

Speciale N° 32: atti dal simposio  
"Nuovi orizzonti di una scienza in divenire"

## IL "LATO OSCURO" DELL'UNIVERSO

di Marco Bersanelli\*

*Il lato oscuro dell'Universo in realtà è un lato cristallino. Ci sono evidenze dell'esistenza della materia oscura su diverse scale: galassie, ammassi di galassie e Universo primordiale, dove ha una funzione fondamentale nella formazione di tutte le strutture e nel fiorire della complessità cosmica. Deve essere fatta di particelle diverse da quelle note alla fisica convenzionale e contribuisce all'85% della materia e a circa il 27% del budget totale.*

*L'energia oscura, scoperta grazie all'osservazione delle supernovae lontane, e confermata dalle misure del fondo di microonde, contiene il 69% della densità di energia dell'Universo attuale. Dobbiamo rassegnarci al fatto che il 95% di tutto è ancora ignoto.*

*Questa situazione ci dà però lo slancio per nuove domande e approfondimenti. C'è molta attesa per le prossime missioni, come Euclid, che cercherà di misurare gli effetti di materia e energia oscura nella distribuzione delle galassie nello spazio profondo.*

\* Dipartimento di Fisica.  
Università degli Studi di  
Milano

Iniziamo con un indovinello: che cosa stiamo osservando nell'immagine della *Figura 1* qui sotto? Le luci che provengono dalla Terra. Sono tutte artificiali tranne quelle in alto a sinistra: l'aurora boreale. Ma il grosso della materia, la Terra, qui non si vede.

Questa immagine ci aiuta ad immedesimarci nel fatto che la luce non necessariamente traccia la massa. In questo caso la maggior parte della materia risulta invisibile, potremmo definirla "oscura", e la luce che vediamo non ci restituisce una buona mappa della distribuzione della massa sottostante.

Facciamoci la stessa domanda riguardo al cielo: quando guardiamo le stelle vediamo effettivamente la distribuzione della massa nell'Universo, oppure qualcosa che potrebbe essere scorrelato da ciò? In realtà, che ci sia una gran quantità di materia celeste radicalmente invisibile è un'idea antica.

Basti pensare al sistema Tolemaico, che prevedeva l'esistenza di un enorme ingranaggio di sfere cristalline, a cominciare dal Primo Mobile, un sistema di notevole complessità che riusciva a dar ragione del moto osservato delle stelle e dei pianeti. Le sfere celesti, perfettamente trasparenti e quindi invisibili, erano contemplate anche nel sistema Copernicano. In tali sfere si immaginava fossero incastonate le stelle e i pianeti: le sfere erano un substrato fisico sui generis, fatto di una materia diversa da quella terrestre, totalmente incorruttibile.

Rispetto alle conoscenze odierne, cosa possiamo dire della possibilità che esista materia invisibile, materia che non è osservabile in modi convenzionali?

Tutte le stelle che vediamo nel cielo a occhio nudo sono parte di un sistema stellare, la nostra Galassia, che contiene 200-250 miliardi di stelle (noi a occhio nudo ne vediamo solo qualche migliaio).

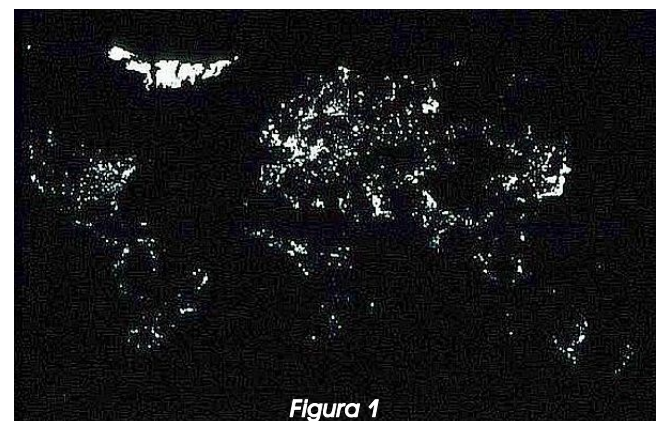
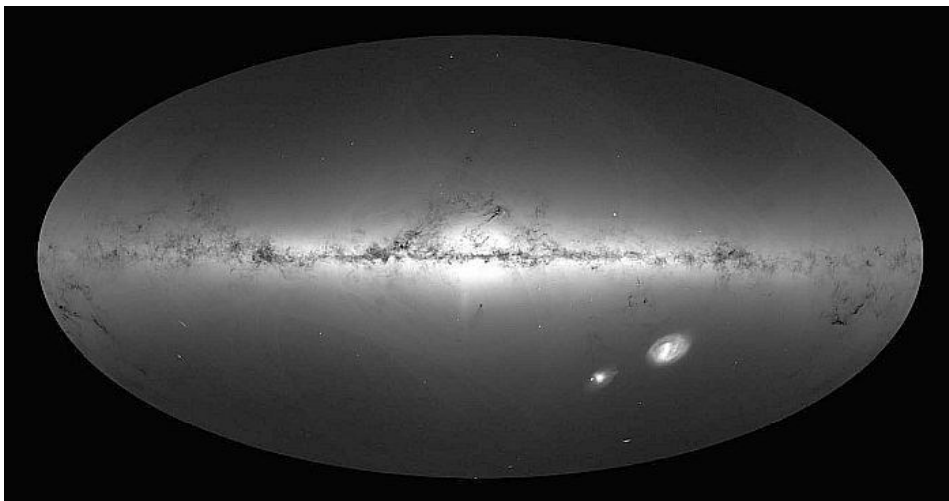


