

Omogeneita' ed Isotropia dell'Universo - La massa Oscura
=====

1) Il Principio Cosmologico

La moderna cosmologia e' legata ad alcuni dati osservativi di base e ad alcune assunzioni. Per quanto riguarda i primi possiamo cosi' riassumerli:

1. Il cielo notturno e' scuro.
2. La materia visibile nell'universo appare distribuita isotropicamente attorno a noi.
3. Le galassie mostrano un redshift proporzionale alla loro distanza (ad eccezione di quelle molto vicine).
4. C'e'un fondo di radiazione isotropo (al livello di almeno una parte su mille) che riempie l'intero universo, il cui spettro e' quello di un corpo nero a temperatura di circa 2.7 °K.

Per quanto riguarda il primo punto, la cosa non e' affatto banale come sembra. Se immaginiamo di vivere in un Universo la cui densita' sia pressapoco costante, e' facile rendersi conto che la quantita' totale di materia racchiusa entro una sfera di raggio R crescerebbe con il cubo della distanza da noi. Ma se ammettiamo che la materia in generale si manifesti con una qualche emissione in qualche banda elettromagnetica (materia luminosa, normalmente racchiusa in stelle, rapporto massa/densita' = M/L costante), allora L(R) (luminosita' totale emessa entro una distanza R) crescerebbe come R^3. Contemporaneamente il flusso luminoso ricevuto da un oggetto distante R da noi decresce come 1/R^2. Ma allora la luminosita' totale ricevuta dovrebbe crescere indefinitamente come R, quindi l'integrale di L(R)dR divergerebbe a infinito. Ovvero dovremmo vedere il cielo luminosissimo, anzi, la sua luminosita' dovrebbe essere infinita (Paradosso di Olbers).

In realta' questo non succede per diversi motivi: intanto l'Universo non ha estensione infinita, ma e' finito, pur illimitato. Inoltre il nostro orizzonte degli eventi (la sfera di raggio R=ct dove t e' l'eta' dell'Universo e c la velocita' della luce) e' pure finito (vale circa 10^26 cm.). Quest'ultimo concetto (orizzonte degli eventi) si riferisce al fatto che noi non potremmo in alcun modo avere informazioni (neppure luce) provenienti da luoghi piu' distanti di ct, in quanto nemmeno viaggiando alla velocita' della luce queste avrebbero mai potuto raggiungerci dall'origine dell'Universo.

Per quanto riguarda il secondo punto l'omogeneita' dell'Universo dal punto di vista osservativo e' provata almeno localmente (vedremo meglio questo punto piu' avanti). L'isotropia invece si riferisce al fatto che non esistono direzioni privilegiate in cui per esempio la luce possa propagarsi piu' facilmente.

Una prova di questo e' stata la scoperta della CMBR (Radiazione di fondo nelle microonde), un fondo di radiazione altamente isotropo (il cui flusso ci appare costante in tutte le direzioni) entro una parte su 1000, il cui spettro e' quello di un corpo nero a 2.7 °K. Questa radiazione e' in realta' il residuo dell'enorme energia rilasciata durante le primissime fasi dell'espansione dell'Universo. Per capire perche' questa ci appaia ad una cosi' bassa temperatura dobbiamo prima introdurre il concetto di 'Red-Shift Cosmologico'.

Tutti noi conosciamo bene l'effetto Doppler, per il quale una vibrazione (sonora o elettromagnetica che sia) ci appaia spostata ad alte o basse frequenze a seconda che la sorgente si stia avvicinando o allontanando da noi. Ebbene, la nuova frequenza cui osserviamo la vibrazione si ricava

dalla:

$$\frac{f' - f}{f} = \frac{v}{c}$$

dove v e' la velocita' relativa della sorgente,
 f la frequenza originale ed f' la frequenza
osservata. ($c = \text{vel. luce} = 300.000 \text{ km/s}$)

