che hanno massa, ma senza costituire materia.

La parte principale della massa di protoni e neutroni proviene dall'energia cinetica dei quark e dalla massa dei gluoni (un tipo di bosoni) che li legano, quindi non solamente dai quark stessi. La definizione di materia come formata da fermioni soffre perciò del problema primario che la gran parte della massa (più del 99%) della "materia ordinaria" non è composta da fermioni (quark e leptoni) ma dalla loro energia cinetica e dai bosoni.

1.12 Proprietà della materia

Secondo la visione classica ed intuitiva della materia, tutti gli oggetti solidi occupano uno spazio che non può essere occupato contemporaneamente da un altro oggetto. Ciò significa che la materia occupa uno spazio che non può contemporaneamente essere occupato da un'altra materia, ovvero la materia è *impenetrabile* (principio dell'impenetrabilità).

Se prendiamo un pezzo di gomma, lo misuriamo con una bilancia e otteniamo, ad esempio, una massa di 3 grammi, dividendo la gomma in tanti piccoli pezzi e pesando tali pezzi otterremo sempre 3 grammi. La quantità non è cambiata, in accordo con la legge di conservazione della massa. Secondo questa ipotesi si può quindi affermare che "*la materia ha una massa che non cambia anche se variano la sua forma e il suo volume.*" Su queste basi in passato si è così costruita la definizione secondo cui "*la materia è tutto ciò che occupa uno spazio e ha una massa.*"

La massa inerziale di una certa quantità di materia, ad esempio di un dato oggetto, che una bilancia misura per confronto con un'altra massa, rimane invariata in ogni angolo dell'universo, ed è quindi considerata una proprietà

intrinseca della materia. L'unità con cui si misura la massa inerziale è il chilogrammo.

Viceversa, il peso è una misura della forza di gravità con cui la Terra attira verso di sé un corpo avente una massa gravitazionale; come tale, il peso di un dato corpo cambia a seconda del luogo in cui lo misuriamo - in diversi punti della Terra, nello spazio cosmico o in un altro pianeta. Il peso quindi non è una proprietà intrinseca della materia. Come altre forze statiche, il peso può essere misurato con un dinamometro.

Massa inerziale e massa gravitazionale sono due concetti distinti nella meccanica classica, ma sono state sempre trovate uguali sperimentalmente. È solo con l'avvento della relatività generale che abbiamo una teoria che interpreta la loro identità.

La densità superficiale e volumica di materia nel mondo subatomico è minore che nell'universo macroscopico. Nel mondo degli atomi le masse occupano in generale volumi maggiori (minore densità di volume) e si trovano a distanze maggiori (più bassa densità di superficie) di quelle che separano pianeti, stelle, galassie. Fra i costituenti della materia prevale il vuoto.

La **materia omogenea** ha composizione e proprietà uniformi. Può essere una mistura, come il vetro, un composto chimico come l'acqua, o elementare, come rame puro. La **materia eterogenea**, come per esempio il granito, non ha una composizione definita.

È di fondamentale importanza nella determinazione delle proprietà macroscopiche della materia la conoscenza delle strutture a livello microscopico (ad esempio l'esatta configurazione delle molecole e dei cristalli), la conoscenza delle interazioni e delle forze che agiscono a livello fondamentale unendo fra loro i costituenti fondamentali (come le forze di London e i legami di van der Waals) e la determinazione del comportamento delle singole macrostrutture quando interagiscono fra loro (ad esempio le relazioni solvente - soluto o quelle che sussistono fra i vari microcristalli nelle rocce come il granito).

1.13 Proprietà fondamentali della materia

Quark

I quark sono particelle a spin semi-intero e quindi sono dei fermioni. Hanno un carica elettrica uguale a un terzo di quella dell'elettrone, per quelli di tipo *down*, e uguale invece a meno due terzi per quelli di tipo *up*. I quark hanno anche una carica di colore, che è l'equivalente della carica elettrica per le interazioni deboli. I quark sono anche particelle massive e sono quindi soggette alla forza di gravità.

Proprietà dei Quark[1]

Nom e	Simb olo	Sp in	Caric a elettr ica (e)	Massa (MeV/ c^2)	Massa compara bile a	Antipartic ella	Simbolo dell'antiparticella
Quark di tipo Up							
Up	u	1/2	+ 2/3	1,5 a 3,3	~ 5 elettroni	Antiup	\bar{u}
Char m	c	1/2	+ 2/3	1160 a 1340	~ 1 protoni	Anticharm	\bar{c}
Top	t	1/2	+ 2/3	169.10 0 a 173.30 0	~ 180 protoni o ~ 1 atomo di tungsteno	Antitop	\bar{t}
Quark di tipo Down							
Down	d	1/2	- 1/3	3,5 a 6,0	~ 10 elettroni	Antidown	\bar{d}
Strange	s	1/2	- 1/3	70 a 130	~ 200 elettroni	Antistrang e	\bar{s}
Bottom	b	1/2	- 1/3	4130 a 4370	~ 5 protoni	Antibottom	\bar{b}

1.14 Fasi della materia

Abbiamo per esempio un recipiente di metallo solido contenente azoto liquido, che evapora lentamente nel gas azoto. L'evaporazione è la transizione di fase dallo stato liquido a quello aeriforme.

In risposta a differenti condizioni termodinamiche come la temperatura e la pressione, la materia si presenta in diverse "fasi", le più familiari (perché sperimentate quotidianamente) delle quali sono: **solida, liquida e aeriforme**. Altre fasi includono il plasma, il superfluido e il condensato di Bose-Einstein. Il processo per cui la materia passa da una fase ad un'altra, viene definito transizione di fase, un fenomeno studiato principalmente dalla termodinamica e dalla teoria del caos.

Le fasi sono a volte chiamate stati della materia, ma questo termine può creare confusione con gli stati termodinamici. Per esempio due gas mantenuti a pressioni differenti hanno diversi stati termodinamici, ma lo stesso "stato" di materia.

Solidi

I solidi sono caratterizzati da una tendenza a conservare la loro integrità strutturale e la loro forma, al contrario di ciò che accade per liquidi e gas. Molti solidi, come le rocce, sono caratterizzati da una forte rigidità,

e se le sollecitazioni esterne sono molto alte, tendono a spezzarsi e a rompersi. Altri solidi, come gomma e carta, sono caratterizzati invece da una maggiore flessibilità. I solidi sono di solito composti da **strutture cristalline** o lunghe catene di molecole (ad esempio **polimeri**).

Liquidi

In un liquido, le molecole, pur essendo vicine fra di loro, sono libere di muoversi, ma al contrario dei gas, esistono delle forze più deboli di quelle dei solidi che creano dei legami di breve durata (ad esempio, il legame a idrogeno). I liquidi hanno quindi una coesione e una viscosità, ma non sono rigidi e tendono ad assumere la forma del recipiente che li contiene.

Aeriforme

Un aeriforme è una sostanza composta da piccole molecole separate da grandi spazi e con una debolissima interazione reciproca. Quindi gli aeriformi non offrono alcuna resistenza a cambiare forma, a parte l'inerzia delle molecole di cui è composto.

Materia chimica

La **materia chimica** è la parte dell'universo composta da atomi chimici. Questa parte dell'universo non include la materia e l'energia oscura, buchi neri, stelle a neutroni e varie forme di materia degenerata, che si trova ad esempio in corpi celesti come la nana bianca. Dati recenti del Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), suggeriscono che solo il 4% della massa totale dell'intero universo visibile ai nostri telescopi sia costituita da materia chimica. Circa il 22% è materia oscura, il restante 74% è energia oscura.

La materia che osserviamo è generalmente nella forma di composti chimici, di polimeri, leghe o elementi puri.

1.15 Antimateria

Nelle particelle fisiche e nella chimica quantistica, l'antimateria è composta dalle rispettive antiparticelle che costituiscono la normale materia. Se una particella e la sua antiparticella si incontrano tra loro, le due annichiliscono; si convertono cioè in altre particelle o più spesso in radiazione elettromagnetica di eguale energia in accordo con l'equazione di Einstein $E = mc^2$.

L'antimateria non si trova naturalmente sulla Terra, eccetto quantità piccole e di breve durata (come risultato di decadimenti radioattivi o raggi cosmici). Questo perché l'antimateria che si crea fuori dai confini dei laboratori fisici incontra immediatamente materia ordinaria con cui annichilirsi. Antiparticelle ed altre forme di stabile antimateria (come antiidrogeno) possono essere

create in piccole quantità, ma non abbastanza per fare altro oltre a test delle proprietà teoriche negli acceleratori di particelle.

C'è una considerevole speculazione nella scienza e nei film su come mai l'intero universo sia apparentemente composto da ordinaria materia, sebbene sia possibile che altri posti siano composti interamente da antimateria. Probabili spiegazioni di questi fatti possono arrivare considerando asimmetrie nel comportamento della materia rispetto all'antimateria.

Materia oscura

In cosmologia, effetti a larga scala sembrano indicare la presenza di un incredibile ammontare di materia oscura che non è associata alla radiazione elettromagnetica. La teoria del Big Bang richiede che questa materia abbia energia e massa, ma non è composta né da fermioni elementari né da bosoni. È composta invece da particelle che non sono mai state osservate in laboratorio (forse particelle supersimmetriche).

Materia esotica

La materia esotica è un ipotetico concetto di particelle fisiche. Si riferisce a ogni materia che viola una o più delle classiche condizioni e non è costituita da particelle barioniche note.

Storia del concetto di Materia

Aristotele formulò una delle prime teorie sulla struttura della materia. Nel medioevo e nell'antichità era radicata la convinzione aristotelica che la materia fosse composta da quattro elementi: terra, aria, acqua e fuoco. Ciascuno di questi, avendo un diverso "peso", tende verso il proprio luogo naturale, lasciando al centro dell'universo la terra e l'acqua, facendo invece salire verso l'alto aria e fuoco. Inoltre si credeva che la materia fosse un insieme continuo, privo completamente del vuoto (la natura aborre il vuoto, *horror vacui*). Oggi invece si è scoperto che la materia è al contrario composta per oltre il 99% di vuoto.

Un grossa disputa nella filosofia greca riguardò la possibilità che la materia possa essere divisa indefinitamente in parti sempre più piccole. Contrari a questa ipotesi, gli atomisti erano invece convinti che vi fosse una struttura elementare costituente la materia non ulteriormente divisibile.

1.16 Generalità sulla Materia oscura:

In cosmologia, il termine **materia oscura** indica quella componente di materia che si manifesta attraverso i suoi effetti gravitazionali, ma non è direttamente osservabile.

Il concetto di materia oscura ha senso solo all'interno dell'attuale cosmologia basata sul Big Bang; infatti, non si sa altrimenti spiegare come si siano potute formare le galassie e gli ammassi di galassie in un tempo così breve come quello osservato. Non ci si spiega inoltre come le galassie, oltre a formarsi, si mantengano integre anche se la materia visibile, composta da barioni, non può sviluppare abbastanza gravità per tale scopo. Anche da questa prospettiva il concetto di materia oscura ha senso solo all'interno dell'attuale Modello Standard, che prevede come unica forza cosmologica quella gravitazionale; se il Modello Standard risultasse errato, non si avrebbe necessità di materia oscura, dato che non si ha alcuna evidenza sperimentale se non le violazioni di un modello matematico.

Nonostante dettagliate mappe dell'Universo vicino, che coprono lo spettro elettromagnetico dalle onde radio ai raggi gamma, si è riusciti ad individuare solo il 10% della sua massa, come dichiarato nel 2001 al New York Times da Bruce H. Margon, astronomo all'Università di Washington:

«È una situazione alquanto imbarazzante dover ammettere che non riusciamo a trovare il 90 per cento [della materia] dell'Universo.»

Le più recenti misure indicano che la materia oscura costituisce circa il 23% dell'energia dell'Universo e circa l'85% della massa.

Venne inizialmente indicata come "massa mancante", anche se effettivamente esiste materia, in quanto sono osservabili effetti gravitazionali della sua massa. Tuttavia, questa materia non emette alcuna radiazione elettromagnetica e non risulta pertanto individuabile dagli strumenti di analisi spettroscopica, da cui l'aggettivo "oscura". Il termine massa mancante può essere fuorviante, dato che non è la massa a mancare, ma solo la sua luce.

La materia oscura non va confusa con la diversa ipotesi che va sotto il nome di energia oscura.

Cenni storici

Variazione della materia oscura con la distanza (dati HST)

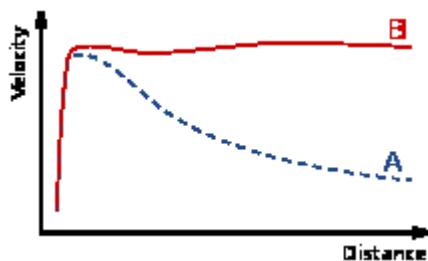
Come abbiamo visto nell'introduzione nel 1933 l'astronomo Fritz Zwicky stava studiando il moto di ammassi di galassie lontani e di grande massa, nella fattispecie l'ammasso della Chioma e quello della Vergine. Zwicky stimò la massa di ogni galassia dell'ammasso basandosi sulla sua luminosità, e sommò tutte le masse galattiche per ottenere la massa totale dell'ammasso. Ottenne poi una seconda stima indipendente della massa totale, basata sulla misura della dispersione delle velocità individuali delle galassie nell'ammasso; questa seconda stima di massa dinamica era molte volte più grande della stima basata sulla luminosità delle galassie.