Figura 1

Nella seguente figura è mostrata una recentissima immagine della nostra Galassia, pubblicata qualche mese fa, ottenuta dalla missione spaziale Gaia. Qui sono rappresentate 1,7 miliardi di stelle (ognuna è un piccolo puntino bianco), distribuite sull'intera sfera celeste, e concentrate soprattutto sul piano della nostra Via Lattea (la striscia centrale orizzontale), che è la nostra Galassia e ha la forma di un grande disco.



*Immagine della Via Lattea pubblicata il 25 aprile 2018 con i dati della missione Gaia dell'ESA.*

Nel piano della Galassia vediamo anche alcune regioni oscure: sono nubi di polvere a cui sono associati gas interstellari, che trattengono, assorbono la luce stellare. Nubi analoghe le vediamo anche nelle galassie esterne alla nostra.

Queste nubi di polveri e gas diffusi sono oscure nella luce visibile, ma se le osserviamo a lunghezze d'onda più grandi, nel lontano infrarosso o nelle microonde, allora diventano visibili, luminose. Nelle galassie a spirale (come la nostra) il gas e la polvere interstellare contribuiscono per una quantità non trascurabile rispetto alla massa totale delle stelle, intorno al 10%.

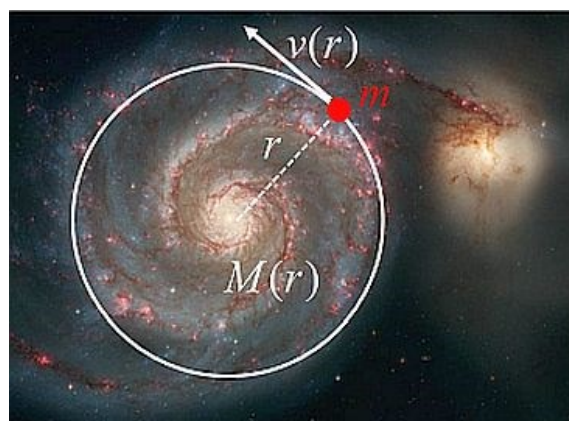
Ora vorremmo capire se esistono dei modi per misurare la massa intera di una galassia, essendo certi di non perderne qualche pezzo o qualche componente difficile da vedere. Possiamo avvalerci degli effetti gravitazionali. Infatti, sia le stelle che il gas interstellare che altre forme di materia sono soggetti alla forza di gravità.

Per questo possiamo sfruttare le misure di rotazione delle galassie: grazie a misure dell'effetto Doppler infatti gli astrofisici sono diventati abilissimi a effettuare misure precise di velocità. Consideriamo, nella figura a lato, una massa campione  $m$  (diciamo una stella) a distanza  $r$  dal centro di una galassia, e sia  $M(r)$  la massa contenuta entro il raggio  $r$ .

Se la stella ruota intorno al centro della galassia con velocità  $v(r)$ , la sua forza centripeta in base alle leggi newtoniane sarà data da:  $mv(r)^2/r = GM(r)m/r^2$ . Si può allora ricavare la massa che si trova all'interno della regione di raggio  $r$ :  $M(r) = r v(r)^2/G$ .

Ora noi ci aspettiamo che al bordo esterno della galassia, laddove la sua luminosità tende a zero, venga meno anche la sua massa. Quindi oltre quel limite,  $M(r)$  non aumenta più all'aumentare di  $r$ . In questa ipotesi l'andamento della curva di velocità sarà dato da:  $v = (GM/r)^{1/2}$  quindi la velocità  $v$  in funzione di  $r$  (la cosiddetta curva di rotazione) dovrebbe avere un andamento pari a  $r^{-1/2}$ .

Questa relazione è detta kepleriana, perché è direttamente legata alla terza legge di Keplero.



*La misura della curva di rotazione delle galassie mette in evidenza la presenza di materia oscura.*

Il modo migliore per misurare curve di velocità è usare galassie esterne viste di taglio, perché la loro rotazione permette di misurare al meglio l'effetto Doppler. Con questo sistema si misura la velocità radiale, che al bordo della Galassia coincide con la velocità effettiva.