A causa dell'esplosione iniziale che ha dato origine all'Universo, le galassie si allontanano attualmente da noi con una velocita' proporzionale alla loro distanza (da noi). Il rapporto tra velocita' di allontanamento e distanza (costante di Hubble) vale oggi circa $H=75 \text{ km/sec/Mpc}$ (con enormi dispute sul suo valore preciso). In base a quanto detto una sorgente (galassia) distante da noi, per esempio, 2 MegaParsec ($1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc}$, $1 \text{ pc} = 3.26 \text{ anni/luce}$) si allontana da noi ad una velocita' di 150 km/s . Noi osserveremo quindi la radiazione che essa emette 'red-shiftata' (perche' la sorgente si allontana, quindi lo spostamento e' verso le basse frequenze = rosso) di una frazione $150/300000 = 1/2000$ della frequenza iniziale. E' facile rendersi conto che l'effetto e' molto piccolo. Per una lunghezza d'onda di 5000 \AA (luce verde) esso ammonta a circa 2.5 \AA . Questo significa che osserveremo nello spettro della galassia, per esempio la riga in emissione Halfa (prima riga della serie di Balmer) a 6560 \AA invece che a 6562 . L'effetto sembrerebbe irrilevante, eppure e' l'unico modo per determinare la distanza della maggior parte delle galassie che conosciamo ($d=v/H$ dove $v=(f'-f)c/f$). Ecco l'importanza di determinare con la maggior precisione possibile la costante di Hubble H . Ebbene, siccome guardare a distanze molto grandi equivale a guardare indietro nel tempo (il tempo necessario per la luce per raggiungerci, $t=d/c$), se la radiazione di fondo si e' formata ad epoche molto distanti da noi temporalmente, essa ci apparira' red-shiftata di un fattore $(1+z)=R_0/R(t)$ dove $R(t)$ e' il fattore di scala dell'Universo al tempo t dell'emissione della radiazione, R_0 e' il suo valore all'epoca attuale e z e' il parametro di red-shift ($z=0$ significa nessun red-shift (epoca attuale)). Se il suo spettro era allora di corpo nero a temperatura T , all'epoca attuale sara' ancora di corpo nero, ma ad una temperatura $T_0 = T/(1+z) = T R(t)/R_0$. Tale temperatura, all'epoca attuale, risulta essere $T=2.7 \text{ ^\circ K}$ come le osservazioni confermano.

Il fattore di scala $R(t)$ e' quel fattore per cui bisogna moltiplicare tutte le distanze per tener conto dell'espansione dell'Universo (nel formalismo della relativita' generale di Einstein).

Tornando alla radiazione di fondo, se questa ci appare isotropa, questo significa che lo era anche quando si e' formata (ed aveva una temperatura di qualche miliardo di gradi) e che l'ipotesi di isotropia nell'Universo appare ben fondata.

Notiamo a proposito della isotropia che in realta' l'Universo e' organizzato in strutture gerarchiche quali galassie, ammassi di galassie e superammassi, e' l'Universo appare effettivamente isotropo solo se lo osserviamo su scale sufficientemente grandi (10^8 pc), ossia molto maggiori di quelle di tali 'piccole' fluttuazioni.

Come ASSUNZIONI fondamentali della cosmologia possiamo invece ritenere le seguenti:

- 1'. Il Principio Copernicano, che afferma che noi non siamo in alcun modo degli osservatori privilegiati.
- 2'. Il Principio di Relativita', secondo il quale le leggi della fisica non cambiano nello spazio e nel tempo.

Il Principio Copernicano va utilizzato con cautela: e' chiaro che l'Universo non puo' apparire a noi come appare ad un osservatore che, per esempio, si muova a $c/2$ (che lo vede infatti fortemente anisotropo). Si afferma solo che la nostra posizione di osservazione dell'universo e' da considerare

del tutto tipica, e che quindi, presumibilmente, esso ci apparirebbe isotropo anche se lo osservassimo da un'altra galassia.

Il Principio di Relativita' richiede che gli esperimenti fisici coinvolgenti masse, lunghezze e tempi espressi in unita' naturali (per esempio atomiche) diano gli stessi risultati indipendentemente dal luogo e dal tempo.

Sulla base di quanto esposto, in particolare ai punti 2, 4 e 1', siamo spinti a considerare un universo idealizzato, per il quale possiamo enunciare il fondamentale "Principio Cosmologico":

"Esiste un sistema fondamentale di osservatori per ognuno dei quali l'universo e' isotropo in tutte le proprieta' misurabili e ad ogni tempo."

Questo enunciato e' un principio, una assunzione suffragata solo in via indiretta dalle osservazioni elencate.

2) Omogeneita' dal punto di vista osservativo

Ma passiamo a descrivere l'Universo cosi' come lo vediamo da un punto di vista osservativo: da questo punto di vista sappiamo che il Sistema Solare si trova immerso in una struttura contenente circa 10^{11} stelle in un diametro medio dell'ordine dei 30 Kpc (la Galassia), in cui la densita' media in materia visibile e' attorno a 2×10^{-14} g/cm³.