Sebbene l'evidenza sperimentale ci fosse già ai tempi di Zwicky, fu solo negli anni settanta che gli scienziati iniziarono ad esplorare questa discrepanza in modo sistematico. Fu in quel periodo che l'esistenza della materia oscura iniziò ad essere considerata; l'esistenza di tale materia non avrebbe solo risolto la mancanza di massa negli ammassi di galassie, ma avrebbe avuto conseguenze di ben più larga portata sulla capacità dell'uomo di predire l'evoluzione e il destino dell'Universo stesso.

Nel 2008 grazie allo studio di diversi ricercatori, tra cui francesi e canadesi coordinati dall'Istituto di Astrofisica di Parigi, si ebbe la definitiva scoperta della sua presenza nell'universo difatti utilizzando il telescopio Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT) posto sul monte Mauna Kea nelle Hawaii osservarono migliaia di galassie contenenti Materia oscura

.Presenza della materia oscura che, anche se non è visibile, possiede un campo gravitazionale.

1.17 Evidenze della materia oscura La rotazione delle Galassie



Curva di rotazione della galassia: (A): predetta; (B): osservata.

Un'importante evidenza osservativa della necessità della materia oscura fu fornita dalle curve di rotazione delle galassie spirali. Queste galassie contengono una vasta popolazione di stelle poste su orbite quasi circolari attorno al centro galattico. Come accade per le orbite planetarie, secondo la terza legge di Keplero le stelle con orbite galattiche più grandi dovrebbero avere velocità orbitali minori; ma la terza legge di Keplero è applicabile soltanto a stelle vicine alla periferia di una galassia spirale, poiché presuppone che la massa racchiusa dall'orbita sia costante. Tuttavia gli astronomi hanno condotto osservazioni delle velocità orbitali delle stelle nelle regioni periferiche di un gran numero di galassie spirali, e in nessun caso esse seguono la terza legge di Keplero. Invece di diminuire a grandi raggi, le velocità orbitali rimangono con ottima approssimazione costanti. L'implicazione è che la massa racchiusa da orbite di raggio via via maggiore aumenti, anche per stelle che sono apparentemente vicine al limite della galassia. Sebbene si trovino presso i confini della parte luminosa della galassia, questa ha un profilo di massa che apparentemente continua ben al di là delle regioni occupate dalle stelle.

Considerando le stelle presso la periferia di una galassia spirale, con velocità orbitali osservate normalmente di 200 chilometri al secondo, se la galassia

fosse composta solo dalla materia visibile queste stelle la abbandonerebbero in breve tempo, dato che le loro velocità orbitali sono quattro volte più grandi della velocità di fuga dalla galassia. Dato che non si osservano galassie che si stiano disperdendo in questo modo, al loro interno deve trovarsi della massa di cui non si tiene conto quando si somma la massa di tutte le parti visibili.

1.18 Lente gravitazionale in un gruppo di galassie.

Il 21 agosto 2006 la NASA ha rilasciato un comunicato stampa secondo cui Chandra avrebbe trovato prove dirette dell'esistenza della materia oscura, nello scontro tra due ammassi di galassie. All'inizio del 2007 gli astronomi del Cosmic Evolution Survey e Hubble Space Telescope, utilizzando le informazioni ottenute dal telescopio Hubble e da strumenti a terra, hanno tracciato una mappa della materia oscura rilevando che questa permea l'universo; ove si trova materia visibile deve essere presente anche grande quantità di materia oscura, ma questa è presente anche in zone dove non si trova materia visibile.

Le lenti gravitazionali

Un'altra prova dell'esistenza della materia oscura è data dalle lenti gravitazionali. La massa visibile risulta insufficiente per creare una lente gravitazionale, per cui si prefigura la presenza di massicce quantità di materia oscura, ottenendo una massa totale in grado di deviare il percorso della luce.

Ipotesi sulla materia oscura

In letteratura sono comparse numerose teorie per spiegare la massa mancante legate a diversi fenomeni. La materia oscura sarebbe intesa come il "nero" attorno alle stelle o alle galassie e costituisce il 90% della materia dell'universo.

La massa oscura è divisa in barionica e non barionica:

- la materia oscura barionica è quella composta da materia del tutto simile a quella che costituisce le stelle, i pianeti, la polvere interstellare, ecc., che però non emette radiazioni;
- la materia oscura non barionica è composta da materia intrinsecamente diversa e non ancora scoperta. Si ipotizza che possa trattarsi di particelle supersimmetriche quali neutralini, o neutrini massicci, o assioni, o altre particelle mai osservate e soggette solo alla forza gravitazionale e all'interazione nucleare debole. Questo materiale è detto WIMP (Weakly Interacting Massive Particles), particelle di grande massa unitaria debolmente interagenti con la materia barionica, e quindi difficilmente rivelabili. Tre tipi di esperimenti cercano di rivelare queste particelle: i)

producendole in acceleratori di particelle; ii) vedendo l'energia che dovrebbero rilasciare quando urtano con la materia ordinaria; iii) annichilazioni fra particelle di materia oscura presenti attorno al centro della galassia o del sole potrebbero dare particelle normali, quali neutrini, positroni, antiprotoni. Maggiori dettagli su queste particelle saranno dati nel capitolo IV.

Si pensa attualmente che almeno il 90% della materia oscura sia non barionica. Infatti l'abbondanza cosmica del deuterio, che è di un atomo di deuterio per ogni 100 000 di idrogeno, è estremamente sensibile alla densità della materia sotto forma di barioni. Una densità barionica maggiore avrebbe per conseguenza un'abbondanza di deuterio molto più bassa. Invece l'abbondanza osservata del deuterio è compatibile con la densità della materia osservabile.

La scoperta che il neutrino ha massa, seppur estremamente bassa, potrebbe in parte spiegare l'eccesso di massa degli ammassi e superammassi di galassie, ma non quello delle singole galassie, perché esso si muove a velocità prossima a quella della luce, sfuggendo prima o poi all'attrazione gravitazionale e uscendo da esse.

Altri possibili costituenti della materia oscura sono stati indicati nei MACHO (*Massive Compact Halo Objects*), oggetti compatti di grande massa dell'alone galattico, nei buchi neri primordiali, nelle stelle brune, nelle stelle solitoniche, nelle stelle di bosoni e nelle pepite di quark.

1.19 Teorie alternative

Una minoranza di ricercatori non considera soddisfacente l'ipotesi della materia oscura come spiegazione degli effetti osservati. Tra questi:

- Arrigo Finzi, gravitazione modificata, 1963.
- Robert Sanders, gravitazione modificata, 1984.
- John W. Moffatt, gravitazione non simmetrica (NGT, Nonsymmetric Gravitational Theory), 1994
- Alexander Mayer, 2005.
- Mordehai Milgrom, teoria MOND, 1981, acronimo di *Modified Newtonian Dynamics* (dinamica newtoniana modificata). Essa prevede che sulle scale di accelerazione tipiche delle zone esterne delle galassie la legge di gravitazione universale di Newton debba essere leggermente modificata, in modo da tener conto delle curve di rotazione piatte senza fare ricorso alla materia oscura. La teoria MOND è stata anche sostenuta e rielaborata dal pioniere della termodinamica dei buchi neri, Jacob David Bekenstein.
- Jacob Bekenstein, tensor-vector-scalar gravitation (TeVeS), 2004.

- Johan Masreliez, Scale Expanding Cosmos model (SEC), 1999.] SEC è un modello cosmologico completo basato sulla teoria generale di relatività che richiama tutti i tipi di edizioni. Non nega l'esistenza della materia oscura, ma non ha bisogno di spiegare le curve di rotazione delle galassie o delle altre anomalie gravitazionali.
- Maurizio Michelini. La sua teoria prevede la presenza di sorgenti gravitazionali "addizionali" nel quadro di una teoria più generale dell'inerzia e della gravitazione. La forza gravitazionale dipende infatti non dalla "massa gravitazionale" di Newton ma da una complessa azione di autoschermo esercitata sulle masse da un flusso di micro-quanti (con lunghezza d'onda uguale alla lunghezza di Planck ed energia piccolissima) che riempie l'universo. Nelle collisioni dei micro-quanti con la materia si generano innanzitutto le forze d'inerzia relativistiche. Inoltre, all'interno dei corpi celesti superdensi i micro-quanti subiscono un numero di collisioni altissimo, perdendo un poco della loro energia e generando una forza gravitazionale addizionale. Poiché le stelle di neutroni sono disseminate nelle galassie, può essere sufficiente che rappresentino 2-3% della massa totale per sortire un effetto gravitazionale tale da spiegare (insieme con il contributo della popolazione di nane brune) le elevate velocità di rotazione osservate.
- Dragan Slavkov Hajdukovic fisico del CERN ha proposto una nuova teoria: che ipotizza la materia oscura come un'illusione creata dalla polarizzazione gravitazionale. Prendendo ad esempio una piastra dielettrica e inserendola in un condensatore piatto parallelo si ha come risultato una diminuzione del campo elettrico tra le piastre. Questo decremento è dovuto al fatto che le cariche elettriche di segno opposto si attraggono le une alle altre, ma se le cariche elettriche di segno opposto fossero repulsive, al posto di attrattive, allora il campo elettrico sarebbe aumentato. Dato che le cariche gravitazionali di segno opposto sono repulsive si ha che il campo gravitazionale aumenta e quindi la materia oscura sarebbe solo un'illusione.

Le teorie che prevedono una modifica della dipendenza del campo gravitazionale dalla distanza si sono rivelate inadatte a rendere ragione delle curve di rotazione delle galassie a spirale, perché le loro previsioni risulterebbero in conflitto con altre evidenze osservative universalmente accettate. La teoria MOND è difficilmente compatibile con la relatività generale, ma rappresenta l'ambito di ricerca meglio conosciuto realisticamente competitivo con il paradigma della materia oscura nella spiegazione dei moti galattici.

Nessuna singola teoria è stata finora del tutto accettata dalla comunità astronomica poiché attualmente impossibile da verificare in modo risolutivo.

1.20 Riferimenti nell'immaginario moderno

- Nella saga letteraria dello scrittore di fantascienza Valerio Evangelisti dedicata a Nicolas Eymerich è descritta la presenza di una forma di

particelle sconosciuta, dette positroni. Tali entità sarebbero in grado di interagire con la mente umana e viceversa, rendendo difficile la misurazione del mondo subatomico, fornendo così una spiegazione fantasiosa al principio di indeterminazione di Heisenberg.

- Nella trilogia fantasy "Queste oscure materie" di Philip Pullman e nel film "La bussola d'oro" tratto dal primo volume, la materia oscura ha un ruolo centrale sotto il nome di "polvere"; la connessione tra i due concetti è resa esplicita a partire dal secondo romanzo, La lama sottile, la cui co-protagonista è una ricercatrice contemporanea del nostro mondo che si interessa appunto di materia oscura, rappresentata come una sostanza impalpabile che filtra tra gli universi, misteriosamente legata al libero arbitrio umano.
- Nel videogioco di fantascienza Ogame, a partire dalla versione 0.76c la materia oscura è utilizzata come credito per i servizi a pagamento, acquistandola od ottenendone piccolissime quantità in gioco attraverso particolari missioni. In alcuni episodi di Final Fantasy la materia oscura è un oggetto molto raro.
- Nel mondo di Futurama, la materia oscura viene usata come combustibile per astronavi e macchine.

Note

Comunicato stampa della NASA

Mappa della materia oscura

J. W. Moffat, "Nonsymmetric Gravitational Theory", Nov. 1994

Mordehai Milgrom; Do Modified Newtonian Dynamics Follow from the Cold Dark Matter Paradigm?, Astrophysical Journal, May 2002

J.D. Bekenstein, Phys. Rev. D70, 083509 (2004), Erratum-ibid. D71, 069901 (2005) [arXiv:astro-ph/0403694](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0403694)

Masreliez C. J., *Scale Expanding Cosmos Theory II–Cosmic Drag*, Apeiron Okt (2004)

Masreliez C J *Dynamic incremental scale transition with application to physics and cosmology*, Physica Scripta (nov 2007)

M. Michelini, A flux of micro quanta explains Relativistic Mechanics and the Gravitational Interaction, Apeiron Journal, April 2007

Is dark matter an illusion created by the gravitational polarization of the quantum vacuum?, arxiv, 4 giugno 2011

Un gruppo di astronomi ha rivelato per la prima volta lo "scheletro" di materia oscura nei filamenti che collegano gli ammassi di galassie.

La ricerca guidata da Dietrich dell'università del Michigan è stata pubblicata su "Nature" calcoli teorici hanno da tempo previsto che le galassie si dispongono negli ammassi e lungo i filamenti che li collegano fra loro attratte gravitazionalmente da un' impalcatura di materia oscura, ma fino ad oggi nessuno era mai riuscito a osservare direttamente queste strutture proprio perche' sono costituite da materia oscura e quindi non rivelabili se non indirettamente attraverso i loro effetti gravitazionali. Adesso grazie ad osservazioni condotte con il telescopio giapponese Subaru e in banda X con il telescopio spaziale xmm-newton, Dietrich e colleghi hanno rivelato come la materia oscura si distribuisce proprio nei filamenti che collegano fra loro gli ammassi di galassie. In particolare i ricercatori hanno studiato il filamento di materia che congiunge gli ammassi Abell 222 e 223 sfruttando il fenomeno del gravitational lensing (lente gravitazionale) previsto dalla Teoria della relatività generale. Questo effetto consiste nella deflessione dei fotoni provenienti da una sorgente luminosa da parte di una massa interposta fra la sorgente e l'osservatore. In virtù della curvatura dello spazio tempo in prossimità della massa si produce un'immagine distorta e spesso ingrandita della sorgente distante. Nel caso in esame Dietrich e colleghi hanno calcolato la distribuzione di materia nel filamento.