Le prime misure decisive delle curve di rotazione delle galassie furono fatte negli anni '70 da Vera Rubin. Sorprendentemente, trovò che la curva di velocità  $v(r)$  non variava con la legge kepleriana, ma rimaneva costante al variare di  $r$  fino alle regioni più esterne. Ciò significa che ai bordi delle galassie deve esistere più materia di quella che si rende visibile attraverso la luminosità delle stelle.

Le misure attuali confermano in modo clamoroso questo fatto (vedi figura a fianco) la parte visibile delle galassie contiene solo il 10% circa della massa totale. Grazie a misure radio (in particolare sulla riga a 21 cm dell'idrogeno atomico neutro) si possono misurare le curve di rotazione anche in regioni molto lontane dal centro della galassia, dove ci si discosta in modo drammatico dalla previsione kepleriana.

È naturale allora ammettere la presenza di una nuova forma di materia, che è stata chiamata materia oscura, in quantità molto più cospicue di quella data dalle polveri e i gas. Essa in realtà non è oscura, ma perfettamente trasparente: non ne vediamo traccia luminosa, ma la sua massa si fa sentire perché incide sulla dinamica gravitazionale della rotazione delle galassie. Questa è una prima evidenza della presenza di materia oscura.

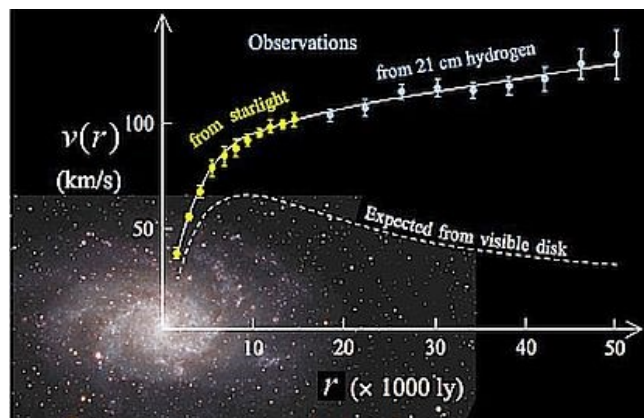
Adesso andiamo su scale molto più grandi: gli ammassi di galassie, oggetti che possono contenere migliaia di galassie, con masse pari a  $10^{14}$  -  $10^{15}$  masse solari. Sono i sistemi più grandi che esistono nell'Universo. Perché siamo convinti che siano sistemi gravitazionalmente legati e non semplicemente delle occasionali fluttuazioni di densità nella distribuzione delle galassie?

Perché se calcoliamo il tempo tipico che una galassia impiega ad attraversare l'intero ammasso - prendendo la dimensione dell'ammasso e dividendo per la velocità tipica interna della galassia - questo tempo è minore dell'età dell'Universo. Quindi se tale sistema non fosse gravitazionalmente legato avrebbe già avuto il tempo di disperdersi, proprio come un gas che diffonde e si distribuisce uniformemente nello spazio.

Utilizzando il Teorema del Viriale, che sfrutta l'equilibrio tra energia cinetica e energia gravitazionale, è possibile stimare la massa dell'ammasso. Questo tipo di stima risale agli anni 30 del secolo scorso. Il primo a utilizzarlo fu l'astrofisico Fritz Zwicky che, osservando un ammasso di galassie nella costellazione della Chioma di Berenice, si rese conto che per dar ragione della sua energia cinetica (misurata dalla dispersione di velocità delle galassie), il rapporto tra massa e luminosità dell'ammasso doveva essere centinaia di volte maggiore di quello presente in una stella, per esempio nel Sole. Anche in questo caso, si conclude che la materia associata alla parte luminosa dell'ammasso di galassie costituisce al massimo il 10-15% della sua massa totale.

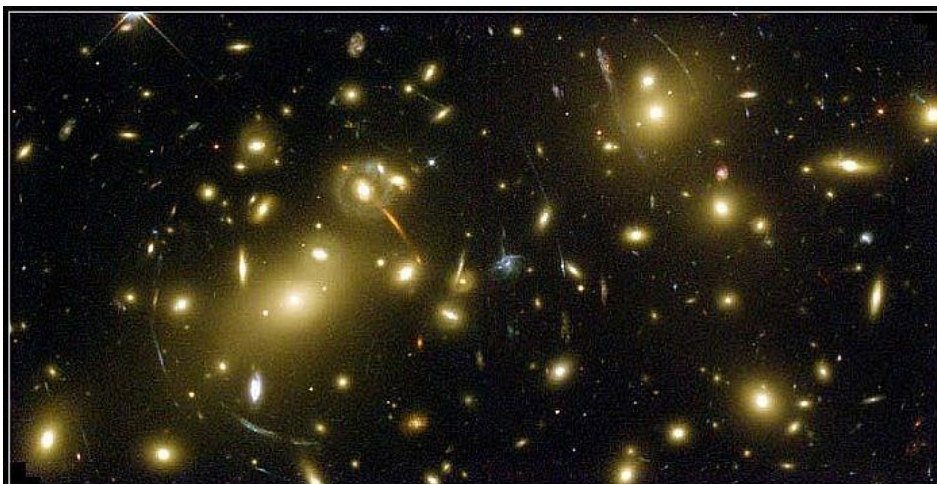
Oggi sappiamo molto di più sugli ammassi di Galassie. In particolare si è scoperto che quello che nel visibile appare come un raggruppamento di galassie, distribuite in modo un po' sparso e irregolare, se lo osserviamo con un telescopio a raggi X ci si presenta come una distribuzione molto regolare, a simmetria sferica. Questa emissione X è prodotta da un gas diffuso e incandescente, a temperature dell'ordine di  $10^7$  -  $10^8$  K, e molto rarefatto (numero di particelle per  $\text{cm}^3$  pari a  $10^{-3}$ - $10^{-4}$ ). Pur essendo molto rarefatto, poiché riempie un enorme volume, il gas degli ammassi contiene una grande quantità di massa.

