

## **COSMOLOGIA 2003**

**Le ultime scoperte che hanno cambiato  
la nostra visione dell'Universo**

**RIASSUNTI DI ARTICOLI TRATTI DALLA RIVISTA SCIENCE  
dell'American Association for the Advancement of Science  
nell'anno 2003**

\*\*\*

**Science, 3 Jan 2003, Vol. 299, pg. 70 - Christopher Sneden** - La nucleosintesi degli elementi chimici stabili noti, circa 90, rimonta alla nascita delle prime stelle avvenuta fra 10 e 15 miliardi di anni fa. Osservando la composizione del nostro primitivo sistema solare attraverso l'analisi dello spettro solare e dei meteoriti di condriti carbonacee, si trova che, al di fuori dell'idrogeno e dell'elio che costituiscono la parte predominante, gli altri elementi si trovano in quantità sempre più piccole aumentando il numero atomico (Z) e quelli con Z pari sono più abbondanti. Idrogeno, elio e piccole quantità di litio si sono formati al momento del big bang, litio, berillio e boro si sono formati poi all'interno delle stelle, vengono distrutti per cattura di neutroni nella formazione di carbonio, azoto ed ossigeno e si riformano nello spazio interstellare per bombardamento di raggi cosmici e neutrini. Tutti gli altri elementi con Z da 6 a 30, fino al gruppo del ferro, si formano per fusione all'interno delle stelle purché abbiano masse maggiori di 8 volte quelle del nostro Sole per poter raggiungere pressioni e temperature sufficientemente elevate. Per gli elementi con  $Z > 30$  l'abbondanza scende drasticamente ed il processo non è più per fusione perché al di là del gruppo del ferro la fusione non è più esotermica. Il processo è quello della cattura di neutroni che porta all'instabilità del nucleo, al decadimento beta ed alla trasformazione di neutroni in protoni. Questo processo è relativamente lento ed è detto s-process. Durante il collasso delle stelle e l'inizio delle esplosioni di supernova di tipo II si formano un gran numero di neutroni liberi con la reazione:  $\text{protone} + \text{elettrone} = \text{neutrone} + \text{neutrino}$  e la cattura dei neutroni da parte di elementi pesanti avviene più rapidamente del decadimento beta. Questo è detto r-process, non ancora ben compreso, ed è responsabile della formazione degli elementi più pesanti. La presenza di tali elementi nel nostro Sole proviene da precedenti generazioni di stelle che li hanno lasciati nel mezzo interstellare. La determinazione degli elementi nelle stelle e della loro abbondanza è un'area di indagine della spettroscopia stellare. La presenza di europio è un indice di r-process nella nucleosintesi. Anche l'età delle stelle e della nostra galassia può essere determinata dall'abbondanza di certi elementi radioattivi, il torio ad esempio ha un tempo di dimezzamento di 14 miliardi di anni. Il tempo di formazione delle prime galassie dal momento del big bang si assume sia un miliardo di anni; le prime stelle sono ormai sparite perché erano molto massive, con più di 100 masse solari. Esse hanno iniziato la sintesi degli elementi pesanti ma non è stata scoperta nessuna stella senza metalli.

**Science, 3 Jan 2003, Vol. 299, pg. 77 - Vadim N. Gamezo** - Molte stelle che bruciano il loro combustibile per milioni o miliardi di anni finiscono improvvisamente la loro vita con una potente esplosione e la formazione di una supernova. L'esplosione è innescata dall'energia gravitazionale emessa nel collasso della stella o da una reazione termonucleare esplosiva. Il caso delle supernove tipo Ia (SN Ia) è l'esplosione che si produce nelle nane bianche (WD) composte da carbonio ed ossigeno con elettroni degenerati cioè disposti negli stati quantici più bassi. Le WD si formano alla fine dell'evoluzione di stelle più grandi di 8 masse solari dopo aver eiettato nello spazio gli strati esterni. La massa finale è sempre inferiore al limite di Chandrasekhar cioè 1,4 masse solari, il nucleo di carbonio-ossigeno è stabile e, se la stella è isolata, può rimanere inerte indefinitamente raffreddandosi lentamente. Quando però le WD fanno parte di un sistema binario ravvicinato la WD si accresce con il materiale della compagna vicina e appena la sua massa si avvicina al limite di Chandrasekhar inizia la compressione con aumento della temperatura e si innescano le reazioni nucleari. La stella esplosa rilasciando circa  $10^{51}$  erg pari a tutta l'energia emessa dal Sole in 8 miliardi di anni. Le reazioni termonucleari sono quelle che portano alla trasformazione del carbonio ed ossigeno negli elementi più pesanti del gruppo del ferro; si formano anche elementi di massa intermedia come quelli dal sodio al calcio. La reazione inizia dal centro, diventa turbolenta ed accelera, da un regime subsonico detto di deflagrazione passa ad un regime supersonico di detonazione con un'onda d'urto che precede il fronte di reazione. La luminosità della SN Ia è prodotta dal decadimento radioattivo  $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ , raggiunge il suo massimo 15-20 giorni dopo l'esplosione e quindi diminuisce lentamente. Il massimo è comparabile alla luminosità di un'intera galassia e può essere usato come candela standard per misurare le distanze stellari ed i parametri cosmologici. La determinazione del massimo si fa anche partendo dall'andamento della luminosità nella fase decrescente ma ci si basa su un modello bidimensionale che è solo una prima approssimazione. Il modello esatto è però quello tridimensionale che postula la transizione dalla deflagrazione alla detonazione ad un certo stadio dell'esplosione nucleare. Costruire un tale modello numerico è un complicato problema interdisciplinare che coinvolge astrofisica, fisica nucleare, fisica della combustione e calcolo. Il modello numerico fisico è basato sulle equazioni di Eulero e la leggi di conservazione dell'energia in un fluido, le proprietà del fluido sono quelle della materia degenerata note dalle teorie di Fermi-Dirac e della radiazione di Plank. Il meccanismo dell'esplosione viene simulato supponendo che parta dal centro e considerando solo un ottante ed una simmetria speculare sui tre piani; instabilità e