Analizzandone l' intensità del campo gravitazionale, questa può infatti essere misurata attraverso l'osservazione della deflessione della luce proveniente dalle galassie di sfondo. Benché molti astronomi ritenevano praticamente impossibile ottenere un risultato del genere a causa della bassa intensità dell'effetto di lente gravitazionale, Dietrich e colleghi hanno scelto questi ammassi per la loro particolare configurazione, in grado di amplificare l'effetto. Così dall'analisi di decine di migliaia di galassie poste oltre gli ammassi e dalle osservazioni in banda X del filamento, i ricercatori hanno potuto dedurre che oltre il 90 per cento della materia che lo compone è oscura.

1.21 Distanza delle stelle dal centro di una galassia

Pare quindi che intorno ad una galassia a spirale esista un "alone" di materia oscura esteso fino a distanze enormi. All'interno della regione visibile della galassia la quantità di materia oscura corrisponde probabilmente a quella visibile. Fuori di questa regione però il rapporto fra massa e luminosità può crescere di cento volte.

Perché nel disco galattico materia oscura e materia luminosa sono in equilibrio, mentre fuori la materia oscura non segue assolutamente la distribuzione di quella luminosa?

Non solo: mentre le galassie a spirale visibili sono dischi bidimensionali, gli aloni di materia oscura dovrebbero disporsi in modo sferico!

Quasi in risposta a questa osservazione gli astronomi hanno scoperto un particolare tipo di galassie: le galassie "Polar-ring" (ad anello polare). Queste mostrano una scia di materiale luminoso orientato perpendicolarmente al disco. Misurando le velocità di rotazione di stelle poste sul disco polare e

confrontandole con quelle sul disco galattico principale, sembra che la concentrazione di massa compresa nelle rotazioni segua un andamento lineare e sferico.

Forse la nostra ipotesi della polvere nel Sistema Solare non si allontana troppo dalla verità. Una sorta di polvere invisibile, impalpabile, inconoscibile, sembra pervadere tutto. L'etere dei filosofi greci forse non era troppo lontano dall'astronomia più moderna! La materia luminosa potrebbe quindi, in questi casi, essersi disposta perpendicolarmente al disco per l'attrazione dovuta agli aloni di materia oscura lì presenti. Questi anelli potrebbero evidenziare con materia luminosa la distribuzione di materia oscura presente.

1.22 Galassie a spirali barrate. Teoria di Peebles e Ostriker , criterio di sopravvivenza galattico ed effetto Warp

Una bella poesia non guasta....

Stella
stella, mia unica stella,
nella povertà della notte, sola,
per me solo rifulgi;
ma, per me, stella
che mai non finirai d'illuminare,
un tempo ti è concesso troppo breve,
mi elargisci una luce
che la disperazione in me
non fa che acuire.

Giuseppe Ungaretti

Ancora prima delle analisi delle curve di rotazione i due astronomi P.J.E. Peebles e J. Ostriker ipotizzarono l'esistenza di aloni sferici di massa estesa. Venivano osservate in quegli anni le prime galassie a spirale barrate. Peebles e Ostriker si chiesero perché alcune galassie presentano la barra centrale ed altre no. Approssimativamente un terzo delle galassie a spirale sono barrate: le barre sono comuni, ma non sono presenti in tutte le galassie. Peebles e Ostriker capirono nel 1973 che le galassie in rotazione sono fortemente instabili e portano alla naturale formazione di barre e alla successiva dispersione della galassia stessa. Infatti in un disco in cui tutte le stelle si muovono su orbite circolari distribuite in modo assolutamente uniforme non avrà movimento relativo fra le stelle. Un piccolo aumento di densità in un punto permette alla gravità di

accumulare più stelle che altrove. Le stelle tenderanno verso questi punti alterando il moto di rotazione e formando appunto una barra. Sembra così che tutte le galassie a spirale dovrebbero avere una barra: ma la presenza di barre non è universale: occorre giustificare questa assenza. Ovviamente una velocità di rotazione maggiore contrasta l'attrazione di gravità verso la barra.

Quindi galassie in cui le stelle si muovono più velocemente saranno restie a diventare galassie barrate. Per aumentare le velocità di rotazione ed impedire la formazione di barre occorre aumentare la massa della galassia. Peebles e Ostriker dimostrarono (con calcoli troppo complicati per questa sede) che una distribuzione ad alone di massa, che diminuisce in funzione del quadrato della distanza, genererebbe velocità di rotazione sufficientemente elevate.

I dischi di galassia a spirale potrebbero stabilizzarsi senza trasformarsi in galassie a spirale barrate, ammettendo la presenza di un alone di materia oscura diffuso.

Secondo queste affermazioni, la presenza o meno della barra va imputata alla quantità di materia oscura presente. Una galassia a spirale con molta materia oscura non presenterà barre centrali, una con poca materia oscura, invece, diventerà una galassia a spirale barrata (anche le spirali barrate, per non dissolversi necessitano una certa quantità di materia oscura). Nel '73 dopo le perplessità espresse dai due astronomi venne trovata un'altra prova degli aloni di materia oscura attorno a galassie a spirale.

Alcuni dischi galattici visti di lato presentano delle torsioni (Warped Galaxy). Come una bandiera che "sventola" nell'aria, perché urtata dal fluido in cui è immerso (l'aria, appunto) così, a livelli infinitamente più grandi, queste galassie subiscono torsioni in quanto immerse in un alone fitto fitto di materia oscura.

1.23 Involucri stellari oscuri: galassie ellittiche

Esplorazione a Raggi X

I sistemi galattici ellittici presentano variazioni grandissime di massa e dimensioni; alcuni formano le galassie più grandi che si conoscano, con involucri stellari che si estendono a più di 300.000 anni luce dal centro galattico.

A causa della loro forma ellittica noi possiamo osservarne solo una loro proiezione in due dimensioni: è quindi difficile usare le curve di rotazione per predirne la massa in quanto le stelle si muovono in tre dimensioni e non su di un disco (come nel caso delle galassie a spirale).

Per le più sferiche delle galassie ellittiche, per le quali si può usare una certa simmetria, le curve appaiono orizzontali, confermando i dati ritrovati sulle galassie a spirale. Una potenziale analisi diretta include l'osservazione a raggi X. Come sappiamo dalla fisica i raggi X sono un porzione dello spettro elettromagnetico con una lunghezza d'onda compresa approssimativamente tra 10 nanometri (nm) e 1/1000 di nanometro. I gas a temperature molto elevate emettono raggi X. La distribuzione dell'energia dei fotoni di raggi X dipende dalla temperatura del gas che li emette.

Planck realizzò delle curve (le interpretò per un corpo nero, ma bene si adattano ai gas), in base alla temperatura che lega l'energia alla

frequenza dello spettro elettromagnetico. All'aumentare della temperatura, dunque, il massimo di emissione si sposta verso frequenze minori (legge di Wien). Secondo questa legge le temperature molto elevate dei gas che stiamo considerando permettono l'emissione in raggi X.

Supponendo che il gas sia molto caldo e sia in equilibrio di pressione (un assunto ragionevole in quanto il sistema non cambia rapidamente forma nel tempo) esso si distribuirà automaticamente in un volume sferico attorno alla galassia.

Inoltre, poiché le particelle di gas entrano spesso in collisione fra loro, si può essere certi che le singole orbite siano distribuite in modo uniforme.

In un sistema così simmetrico la densità del gas e quindi la temperatura (in quanto a maggiore densità corrisponde maggior numero di urti e quindi maggiore temperatura) sono legate alla distribuzione delle masse e all'attrazione gravitazionale in quel punto. Poiché per la legge di Wien lo spettro di emissione dei gas è connesso alla temperatura, misurando questo possiamo risalire alla temperatura, quindi alla densità del gas.

Confrontando i dati sulle densità risaliamo alla distribuzione delle masse (oscure e non).

Tramite le sonde Einstein del 1984 e soprattutto ROSAT del 1990, sono stati raccolti numerosi dati per le galassie ellittiche utilizzando il materiale interstellare (la sonda CHANDRA del 1999 sta tuttora compiendo misurazioni del genere).

Per una galassia in particolare, la M87, i dati che abbiamo ci permettono di stimarne la distribuzione di massa. M87 (conosciuta anche come la Galassia Virgo A o NGC 4486) è una delle più grandi galassie conosciute, una galassia ellittica gigante che domina l'ammasso della Vergine.

L'emissione di raggi X di questa galassia è particolarmente intensa, un vero e proprio getto (nel 1918 l'astronomo Heber Curtis del Lick Observatory che scoprì questo getto di energia emergente da M87, lo descrisse come "uno strano raggio diritto").

La massa totale contenuta entro una distanza di 600.000 anni luce dal centro di questa galassia, è 200 volte più di quella della nostra galassia. Da ciò gli astronomi hanno dedotto la presenza di una quantità di materia oscura circa dieci volte

maggiori rispetto alle stelle e al gas luminoso.

Pare veramente quindi che gli aloni di materia oscura siano onnipresenti, anche se, mentre possediamo prove schiaccianti per le galassie a spirale, per quelle ellittiche necessitiamo di maggiori conferme.

Era una notte ricca di stelle e priva di luna, una di quelle notti in cui si vede molto lontano e

perciò addolcisce e quieta.

Italo Svevo, La coscienza di Zeno

1.24 Galassie nane (e misteriose!) Materia oscura in abbondanza

Completo il discorso sulle galassie passando velocemente in rassegna le più piccole. Negli anni 2005/2007 si sono raccolti dati a sufficienza su queste galassie, le galassie sferoidali nane.

Secondo le più moderne teorie queste sarebbero le galassie più oscure di tutte: non solo, sono anche molto numerose.

Galassie fantasma composte quasi completamente di materia oscura popolano l'Universo.

A differenza delle galassie normali, questi sistemi estremi contengono pochissime stelle e sono per lo più prive di gas. La maggior parte della materia visibile è stata persa e ciò che rimane è un'ombra di materia oscura. Queste galassie in luminosità sono deboli al punto da risultare invisibili andando poco oltre le vicinanze della nostra galassia. E nessun modello scientifico proposto finora è riuscito a spiegare simultaneamente il loro eccezionale contenuto di materia oscura e il fatto che si trovino solo in stretta vicinanza di galassie ben più grandi (noi riusciamo ad osservare solo le galassie nane orbitanti attorno alla Via Lattea).

Stelio Kazantzidis, ricercatore all'università di Stanford, e i suoi collaboratori hanno sviluppato un'elegante spiegazione su come galassie finiscano per essere dominate dalla materia oscura. Egli afferma: "E' un passo avanti per una più completa comprensione circa la formazione di strutture nell'Universo, uno dei fondamentali obiettivi dell'astrofisica".

Utilizzando supercomputer per simulare la formazione di galassie, gli astronomi hanno trovato che una galassia dominata da materia oscura comincia la sua vita come un normale sistema. Ma quando si avvicina a una galassia molto più massiva, essa subisce contemporaneamente diversi effetti ambientali che la trasformano in un mera ombra di materia oscura. La materia visibile barionica (ovvero formata da barioni: protoni e neutroni) subisce, al momento della formazione delle galassie una sorta di "effetto marea" (ci basti questa sterile spiegazione, rimandando a studi molto più avanzati le precise spiegazioni degli eventi) della radiazione cosmica di fondo. La materia oscura, assumendo l'ipotesi, assolutamente non confermata, come vedremo più avanti, che sia non barionica, non subisce questi spostamenti dovuti alla radiazione cosmica di fondo.

"Le simulazioni a computer dell'ultimo decennio circa la formazione delle galassie sono state focalizzate nel modellare le proprietà della materia oscura piuttosto di quella visibile" - dice Mayer, il coautore della simulazione - "Invece, il nostro lavoro suggerisce che non possiamo comprendere l'origine delle galassie senza tener conto della materia visibile, anche in un Universo dominato dalla materia oscura": il modello, pur necessitando ancora di innumerevoli conferme, è in qualche modo confortante, quello che vediamo conta, eccome!

CAPITOLO 2

MATERIA OSCURA IN AMMASSI E SUPERAMMASSI

2.1 Sempre più materia oscura... Teorema del viriale cosmico

Gli aloni oscuri continuano all'infinito? Data per certa ormai l'esistenza di aloni di materia oscura attorno alle galassie cerchiamo di spingerci più oltre nella classificazione del cosmo. Questi aloni hanno un termine oppure continuano anche negli enormi spazi intergalattici?

Il che equivale a chiedere: è possibile pesare strutture molto più grandi come gli ammassi di galassie o i superammassi (ovvero ammassi di ammassi di galassie)? Ricordiamo, all'inizio di questo lavoro, che i primi dubbi sulla possibile esistenza di materia oscura giunsero proprio dall'analisi, da parte di Zwicky(1933), di un ammasso di galassie.

Per pesare queste strutture noi usiamo tutt'oggi una variazione minore del metodo di Zwicky spiegato precedentemente. Più precisamente ne utilizziamo una variante statistica. Non possiamo infatti applicare le formule della velocità di fuga a queste strutture, in quanto non sono coerenti come potrebbero esserlo il Sistema Solare o una galassia, ma sono piuttosto un asimmetrico e irregolare mucchio di materia. In tale situazione è impossibile basarci su singoli moti di singoli elementi come faceva Zwicky (sull'ammasso della Chioma aveva egli a disposizione dati particolari data la relativa vicinanza di quell'ammasso), ma analizziamo i dati con argomenti statistici, sicuri che "nella media" l'analisi rispetterà la distribuzione effettiva delle masse. Ovviamente come tutte le

indagini statistiche anche questa diventa attendibile solo avendo a disposizione una grande quantità di dati.