Si potrebbe pensare di aver risolto il problema della massa mancante, almeno per gli ammassi di galassie: forse essa è proprio in questa grande distesa di gas. Ma quando si sono fatte delle stime abbastanza accurate della massa contenuta in questo gas, si è trovato che al massimo corrisponde al doppio della massa delle galassie, non certo a quel fattore 10 in più che le misure di Zwicky avevano mostrato. Dunque anche per gli ammassi di galassie, la massa che vediamo mediante la luminosità ottica delle singole galassie più la massa del gas rivelata dai raggi X, è appena il 15-20% della massa totale. Di nuovo, manca all'appello oltre l'80% della massa, che dev'essere in qualche forma di "materia oscura".



C'è un altro modo attraverso cui possiamo misurare la massa, sempre attraverso effetti gravitazionali, ed è il *lensing gravitazionale*.

In base alla teoria della relatività generale ci aspettiamo che un raggio di luce, passando attraverso un campo gravitazionale, venga deflesso di un certo angolo che è proporzionale alla massa e inversamente proporzionale alla distanza minima del raggio di luce dalla massa stessa. È un effetto simile a quello di una lente, che devia la luce, ma in questo caso la deviazione è prodotta dal campo gravitazionale. Oggi siamo in grado di sfruttare questo effetto per misurare la massa che lo produce. La seguente figura mostra come la luce proveniente da galassie lontane attraversando un campo gravitazionale viene deformata, proprio come se passasse attraverso una lente. Nell'immagine di questo ammasso vediamo effettivamente comparire delle strutture filamentose, simili a degli archi. Misurando queste deformazioni possiamo stimare la massa che le produce.



**Galaxy Cluster Abell 2218**

HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08

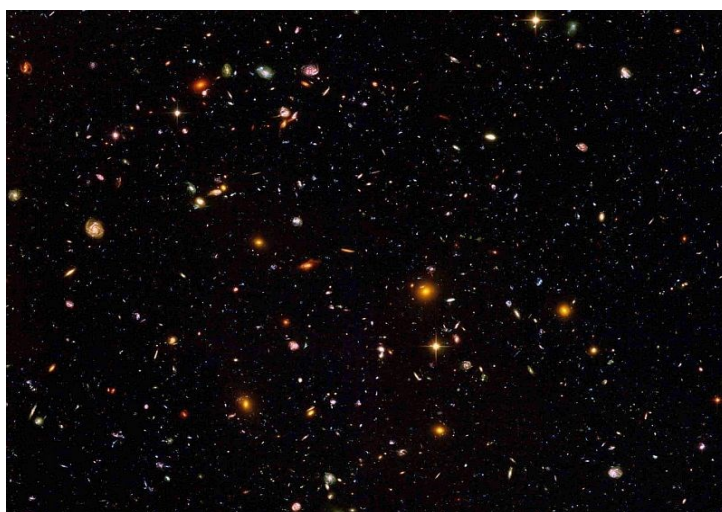
*Ammasso di galassie osservato dal telescopio spaziale Hubble. Gli archi luminosi visibili nell'immagine sono causati dal fenomeno del lensing gravitazionale.*

Mettendo insieme tutti questi dati riusciamo ad avere una stima abbastanza ben definita del contributo in massa che le varie componenti danno agli ammassi di galassie: la materia luminosa stellare, i gas e le polveri, contribuiscono per il 5%. Il gas tenue ad alta temperatura, diffuso all'interno dell'ammasso, contribuisce al 10-15%. E "qualcosa d'altro", che chiamiamo *dark matter* e che non è percepibile dal punto di vista elettromagnetico ma solo dal punto di vista gravitazionale, conta per l'85%.