Distribuiti attorno ad essa in approssimata simmetria sferica troviamo circa 200 ammassi globulari (ammassi estremamente compatti di stelle, contenenti normalmente 10^5 - 10^6 stelle di eta' avanzata).

Piu' oltre, a qualcosa come 600-700 Kpc, c'e' la galassia di Andromeda, M31, che e' il piu' lontano oggetto visibile ad occhio nudo. Andromeda e la nostra galassia sono gli oggetti dominanti tra circa una ventina di galassie che costituiscono il cosiddetto Gruppo Locale. In esso si trovano oggetti come le galassie ellittiche nane (Draco, Sculptor, Fornax), le irregolari nane come la Grande e Piccola Nube di Magellano, la galassia a spirale M33 e l'ellittica M32. Nel Gruppo Locale la densita' media in materia luminosa e' dell'ordine di 10^{-28} - 10^{-29} g/cm³.

Se fossimo in grado di vedere ad occhio nudo tutti gli oggetti piu' luminosi di $m=+13$, allora, ignorando le stelle della nostra galassia, vedremmo in cielo un gruppo di galassie in direzione dell'ellittica gigante M87. Questa dista da noi circa 11 Mpc, ed e' al centro di un ricco ammasso irregolare di qualcosa come 200 galassie, chiamato Ammasso della Vergine, avente densita' media analoga a quella del Gruppo Locale.

Molte, se non tutte, le galassie nella zona di spazio compreso tra noi e l'ammasso della Vergine sono associate in gruppi di varia consistenza, di cui il Gruppo Locale e' un esempio. Questo insieme di gruppi e piccoli ammassi raccolti attorno all'ammasso ricco della Vergine costituiscono il Superammasso Locale, avente densita' media in materia luminosa non molto diversa da quella del Gruppo Locale. Altri esempi di ammassi ricchi sono forniti da Coma, da molti ammassi di Abell, ed e' anche ben documentata la tendenza degli ammassi a creare superammassi.

C'e' pertanto una tendenza, chiaramente definita, della materia a creare strutture almeno sulla scala dei 20 Mpc. E' altresì chiaro che la densita' media tende a diminuire all'aumentare della scala lineare su cui si fa la media. Ma, diminuire sino a che limite? Possiamo facilmente costruire un universo infinito la cui densita' media tenda a zero all'aumentare del volume su cui si fa la media, se assumiamo esservi un clustering gerarchico

infinito: ammassi di ordine m sono a loro volta i semi di ammassi di ordine $m+1$ e così via indefinitivamente. Se supponiamo per esempio che la distanza tra le regioni periferiche di due ammassi di ordine m , negli aggregati $m+1$, superi di molto m volte la distanza tra gli ammassi di ordine $m-1$, negli aggregati m , è facile vedere che all'aumentare dell'ordine su cui si media, la densità tende a zero. In un siffatto sistema, il concetto di densità media è privo di utilità, poiché dipende dal volume su cui si fa la media, eccetto nel caso limite in cui vale zero.

Supponiamo invece che l'universo consista di ammassi di ordine m sparsi casualmente, i quali non siano semi di ulteriori ammassi di ordine superiore. Naturalmente, la disposizione casuale di tali ammassi, produce raggruppamenti accidentali di ammassi di ordine m ; dicendo che non esistono ammassi di ordine $m+1$, intendiamo semplicemente che tali raggruppamenti non ricorrono con maggiore frequenza di quella che ci aspetteremmo da una distribuzione casuale. In questa situazione, se mediamo sopra un volume contenente un gran numero di oggetti di ordine m , trascurando le fluttuazioni statistiche, otterremo che la densità media in massa non dipende dal volume considerato. Un universo con tale proprietà si dice OMOGENEO. Tale sembra essere il nostro Universo in base alle più raffinate osservazioni tutt'ora disponibili.