turbolenze fanno propagare l'esplosione con accrescimento a forma di funghi multipli. Un parametro di confronto fra i risultati della simulazione e l'osservazione si fa misurando l'energia cinetica della materia durante l'espansione tramite l'effetto doppler delle linee spettrali. Nella simulazione la turbolenza della deflagrazione rende la combustione del materiale (carbonio ed ossigeno) incompleta al centro per l'80-90% mentre l'osservazione mostra che gli elementi incombusti si trovano solo negli strati esterni. Per rendere i risultati consistenti con l'osservazione bisogna supporre che la detonazione venga innescata nella fase turbolenta della deflagrazione.

**Science, 14 Feb 2003, Vol. 299, pg. 991 - Charles Seife** - Le immagini del Cosmic Microwave Background (CMB) prese dal satellite MAP (Microwave Anisotropy Probe) di 145 milioni di US\$, lanciato nel giugno 2001 con un razzo Delta II e posizionato in un'orbita a 1,5 milioni di km dalla Terra, rappresentano la carta più dettagliata del cielo ed un grande progresso rispetto alle misure degli ultimi anni con strumentazioni su palloni e con impianti terrestri. La mappa rappresenta la prima radiazione emessa dall'universo 400000 anni dopo il big bang all'atto della ricombinazione fra nuclei ed elettroni. La mappa conferma che l'universo è costituito per due terzi da dark energy e che la sua età è di 13,7 miliardi di anni con un errore dell'1%. Il MAP ha misurato anche la polarizzazione del CMB trovata lo scorso anno dal sistema DASI da terra. La polarizzazione si presenta a macchie interrotte dal ritorno della ionizzazione provocata dalla nascita delle prime stelle e galassie. Queste macchie sono più piccole di quanto previsto indicando che la ionizzazione è ricominciata 200 milioni di anni dopo il big bang invece degli 800 milioni stimati. Ciò indica che prima dei quasar e delle galassie si è formata una popolazione di stelle massive.

**Science, 7 Mar 2003, Vol. 299, pg. 1532 - Sarah L. Bridle** - Le recenti informazioni dal team del satellite WMAP sulle misure del Cosmic Microwave Background (CMB) hanno confermato importanti aspetti del modello cosmologico standard. In particolare si conferma che lo spazio è piatto invece di curvo e che la maggior parte dell'energia dell'universo è "energia oscura" e quindi repulsiva cosa che accelera l'espansione dell'universo. Le misure indicano che le variazioni di densità e temperatura dello spazio che hanno generato la formazione delle galassie sono uniformi su grande scala ed hanno una distribuzione gaussiana come predetto dal modello del big bang inflazionario. La vita dell'universo è stata determinata a 13400 +/-300 milioni di anni ed infine le nuove misure di polarizzazione del CMB mostrano che l'epoca della reionizzazione associata alla formazione delle prime stelle è avvenuta diverse centinaia di milioni di anni dopo il big bang. Vi sono ancora importanti problemi aperti. Non è chiaro se lo spettro delle fluttuazioni di temperatura sia consistente con l'inflazione e non sono state ancora osservati gli effetti della presenza di onde gravitazionali. Inoltre non si sa se l'energia oscura è dovuta ad una uniforme energia del vuoto (detta anche costante cosmologica) o ad un campo dinamico cosmico che cambia nel tempo e nello spazio (noto come quintessenza). Misteriosa rimane anche la "materia oscura" che è di natura attrattiva. Per il big bang infrazionario l'universo comincia in uno stato di temperatura e densità infinita e quasi immediatamente entra in una fase di rapida accelerazione ed espansione detta inflazione. Questa espansione rende uniforme la distribuzione dell'energia, appiattisce la curvatura dello spazio e crea le sottili variazioni di densità che sono all'origine delle grandi strutture dell'universo attraverso il collasso gravitazionale. I risultati provenienti dalle misure del WMAP sono conseguenze dirette e molto affidabili, altri risultati derivano dalla combinazione di questi dati con altre misure cosmologiche e questi vanno visti con più cautela perché dipendono dall'assunzione di altre ipotesi. Così ci si chiede se i dati WMAP siano consistenti unicamente con il modello inflazionario. Ci sono anche alternative come la configurazione ciclica secondo la quale l'universo ha delle sequenze cicliche e all'espansione segue una contrazione ed un big crunch seguito ancora da un big bang; questo offre una diversa immagine della storia cosmica che tuttavia è coerente con tutte le attuali osservazioni. Anche se il modello standard è corretto, esso è incompleto ed il campo di inflazione che causa questa espansione rimane sconosciuto come la natura della materia oscura. Circa la natura dell'energia oscura (energia del vuoto o quintessenza) questa dipende dal fattore  $w$ , rapporto fra pressione e densità dell'energia. Una prima analisi propende per l'energia del vuoto ma l'esame su larga scala mostra che non si trovano le fluttuazioni attese e questo potrebbe essere un primo segno della sua natura di quintessenza. Ancora è molto grande l'incertezza sulla densità della materia oscura e sull'ampiezza delle fluttuazioni di densità e  $c'$  è ancora molto spazio per delle sorprese.