## Su scala cosmica

Abbiamo visto che abbiamo evidenza di materia oscura a livello della scala galattica, attraverso la rotazione delle galassie, e negli ammassi di Galassie, attraverso il lensing gravitazionale. Ora vediamo il fenomeno su scala cosmica, a livello globale, a un ordine di grandezza superiore. Nella figura a fianco è mostrato l'*Hubble ultra deep field*, l'immagine più profonda dell'Universo delle galassie che abbiamo e che rappresenta un piccolo angolino di cielo, come una piccola frazione del disco della Luna (il 10%). Sono presenti circa 10.000 galassie, quelle più deboli sono quelle più lontane, a miliardi (fino a 12-13) di anni luce di distanza.

Abbiamo imparato che l'Universo è in espansione e, misurando quanto rapidamente lo spazio si espande, possiamo stimare quanto tempo ci ha messo a dilatarsi al punto in cui lo vediamo oggi. Troviamo che questo tempo, che corrisponde all'età dell'Universo, è di circa



*Ultra deep field fotografato dal Telescopio Spaziale Hubble*

14 miliardi di anni. Dunque quelle galassie più lontane si trovano in una fase in cui l'Universo era giovane: aveva solo 1 o 2 miliardi di anni di età.

Più osserviamo regioni lontane nello spazio e più le vediamo come erano nel passato, cioè andiamo indietro nel tempo. La velocità della luce, grandissima ma finita, ci restituisce uno spaccato della storia cosmica, via via che ci addentrandoci nello spazio profondo.

Domandiamoci se esista una luce che ci arriva da ancora più lontano delle più lontane galassie, che ci possa portare un'immagine di un Universo ancora più giovane. Ebbene sì, quella luce esiste e proviene dal fondo del cielo, da tutte le direzioni, da tutte le regioni dello spazio; riceviamo questo debole segnale luminoso nelle microonde (a lunghezze d'onda di qualche mm), e per questo lo chiamiamo fondo cosmico di microonde.

E' una luce che ci avvolge, raggiungendoci dalla periferia dell'Universo osservabile dopo un viaggio di 14 miliardi di anni.

Se volessimo rappresentare con un fotogramma come è fatto l'Universo così come lo possiamo osservare (Figura a fianco), potremmo rimanerci sorpresi: in un certo senso assomiglia all'Universo tolemaico... ma, attenzione, non siamo tornati all'immagine geocentrica dell'Universo. Anzi! Paradossalmente stiamo parlando di qualcosa che è completamente l'opposto: l'Universo non ha un centro fisico essendo isotropo e uniforme.

La nostra situazione è simile a quella che avremmo essendo in una barchetta in mezzo all'oceano: ci vediamo al centro di una realtà che ha simmetria sferica attorno a noi, delimitata da un orizzonte. Se non che, nella nostra situazione cosmica, l'orizzonte è non solo spaziale ma anche temporale: più lontano andiamo più raggiungiamo il passato fino all'inizio della storia dell'Universo.

La scena è la stessa in ogni direzione, a meno di variazioni locali di poco conto su scala cosmologica; fino a raggiungere un Universo primordiale molto denso, compatto, la cui temperatura era altissima. In quelle condizioni l'universo era opaco, per cui la luce non era in grado di propagarsi liberamente.

La superficie di demarcazione tra la regione opaca e quella trasparente dell'universo nello spazio-tempo è la cosiddetta superficie di ultima diffusione: da essa riceviamo i fotoni primordiali, il fondo cosmico di microonde.

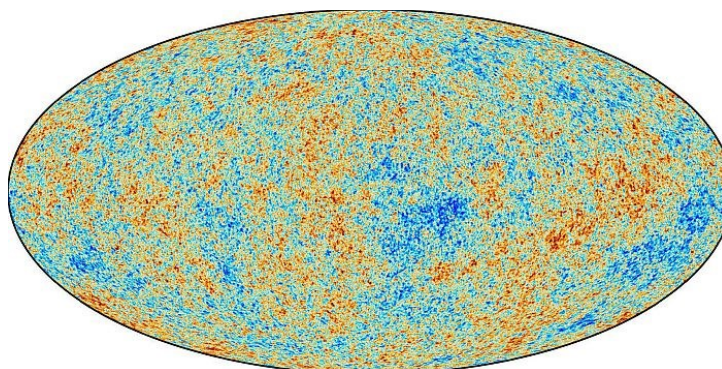
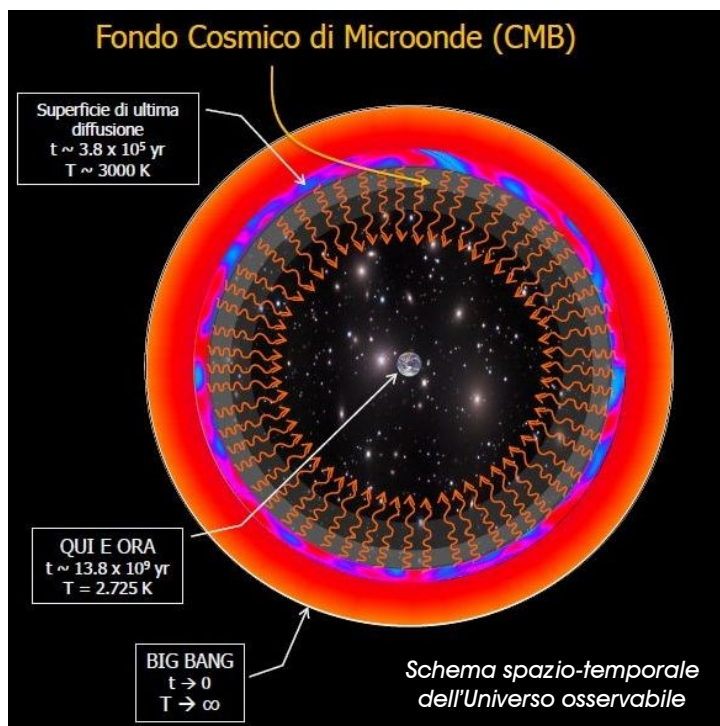
La missione PLANCK – alla quale ho lavorato assieme a molti amici e colleghi per 26 anni - lanciata nel 2009, ha misurato questa luce primordiale con precisione senza precedenti da ogni direzione. Il satellite ha ruotato su sé stesso per 4 anni con un ritmo di un giro al minuto, in un'orbita lontana 1,5 milioni di chilometri dalla Terra, seguendola nel suo giro annuale attorno al Sole. Cambiando ogni 6 mesi il proprio angolo di osservazione di 180 gradi (coprendo quindi l'intera sfera), otteniamo una mappa dell'intero cielo.