In sistemi autogravitanti (ossia tenuti insieme dalla loro stessa forza di gravità) la velocità relativa media degli oggetti nel sistema aumenta secondo una precisa relazione al crescere della massa totale del sistema. Le leggi di Newton diventano quindi un caso particolare, dimostrandoci che ciò è vero in assoluto (e non solo in senso statistico) per sistemi ordinati e ben definiti. Queste generalizzazioni derivano da un teorema fondamentale della meccanica: il teorema del viriale. Ora in astrofisica parleremo di "teorema del viriale cosmico". Cerchiamo di capire cosa sia per poi ampliarlo.

La principale formulazione del teorema del viriale la dobbiamo a Rudolf Clausius nel 1870.

Esso dice che: "dato un sistema di masse le cui interazioni reciproche siano di tipo gravitazionale e tali che i loro moti avvengano in una porzione limitata di spazio allora

$$2K+U=0 \quad (2.1.1)$$

(ove K è l'energia cinetica del sistema e U l'energia potenziale gravitazionale, entrambe prese in un lungo intervallo di tempo)"

Zamagni (1997) considera il caso che tutte le galassie membri dell'ammasso abbiano la stessa massa e sotto l'azione della gravità si comportino come punti se m_i è la massa della i -esima galassia dell'ammasso, v_i la sua velocità, $M <v^2_p> \frac{1}{2}$ la dispersione di velocità centrale dell'ammasso lungo la linea di vista, r_e il raggio effettivo dell'ammasso, la relazione (2.1.1) diventa

$$2K=\sum m_i v_i^2=M<v^2>=3M<v^2_p>=|U|=GM^2/r_e \quad (2.1.2)$$

Generalità equilibrio dinamico, la sua energia totale sarà in equilibrio in un modo fisso fra l'energia cinetica di movimento dei suoi componenti e l'energia potenziale gravitazionale dovuta alla loro stessa massa.

Questo teorema è una condizione necessaria per la stabilità del sistema stesso. Anche senza una dimostrazione rigorosa è facile capire che, se prevale l'energia termica (in pratica l'energia cinetica), il sistema si espande (non è più stabile), se prevale l'energia potenziale gravitazionale, il sistema si comprime (non è più stabile). Le energie devono quindi mantenersi in una qualche proporzione. È interessante notare che, essendo l'energia potenziale negativa, se il sistema si contrae l'energia potenziale diventa sempre più negativa. In base alla formula quindi, se il sistema si contrae, l'energia termica (cinetica), aumenta. Ma, in base al teorema del viriale, solo metà dell'energia gravitazionale rilasciata rimane nel sistema sotto forma di energia termica, l'altra metà viene emessa sotto forma di radiazione.

Quando abbiamo trovato la velocità di fuga nel caso considerato da Zwicky, uguagliando i due tipi di energia, abbiamo utilizzato senza accorgerci una formulazione particolare del teorema del viriale. Veniamo ora al teorema del viriale cosmico. Se energia potenziale e cinetica in un sistema dominato dalla gravità sono strettamente legate, allora le velocità relative delle galassie in un ammasso dovrebbero riflettere l'entità della buca di potenziale nella quale esse sono cadute per ottenere quella velocità.

Queste variazioni statistiche del metodo di Zwicky si sono rivelate abbastanza concordi evidenziando la presenza di una quantità di massa solamente dieci o venti volte maggiore. Questo mio “solamente” non è ironico, ma è in realtà un risultato molto importante: essendo le galassie lontanissime fra loro all’interno dell’ammasso (stiamo parlando di dimensioni che vanno dai 3 ai 30 milioni di anni luce) rispetto alla grandezza delle galassie stesse (diametro 90-100 mila anni luce), sappiamo ora che gli aloni non continuano indefiniti riempiendo tutto lo spazio, ma sono localizzati solamente intorno al materiale visibile. Lo spazio ritorna ad essere essenzialmente vuoto, con enormi spazi, anche di 1 miliardo di anni luce, senza una sola galassia.

2.2 Lo sbaglio dell’ammasso del Cancro Falsificabilità secondo K.Popper

La storia che stiamo raccontando non è coronata solamente di successi. Proprio cercando di utilizzare il teorema del viriale cosmico, gli astronomi andarono incontro ad un abbaglio colossale: ma forse, come afferma il filosofo K. Popper, è proprio la possibilità d’errore che rende scientifica una teoria. Osservato quale ci appare nella volta celeste l’ammasso del Cancro sembrerebbe il sistema ideale da studiare: esso sembra sferico e non troppo irregolare, in equilibrio dinamico. Quando si applica il teorema del viriale per la prima volta si ottenne un risultato in accordo con una continuazione degli aloni (e quindi delle curve di rotazione piatte) a distanza maggiore rispetto alle altre stime, tuttavia non ad una distanza infinita. Questo ammasso sembrava contenere 50 volte più massa di quella che poteva essere associata (visibile e oscura) alle galassie componenti.

Questo risultato resse fino al 1984! Gregory Bothum e i suoi colleghi dello Smithsonian Center for Astrophysics riesaminarono l’ammasso. Nuovi dati sui singoli spostamenti verso il rosso delle singole galassie permisero di concludere che le galassie componenti non sono distribuite in modo omogeneo. Alcuni oggetti mostravano uno spostamento talmente maggiore di altri da non poter essere imputato al movimento relativo delle galassie. Si ricordi che, in seguito alla legge di Hubble, oggetti con red-shift maggiore sono più lontani. L’ammasso del Cancro è formato da piccoli gruppi di galassie lontanissimi fra loro, ma che ci appaiono vicini solo nella proiezione bidimensionale della volta celeste. L’ammasso del Cancro non è un ammasso! Questo fu l’errore. Quella che precedentemente era stata individuata come una grande massa, poté essere reinterpretata come un risvolto della legge di espansione di Hubble. Questo esempio ci ricorda come, lavorando su scala così vasta, moltissimi sono gli errori in cui si può incappare. Costruiamo molto su esili principi di fondamento, per i quali non abbiamo la certezza della verità. Ma, questo rende la nostra indagine “scienza” propriamente detta.

2.3 Stiamo precipitando verso la Vergine? Anisotropia dipolare della radiazione cosmica di fondo

La stima della massa presente nei superammassi è sicuramente più complicata, ma anch'essa si basa sulle velocità relative e sulla gravità. La Terra fa parte del sistema Solare, il quale è parte di una galassia a spirale che chiamiamo Via Lattea. Questa appartiene all'ammasso di galassie detto "Gruppo Locale".

Il superammasso (formato da ammassi di galassie) più vicino a noi è il superammasso della Vergine, che ha centro nell'ammasso della Vergine. Questo superammasso di trova ad una distanza di circa 45 milioni di anni luce da noi. L'abbondanza di galassie nel cielo delimitato dalla costellazione della Vergine è pressappoco doppia che in qualsiasi altra zona del cielo.

In un Universo dominato dalla sola gravità l'attrazione della grande massa del superammasso della Vergine dovrebbe portare a far precipitare su di esso l'intero nostro gruppo locale. Misurando la velocità di caduta riusciremo a risalire alla massa del superammasso (visibile e oscura ovviamente)

Il problema diventa quindi: come possiamo misurare il nostro moto locale verso la Vergine?

Anzitutto dobbiamo chiarire che questo moto è sovrapposto all'espansione celeste di Hubble. Un modo potrebbe essere quello, sempre usando gli spostamenti verso il rosso, di misurare le velocità di recessione di molte galassie in molte direzioni diverse. Se veramente ci stiamo muovendo verso la Vergine, le galassie nella direzione opposta alla Vergine dovrebbero avere una velocità di allontanamento da noi maggiore rispetto a quelle nella direzione della Vergine, in quanto noi "gli stiamo andando incontro". Questo metodo, per quanto bello e facile da applicare, richiede troppi assunti che non possiamo dare, come la sfericità del superammasso della Vergine.

Ma c'è un altro metodo: la radiazione cosmica di fondo. Per la radiazione cosmica di fondo (abbreviata in CBR, da Cosmic background radiation) si intende generalmente

la radiazione omogenea ed isotropa che nella cosmologia moderna è ritenuta essere il residuo termico del big bang.

Tutto il cosmo è pervaso da una ombra energetica, che emette lo stesso spettro di un corpo nero a temperatura di 3 K.

Noi supponiamo, con valide ragioni, che i fotoni della radiazione cosmica di fondo provengano da una distanza pressoché infinita, dal Big Bang, e hanno percorso distanze di milioni di anni luce.

La radiazione cosmica di fondo è quindi un sistema inerziale, l'unico vero sistema inerziale presente in natura!. Ponendo come sistema di riferimento la radiazione di fondo possiamo misurare il nostro moto locale, senza dover incorrere in assunti teorici. Se noi ci stiamo spostando verso una qualche direzione la radiazione di fondo, che permea tutto l'universo, apparirà spostata verso il rosso nel verso opposto al nostro moto (ci allontaniamo infatti dalla sorgente di emissione) e spostata verso il blu lungo il verso del movimento. Questa situazione che ho appena descritto viene detta "anisotropia dipolare" della radiazione cosmica di fondo.

Se siamo in grado di misurare l'entità di questa anisotropia, ovvero la differenza della radiazione fra due poli opposti del cielo, dovremmo riuscire a dedurre il nostro moto locale verso la Vergine (e da questo moto stimare la

massa del superammasso, che è il nostro scopo finale). Queste misurazioni sono state effettuate con grandissima precisione dal satellite COBE. I risultati hanno evidenziato la presenza di un'anisotropia enorme (in termini relativi ovviamente!) rispetto ad ogni previsione, ma....in direzione OPPOSTA rispetto alla Vergine!

Il risultato ha causato moltissimo imbarazzo...stiamo o no cedendo verso la Vergine? In un Universo dominato dalla gravità, come ogni teoria in nostro possesso ci dice, questi risultati sono impossibili. Eppure...questo esperimento ha falsificato la nostra teoria di caduta verso la Vergine. Dove stiamo andando?

2.4 I sette samurai e il Grande Attrattore

Oltre il superammasso? Strutture a grande scala nell'Universo

A fronte di questi sconcertanti risultati su nostro movimento un gruppo di sette astronomi, appartenenti ad altrettante istituzioni, detti simpaticamente "i sette samurai" (David Burstein, Roger Davies, Alan Dressler, Sandra Faber, Donald Lynden-Bell, Roberto J. Terlevich, e Gary Wegner) cominciò a lavorare.

Questi trovarono che le galassie sono distribuite nello spazio in modo molto singolare, formano infatti enormi superammassi, separati da miliardi e miliardi di anni luce di vuoto.

I sette samurai ipotizzarono che la direzione e il verso del nostro moto fossero dettati da una enorme quantità di massa che attira il nostro gruppo locale: una massa talmente grande da rendere ininfluente quella del superammasso della Vergine! Questa concentrazione di materia venne chiamata "il Grande Attrattore" (Great Attractor). Un quarto circa del cielo che ci sovrasta è in realtà impenetrabile. Il disco della Via Lattea, rovina, con stelle e polveri la nostra visuale sul cielo profondo. Il Grande Attrattore dovrebbe appunto trovarsi in una di queste zone vietate del cielo, in particolare nella costellazione meridionale del Centauro. Strumenti sempre più potenti ci permettono ora di scavare dietro la nube prodotta dalla via lattea per evidenziare solo gli oggetti a lei estranei.

Sempre utilizzando i redshifts riusciamo ad evidenziare gli oggetti più lontani. Secondo questa teoria a soli 250 milioni di anni luce si trova un deposito di materia di dimensioni di circa 400 milioni di anni luce.

Il grande attrattore ha il suo centro gravitazionale nell'ammasso della Norma. Il grande Attrattore potrebbe essere l'unico esempio conosciuto di massima struttura dell'Universo: una sorta di supersuperammasso, un ammasso di superammassi insomma.

Per giustificare il movimento rivelato dal COBE il grande attrattore dovrebbe essere un gruppo di 100.000 galassie! Decisamente troppe. Nessun modello di formazione del cosmo giustifica la presenza di tanta materia (luminosa!) tutta assieme. L'alternativa ricade ancora sulla nostra materia oscura.

Il grande attrattore potrebbe essere una zona ricca di materia visibile, ma con una smisurata presenza di materia oscura, non del tutto giustificata dalla presenza di aloni. Questa teoria ha ancora molta strada da fare per convincerci, in quanto è molto povera di dati osservativi, per la difficoltà

rappresentata dalla Via Lattea, tuttavia potrebbe aprire la strada a distribuzioni di materia oscura che non seguono la materia visibile (come abbiamo visto essere invece per le galassie), quanto piuttosto di materia visibile che segue le disposizioni della materia oscura (un po' come le galassie "Polar Ring").

2.5 Le lenti gravitazionali Einstein e le nuove frontiere dell'esplorazione celeste

Veniamo ora alla prova più convincente, dopo le curve di rotazione, per l'esistenza di materia oscura. Per ogni prova che qui ho presentato abbiamo sempre utilizzato la gravità newtoniana. Le teorie di Newton sono perfette, uno dei grandi pilastri di tutta la nostra conoscenza della fisica. Tuttavia per le grandi distanze che stiamo esaminando ultimamente necessitano di alcune integrazioni. Come tutti sappiamo Einstein apportò queste integrazioni con la teoria della relatività generale. Per descrivere spazi così grandi abbiamo bisogno di tenere conto della curvatura dello spazio tempo descritta dalla relatività generale, altrimenti, approssimando le teorie di Einstein con quelle di Newton , commetteremmo un errore troppo rilevante.

La teoria della relatività generale infatti afferma che lo spazio-tempo viene più o meno curvato dalla presenza di una massa; un'altra massa più piccola si muove allora come effetto di tale curvatura.