**Science, 20 Jun 2003, Vol. 300, pg. 1894 - Robert Irion** - Negli anni recenti le ricerche degli astronomi hanno confermato che tutto ciò che si vede nell'universo è solo una piccola parte di quello che c'è in realtà. Un quarto è costituito da materia oscura e tre quarti da energia oscura cioè un tipo di materia completamente sconosciuto in natura ed un'energia che provoca l'espansione dell'universo. Per scoprire le proprietà della materia oscura gli astronomi devono trovare prima dove si trova ed hanno scoperto una nuova tecnica che si basa sulla curvatura prodotta nello spazio dalla materia oscura detto effetto debole di lente gravitazionale rivelando la leggera distorsione che essa provoca sull'allineamento di milioni di galassie lontane. Questo effetto non è evidente all'occhio ma altera il modo di apparire del fondo delle lontane galassie. Queste galassie del fondo sono quelle formatesi quando l'universo aveva meno della metà della presente età e l'effetto di distorsione è provocato dalla materia oscura che si trova più vicina. Le immagini che vengono analizzate sono delle dimensioni di una Luna piena ed hanno sullo sfondo circa 20000 galassie. Applicando la fisica della relatività alle piccole distorsioni si determina la presenza di masse sia luminose che oscure fra noi e le galassie del fondo. Questa analisi ha mostrato che la massa che provoca questa distorsione è in parte visibile ed

in parte oscura ed il rapporto varia considerevolmente. Ci sono anche dei cluster di materia oscura senza materia visibile e questo risultato era inatteso. Correlando poi la distorsione con la distanza approssimate delle galassie si converte la proiezione piana della massa totale in volumi 3D e si rivelano le montagne di materia oscura nello spazio con 10-20% di accuratezza. Ci si aspetta di identificare entro il 2004 200 cluster fino alla distanza di 7 miliardi di anni luce.

**Science, 20 Jun 2003, Vol. 300, pg. 1896 - Charles Seife** - L'idea dell'energia oscura risale al tempo di Einstein quando l'autore della Relatività Generale la introdusse come termine di compensazione nelle sue equazioni e successivamente considerò un errore. Oggi l'energia oscura ha assunto presso i cosmologi una grande importanza come antigravità anche se nessuno sa dire che cosa sia e come funzioni. L'energia oscura è entrata di prepotenza nel 1997 quando i cacciatori di supernove del Lawrence Berkeley National Laboratory in California dimostrarono che l'universo si espandeva sempre più velocemente invece di rallentare come i fisici si aspettavano. Le conclusioni erano basate sull'osservazione di un gran numero di supernove del tipo Ia che all'esplosione hanno tutte la stessa luminosità in modo che gli astronomi possono determinare, dalla loro luminosità apparente, la loro distanza e, dall'effetto doppler, a che velocità si allontanano. Calcolando così come l'universo si espandeva nel passato, ci si accorse con sorpresa che l'espansione va accelerandosi invece di rallentare. All'inizio del big bang l'energia ha provocato l'espansione rapida dell'universo dopo, appena la materia si condensò in particelle, stelle e galassie, la gravitazione ha iniziato a frenare l'espansione. I dati delle supernove aggiungono qualcosa di nuovo; c'è una misteriosa forza di antigravità che forza la trama dell'universo a gonfiarsi più rapidamente di quanto la gravità non tenda a farla collassare. Guardando poi la radiazione di fondo del primo universo ci si accorge che questo nel suo complesso è piatto cioè senza curvatura. Ci si chiede allora che cosa sia questa energia oscura. Alcuni teorici dicono che è l'energia latente dello stesso vuoto che secondo la meccanica quantistica crea particelle virtuali capaci di esercitare una pressione. Altri fisici sospettano che alla base dell'accelerazione cosmica vi sia la fisica dell'inflazione, un'espansione super rapida all'inizio del big bang. I cosmologi hanno cominciato ora a definire un parametro  $w$  che caratterizza l'energia oscura e la sua equazione di stato. Al contrario di un gas in espansione, la cui pressione diminuisce all'aumentare del volume, l'energia oscura esercita una pressione maggiore man mano che lo spazio si espande e questa proprietà fa di  $w$  un numero negativo, si tratta ora di determinare il suo valore. Se la pressione è stata costante in tutta la storia dell'universo deve essere  $w = -1$ , se le proprietà dell'energia oscura sono cambiate nel tempo come suggeriscono varie teorie di "quintessenza",  $w$  varierà fra 0 e -1. Per il momento le misure indicano che  $w$  è quasi -1. I dati delle supernove lasciano aperta anche la possibilità che  $w$  sia minore di -1 (-1,1 ... -1,2) e quindi che l'energia oscura diventi sempre più repulsiva. In questo caso l'universo morirebbe di una morte orribile, in pochi miliardi di anni i cluster di galassie si disintegrerebbero, diverse centinaia di milioni di anni dopo le stesse galassie, inclusa la nostra, andrebbero in frantumi, poi il sistema solare ed i pianeti ed infine anche gli atomi e lo spazio stesso diventerebbe instabile. L'universo finirebbe in un "big rip" lacerando la sua stessa trama. Anche se un tale scenario non goda molto favore, gli astronomi cercano ora di trovare con precisione il momento nel passato in cui la forza espansiva dell'energia oscura abbia equilibrato quella di contrazione della gravità. Si pensa che ciò sia avvenuto circa 4 miliardi di anni fa e prima l'universo doveva essere in fase di rallentamento. La determinazione di questo istante potrebbe dare più informazioni sulla natura dell'energia oscura dello stesso parametro  $w$ .