Togliendo il disturbo rappresentato dall'emissione nelle microonde della nostra Galassia si ottiene una vera e propria immagine dell'universo appena nato (figura a fianco) quando ancora non esistevano stelle, galassie o strutture di sorta. L'universo era un mare infuocato quasi esattamente uniforme, ma non del tutto, come evidenziano questi colori blu e rossi, che tracciano regioni leggermente più dense o più rarefatte di quel plasma primordiale.

Queste perturbazioni di densità sono i semi gravitazionali a partire dai quali si sono formate le galassie, gli ammassi di galassie, e tutte le strutture che vediamo oggi nell'universo.

Cosa c'entra tutto questo con la materia oscura? C'entra drammaticamente, come vedremo.

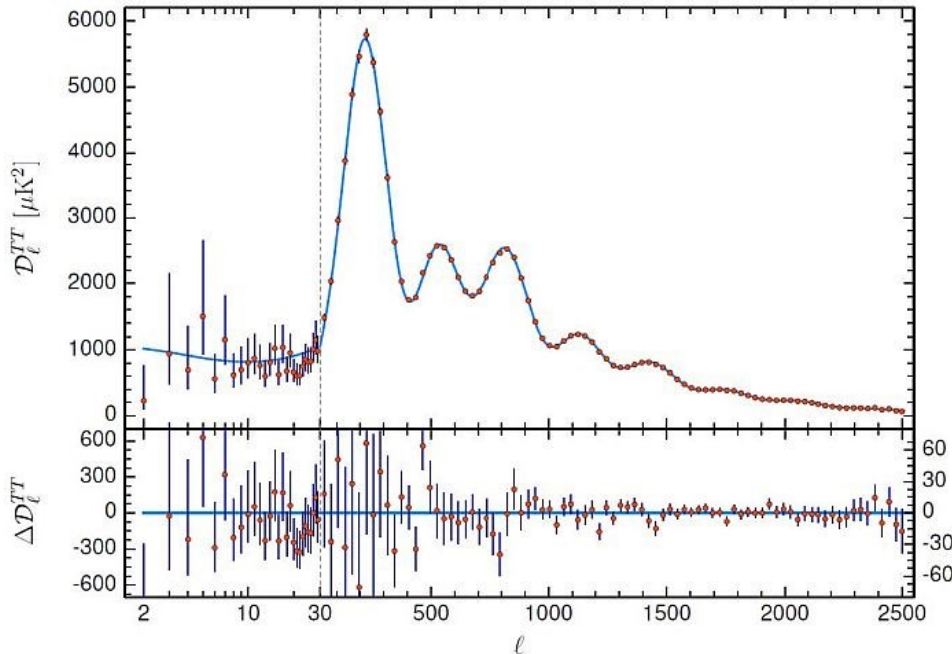
Queste regioni più dense e più rarefatte, che chiamiamo anisotropie, hanno un contrasto molto piccolo, una parte su 100.000.



L'immagine più accurata oggi esistente dell'universo primordiale

La statistica con cui si presentano queste lievi disuniformità può essere sintetizzata in una singola curva.

Questa curva rappresenta il grado di contrasto (asse verticale) in funzione della scala angolare (asse orizzontale), cioè in funzione dell'ampiezza delle regioni di cielo che consideriamo: la scala sull'asse orizzontale è proporzionale all'inverso della scala angolare.