3) Massa luminosa e massa oscura

Tornando alla nostra survey sulle varie scale dell'Universo, cerchiamo di valutare quanta massa ci aspettiamo che il nostro Universo contenga. Questo punto è fondamentale per la Cosmologia in quanto, in base alla soluzione di Robertson-Walker delle equazioni di Einstein del campo gravitazionale, la densità media dell'Universo è un parametro fondamentale che distingue tra 3 principali modelli di evoluzione dell'Universo:

densità critica = 10^{-30} gr/cm³

a) Universo Aperto: densità < densità critica

l'espansione dell'Universo, cominciata 15 Miliardi di anni fa, è destinata continuare all'infinito in quanto la massa racchiusa non è in grado di arrestarne l'espansione. Le stelle esauriranno tutto il loro combustibile e collasseranno (black holes, stelle a neutroni, blocchi di materia fredda) o esploderanno (Supernovae). La materia si raffredderà fino a raggiungere lo zero assoluto. A quel punto anche tutti i protoni decadranno (il tempo di vita medio di un protone pare essere 10^{32} anni) in fotoni ed altre particelle le quali a loro volta decadranno. I fotoni della radiazione di fondo, continuando l'espansione, raggiungeranno frequenza 0 (non esisteranno più).

b) Universo Chiuso: densità > densità critica

l'espansione raggiungerà un massimo per poi essere frenata dall'autoattrazione gravitazionale. Collasso gravitazionale fino a raggiungere di nuovo una situazione iper-densa (nuovo Big-Bang?).

c) Universo Asintotico: densità = densità critica

l'universo continuerà ad espandersi, ma rallenterà asintoticamente l'espansione fino a fermarsi per $t \rightarrow$ infinito.

Questi tre modelli dipendono in modo essenziale dunque dalla quantità totale di massa racchiusa nell'universo e dal cosiddetto 'parametro di decelerazione' q . Per semplificare la trattazione definiremo il parametro di densità W , pari al rapporto tra densità e densità critica. Ovviamente nella densità

di massa dovremo considerare tutte le forme di energia, anche i fotoni che sono privi di massa ma che, per la relazione di Einstein, contribuiscono alla massa totale dell'Universo, ognuno con un termine $E=mc^2$ dove $E=hf$ è l'energia di un fotone. Ma questa quantità è presto calcolata in quanto la maggior parte di fotoni dell'Universo si trova nella radiazione di fondo di cui conosciamo lo spettro. Il loro apporto alla densità totale è di 10^{-34} gr/cm³, quindi molto piccolo ($\omega=10^{-4}$).

Per quanto riguarda la densità di materia barionica (protoni, neutroni) ed elettroni, si può tentare una valutazione in base all'assunzione che la materia si manifesti in qualche modo emettendo radiazione elettromagnetica (stelle). Definendo il rapporto locale $M_0/L_0 = \text{Massa del sole/Luminosità del Sole} = 1$, si vede che già in un intorno del sole (5pc), sfera entro cui conosciamo la massa e la luminosità delle stelle racchiuse con una buona precisione, si vede che $M/L=2$, ovvero la materia emette mediamente meno energia di quanta ne emetta il sole, a parità di massa.

Se poi allarghiamo gli orizzonti ad un intorno del sole di qualche centinaio di pc, la massa delle stelle racchiuse si può valutare con metodi dinamici in base alla dispersione della distribuzione di velocità delle stelle entro il piano del disco Galattico. Già entro questi confini il rapporto M/L cresce fino a 5, indicando che l'approssimazione che M/L sia costante non è una buona approssimazione. Le cause di questo possono essere in genere dovute al fatto che non tutte le stelle sono di tipo solare. Le nane bianche per esempio sono stelle abbastanza compatte che emettono poca energia rispetto alla massa che racchiudono. Ma nemmeno queste spiegazioni sono sufficienti per spiegare la discrepanza tra la massa che ci si aspetta da metodi fotometrici (luminosità totale) e metodi dinamici, quando si va su scale dell'ordine di una galassia.