**Science, 20 Jun 2003, Vol. 300, pg. 1898 - Mitchell C. Begelman** - I buchi neri sono luoghi dove la gravità è così forte che nulla di ciò che entra può sfuggire, neanche la luce; anche il tempo e lo spazio sono distorti in modo da non offrire via di uscita. La natura di questa singolarità non è ben compresa ed è probabile che le teorie fisiche vengano meno vicino a questa singolarità. Per gli astronomi questa singolarità è nascosta alla vista dal cosiddetto orizzonte degli eventi che per un buco nero non rotante e senza carica è caratterizzato dal raggio di Schwarzschild  $R_s = 2GM/c^2$  dove  $G$  è la costante di Newton della gravità,  $M$  è la massa del buco nero e  $c$  la velocità della luce.  $R_s$  avrebbe il valore di 3 km per un corpo avente la massa del Sole concentrata al centro. All'esterno però un buco nero si comporta in modo molto semplice. Un buco nero è caratterizzato dalla sua massa, momento angolare e carica elettrica, quest'ultima non è importante dal punto di vista astrofisico e quindi i parametri sono solo due. Lontano dall'orizzonte degli eventi un buco nero esercita una gravitazione come qualsiasi altra massa sferica e che esista un buco nero viene dedotto dall'intensità degli effetti gravitazionali quando l'oggetto risulta troppo massivo per essere una stella di neutroni. In molti casi si può osservare la radiazione emessa da gas vicini all'orizzonte degli eventi o da getti di plasma a velocità vicine a quelle della luce. L'energia liberata dalla materia vicina all'orizzonte degli eventi è prodigiosa specie per i grandi buchi neri al centro delle galassie che possono essere responsabili di certi tipi di gamma-ray burst. I buchi neri possono derivare dal collasso di stelle massive. Diverse dozzine di candidate si trovano nelle binarie che emettono raggi X quando la materia di una stella compagna viene trasferita al buco nero ed emette raggi X prima di essere ingoiata. In questo caso si deve stabilire che la massa della compagna oscura sia maggiore di 2-3 masse solari. Risulta difficile invece riconoscere buchi neri isolati che non catturano abbastanza gas dal mezzo interstellare e nella nostra galassia potrebbero essere da 10 milioni ad un miliardo. Buchi neri supermassivi si trovano al centro delle galassie e sono state proposte all'inizio per spiegare l'energia emessa dai quasar, si sa ora che sono la sorgente primaria di energia dei nuclei galattici attivi (AGN). Anche se non tutti i nuclei delle galassie sono sempre attivi, forse tutte le galassie hanno nel loro centro buchi neri supermassivi. Al centro della nostra Via Lattea c'è una sorgente di radiazioni, la Sgr A\*, che coincide con una massa

oscura di 3-4 milioni di masse solari. Le osservazioni hanno mappato le orbite che si avvicinano fino a 1000 Rs (60 volte il raggio dell'orbita terrestre). Le masse dei buchi neri sono correlate alle caratteristiche delle galassie che le ospitano e sembra si accrescano per assorbimento dei gas presenti intorno e non per fusione di buchi neri più piccoli. Si cerca anche di provare l'esistenza di un'altra popolazione di buchi neri di massa intermedia, resti di una Popolazione III di stelle molto massive formatesi con materiale ancora privo di metalli del primo universo. Contrariamente a quanto si pensa i buchi neri non sono come un aspiratore cosmico e non possono ingoiare materia il cui momento angolare per unità di massa sia maggiore di  $2R_{sc}$ , valore questo abbastanza piccolo. Il gas si pone in un disco di accrescimento in orbita kepleriana e spiralizza dissipando energia radiante raggiungendo un'orbita stabile a circa  $3R_s$ . L'energia irradiata è però bassa e la maggior parte della materia sfugge al buco nero, ciò spiega perché sono in genere poco luminosi. Parte della materia viene espulsa mediante jet relativistici accelerati e collimati dal campo magnetico prodotto dalla corrente del gas esterno e questo può estrarre energia dallo spin del buco nero mediante l'effetto Blandford-Znajek (BZ). Tutti questi fenomeni di emissione di energia si osservano anche in presenza di grandi potenziali gravitazionali come succede per le stelle di neutroni e l'unica reale caratterizzazione di un buco nero è l'esistenza di un orizzonte degli eventi cosa che è difficile da stabilire con le osservazioni. Le stelle di neutroni sono difficili da distinguere dai buchi neri anche se il materiale che cade sulla loro superficie dovrebbe produrre un'emissione particolare che deve mancare nei buchi neri. In futuro nuovi strumenti saranno atti a rivelare le onde gravitazionali prodotte dalla formazione di buchi neri nel collasso di stelle, correlata forse alla generazione di gamma-ray burst, o dalla caduta di oggetti massivi in un buco nero o dalla fusione di due buchi neri; saranno il LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) ed il LISA (Laser Interferometer Space Antenna). Altri progressi nella comprensione si attendono da una simulazione tridimensionale del processo di accrescimento intorno ad un buco nero.