Spesso, si raffigura la situazione come una palla che incurva un lenzuolo con il suo peso, mentre una biglia viene accelerata da questa deformazione del piano ed in pratica attratta dalla prima. Questa è solo una semplificazione alle dimensioni raffigurabili, in quanto ad essere deformato è lo spaziotempo e non solo le dimensioni spaziali, cosa impossibile da raffigurare e difficile da concepire. La relatività generale vede quindi la gravità semplicemente come una modifica della curvatura dello spazio-tempo. Precedendo con le teorie di Einstein, il grande scienziato spiegò anche come la massa e l'energia potessero essere viste sotto la stessa ottica (la formula divenne famosa a tal punto che moltissimi la conoscono senza sapere cosa significa...). La luce è energia trasmessa sotto forma di onda elettromagnetica. Con la famosa equazione di Einstein, una data quantità di energia si comporta come una data quantità molto molto minore di massa (il fattore di conversione è la velocità della luce al quadrato!). Anch'essa quindi subisce l'effetto della gravità. La luce viene in qualche modo "attrata" da una grande massa. Masse molto molto concentrate, come i buchi neri, addirittura intrappolano senza via di fuga qualsiasi raggio di luce passi vicino.

Masse meno concentrate, ma comunque considerevoli, come una galassia o un ammasso di galassie sono in grado di curvare la direzione di propagazione del raggio luminoso.

Se il raggio è passato vicino ad una grande massa e viene incurvato arriva a noi osservatori con un'altra direzione. Il nostro occhio, che ipotizza sempre una propagazione rettilinea della luce vede quindi la fonte luminosa in una posizione apparente che si discosta da quella reale tanto maggiore è l'entità della massa che ha curvato il raggio.

Nel 1919 Eddington durante un'eclissi di Sole misurò la curvatura dei raggi luminosi e rese il nome di Einstein famoso in tutto il mondo. Questo apre la strada alle cosiddette lenti gravitazionali.

E' possibile utilizzare le galassie come telescopio per osservare oggetti sempre più lontani! Questa ipotesi venne calcolata da Einstein ma subito esclusa in quanto, pensava, i suoi effetti sarebbero stati così piccoli da non essere nemmeno percettibili.

Sessant'anni dopo le lenti gravitazionali furono davvero osservate! Vediamo bene di cosa si tratta. I raggi di luce provenienti da una sorgente lontana possono venire curvati da una massa presente sul loro cammino e aggirare la massa in due direzioni, come mostrano i disegni. A noi osservatori ci giungono quindi due fasci luminosi perfettamente identici, in quanto provenienti dalla stessa sorgente. Ovviamente, lavorando in tre dimensioni i fasci sono ben più di due.

Noi osserviamo più immagini apparenti provenienti da una singola sorgente reale. Queste immagini ci appaiono circondare la massa che ha causato la deviazione. Le immagini prodotte dalla lente di appaiono distorte (la distorsione è data dall'asimmetria del corpo lente).

Queste osservazioni furono definite "anelli di Einstein". Apparirono così i primi quasar: sorgenti luminosissime e lontanissime. Con moltissime probabilità i raggi luminosi provenienti da regioni così lontane nello spazio e nel tempo, incontrano una galassia sul loro cammino. Moltissime immagini di quasar vennero quindi riconosciute come apparenti alla luce delle scoperte sulle lenti gravitazionali.

Veniamo ora alla materia oscura. Poiché solo una data massa produce una data immagine, analizzando la produzione delle immagini nelle lenti gravitazionali è possibile stimare non solo l'entità della massa dell'oggetto lente, ma anche, osservando le deformazioni, la distribuzione della massa in questo oggetto.

Bene, le stime sulle lenti gravitazionali prevedono che la massa degli oggetti lenti (principalmente galassie e ammassi) sia di circa 10-30 volte superiore al materiale visibile.

Ancora una volta troviamo una stima in accordo con i nostri dati. Ipotesi più esotiche sono state formulate: si potrebbe formare una lente gravitazionale senza un oggetto-lente? O meglio...senza un oggetto-lente visibile? Lenti gravitazionali completamente formate da materia oscura non se ne sono osservate, ma gli astronomi le cercano sempre più avidamente. Finora i dati sembrano confermare l'ipotesi che non esista materia oscura senza materia visibile, e viceversa: le due categorie di massa viaggiano in coppia

...di chi vide
sotto l'etereo padiglion rotarsi

piú mondi, e il Sole irradîarli immoto,
onde all'Anglo che tanta ala vi stese
sgombrò primo le vie del firmamento:

Foscolo, I Sepolcri

CAPITOLO 3

EVIDENZE COSMOLOGICHE SULLA MATERIA OSCURA

3.1 Troppa materia oscura

Spillar, Loh. Misurando la curvatura del cielo

Geometrie non euclidee

Sappiamo ora, dalla relatività generale di Einstein che lo spazio tridimensionale è curvo. Quando incurviamo lo spazio mutiamo i rapporti fra quantità geometriche. Ad esempio lavorando con una superficie e incurvandola, il rapporto fra raggio e circonferenza varia: mentre in un piano la circonferenza misura sempre $2\pi r$, in una superficie curva il valore della circonferenza cambia in base alla curvatura della superficie stessa.

Da questo esempio compiamo un'astrazione e passiamo con la mente ad un Universo tridimensionale curvo. Il rapporto fra volume e raggio cambia il rapporto con la curvatura dell'Universo stesso, esattamente come la circonferenza di prima. Conoscendo il volume e il raggio è quindi possibile risalire alla curvatura dell'Universo.

Ora sappiamo cosa determina la curvatura dell'Universo: la presenza di masse. Misurare la curvatura del cosmo quindi potrebbe essere una strada per misurarne il peso. Necessitiamo però di volume e raggio per fare queste misure. Non possiamo misurare direttamente il volume (a meno di conoscere già la curvatura ovviamente) ma, se supponiamo che il numero di galassie in un dato volume sia circa poco costante in tutto l'Universo, premessa che è certamente confermata dall'osservazione, possiamo tentare di contare le galassie in volumi sferici progressivamente maggiori (fissando un raggio,

contare tutte le galassie con distanza inferiore a quel raggio) e vedere in quale rapporto stiano raggio e volume sferico (esattamente come prima dicevamo "più di $2\pi r$ " oppure "meno di $2\pi r$ "). Da questo rapporto deduciamo, se il volume effettivo è maggiore del volume sferico una curvatura negativa, se è minore una curvatura positiva.

Queste indagini furono portate avanti da due giovani astronomi di Princeton, Earl Spillar e Ed Loh. Tramite la curvatura trovarono che la massa presente doveva superare quella visibile di una quantità quattro o cinque volte superiore alle stime del viriale cosmico.

Una quantità di materia oscura mai trovata prima. I loro risultati sono tutt'altro che confermati e furono ben presto attaccati da varie direzioni. Le loro approssimazioni erano talmente grandi da rendere inaccettabile una stima con questo metodo, che comunque, con strumenti e dati più affidabili potrebbe rivelarsi fondamentale per conoscere la geometria e la massa dell'Universo in un futuro non lontano.

3.2 Se l'Universo è piatto... Il parametro C e le teorie cosmologiche

Torniamo un istante all'inizio della nostra analisi... Perché ci interessa sapere quanta materia ci sia nell'Universo? Beh, sicuramente per la stessa utilità che ha ogni ricerca scientifica (ovvero conoscere il mondo che ci circonda), ma in particolare la massa del cosmo ci permette di dedurne il suo destino.

Le equazioni della relatività generale prevedono tre modelli sulla fine dell'Universo:

- Universo chiuso
- Universo piatto
- Universo aperto

I tre tipi di universi si distinguono per la curvatura spazio-temporale e la quantità di materia. In un Universo chiuso la materia sarà sufficiente da superare con la forza di gravità l'espansione di Hubble. La materia incurva lo spazio a tal punto da chiuderlo su se stesso, generando così una curvatura positiva. La gravità fermerebbe l'Universo facendolo collassare in un punto, generando un nuovo fenomeno, detto Big Crunch.

In un universo aperto la quantità di materia non è sufficiente contrastare la forza di gravità. L'universo sarebbe spazialmente infinito e dominato da una curvatura negativa (una geometria iperbolica quindi). L'espansione continuerebbe a livelli sempre maggiori, con velocità costante.

L'universo piatto, il più improbabile date le equazioni di Einstein, è un caso limite fra i due. Comporterebbe l'adozione della semplice geometria euclidea (curvatura nulla). Espansione e gravità si annullano perfettamente. La velocità

di espansione diminuisce tendendo asintoticamente a zero. Possiamo ridurre il tutto in termine Newtoniani:

$$\text{ENERGIA GRAVITAZIONALE} = \text{ENERGIA CINETICA (espansione)} + \text{ENERGIA POTENZIALE (gravità)}$$

L'energia cinetica dovuta all'espansione di Hubble è positiva, mentre assumiamo come negativa quella potenziale dovuta all'attrazione gravitazionale. Se l'energia totale è positiva avrà un Universo aperto, se è negativa chiuso. Per un energia totale nulla l'Universo sarà piatto. Se l'energia è positiva il moto di recessione fra le galassie finirà per invertirsi ed esse collasseranno. Per le equazioni di Einstein il termine che rappresenta la curvatura è esattamente il negativo dell'energia totale maggiore. Ad energia elevata corrisponde una curvatura che si discosta molto dalla nulla. Per misurare l'energia cinetica media dobbiamo conoscere la costante di Hubble. Per misurare quella gravitazionale occorre conoscere la densità di massa. Definiamo un valore di densità di massa, in relazione ad h fattore variabile della costante di Hubble. Descriviamo la densità di massa con la lettera C definita come rapporto fra la densità effettiva e quella critica, ovvero quel valore di densità che genererebbe un universo piatto.

Quindi se:

$C > 1$ siamo in presenza di un Universo chiuso

$C < 1$ siamo in presenza di un Universo aperto

$C = 1$ siamo in presenza di un Universo piatto

Trovare l'esatto valore di C coincide ora con lo scoprire il destino dell'Universo. Gran parte degli sforzi di astronomia e astrofisica nell'ultimo secolo sono stati impiegati per trovare C : da queste ricerche è nato il sospetto della materia oscura che noi stiamo analizzando. Ovviamente il valore C dipende da h , ovvero dal nostro grado di conoscenza della costante di Hubble. L'astrofisica moderna è portata a credere che l'Universo sia piatto. Ovviamente, lettori avidi, desidererete una spiegazione. Libri interi sono stati scritti a sostegno di questa tesi, e non è il caso di esporli qui.

Bastino alcune affermazione intuitive. Tutti gli esperimenti finora effettuati (per esempio moltissimi esami sul viaggio dei neutrini) hanno evidenziato un valore di C che si discosta pochissimo in positivo da 1. Il discorso ora diventa questo. Supposta intorno ai 13-14 miliardi di anni l'età dell'Universo, se l'Universo non fosse piatto la densità C si sarebbe discostata immensamente da 1.

Se C non fosse stato al momento della creazione esattamente 1, anche solo di un piccolo spostamento, oggi sarebbe molto diverso da 1. Il fatto di trovare un C quasi uguale a 1 ci porta a dire che esso sia 1, e noi non riusciamo a misurarla alla perfezione. Le prove teoriche e sperimentali sulla nucleosintesi del Big Bang, e dei primissimi istanti di vita del cosmo (più di così non posso inoltrarmi, per mancanza di conoscenze in questi campi ...) dimostrano la necessità teorica di un Universo piatto.

Se l'Universo è effettivamente piatto come sembra, la materia presente deve essere tale da giustificarlo. La massa ricavata dalla luminosità, come l'abbiamo dedotta all'inizio di questa discussione porterebbe ad un valore di C pari a 0.001-0.002. La materia visibile fornisce solo l'1%-2% circa della massa necessaria per giungere oggi alla densità critica. Se l'ipotesi dell'Universo

piatto regge, serve sicuramente più materia. Il culmine, e la delusione, di tutte le nostre fatiche giunge ora. Le stime più abbondanti sulla presenza di materia oscura, ovvero quelle fondate sul teorema del viriale, dicono che la materia oscura sia da 10 a 20 volte maggiore rispetto a quella visibile.

Bene: arriviamo a un C pari a 0.2-0.3. Siamo ancora molto molto lontani dall'Universo piatto. La materia oscura sembra fornire solo il 10-20% di C! Evidentemente c'e molta molta più materia....Oppure molta più energia....Uno scenario affascinante si presenta agli astronomi: e se il vuoto non fosse vuoto...se il vuoto fosse energetico? (collegando queste domande con le particelle virtuali della meccanica quantistica....)

3.3 Il rapporto barioni-fotoni Nucleosintesi primordiale

Dio disse: "Ci siano luci nel firmamento del cielo, per distinguere il giorno dalla notte; servano da segni per le stagioni, per i giorni e per gli anni e servano da luci nel firmamento del cielo per illuminare la terra". E così avvenne: Dio fece le due luci grandi, la luce maggiore per regolare il giorno e la luce minore per regolare la notte, e le stelle. Dio le pose nel firmamento del cielo per illuminare la terra.

(La Bibbia, Genesi)

Come ultima prova analizziamo il rapporto barioni/fotoni dell'Universo, tema che poi sarà funzionale alla sezione successiva. Premetto che con il termine "barioni" si esprime in un solo termine la coppia protoni più neutroni. Dobbiamo gettare uno sguardo sulla nucleosintesi primordiale, ovvero sulla formazione degli elementi pochi istanti dopo l'esplosione del Big Bang. Uno dei pilastri su cui si basa la teoria del Big Bang è l'abbondanza di elio. Nell'Universo è presente infatti troppo elio per essere stato tutto prodotto nelle fucine stellari.