Il modello dell'Universo primordiale a 6 parametri (Planck Collaboration 2018)

Tecnicamente, la curva della figura rappresenta la scomposizione in armoniche sferiche della funzione temperatura del fondo cosmico sulla sfera celeste. In questa figura i punti rossi sono dedotti dalle osservazioni (la mappa dell'universo primordiale alla pagina precedente), mentre la curva blu è il più semplice modello teorico compatibile con la relatività generale che descrive lo stato fisico dell'Universo primordiale, e contiene solo 6 parametri liberi. L'accordo tra dati osservati e teoria è straordinario.

I sei parametri del modello contengono, fra l'altro, le informazioni sul contenuto di materia barionica (ossia la materia ordinaria, capace di emettere e assorbire luce), e di materia oscura non barionica.

Ebbene, i risultati di Planck indicano che la materia barionica corrisponde a solo il 4,9% dell'energia complessiva nell'universo. Inoltre il 26,4% è costituito dalla materia oscura: essa ha le caratteristiche gravitazionali della materia ordinaria ma non è soggetta ad essere visibile elettromagneticamente.

Si tratta evidentemente della stessa materia oscura che abbiamo visto nelle galassie e negli ammassi di galassie, che si rende presente anche nell'universo primordiale.

Poi c'è un'altra grande fetta, il restante 68,7%, che viene attribuito a una componente ancora più esotica, la cosiddetta energia oscura (*Dark Energy*). Naturalmente "materia" ed "energia" possono essere trattate sullo stesso piano, grazie alla famosa equazione di Einstein  $E=mc^2$ .

La presenza di questa ulteriore componente "oscura" dell'universo era stata scoperta mediante osservazioni di *Supernovae* lontane (stelle che esplodono a grande distanza), una scoperta che ha dato il premio Nobel ai suoi protagonisti.

Si ritiene che l'energia oscura sia responsabile dell'espansione accelerata dell'universo. Significa che oggi (cosmicamente parlando) l'Universo si espande più rapidamente di qualche miliardo di anni fa, a partire da quando questa forma di energia è divenuta dominante.

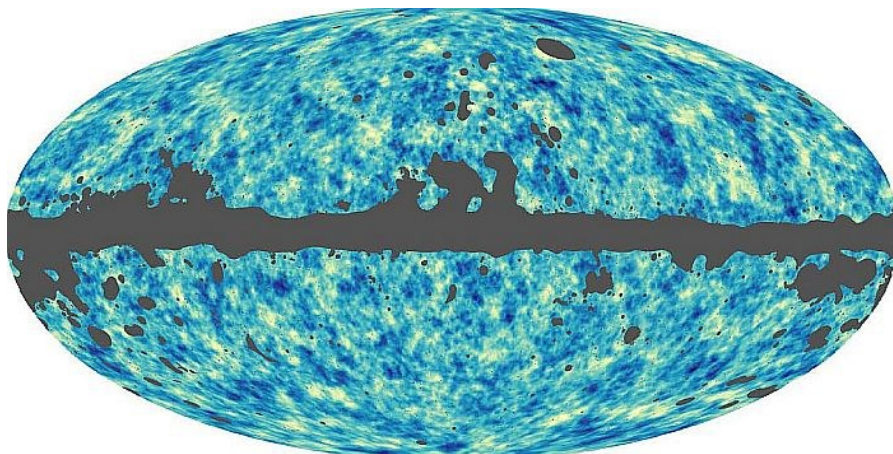
Le osservazioni delle *Supernovae* lontane hanno permesso anche di dare una stima della densità di energia corrispondente a questa componente: circa il 70%. Un valore che viene ora confermato, in quanto combacia molto bene con quel 68,7% residuo che emerge dalle misure del fondo cosmico di microonde.

Quindi le misure di Planck hanno consentito di "pesare" le componenti di materia e di energia nell'universo. Il risultato è che il 95% dell'universo è completamente invisibile, fatto di materia oscura e di energia oscura. Quest'ultima, la *dark energy*, agisce solo su grandissime scale, e ha l'effetto di accelerare l'espansione dell'universo.

La materia oscura invece agisce gravitazionalmente come la materia ordinaria. Essa è responsabile dell'efficienza con cui le strutture si formano nell'universo primordiale: se non ci fosse questa componente non avremmo avuto la formazione delle galassie e delle stelle che attualmente osserviamo, e quindi da essa dipende anche la nostra stessa esistenza.

Le piccole fluttuazioni di densità visibili nel fondo cosmico di microonde sono guidate dal collasso gravitazionale della materia oscura che iniziava il processo di formazione delle galassie.

Con Planck abbiamo anche osservato l'effetto di *lensing gravitazionale* nel fondo del microonde: la luce primordiale attraversando lo spazio cosmico viene deflessa dalla materia che incontra nel suo tragitto; stimando questo effetto in ogni direzione possiamo fare una specie di tomografia dell'intero universo osservabile, dal suo confine ultimo fino a noi. La mappa, mostrata nella seguente figura, traccia la materia gravitazionale, sia barionica che di *dark matter*: le zone più scure e più chiare corrispondono a regioni in cui la luce primordiale, nel suo viaggio cosmico, è stata più o meno deflessa dal campo gravitazionale prodotto dalla materia che ha incontrato nel suo percorso, dall'origine fino a noi.