**Science, 20 Jun 2003, Vol. 300, pg. 1904 - Jordi Miralda -Escudé** - Sono passati solo 75 anni da quando Edwin Hubble scoprì che viviamo in un universo di galassie in espansione ed ora, alla fine del XX secolo, ci sono abbastanza prove per affermare che il primo universo era quasi omogeneo: Ci si chiede ora come da una situazione di omogeneità l'universo sia arrivato alla presente complessità. Bisogna fare la storia dell'universo dal momento dell'emissione del Cosmic Microwave Background (CMB) fino al collasso gravitazionale del primo oggetto stellare. Per designare un'epoca cosmica i cosmologi usano il redshift  $z$  mentre la quantità  $1 + z$  rappresenta il fattore con il quale l'universo si è espanso fino ad oggi ed è anche il fattore di cui è aumentata la lunghezza d'onda di una radiazione emessa in quell'epoca a causa dell'espansione dell'universo. Il modello iniziale dell'universo è quello del Cold Dark Matter (CDM) che assume che, oltre all'ordinaria materia formata da protoni, neutroni ed elettroni che viene chiamata barionica, c'è anche della materia oscura (dark matter) formata da particelle che hanno solo interazioni gravitazionali. Il CMB mostra che le leggerissime fluttuazioni di temperatura presenti sono state i semi che hanno formato successivamente le attuali galassie. Più recentemente è stata identificata anche una dark energy che ora è diventata dominante causando un'accelerazione nell'espansione dell'universo. Il Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) ha mostrato che la materia barionica costituisce solo il 17% di tutta la materia, mentre il resto è costituito da materia oscura, ed ha confermato la presenza della dark energy. Tuttavia i cosmologi non hanno alcuna idea della natura sia della dark matter che della dark energy. Per valori molto alti di  $z$  l'universo era praticamente omogeneo e con l'espansione la temperatura si è andata abbassando. Gli atomi si formarono a circa  $z = 1100$  quando la temperatura era di 3000 K e provocarono la ricombinazione del plasma. Da questo istante è visibile in ogni direzione il fondo a 3000 K del CMB che continuando l'espansione si è spostato verso l'infrarosso ma fino alla formazione delle prime stelle per collasso gravitazionale spazio e materia rimasero nell'oscurità per un intervallo di tempo detto Dark Age. I primi quasar e galassie osservati dagli astronomi si hanno per  $z = 6,5$  circa e la teoria suggerisce che migliorando la tecnologia per l'osservazione di oggetti sempre più deboli, saranno estremamente rari gli oggetti luminosi per  $z > 20$ . La Dark Age finì quando si formarono le prime stelle massive ed allora l'ambiente cambiò per l'emissione di grandi quantità di radiazioni ultraviolette che cominciarono a ionizzare l'idrogeno. Le prime stelle massive si sono formate per  $z = 38$  circa, quando l'universo aveva 75 milioni di anni ed hanno avuto una vita breve terminando come supernove e generando elementi pesanti con cui inizia la formazione nello spazio di polveri e degli ingredienti necessari a comporre i pianeti. La seconda generazione di stelle, anche con un contenuto di elementi pesanti 1000 volte inferiore a quelli del nostro Sole, viene favorita da un più rapido raffreddamento dei gas e dalle nuove polveri e si formano stelle più piccole e di vita più lunga. Stelle con masse pari a 0,8 la massa solare vivono ancora oggi nell'alone della nostra galassia, dove sono state incorporate, ed hanno la composizione delle prime supernove. La formazione delle stelle ha come effetto importante la reionizzazione dell'idrogeno nello spazio con l'emissione della riga Lyman-alpha. L'osservazione di questa riga emessa fino a  $z = 6$  indica che a questa data l'universo era di nuovo ionizzato. All'inizio si osservano bolle di gas ionizzato in un mezzo allo stato atomico, poi le bolle si espandono e si riuniscono fino alla ionizzazione completa. La reionizzazione però non rende opaco l'universo come era prima di  $z = 1100$ , perché l'ulteriore espansione ha reso la densità di materia più bassa.