La teoria del Big Bang prevede un universo di partenza non di solo idrogeno, ma di elio e idrogeno. La vera dimostrazione della teoria del Big Bang fu la definizione della teoria della nucleosintesi di Gamow. Tale teoria spiega la presenza e le quantità degli elementi nell'universo che poi sono realmente osservate.

Nel periodo della nucleosintesi la forza della natura che entra in scena è quella che determina le reazioni nucleari: la forza debole (ancora legata alla forza elettromagnetica, formando la forza elettrodebole) Si può quindi già intuire come la stessa forza sia responsabile della presenza di nuclei atomici (barioni) e possa allo stesso modo influenzare la radiazione elettromagnetica (fotoni). Da questa analisi poi scaturì anche la teorizzazione della radiazione di fondo effettivamente osservata successivamente. Gamow, insieme ad un suo studente, Ralph Alpher, calcolò l'entità di questa nucleosintesi primordiale. Con ironia, per rendere l'evento solenne, chiama il fisico nucleare Hans Bethe a firmare l'articolo. Il 10 Aprile 1948 esce su Physical Review una sorta di ABC delle origini. Firmato con le prime lettere dell'alfabeto greco Alpher, Bethe, Gamow. La nucleosintesi analizza ciò che succede tra 10-32 secondi dopo l'esplosione e 3 minuti dopo l'esplosione. Dopo i primi tre minuti infatti le temperature diventano troppo basse da permettere reazioni nucleari, prima di 10-32 secondi nessun fisico può gettare lo sguardo, come se si avvicinasse

tropo al mistero della creazione. Dal primo secondo, dopo il big bang, al 3° minuto le particelle barioniche si trasformano e uniscono a formare i nuclei dei vari elementi nell'universo. Abbiamo così la formazione di vari fondi universali, come in una sorta di atmosfera di particelle barioniche, organizzate in nuclei atomici.

Le condizioni iniziali al primo secondo sono tali che il numero dei protoni è equivalente al numero degli elettroni, e pertanto l'universo dal punto di vista elettrico si presenta neutro. In realtà gli elettroni, per mantenere la neutralità dell'universo, dovranno essere un poco di più, perché sono presenti anche dei positroni, antiparticella dell'elettrone. Inoltre il numero dei neutroni è equivalente a quello dei protoni. Ma i neutroni in natura, se non legati, dopo 11 minuti decadono in altre particelle. Pertanto dal 1 secondo al 3° minuto abbiamo che la quantità dei protoni aumenta a discapito dei neutroni, e considerando che le temperature in quel periodo sono maggiori di 1 miliardo di gradi sono favorite reazioni nucleari di fusione fra più protoni per formare i nuclei degli elementi più pesanti. Maggiore sarà la densità di radiazione e maggiore sarà la probabilità e quindi la velocità di reazioni nucleari di fusione dei nuclei atomici. Pertanto le quantità dei vari nuclei degli elementi dipendono dalla densità, sia dei protoni (e neutroni) che dei fotoni. Osservando le abbondanze di nuclei in natura

possiamo tracciare una stima dell'abbondanza delle particelle. Per rappresentare questo quadro si usa appunto, il rapporto fra i barioni e i fotoni. Ad oggi tale rapporto è ritenuto essere intorno 1 barione per 109 fotoni.

Analizzando tali teorie si è evidenziato che se tale rapporto variasse di 10 volte, da 1 a 109 barioni per 10 fotoni, si dovrebbe osservare una variazione di percentuale elevata nell'universo dei vari elementi e isotopi.

Prendendo un isotopo dell'idrogeno, il deuterio, rileviamo una variazione di 4 ordini di grandezza, e pertanto di 10000 volte. Se oggi misuriamo il fondo di deuterio nell'universo, anche se non con grande precisione, siamo in grado di stimare la correttezza di questo rapporto. Essendo conosciuta la quantità dei fotoni presenti nell'universo, perché equivalenti alla radiazione di fondo cosmologica, deduciamo, dalla conoscenza del rapporto fra barioni e fotoni, la materia barionica. La materia barionica dedotta si è rilevata essere in grado di soddisfare C per un 4.9%, sempre nel caso di Universo piatto. Una quantità di massa superiore a 5 volte quella valutata dal punto di vista luminoso.

I problemi che sorgono all'orizzonte sono parecchi, ma anche qualche certezza. Sicuramente il rimanente di questo 5% di C, partendo dall'1-2% dato dalla materia visibile e composto da materia oscura. Non solo: ora sappiamo che cos'è questa materia oscura: barioni.

Infatti il rapporto barioni\fotoni richiede la presenza di più barioni di quelli che osserviamo. Parte della materia oscura è formata da barioni. E' un ottimo risultato dopo tutte le nostre fatiche: scoraggiante però se pensiamo che abbiamo finalmente compreso solo il 4.9% della materia esistente!

Il rimanente 95% ci è COMPLETAMENTE ignoto.

Sappiamo solo che non sono barioni. Il 95% della materia oscura non è "materia" come l'abbiamo in mente noi! Tutte le prove, teorema del viriale compreso quindi (che mi avevano permesso di arrivare al 10% di C) si sono lasciati scappare la maggior parte della materia oscura.

CAPITOLO 4

POSSIBILI CANDIDATI PER LA MATERIA OSCURA

4.1 Che cosa é la materia oscura?

Materia oscura barionica: MACHO

Pianeti, nane brune, pulsar, polveri interstellari e buchi neri

Quella parte della materia oscura che sappiamo essere barionica, per giungere al corretto rapporto barioni\fotoni, si pensa sia costituita da MACHOs.

Il termine MACHO (plurale MACHOs) è un acronimo che sta per MAssive Compact Halo Object, ossia oggetto massivo compatto di alone. L'acronimo è nato nei primi anni '90, nel quadro dei tentativi di individuare la natura della cosiddetta materia oscura.

Esso viene utilizzato per indicare oggetti astronomici che potrebbero rappresentare una parte della materia oscura presente nell'alone delle galassie. La categoria dei MACHOs comprende tutti gli oggetti cosmici "usuali" che NON emettono luce: stelle di neutroni, buchi neri, nane brune, pianeti, polveri interstellari.

I MACHOs a livello di particelle elementari sono costituite da nuclei atomici convenzionali. L'ipotesi dei MACHOs è ormai assolutamente superata, soprattutto vista la quantità della materia oscura barionica.

Dal punto di vista storico, l'ipotesi che la massa degli aloni galattici potesse essere spiegata solamente con oggetti astronomici "convenzionali" di scarsa luminosità è stata avanzata fin dagli anni '70, immediatamente dopo le prime

misure delle curve di rotazione delle galassie a spirale. L'ipotesi che la materia oscura fosse costituita da MACHOs subì un duro colpo negli anni '80, quando le teorie cosmologiche cominciarono a richiedere l'esistenza di materia oscura "non barionica".

Tuttavia l'ipotesi dei MACHOs sopravvive tutt'ora, anche se solo limitatamente a quella piccola parte di materia oscura barionica. Finalmente nei primi anni '90 fu possibile sottoporre l'"ipotesi MACHOs" ad una verifica sperimentale. La tecnica usata fu quella di un monitoraggio sistematico di alcuni milioni di stelle delle Nubi di Magellano. Lo scopo era di individuare variazioni nella luminosità di queste stelle che fossero dovute al passaggio (transito) di un MACHO dell'alone della nostra galassia sulla linea di vista: questi transiti hanno l'effetto di incrementare fortemente la luminosità della stella osservata, per via di un effetto di lente gravitazionale. L'esperimento MACHO ebbe successo, rivelando alcuni eventi che con tutta probabilità sono dovuti a lenti gravitazionali causato dal transito di un MACHO.

Tuttavia questi eventi sono in numero molto inferiore a quello che ci si aspetterebbe nel caso che la materia oscura dell'alone galattico fosse composta solo di MACHOs. La conclusione generalmente accettata è che i MACHOs esistono, ma la loro massa totale è molto inferiore a quella dell'alone di materia oscura, per cui essi non sono importanti a livello cosmologico; inoltre essi sono quasi sicuramente trascurabili anche al livello della dinamica interna delle galassie. La presenza dei MACHOs giustifica con termini usuali, la materia oscura barionica.

4.2 La materia oscura calda: veloce come la luce La grande saga dei neutrini

Il termine "calda" non riguarda assolutamente la temperatura.

Definiamo materia non barionica calda quella composta da particelle che si muovono a velocità relativistiche, ovvero prossime a quella della luce.

Il candidato principale per questo tipo di materia oscura è il neutrino. Poiché il neutrino interagisce debolmente, quando si muove attraverso la materia le sue possibilità di rilevazione sono molto piccole. Occorrerebbe un ipotetico muro spesso un anno luce in piombo per bloccare la metà dei neutrini che lo attraversano.

I rivelatori di neutrini tipicamente contengono centinaia di tonnellate di materiale, costruito in modo tale che pochi atomi al giorno interagiscono con i neutrini entranti. In una supernova collassante, la densità del nucleo diventa abbastanza alta (10^{14} g/cm³) da intercettare parte dei neutrini prodotti. Esistono tre tipi differenti di neutrino: il neutrino elettronico, il neutrino muonico e il neutrino tau, corrispondenti ai rispettivi leptoni del modello standard (elettrone, muone e tauone). Il neutrino è stato ipotizzato negli anni '30 da Wolfgang Pauli (come conseguenza del decadimento beta) e da Enrico Fermi ed è stato scoperto in laboratorio nel 1953. È una particella neutra, cioè senza carica elettrica, ed è molto, molto piccola, almeno (non si sa con precisione il valore, ma si può dare un limite superiore: cinquantamila volte più piccola dell'elettrone). Essa si presenta come un valido candidato

per la costituzione della materia oscura, perché l'Universo è pieno di neutrini: sono infatti particelle che vengono emesse in occasione di ogni reazione nucleare e nel caso di decadimento radioattivo degli elementi.

Il Sole per esempio, ne produce in grandissima quantità ed esistono numerosi apparati sperimentali nel mondo deputati alla ricerca e al rilevamento dei neutrini solari.

Il fatto è che se ne rilevano meno di quelli previsti, circa un terzo. Questo si spiega tenendo presente che i rilevatori terrestri di neutrini sono sensibili a un solo tipo di neutrino (quello elettronico, cioè dell'elettrone) e non agli altri due tipi esistenti (quello tauonico, della particella tau e quello muonico, della particella mu) corrispondenti complessivamente ai tre tipi di leptone nel modello standard). Ma, come spiegazione al conteggio rilevato sperimentalmente (cioè si rileva circa 1/3 dei neutrini aspettati), potrebbe valere anche l'ipotesi che i tre tipi di neutrini non siano in realtà tre particelle distinte, ma siano i tre "vestiti" possibili di una stessa particella (teoria dei neutrini oscillanti). Se fosse vera questa ipotesi, vuol dire che il deficit rilevato a Terra potrebbe essere dovuto al fatto che due volte su tre il neutrino si "veste" da neutrino tauonico o muonico eludendo il conteggio sperimentale. Il fatto è che per cambiare abito il neutrino dovrebbe possedere una massa, circa un milione di volte più piccola di quella dell'elettrone, mentre nella teoria usuale (quella secondo la quale i tre neutrini sono particelle distinte) il neutrino ha massa nulla. Supponendo allora che il neutrino abbia massa, possiamo "pesare" tutti i neutrini contenuti nell'Universo, ottenendo un contributo alla densità critica dell'ordine dell'1, 2 per cento.

Questo valore è ancora insufficiente, ma in ogni caso è importante sottolineare che è di più di quello ottenuto dalla somma della massa di tutte le stelle messe insieme.

Ancora oggi non si ha una stima precisa della massa del neutrino e non si ha una verifica sperimentale diretta della teoria dei neutrini oscillanti, per cui sarebbe affrettato dire che la materia oscura è fatta da neutrini, anche perché c'è un problema di difficile soluzione riguardante la capacità dei neutrini di formare le strutture cosmiche, quali galassie e ammassi di galassie.

Infatti, durante la formazione delle strutture cosmiche, avvenuta quando l'Universo aveva circa un milione di anni, un ruolo essenziale è stato rivestito dalla materia oscura che, come abbiamo accennato, è attiva gravitazionalmente, cioè deve essere in grado di creare un campo gravitazionale sufficientemente forte per consentire la costituzione di regioni molto dense nel cosmo; quelle stesse regioni che in seguito daranno origine alle galassie e agli ammassi.

Il problema riguardo ai neutrini, come possibili costituenti della materia oscura, è dovuto al fatto che sono particelle relativistiche, ossia viaggiano a velocità molto prossime a quelle della luce, per cui è molto difficile tenerle "ferme" in uno stesso luogo.

La loro tendenza a disperdersi in tutte le direzioni è un forte ostacolo alla possibilità di innescare il processo di collasso gravitazionale che solo permetterebbe la successiva formazione di una struttura. I neutrini quindi "riempiono" il 2% di C: facciamo un piccolissimo, e alquanto

scoraggiante passo avanti. Il 4.9% di C è materia (visibile e non) barionica, con l'apporto dei neutrini arriviamo al 7% circa. C'è assolutamente dell'altro!

4.3 La materia oscura fredda: particelle esotiche

Assioni e Monopoli magnetici!