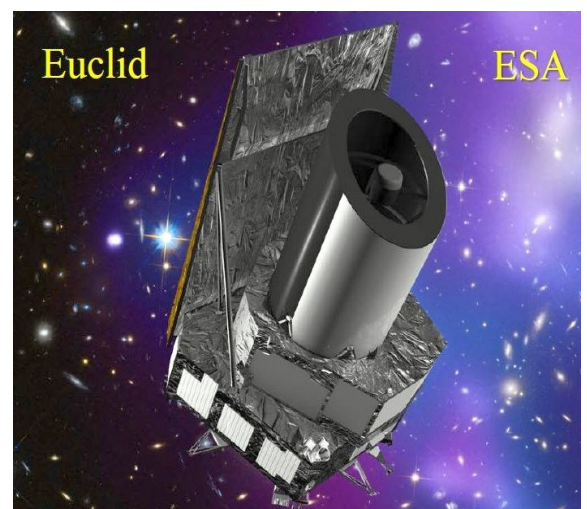
*Mappa della distribuzione della materia nell'universo, dominata dalla materia oscura, ottenuta dal lensing gravitazionale sul fondo cosmico (Planck Collaboration 2018)*

Molto c'è ancora da fare, molte sono le domande aperte. Altre misure sul fondo cosmico sono in preparazione. Inoltre c'è una missione dell'ESA (*Euclid*) in fase di sviluppo, la missione *Euclid*, che farà una mappatura globale delle galassie per cogliere nella loro distribuzione e nei loro campi di velocità gli effetti della materia oscura e sull'energia oscura, per fare altri passi avanti nella comprensione della natura di queste componenti misteriose ma vitali dell'universo.

Concludo dicendo che il "lato oscuro" dell'Universo, come abbiamo visto, è in realtà un "lato cristallino". Abbiamo visto che ci sono evidenze dell'esistenza di materia oscura su diverse scale: nelle galassie, negli ammassi di galassie e anche nell'Universo primordiale, dove ha un ruolo fondamentale nella formazione di tutte le strutture e del fiorire della complessità dell'Universo.

Si presenta in una forma non-barionica, incapace di assorbire o emettere luce, e di interagire con il campo elettromagnetico. Deve quindi essere fatta di particelle diverse da quelle che noi conosciamo nell'ambito della fisica convenzionale, e contribuisce all'85% della materia delle galassie e degli ammassi, e al 26.4% del budget totale di materia-energia nell'universo.

Nonostante gli sforzi, non è stata ancora rilevata alcuna traccia diretta di questo tipo di particelle, né dall'acceleratore LHC né da altri esperimenti dedicati; la scoperta del bosone di Higgs è stata importantissima, ma la



gran parte dei fisici si aspettava anche di veder emergere particelle che potevano dar ragione dell'esistenza della *dark matter*.

Anche diversi esperimenti qui al Gran Sasso sono legati alla ricerca di particelle di materia oscura. Ma finora nessun esperimento ha rivelato queste particelle. La questione di quale sia la natura della materia oscura rimane quindi aperta.

L'energia oscura è stata scoperta dall'osservazione delle *Supernovae* lontane. La sua presenza e la sua entità sono confermate dalle misure del fondo di microonde: essa contiene il 70% della densità di energia dell'Universo attuale.

Ci troviamo in una situazione un po' paradossale. Abbiamo un modello di universo di grande successo, il modello cosmologico standard, che con soli sei parametri (fra cui la quantità di *Dark* e di *Energy Matter*) descrive accuratamente lo stato fisico del cosmo primordiale e traccia le linee della sua evoluzione.

D'altra parte, dobbiamo rassegnarci al fatto che il 95% di tutto ciò è ancora ignoto. Questa combinazione di comprensione e mistero, di risposte e di interrogativi aperti ci dà lo slancio per affrontare nuove sfide.

Le prossime generazioni avranno molto da lavorare, e nuove meraviglie da scoprire. Chissà che non salti fuori che, come è capitato per l'antico modello delle orbite tolemaiche, qualcuno introduca un punto di vista nuovo, completamente diverso, che rilanci la visione dell'universo in un'altra direzione.

Ma questo è il bello del nostro percorso, ogni passo deve esser fatto coscientemente e umilmente, avendo anche il gusto di sottolineare quello che ancora non comprendiamo, perché in ciò che ci appare ancora poco consolidato si nasconde la promessa delle novità più interessanti per il futuro.

[\*Vai allo Speciale dedicato al Simposio\*](#)

[\*Vai alle presentazioni dei relatori del Simposio\*](#)

*Marco Bersanelli*  
(Dipartimento di Fisica. Università degli Studi di Milano)