**Science, 20 Jun 2003, Vol. 300, pg. 1909 - Jeremiah P. Ostriker** - Il lato oscuro dell'universo cominciò a rivelarsi circa 65 anni fa quando Fritz Zwicky dell'università di Princeton notò che la velocità con cui si muovono le galassie nei grandi cluster era troppo grande per tenerle legate gravitazionalmente a meno che il loro peso fosse 100 volte maggiore

da quello stimato sulla base del numero di stelle del cluster. Decenni di indagini hanno confermato la sua analisi e negli anni '80 si accettò l'esistenza di una materia oscura pari al 20% dell'energia totale dell'universo. Dopo l'introduzione della teoria inflazionaria molti cosmologi si convinsero che l'universo deve essere piatto e che la densità totale dell'energia deve uguagliare il valore critico che distingue un universo curvato positivamente da uno curvato negativamente. Supposto che ogni forma di energia dell'universo consiste in una forma di materia, questa sarà formata per il 4% da normale materia barionica e per il 96% da dark matter. Ma quando fu trovata la prova di un'espansione accelerata dell'universo dall'osservazione delle supernove, si comprese che dark energy e dark matter devono essere fundamentalmente diverse anche se hanno in comune il fatto che ambedue non emettono né assorbono luce. La dark matter, come la materia ordinaria, esercita attrazione gravitazionale mentre la dark energy è autorepulsiva. Secondo la teoria generale della relatività, in un universo composto solo di materia, è la densità di massa che determina la geometria, la storia ed il futuro dell'universo. Con la presenza della dark energy tutta la storia cambia e, a un periodo dominato dalla materia, segue un periodo dominato dall'energia. L'accelerazione dell'espansione continuerà a meno che la dark energy non decada o cambi la sua equazione di stato. Separando quindi la materia dalla dark energy, che costituisce il 73% del totale, possiamo distinguere una materia luminosa costituita da tutto ciò che emette radiazioni e che costituisce lo 0,4% del totale (stelle e gas radianti), una componente non luminosa formata dai gas intergalattici (3,6%), neutrini (0,1%) e buchi neri supermassivi (0,04%) ed un 23% di dark matter sconosciuta. Sulla natura della dark matter si sono fatte molte ipotesi cercando ipotetiche particelle elementari di lunga vita, fredde (cioè non relativistiche) e non interattive. La lunga vita deve essere comparabile con la vita attuale dell'universo e le particelle devono esercitare solo attrazione gravitazionale, si parla così di Cold Collisionless Dark Matter (CCDM) ed una subclasse viene indicata come WIMP (Weakly Interacting Massive Particle). Un candidato è il neutralino, una particella prevista dalla teoria della supersimmetria, un aspetto della supergravità e della teoria delle stringhe. Questa richiede la presenza di un bosone per ogni fermione conosciuto ed un fermione per ogni bosone conosciuto. Questi partner supersimmetrici hanno una massa più grande, sono instabili e decadono rapidamente ma uno di questi con una massa di 100 GeV non decade, è elettricamente neutro e poco interattivo. Dei rivelatori sotterranei potrebbero rivelarne la presenza quando attraversa la Terra. Un altro candidato è l'assone, particella molto leggera (1 micro-eV) e neutra ed anche per esso ci sono dei rivelatori. Nel caso che si osservino discrepanze fra teoria ed osservazione sono state proposte altre forme di dark matter come Strongly self-Interactive Dark Matter (SIDM), Warm Dark Matter (WDM), Repulsive Dark Matter (RDM), Fuzzy Dark Matter (FDM), Self-Annihilating Dark Matter (SADM), Decaying Dark Matter (DDM) ed infine massive Black Holes da un milione di masse solari. Le alternative sono molte e molti tipi di osservazioni possono essere pensati per distinguere fra esse; in base alle simulazioni, le galassie potrebbero contenere nuclei ad alta concentrazione di queste forme di dark matter ma fino ad ora le osservazioni non lo hanno confermato.

**Science, 20 Jun 2003, Vol. 300, pg. 1914 - Robert P. Kirshner** - L'osservazione delle supernove a metà strada fra noi ed il big bang ha mostrato che l'universo è andato accelerando la sua espansione negli ultimi 7 miliardi di anni. Questo effetto viene attribuito alla presenza di una dark energy che rende l'universo piatto e con la sua pressione negativa produce l'accelerazione cosmica. Dall'osservazione del Cosmic Microwave Background (CMB) si deduce che circa il 28+/-5% dell'universo è fatto di materia ed il 72% di dark energy anche se non sappiamo di cosa si tratti. Le supernove che permettono di tracciare la storia dell'espansione cosmica sono le SN Ia prodotte dall'esplosione di una nana bianca in un sistema binario dove subisce l'accrescimento a spese della materia della compagna fino a raggiungere l'instabilità. La luminosità è sempre la stessa e sono quindi le migliori candele campioni per l'astronomia extragalattica. Le SN Ia esplodono una ogni 100 anni per galassia e con esse si determina la distanza con un'accuratezza del 10%. Con le SN Ia vicine si determina il valore della costante di Hubble attuale:  $H_0 = 72 \pm 8 \text{ km/s} \cdot \text{Mpc}$ . L'accelerazione dell'universo aumenta la distanza delle stelle più antiche e la loro luce appare più attenuata. Estendendo le misure a valori di  $z$  elevati, per circa  $z = 1$ , l'effetto cambia e le supernove appaiono più brillanti segnando il momento in cui la decelerazione cosmica dovuta alla dark matter prevale sull'accelerazione dovuta alla dark energy. La vita dell'universo si stima ora a  $13,6 \pm 1,5$  miliardi di anni.