Con i neutrini arriviamo al 7% di C. Ne manca ancora di materia! L'ultima speranza degli astrofisici per giustificare questa assenza di massa nei termini di materia (perché potrebbe non essere così?) risiede nella cosiddetta materia oscura fredda. I candidati sono particelle "esotiche" (ovvero, inusuali per il modello standard che descrive la presenza delle particelle elementari) con una grande massa, che si muovono a bassa velocità. Esamineremo qui alcuni candidati: assioni, WIMPi e monopoli magnetici

Assioni

Per capire veramente gli assioni dovremmo essere fisici delle particelle. Basti sapere che si stanno formulando teorie "simmetriche" ovvero che oppongono ad ogni bosone un fermione. Queste teorie permettono di spiegare la presenza delle quattro forze fondamentali. La più semplice, la simmetria di Gauge per l'elettromagnetismo, non è altro che un approfondimento del principio di conservazione dell'energia. La teoria della simmetria riguardante la forza forte chiamata cromodinamica quantistica (CDQ) descrive le interazioni fra quark per formare i barioni (protoni e neutroni). Durante il decadimento beta del neutrone gli elettroni emessi non rispettano la simmetria di spin del nucleo emettente.

Infatti il decadimento beta debole del neutrone viola le leggi di simmetria CDQ, ma una violazione della simmetria CP comporterebbe infatti la presenza di un elevato momento di dipolo elettrico per il neutrone, finora però mai osservato. Il problema risiede nell'assenza di momento iniziale del neutrone, infatti il decadimento del protone è correttamente spiegato. L'assione è una ipotetica particella elementare, proposta per spiegare l'assenza del momento di dipolo elettrico nel neutrone.

E' stato fatto notare che l'esistenza degli assioni è una componente necessaria anche per la teoria delle stringhe. In tutti i modelli fisici più avanzati gli assioni servono! Secondo queste previsioni teoriche, l'assione non ha carica elettrica, ha massa molto piccola, non ha spin, ed interagisce con la materia ordinaria (elettroni, protoni, ecc...) solo molto debolmente, ragione per cui è considerato una particella praticamente invisibile. Esiste la possibilità che gli assioni possano trasformarsi in fotoni e viceversa in presenza di intensi campi magnetici, e gli attuali esperimenti volti a rintracciare la presenza di queste particelle tentano di sfruttare proprio questa proprietà.

Nel 2006, uno studio sperimentale, condotto nell'ambito del progetto PVLAS, ha fornito risultati che indicherebbero la rilevazione di assioni, anche se non ci sono stati finora ulteriori studi volti a confermarlo.

Nonostante la massa prevista per gli assioni sia estremamente piccola, essi sarebbero stati prodotti in grande quantità nei primi istanti dopo il Big Bang.

Parte della materia oscura potrebbe essere composta da questo fondo di assioni.

Monopoli magnetici

Uno degli aspetti più spiacevoli della fisica moderna rimane il magnetismo. Lo stupore che si prova davanti a teorie perfettamente simmetriche e armoniche (si vedano la forza di Coulomb e quella di Newton) si arresta davanti alle forze magnetiche. Non sono poli (come quelli elettrici o gravitazionali) che generano il campo magnetico, bensì correnti in movimento. Ciò risiede nel fatto che è impossibile ottenere un monopolio magnetico.

Una calamita presenta sempre un'estremità nord e una sud, anche se la si taglia in parti sempre più piccole.

Ogni particella in rotazione infatti agisce come un piccolo dipolo magnetico. Eppure l'esistenza del monopolio magnetico continua ad attirare tutti i fisici. La quantizzazione delle cariche, secondo la carica elementare, potrebbe essere spiegata (teoria di P. A. Maurice Dirac, uno dei padri della meccanica quantistica) ammettendo l'esistenza di un monopolio magnetico.

Le recentissime Grandi Teorie Unificate (GUT), che permettono di unire in un unico aspetto le quattro forze fondamentali, prevedono l'esistenza del monopolio magnetico. Secondo le GUT questi monopoli dovrebbero essere oggetti completamente diversi dalla materia ordinaria, e soprattutto dovrebbero pesare 10^{16} volte più del protone.

Queste enormi particelle, non interagendo con nessuna forza (nemmeno la magnetica, in quanto la materia ordinaria è composta unicamente da dipoli magnetici) attraverserebbero la Terra incontrastati, non trovando nessun ostacolo al loro procedere.

Con un esempio di L. Krauss, sarebbe come cercare di fermare un autotreno lanciandogli contro dei pop-corn. I monopoli magnetici sono quindi altamente desiderati da ogni fisico, ma purtroppo le ricerche recentissime non hanno ancora fornito dati sufficienti ad confermare questi risultati.

Grande, placida, come in un fresco luminoso oceano di silenzio, gli stava di faccia la Luna. Sì, egli sapeva, sapeva che cos'era; ma come tante cose si sanno, a cui non si è dato mai importanza. E che poteva importare a Ciàula, che in cielo ci fosse la Luna? Ora, ora soltanto, così sbucato, di notte, dal ventre della terra, egli la scopriva. Estatico, cadde a sedere sul suo carico, davanti alla buca. Eccola, eccola là, eccola là, la Luna... C'era la Luna! la Luna! E Ciàula si mise a piangere, senza saperlo [...] nella notte ora piena del suo stupore.

(Pirandello, *Ciàula scopre la Luna*)

4.4 WIMP: l'ultima speranza

Freddo, freddissimo

Le stelle ammiccavano più forte, quasi s'accendessero,
e i tre re scintillavano

(Verga, *I Malavoglia*)

Nelle WIMP risiede la vera speranza per la scoperta della materia oscura. WIMP, che sta per Weakly Interacting Massive Particle, indica un'ipotetica

particella dotata di massa che interagisce debolmente con la materia normale solo tramite la gravità e la forza nucleare debole. Non possiedono ne' carica elettrica (per non interagire con la forza elettromagnetica) ne' "colore" (per non interagire con la nucleare forte).

Le WIMP sono ormai l'unico campo di vera ricerca per la materia oscura, il punto di tutto il nostro discorso, dove risiede ogni aspettativa per il futuro. Le ricerche stanno avvenendo con l'esperimento DAMA (DArk MATter) in Italia, nei laboratori nazionali del Gran Sasso. Questa tecnica si basa sullo studio dell'interazione elastica delle WIMP con i nuclei che costituiscono il rivelatore utilizzato.

Quando una WIMP attraversa il rivelatore vi è una certa probabilità che essa urti un nucleo, che rinculi; l'energia di rinculo del nucleo è, quindi, la grandezza misurata. Per evidenziare la presenza delle WIMP nella nostra Galassia è possibile utilizzare la marcatura della modulazione annuale del tasso di conteggio.

A causa del moto di rivoluzione della Terra attorno al Sole, che a sua volta si muove nella Galassia, il flusso delle WIMP che attraversano la Terra varia durante l'anno. In particolare il flusso è massimo in Giugno, quando le velocità del Sole e della Terra nel sistema di riferimento della Galassia si sommano, mentre è minimo sei mesi più tardi, in Dicembre, quando tali velocità hanno verso opposto. Il segnale rivelato sperimentale dovuto alle WIMP deve soddisfare alcuni requisiti molto stringenti:

- 1) deve avere un andamento modulato in accordo con una funzione cosinusoidale;
- 2) deve avere un periodo di un anno (tempo che impiega la Terra a compiere una rivoluzione completa);
- 3) deve essere massimo intorno al 2 Giugno e minimo nel mese di Dicembre;
- 4) deve essere presente in un determinato intervallo di bassa energia, dove le WIMP possono indurre rinculi nucleari;
- 5) dato che la probabilità che una WIMP abbia interazioni in più rivelatori è estremamente piccola, deve coinvolgere - per ogni evento di WIMP - un solo rivelatore;
- 6) deve presentare un'ampiezza di modulazione dell'ordine circa del 7%.

Finora, dopo sette anni di rilevazioni le WIMP mostrano davvero l'andamento desiderato...

Siamo forse arrivati alla soluzione? Le ultime stime sulla materia oscura fredda attribuiscono a questa forma di materia il 18% della densità critica. Un notevole passo avanti direi. Insieme al 7% precedente questo risultato ci spiega il 25% della materia dell'universo.

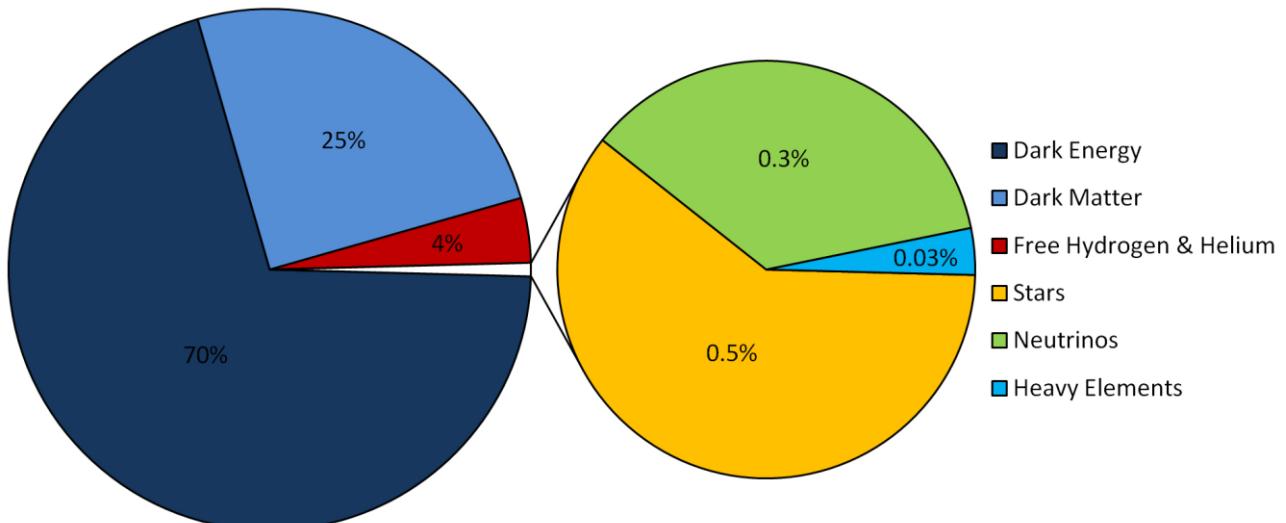
4.5 L'energia oscura (accenni) E se il vuoto non fosse vuoto?

Tutte le stime fatte, comprendendo la materia oscura fredda, ci permette di arrivare al 26.8% di C. Gli astrofisici hanno terminato ogni asso nella manica. Le ipotesi per un universo dominato dalla materia sono finite: eppure più di metà dell'Universo ci rimane sconosciuto. La conclusione è semplice quanto drastica:

I'Universo non è dominato dalla materia. Dovremmo esserci abituati, dopo la lettura di questa mia esposizione, che l'Universo è ben lontano da ciò che vediamo, ma l'Universo è lontano anche da ogni nostra categoria dell'immaginazione.

L'ipotesi principale è quella di un Universo dominato dall'energia, detta energia oscura, che corrisponderebbe al 68.3% della materia dell'Universo.

Le percentuali scritte sopra sono state determinate dalla sonda Planck dell' Agenzia Spaziale Europea (Peplow , 2013) . Le tre percentuali sono



raffigurate nella figura sottostante.

Immaginarsi il concetto di energia mette alla prova ogni studente di fisica. Eppure sembra che solo l'energia conti veramente: la materia è solo decorativa! Secondo le predizioni teoriche l'energia oscura avrebbe una densità di circa 10^{-29} grammi per centimetro cubo, quindi è davvero impossibile pensare di rilevarla con gli strumenti tecnici in nostro possesso. Molti sono stati i modelli cosmologici di Universi dominati dall'energia, ma non li esamineremo qui.

Vero è che, dopo Einstein, massa ed energia si equivalgono, ma questa è un'energia diversa, apparentemente non dominata nemmeno dalla relatività. Una spiegazione può essere trovata nelle particelle virtuali.

Chiunque mastichi anche solo un minimo di meccanica quantistica sa che il vuoto quantistico è solo apparentemente vuoto, in quanto è pieno zeppo di particelle virtuali.

Tutte le teorie moderne attribuiscono energia nulla alle particelle virtuali.

Se queste invece possedessero anche una piccolissima quantità di energia arriveremmo ben presto alla densità critica. La verità è però un'altra: il mondo rimane (e forse rimarrà sempre) misterioso. Ogni sforzo della scienza dal 1933 ad oggi ha avvicinato le nostre concezioni alla verità. Come diceva il nostro Popper, lo scopo della scienza non è la verità, che rimane misteriosa, ma è il limite della verità, ovvero tendere sempre più ad essa.

4.6 Cold collisionless dark matter

Tonight I wake early, the sky is pearl, the stars aglow
Stanotte mi sono svegliato presto, il cielo è di perla, le stelle brillano
(Bruce Springsteen, Silver Palomino)

La materia oscura, proposta come componente ipotetico dell'universo, e' riconosciuta ormai come l'ingrediente vitale del cosmo; essa e' piu' abbondante della materia ordinaria e la sua natura per ora resta un mistero. Comunque ultimamente sono state promosse alternative e teorie per far luce sulla materia e energia oscura. Ce' un modello concordato abbiamo parlato fino ad ora e un modello alternativo Cold collisionless dark matter (CCDM) che ha due propriet'a: puo' risollevere le questioni in sospeso nelle pagine precedenti e puo' condurre a nuove previsioni aggiuntive che lo distinguerebbero da tutte le altre alternative dare nuove alternative. Segue una lista di sette alternative

1. Strongly self-interacting dark matter (SIDM) La materia oscura potrebbe avere una significativa sezione d' urto di autoscattering σ confrontabile con quella dello scattering nucleone- nucleone.
2. Warm dark matter (WDM) La materia oscura puo' essere generata con una piccola dispersione in velocita' (per esempio attraverso il decadimento di un'altra specie) che la lascia con solo cento m/s di velocita' ma che puo' avere un effetto significativo su una struttura su piccola scala.
3. Repulsive dark matter (RDM) La materia oscura puo' consistere di un condensato di bosoni pesanti con un potenziale repulsivo di piccolo range .
4. Fuzzy dark matter (FDM) La materia oscura potrebbe essere costituita da particelle ultra leggere le cui lunghezza d'onda Compton ha le dimensioni del nucleo della galassia
5. Self-hannihilating dark matter (SADM) Le particelle della materia oscura in regioni dense possono collidere e annichilarsi , liberando radiazione .
6. Decaying dark matter (DDM) Se inizialmente i densi aloni decadono in particelle relativistiche e resti di massa inferiore allora le densita' del nucleo che si formano all'inizio sono significativamente ridotte senza alterare nla struttura a grande scala .
7. Massive black hole (BH)Se la maggior parte della materia oscura negli aloni galattici fosse sotto forma di pesanti buchi neri di circa un milione di masse solari , allora diversi misteri dinamici concernenti le proprieta' della nostra galassia potrebbero essere meglio compresi

E relativi grafici, questo modello CCDM e' capace di predire correttamente le osservazioni e questo e' un risultato ottimo.