Un metodo dinamico per valutare la massa racchiusa entro un raggio R dal centro di una galassia a spirale sta nel valutare la velocità di rotazione della materia (stelle) intorno al centro galattico. Come noto, l'accelerazione centrifuga in un moto circolare uniforme è $a=v^2/r$. Ma questa deve essere bilanciata dall'attrazione gravitazionale della galassia, se vogliamo che la nostra stella possa stare in equilibrio: $a=GM(r)/r^2$. Componendo queste due espressioni e valutando il campo gravitazionale che ci si aspetta in una galassia a una distanza r dal centro, si vede che la velocità di equilibrio $v(r)$ in funzione di r è una funzione crescente (linearmente) di r nei primi Kpc dal centro, per poi appiattirsi e finalmente decrescere a distanze r tali che la massa della galassia si possa considerare tutta interna a r . In questo ultimo tratto (tratto Kepleriano) $v(r)$ decresce come $1/r^{1/2}$. Allora noi potremo cercare di misurare la velocità di rotazione delle stelle a varie distanze r dal centro (con metodi basati sull'effetto Doppler, red-shift o blue-shift delle righe) e mettere $v(r)$ in un grafico. Ad una distanza r^* alla quale $v(r)$ assume un andamento come $1/r^{1/2}$ potremo dire che la massa della galassia è contenuta tutta entro r^* e quindi potremo valutarla in base al rapporto M/L che ci aspettiamo (ci basterà conoscere L totale). Ma quello che si osserva è che anche se ad un certo r non osserviamo più luminosità emessa dalla galassia (il bordo della stessa), l'andamento di $v(r)$ è tutt'altro che kepleriano, anzi, in alcuni casi è addirittura crescente! Questo significa che anche se non osserviamo più radiazione emessa, quantità significative di massa devono esserci anche oltre i limiti visibili della galassia (e quindi il rapporto M/L in quelle zone cresce vertiginosamente). Ma allora quanta può essere la massa 'OSCURA' che non riusciamo ad osservare oltre i limiti delle galassie? Ancora una volta metodi dinamici ci possono dare una valutazione approssimata.

Prendiamo per esempio un ammasso di galassie. Se noi assumiamo che le galassie nell'ammasso siano in equilibrio dinamico (il sistema non stia 'esplodendo')

la fisica ci viene incontro dicendo che in un sistema in equilibrio dinamico deve essere soddisfatta la relazione:

$$2T + V = 0 \quad (\text{Teorema del viriale})$$

In questa formula T sta ad indicare l'energia cinetica ('termica') delle particelle contenute, V il potenziale gravitazionale. Se consideriamo ogni galassia come una 'particella' in questo 'fluido cosmico', T si puo' valutare dalla dispersione delle velocita' delle stesse: si calcola la velocita' v di ogni galassia rispetto al baricentro dell'ammasso (tramite il red-shift doppler sulle righe degli spettri), si calcola una velocita' media v_m e si sommano i quadrati degli scarti dalla v_m . Il potenziale V si valuta invece dalla posizione apparente delle galassie rispetto al centro dell'ammasso. Ovviamente le due misure (T e V) andranno corrette per effetti di proiezione (per tener conto che osserviamo soltanto posizioni e velocita' proiettate sulla sfera celeste). In questa equazione rimane incognita soltanto la massa totale dell'ammasso che si puo' dunque ricavare.

Ebbene, il risultato di queste misure e' che, sempre ferma restando l'ipotesi di equilibrio dinamico, ancora una volta la massa totale di un ammasso e' molto maggiore di quella che ci si aspetterebbe da misure fotometriche. In particolare si trova che la massa totale potrebbe essere tipicamente dell'ordine di 10 volte la massa luminosa.

Questa potrebbe essere raggruppata essenzialmente ai bordi delle galassie, oppure essere diffusa nello spazio intergalattico o anche tra un ammasso di galassie e l'altro (Mezzo Intergalattico)

Non si puo' fare a meno di chiedersi di che natura sia questa massa 'oscura'. Varie ipotesi sono state fatte. Una possibilita' e' che una certa quantita' di massa potrebbe essere racchiusa in oggetti freddi o collassati. Ricordiamo che il limite inferiore di massa per l'ignizione delle reazioni termonucleari (limite di Hayashi) e' dell'ordine di 0.2-0.4 masse solari. Al di sotto di questo limite una stella non si puo' accendere ed e' destinata a morire collassando ed emettendo piccole quantita' di energia tramite contrazione gravitazionale.