Una possibile spiegazione della dark energy è una moderna versione della costante cosmologica introdotta da Einstein nelle sue equazioni del campo per imporre una condizione statica. Una volta noti i risultati di Hubble sull'espansione dell'universo, Einstein ritenne la costante cosmologica il suo più grande errore. L'interpretazione moderna della costante cosmologica è una densità di energia del vuoto. Se questa energia genera una pressione negativa e costante produce un'accelerazione nell'espansione che diventa esponenziale. Se materia ed energia rimangono costanti nell'universo, il loro rapporto, che oggi è circa 2, cambierà in futuro con l'espansione perché l'energia del vuoto rimane costante e la densità di materia diminuisce con la terza potenza; 7 miliardi di anni fa dominava la materia e l'universo era ancora in fase di decelerazione, oggi ormai domina l'energia del vuoto e, quando l'universo avrà il doppio dell'età attuale, il rapporto fra le due energie sarà circa 10. Oggi è molto importante stabilire se e quando si sia verificata l'inversione fra decelerazione ed accelerazione con un maggior numero di osservazioni intorno a  $z = 1$ . Sono state osservate 42 supernove con  $z$  fra 0,3 e 1,8 e 10 supernove hanno  $z > 1$ ; si attende l'elaborazione di questi dati. C'è anche la possibilità che la dark energy abbia una natura diversa e che sia un campo che cambia lentamente secondo il modello della quintessenza, le cui proprietà potranno essere determinate dall'osservazione. Anche riguardo alle SN Ia vi sono molti aspetti poco compresi che potrebbero infirmare l'accuratezza delle misure.

**Science, 25 Jul 2003, Vol. 301, pg. 449 - Charles Seife** - L'energia oscura, la forza di antigravità che fa accelerare l'espansione dell'universo, viene confermata da una misura effettuata da scienziati di due dozzine di istituzioni. La misura rappresenta una rivelazione diretta dell'energia oscura ed è basata sull'effetto Integrated Sachs-Wolfe (ISW), conseguenza della relatività generale secondo il quale la luce, passando vicino a oggetti massivi come i cluster di galassie che creano una buca nello spaziotempo, acquista energia nella fase di caduta e la riperde quando risale la buca. L'energia oscura provoca però un'asimmetria in questi due processi che avvengono in tempi successivi perché nel frattempo lo spaziotempo ha ridotto la sua curvatura e quindi alla fine il fotone ha acquistato un po' di energia. Per verificare l'effetto ISW gli astronomi devono comparare la luce che è passata vicino ad una grande massa con quella non influenzata dalla buca di gravità. Questa operazione è stata resa facile questa primavera quando il satellite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) ha prodotto una mappa incredibilmente dettagliata del cosmic microwave background, il fondo di luce fredda dell'antico universo. Gli scienziati hanno confrontato la mappa con quella che rileva la distribuzione delle galassie nell'universo, nota come Sloan Digital Sky Survey (SDSS), ancora in corso di completamento, e si è notato che il cosmic microwave background che passa vicino alle galassie è in media più caldo di quello lontano dalle galassie, prova evidente dell'effetto ISW prodotto dall'energia oscura. La confidenza statistica di questa conclusione è solo del 99%, che è molto piccola per gli standard della fisica, ma l'analisi è piuttosto affidabile. Quando nel 2006 il progetto SDSS sarà completato si avranno a disposizione un numero di dati circa 2,5 volte maggiori di adesso e l'effetto ISW verrà misurato con un livello di confidenza maggiore. Si potrà allora quantificare anche l'energia oscura e dedurre di più sulla sua natura. L'effetto ISW è molto sensibile alla quantità di energia oscura presente e la sua misura può essere abbastanza precisa; si potrà misurare anche la sua equazione di stato, un parametro chiave da cui estrarre le proprietà dell'energia oscura, ed in particolare se cambia la sua intensità nel tempo.

**Science, 10 Oct 2003, Vol. 302, pg. 209 - Charles Seife** - Il satellite Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) ha prodotto recentemente la più dettagliata rappresentazione del cosmic microwave background (CMB) ed i fisici che lo hanno analizzato sono arrivati ad avanzare una strana ipotesi: l'universo potrebbe essere finito e costituito da 12 facce esagonali. Le dimensioni delle macchie più calde e più fredde del CMB indicano che su larga scala non ci sono le grandi fluttuazioni di temperatura che ci si aspettava e questo potrebbe implicare che l'universo ha una dimensione finita. Alcuni fisici avevano pensato che l'universo potesse avere la forma di un toro, ora si è fatta l'ipotesi che una forma dodecaedrica potrebbe spiegare l'anomalia. Diverse topologie dell'universo sopprimono in modo diverso le fluttuazioni ed un universo dodecaedrico si adatta meglio di uno toroidale alla situazione del CMB. La cosa interessante di questa ipotesi è che vi sono delle conseguenze misurabili ma anche se l'ipotesi non venisse confermata rimarrebbe da spiegare la mancanza di oscillazioni su larga scala nella mappa del CMB.