CAPITOLO 5

CONCLUSIONI ULTIMISSIME SULLA MATERIA OSCURA

5.1 Il telescopio Hubble e la prima mappa della materia oscura

Concludiamo come abbiamo cominciato, in ordine cronologico. La messa in orbita del telescopio spaziale Hubble, da cui provengono gran parte delle immagini viste finora, fu fondamentale anche per la ricerca della materia oscura.

Il primo grande contributo di Hubble fu la ricerca “COSMOS” che costituisce la più vasta osservazione attuata attraverso il telescopio spaziale; il progetto è stato realizzato da una squadra internazionale di settanta astronomi. Durante la composizione della panoramica COSMOS Hubble ha fotografato 575 vedute adiacenti e leggermente sovrapposte dell’Universo. Il processo ha richiesto 1000 ore di osservazioni. Utilizzando ogni risorsa acquisita sulla ricerca della materia oscura, che noi abbiamo descritto, con Hubble si è arrivati ad un confronto chiarissimo. La brillantezza degli ammassi

corrisponde alla densità di massa. La mappa copre un'area celeste pari a nove volte il diametro angolare dell'intera Luna e rappresenta il modello più vasto mai ottenuto della distribuzione della materia oscura nell'Universo. La simulazione dimostra che la materia ordinaria, incluse stelle, galassie e gas interstellari, è assemblata all'interno di un'impalcatura fondamentale di materia oscura.

*Continuous as the stars that shine
And twinkle on the milk way,
They stretched in never ending line
Fitti come le stelle che brillano
e sfavillano sulla Via Lattea,
così si stendevano in una linea infinita
(Wordsworth, Daffodils)*

5.2 Verso l'infinito e oltre!

L'ultimo paragrafo nella storia della materia oscura è recente. Gli sforzi approdano il 7 gennaio del 2007 alla pubblicazione da parte di NASA ed ESA (enti spaziali americano ed europeo) della prima mappa tridimensionale della materia oscura. Questa mappa tridimensionale è la prima rappresentazione della distribuzione fibrosa della materia oscura su grande scala. La mappa rivela una rete libera di filamenti in collasso gravitazionale.

Questo conferma le teorie riguardanti le modalità con le quali le strutture si sono formate nel nostro Universo in evoluzione; quest'ultimo ha subito un'evidente transizione da una relativa distribuzione uniforme di materia al momento del Big Bang alla disomogeneità della collocazione degli ammassi galattici odierni.

I filamenti di materia oscura dapprima iniziarono ad esistere e provvidero a formare un'impalcatura di fondo per la costruzione successiva di stelle e galassie dalla materia ordinaria. Senza la materia oscura, ci sarebbe stata massa insufficiente nell'Universo per il collasso di strutture e la formazione di galassie.

5.3 Ulteriori approfondimenti sulla materia ed energia oscura

Come ben si sa il fatto di capire che c'e' materia oscura e' ormai evidente dalle molte prove che sono state fatte e sugli effetti gravitazionali che produce, ma i candidati più probabili come costituenti la materia oscura nel 2015 sono ancora le WIMP.

Unica cosa certa e' che la materia oscura non produce un'emissione ottica e le WIMP emettono raggi gamma infatti nel processo di mutua annichilazione.

Da considerazioni cosmologiche la natura fisica della materia oscura e' divisa in due parti : quella barionica circa il 90 % della materia barionica non

emette nella banda ottica; la materia oscura non barionica e' un discorso complesso, ma le WIMP hanno numero barionico nullo.

C'e' da considerare anche l'energia oscura e' associata a una pressione negativa che produce gravita' repulsiva che si rivela nell' accelerazione cosmica attuale. L' energia oscura corrisponde a un campo scalare; la auto repulsione fa sì che sia diffusa in modo uniforme nell 'universo.

WIMPS

Sono candidate per la costituzione della materia oscura esempi sono offerti dall' assione, lo pseudo bosone di Goldstone.

anche il neutralino. Il contributo delle WIMP al parametro di densita' cosmica dell' universo e' omega = $3 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-3}\text{sec}^{-1}/\sigma v$
 σ rappresenta la sezione d' urto di annichilazione e v e' la velocita' quindi si ripete che rivelare le WIMP si fa in modo indiretto osservando le particelle prodotte nella loro mutua annichilazione raggi gamma neutrini positroni antiprotoni.

5.4 Ricerche della materia oscura dallo spazio

Negli ultimi anni si e' capito che per avere qualche indicazione sulla composizione della materia oscura potevano essere utili nuove osservazioni dei raggi cosmici compiute dallo spazio: dalla stazione spaziale internazionale o da appositi satelliti.

5.5 Alpha Magnetic Spectrometer

Un primo indizio della composizione della materia oscura e' stato catturato dallo strumento Alpha Magnetic Spectrometer (Ams) installato dal 2011 all'esterno della Stazione Spaziale Internazionale. Secondo i responsabili dell'esperimento ci potrebbero essere indicazioni di un nuovo fenomeno fisico, forse l'evidenza indiretta delle particelle che formano la materia oscura.

L'analisi dei dati raccolti da Ams dal 2011 ad oggi, misurando con una precisione straordinaria la composizione dei raggi cosmici, e' stata descritta nel dicembre 2015 al CERN di Ginevra .

Anomalie sono state notate sia nella misura dei positroni che degli antiprotoni; le quantità osservate da Ams sono in eccesso rispetto alle previsioni basate sulla fisica conosciuta. Questo eccesso puo' essere interpretato in modo coerente chiamando in causa particelle associate alla materia oscura”.

L'abbondanza di positroni e di antiprotoni si può infatti interpretare come

l'effetto prodotto da collisioni tra particelle di materia oscura, e quindi come una possibile evidenza indiretta sia dell'esistenza di questa materia invisibile, sia del fatto che possa essere composta da particelle esotiche non ancora conosciute.

Comunicazione di Roberto Battiston, presidente dell'ASI (ANSA DIC 2015)

5.6 Lancio di un satellite cinese

LECCE – Conto alla rovescia per il lancio del primo satellite cinese che andrà a caccia di materia oscura, la materia misteriosa e invisibile che occupa il 25% dell'universo. È in programma per domani il lancio della missione Dampe (Dark matter particle explorer), alla quale l'Italia contribuisce con le università di Bari e del Salento.

Il lancio del satellite è previsto alle 23.30 italiane dal deserto del Gobi, dove si trova la base Juquan (Cina), con un razzo del tipo Lunga Marcia 2D. Il satellite, del peso complessivo di circa 1.900 chili, è il cuore di uno dei cinque progetti dello 'Strategic Pioneer Program on Space Science', il programma di esplorazione spaziale promosso dell'Accademia cinese delle scienze (Cas). Si tratta di una missione di fisica delle astro-particelle ideata per misurare, con una maggiore precisione e in un più ampio intervallo di energie rispetto a quanto fatto sinora, le caratteristiche dei raggi cosmici.

Il Dipartimento Interateneo di Fisica dell'Università e del Politecnico di Bari e la Sezione di Bari dell'Istituto nazionale di fisica nucleare partecipano all'esperimento Dampe con un gruppo composto dai quattro ricercatori Piergiorgio Fusco, Fabio Gargano (responsabile locale dell'esperimento Dampe), Francesco Loparco e Mario Nicola Mazziotta (coordinatore locale della attività di fisica astroparticellare dell'Infn).

Oltre che nella costruzione del satellite, il ruolo del gruppo italiano è stato fondamentale nella fase di caratterizzazione delle prestazioni del rivelatore Dampe, attraverso una vasta campagna di misure effettuate con fasci di particelle presso il Cern a Ginevra. I ricercatori sono ora in prima linea nelle attività di studio delle prestazioni del rivelatore e per la preparazione degli strumenti di analisi dati. Il lancio avvenuto alle una e 12' del 17 dic 2015 ha avuto pieno successo.

E quando miro in cielo arder le stelle;
Dico fra me pensando:
A che tante facelle?
Che fa l'aria infinita, e quel profondo
Infinito seren? che vuol dir questa
Solitudine immensa? ed io che sono?

(Leopardi, Canto notturno di un pastore errante dell'Asia)

5.7 Riepilogo

Siamo ancora come bambini che si svegliano davanti ad un mondo sconosciuto. La natura stessa di ciò che ci circonda rimane, in gran parte, misteriosa. Solamente il 5% del cosmo è direttamente visibile dai nostri occhi. Il rimanente è tutto oscuro. Non abbiamo la più vaga idea di cosa possa essere il 95% della materia dell'Universo, anzi: probabilmente in gran parte non è neanche materia.

Le conclusioni su questo tema sono scioccanti. Certe osservazioni mostrano una quantità di materia oscura inimmaginabile, affiancandola a scenari cosmici arditi; mentre altre potrebbero ricondurre il tutto in termini convenzionali.

Accanto a questo sconforto sta però anche qualche dato rassicurante.

Nonostante la materia oscura domini il cosmo, sembra che questa segua la disposizione di materia luminosa. Ciò che vediamo conta ancora qualcosa.

Gli ultimissimi sviluppi hanno permesso di individuare le strutture filamentose della distribuzione di materia oscura. Sembra che la concentrazione di materia oscura vari, non soltanto nello spazio, ma anche nel tempo (è forse possibile ancora distinguerli?).

I nuovissimi mezzi di osservazione come Hubble Space Telescope hanno permesso di effettuare un confronto diretto fra il visibile e l'oscuro.

E' ancora quasi tutto da scoprire.

Con questo lavoro non ho analizzato altro che il "quasi".

BIBLIOGRAFIA

- Amaral L.H., Ortiz R., Lepine J.R.D., Maciel W.J. (1996) M.N.R.A.S. **281**, 339
Fich M., Tremaine S. (1991) Ann. Rev. Astron. Astroph. **29**, 409
Jeans J.H. (1922) M.N.R.A.S. **82**, 122
Kapteyn J.C. (1922) Ap.J. **55**, 302
Lindblad B. (1926) Uppsala Medd. **30**, 11
Ostriker J.P., Steinhardt P. (2003) New light on Dark Matter. Science, **300**, 1909
Peplow M. (2013) Conferenza dell'ESA del 21/3/2013
Smiith S. (1936) Ap. J. **83**, 23
Zamagni M. (1997) tesi di laurea
Zwicky F. (1933) Helv. Phys. Acta **6**, 110
Zwicky F. (1937) Ap. J. **86**, 217

Libri

- Lawrence Krauss: Il mistero della massa mancante, Cortina Raffaello Editore (collana "Scienza e idee"), 2000
Lawrence Krauss: Il cuore oscuro dell'Universo, Mondadori 1990
Robert Ossemann: Poesia dell'Universo, TEA Scienze 2000

Marco Roncadelli: Quaderni di fisica teorica, Aspetti astrofisici della materia oscura; Bibliopolis (Napoli), 2004
Kevin Tildsley: Cielo Notturno, Fabbri Editore 2007

Siti Web

Unione astrofili italiani: <http://astrocultura.uai.it/>
<http://www.uai.it/>
The DAMA (DArk MATter Project):
<http://people.roma2.infn.it/~dama/web/home.html>
Università di Trieste: <http://physics.infis.univ.trieste.it/>
SISSA (Scuola Internazionale di Studi Avanzati Trieste): <http://www.sissa.it/>
Astronomical Department of Saint Petersburg State University:
<http://www.astro.spbu.ru/>
University of Cambridge: <http://www.admin.cam.ac.uk/>
Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics: <http://www.mpe.mpg.de/>
WARP programme: <http://warp.pv.infn.it/>
Hubble Space Telescope: <http://hubblesite.org>
Chandra X-Ray Observatory: <http://chandra.harvard.edu/>
Ente Spaziale Americano: NASA www.nasa.gov
Ente Spaziale Europeo ESA: www.esa.int
Ente Spaziale Italiano: <http://www.asi.it/>
Ente Spaziale Giapponese: JAXA <http://www.jaxa.jp/>
Ente Spaziale Britannico: BNSC <http://www.bnsc.gov.uk>
Siti di divulgazione scientifica: <http://www.holoscience.com/>
<http://astrolink.mclink.it/>
<http://www.space.com/>
<http://www.cosediscienza.it/>
<http://www.wikisky.org>
<http://www.scienzagiovane.unibo.it>
<http://www.solstation.com/>

Riviste divulgative

Scienza per tutti: Progetto DAMA (periodico multimediale)
Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 111, 1999 june: The early history of dark matter
Le Scienze 405 - Maggio 2002: Bagliori dalla Materia Oscura
Le Scienze 464 – Aprile 2007: Energia Oscura: La mano invisibile dell’Universo
Il Sole 24 Ore, Umberto Bottazzini: La quintessenza oscura

Dedico questo lavoro a mia madre Nella Bagni e al Prof. Corrado Bartolini.