Altre quantita' di massa potrebbero essere racchiuse in oggetti molto peculiari la cui esistenza e' prevista (almeno come possibilita') dalla teoria della Relativita' Generale. Quando una stella esplose come supernova (evento altresì assai raro), lascia normalmente come superstite un nucleo molto denso e compatto, la cui genesi si deve ricercare nell'enorme energia rilasciata come onde d'urto (anche verso l'interno). Puo' succedere che questo oggetto sia talmente massiccio da non potersi piu' sostenere con la pressione interna. In questo caso comincia un collasso che tende a comprimere ancora di piu' l'ex stella, collasso che si puo' arrestare per la degenerazione di protoni ed elettroni che si compenetrano diventando neutroni (stella a neutroni). Se la massa dell'oggetto e' maggiore di una certa massa critica, il collasso non si arresta, ma continua fino a che l'oggetto e' tutto contenuto entro il suo Raggio di Schwarzschild. A quel punto succede una cosa molto interessante: la velocita' di fuga da un oggetto del genere (la velocita' di fuga di un oggetto e' la velocita' che un corpo deve assumere per poter sfuggire al campo gravitazionale dell'oggetto stesso. Per la terra

$$V_f = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = 11.2 \text{ km/s}$$

diventa maggiore della velocita' della luce c. In altri termini nemmeno la luce puo' sfuggire al campo gravitazionale di questo mostro, quindi nessuna informazione ci puo' pervenire dal suo interno (per questo e' stato coniato

il nome 'buco nero' o 'black hole'). Un black hole e' un voracissimo divoratore di materia, tendendo cosi' ad accrescere indefinitamente la propria massa (alimento finche' trova 'cibo'). Altre cose interessantissime succedono all'interno di un black hole (ricordiamo pero' che sono solo speculazioni teoriche che non potremo mai verificare). Per esempio la curvatura dello spazio attorno ad un buco nero e' totale. L'interno del buco nero quindi e' disaccoppiato dal flusso temporale dell'Universo 'normale'... e' come una specie di Universo a parte che non ha possibilita' di comunicare col nostro. Ma tralasciamo queste speculazioni sulle quali nemmeno i fisici sono d'accordo e torniamo alla massa oscura. La conclusione del discorso e' che notevoli quantita' di massa potrebbero essere racchiuse nei black holes, soprattutto se e' vero che essi non sono poi cosi' rari (forse anche il nucleo della nostra Galassia ne ospita uno).

Un'altra possibilita' per la massa 'mancante' potrebbe essere la presenza di gas diffuso nel mezzo intergalattico. Questo dovrebbe essere tuttavia abbastanza caldo (allo stato di plasma, $T=10^4$ K), come prevedono alcune considerazioni sull'assorbimento delle radiazioni di inversione di spin dell'idrogeno neutro a 21 cm. La conclusione e' che una porzione significativa di massa ($W=0.2$) dell'Universo potrebbe essere nella forma di plasma intergalattico caldo.

Infine c'e' anche la possibilita' che una frazione non trascurabile della massa mancante dell'Universo sia da imputare a un tipo di particelle elementari che vengono prodotte in grande quantita' in molte situazioni astrofisiche: i neutrini. Come oggi sappiamo (vedi capitolo sulla Fisica delle Particelle Elementari) esistono almeno 12 tipi di leptoni. 6 di questi (elettrone, muone, tauone e rispettive antiparticelle) sono massivi, mentre i rispettivi neutrini (elettronico, muonico e tauonico) con gli anti-neutrini, sono privi di massa (cosi' pensano i fisici delle particelle). Come sappiamo questa mancanza di massa (unita alla mancanza di carica) rende i neutrini quasi impossibili da osservare, in quanto non interagiscono con la materia se non debolmente tramite interazione nucleare debole (decadimento beta).

Ma c'e' la remota possibilita' che essi possano avere in realta' una piccola massa (<10 eV, per confronto la massa dell'elettrone e' 500 keV) per cui, essendo cosi' abbondanti, potrebbero forse fornire una porzione molto significativa (forse decisiva) alla densita' di massa dell'Universo attuale. Ma queste ipotesi, legate alla fisica dei primissimi istanti di vita, sono molto difficili da verificare. In particolare alcuni esperimenti condotti nei grandi acceleratori di particelle, sono dedicati a stabilire un limite superiore alla massa dei neutrini (e quindi un limite superiore al loro contributo alla massa totale dell'Universo).

In conclusione possiamo dire che la densita' attuale dell'Universo dovrebbe essere intorno a $W=0.2-0.5$ (incertezza dovuta al possibile apporto del plasma intergalattico caldo), il che farebbe pensare che ci troviamo in un Universo di tipo aperto ($W<1$). Ma queste conclusioni sono ben lontane dall'essere definitive, essendoci ancora una grande incertezza su molti fattori che potrebbero contribuire in modo sostanziale ad aumentare questo valore di W .

liberamente adattato dal

Corso di Cosmologia del
prof. Luigi Danese
(Universita' di Padova)