**Science, 19 Dec 2003, Vol. 302, pg. 2038 - Charles Seife** - A conclusione del 2003 il risultato scientifico più sensazionale dell'anno (breakthrough of the year) è stato giudicato la nuova immagine dell'universo uscita dagli ultimi progressi della cosmologia e dalle misure in febbraio della sonda Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP). Queste misure, insieme ad altre osservazioni, hanno confermato un'immagine dell'universo molto più strana di quanto mai supposto. Cinque anni fa, alla fine del 1988, la rivista Science aveva dichiarato Breakthrough of the year la scoperta di un universo in accelerazione. La misura della luminosità apparente di certe supernove aveva permesso ai cosmologi di misurare l'accelerazione dell'universo in diversi momenti della sua storia; con sorpresa gli scienziati scoprirono che l'universo si andava espandendo sempre più rapidamente piuttosto che decelerare come la relatività generale ed il senso comune induceva a pensare. Questo fu il primo segno della misteriosa "dark energy", una forza sconosciuta che contrastava la gravità ed allontanava sempre più le galassie le une dalle altre. Nonostante queste misure sulle supernove, molti cosmologi esitavano a credere a questa strana forma di energia ed hanno cercato di provarne l'esistenza in modi diversi. La ricerca è finita quest'anno e gli scienziati non cercano più di confermarne l'esistenza ma cercano di capirne le caratteristiche e le sue conseguenze sull'inizio e sull'evoluzione dell'universo. I dubbi sull'esistenza della dark energy si sono dissolti quando il satellite WMAP ha ottenuto l'immagine più dettagliata mai misurata del Cosmic Microwave Background (CMB), l'ultima immagine di quando l'universo era una sfera di plasma, 400000 anni dopo il big bang. Durante questa prima fase dell'evoluzione, lo shock del big bang aveva indotto nell'universo una risonanza come in una campana e le onde di pressione avevano provocato espansioni e compressioni nelle nubi di materia. I punti più caldi (hot spot) del CMB rappresentano l'immagine delle zone compresse ed i punti più freddi (cold spot) le regioni rarefatte del plasma. L'abbondanza relativa e le dimensioni di questi hot e cold spot dipendono dalla composizione e dalla forma dell'universo. I dati del WMAP hanno confermato la strana e incredibile immagine dell'universo che altre osservazioni avevano delineato. L'universo è formato solo per il 4% di materia ordinaria, quella che forma le stelle e gli oggetti comuni; il 23% è costituito da materia esotica, una materia oscura formata da particelle ancora non rivelate; il rimanente 73% è costituito da dark energy. Il modo come risuona la campana cosmica ci rivela inoltre la sua età e la sua velocità di espansione. Un anno fa i cosmologi dicevano che l'età dell'universo era compresa fra 12 e 15 miliardi di anni; ora la stima è di 13,7 miliardi di anni più o meno poche centinaia di migliaia. Altri calcoli basati sui dati del WMAP ci danno l'attuale velocità di espansione: 71 chilometri per secondo per megaparsec, più o meno pochi centesimi, inoltre la forma dell'universo è piatta (euclidea). Oltre al WMAP, un altro importante contributo alla cosmologia è stato dato quest'anno

dallo Sloan Digital Sky Survey (SDSS) che sta eseguendo la mappatura di milioni di galassie. Analizzano la distribuzione di queste galassie gli scienziati possono dedurre le forze che producono il loro addensarsi e rarefarsi, incluse le forze di attrazione esercitate dalla materia oscura e le spinte antigravitazionali della dark energy. In ottobre il team dello SDSS ha rivelato la sua analisi del primo quarto di milione di galassie raccolte ed è arrivato alle stesse conclusioni dei ricercatori del WMAP: l'universo è dominato dalla dark energy. In luglio gli scienziati hanno avuto poi la prova più diretta degli effetti della dark energy. Sovrapponendo la mappa dei cluster di galassie con quella del CMB del WMAP hanno provato oltre ogni ragionevole dubbio che la dark energy deve esistere. La prova si basa su un fenomeno noto come effetto Sachs-Wolfe. La radiazione a microonde agisce come una radiazione di fondo che attraversa le buche gravitazionali prodotte dai cluster di galassie dello SDSS più vicine e queste buche provocano un leggero spostamento di questa radiazione verso lunghezze d'onda più alte, cioè un aumento di energia; in un universo piatto ciò è spiegabile solo con una forza antigravitazionale che espande sempre più nel tempo la trama dello spaziotempo. Alcuni dei risultati della cosmologia ci fanno capire ora le forze che hanno plasmato l'universo dopo una frazione di millisecondo dalla singolarità cosmica del big bang. In questi istanti la trama dello spaziotempo ha subito un'espansione più veloce della luce, detta inflazione, che finì in meno di  $10^{-30}$  secondi dando forma al presente universo. Per decenni l'inflazione ha fornito poche ipotesi da sottoporre a prova, ora la precisione dei dati del WMAP permette di provare in modo diretto le conseguenze dell'inflazione. Ogni versione sulla precisa natura della forza di inflazione produce degli scenari diversi che portano a concrete predizioni sul CMB e quindi sulla successiva distribuzione delle galassie e gli scienziati stanno ora verificando una serie di ipotesi. Anche le proprietà della dark energy vengono sottoposte a indagine ed i fisici devono già scartare alcune assunzioni; ma devono anche considerare una situazione in cui l'universo possa morire di una morte violenta ed improvvisa. Se la dark energy fosse più forte di un valore critico l'espansione provocherebbe l'esplosione delle galassie, del sistema solare, dei pianeti e persino degli atomi in un big rip che lacererebbe lo stesso spaziotempo. Quest'anno si sono raggiunte delle certezze e gli scienziati cominciano già a porsi altre domande.

\*\*\*