

COSMOLOGIA

RIASSUNTO DI CONFERENZE DEL DOTT. ITALO MAZZITELLI

(Ist. Naz. Astrofisica, Tor Vergata, Roma)

tenute presso il Centro di Documentaristica Scientifica

Via Nomentana, 175 - 00161 Roma.

A cura di Aiosa Alberto (a.aios@flashnet.it).

INDICE

COSMOLOGIA	1
1.1 L'ASTRONOMIA E L'INFINITAMENTE PICCOLO.	2
1.2 L'ASTRONOMIA E L'INFINITAMENTE GRANDE.	3
1.3 L'ASTRONOMIA E L'INFINITAMENTE FORTE.	5
1.4 LA VITA DELLE STELLE.	6
1.5 EVOLUZIONE DEGLI AMMASSI STELLARI.	8
1.6 PERCHÉ STUDIARE L'UNIVERSO.	8
1.7 LA MISURA DELL'UNIVERSO.	10
1.8 LA DIMENSIONE DEL TEMPO.	11
1.9 I MODELLI DELL'UNIVERSO (1° Parte).	12
1.10 I MODELLI DELL'UNIVERSO (2° Parte).	13
1.11 TUTTI GLI UNIVERSI POSSIBILI (1° Parte).	15
1.12 TUTTI GLI UNIVERSI POSSIBILI (2° Parte).	16
2.93 UNIVERSO E DINTORNI.	17

1.1 L'ASTRONOMIA E L'INFINITAMENTE PICCOLO.

LE PARTICELLE ELEMENTARI

27.05.98 - 18:30 - CCCDS - Via Nomentana, 175.

Relatore Dott. I. Mazzitelli - Istituto Fisica Stellare - CNR.

Lo studio delle particelle elementari confina con l'astrofisica e si può parlare di "astroparticles" perché quando si indaga sull'origine e la costituzione dell'universo si riconosce che esiste uno stretto legame fra quello che è oggi l'universo e le proprietà delle particelle elementari. Lo stato delle particelle è condizionato dal loro livello di energia e poiché l'universo ha avuto in passato livelli di energia molto elevati si devono poter trovare dei resti fossili come previsti dalla teoria.

Per farsi un'idea di quello che hanno in comune le particelle elementari queste vanno pensate come qualcosa di unico che assume di volta in volta una divisa diversa (un impiegato statale con un cappello ed una divisa ed un compito diverso). Le particelle vanno distinte per come si presentano in sé e per come interagiscono, e sono diverse perché interagiscono in modo diverso. Tutte le particelle sono soggette a quattro forze diverse e queste sono come i quattro elementi di Democrito: terra, aria, acqua e fuoco. La prima forza è la forza gravitazionale, che possiamo associare alla "terra"; tutte le particelle, anche quelle prive di massa sono soggette a questa forza in base alla relatività generale. Poi c'è la forza detta debole che è responsabile del decadimento radioattivo; il processo è lento e raro perché la forza è debole ma è quella che controlla i processi nucleari e fa splendere le stelle; può essere associata a "aria". Dopo la gravitazione questa è la forza più generale e tutte le particelle tranne i fotoni ne vanno soggette; per agire però bisogna che le particelle si avvicinino molto. La terza forza è quella elettromagnetica, è molto più intensa e molto diffusa ma agisce solo su 2/3 delle particelle esistenti; può essere assimilata a "acqua". L'ultima è la forza forte o nucleare o di colore, la forza che tiene unite le particelle all'interno del nucleo; si sa che l'energia nucleare è un milione di volte più concentrata di quella chimica ma la forza all'interno del nucleo è ancora più forte e per separare due particelle in un nucleo è necessaria una trazione di 17 tonnellate. La forza forte ha inoltre la caratteristica di essere invariante con la distanza e questo perché, allontanandosi le particelle, le linee di forza non divergono ma rimangono concentrate in un tubo di forza di sezione costante proprio a causa della sua intensità. Questa forza è assimilabile al "fuoco".

Oltre a queste quattro forze pare che non ne esistano altre; una forza più debole di quella della gravitazione, se esistesse avrebbe un raggio di azione più grande del raggio del nostro universo, una forza più intensa di quella di colore è stata anche ipotizzata e chiamata di "technicolor" ma non ci sono prove. Il problema di come agiscono le forze a distanza nel vuoto ha sempre assillato i fisici; Newton per spiegare la gravitazione pensava che lo spazio avesse una proprietà come un indice di rifrazione che deviasse le traiettorie ma solo Einstein ha dato una spiegazione valida eliminando la forza di gravitazione ed introducendo una curvatura dello spaziotempo per cui le particelle si muovono secondo la geometria dello spaziotempo curvo; questo è stato verificato fino alla 16° cifra. Anche per le altre tre forze esiste ora una teoria sulla base della meccanica quantistica dei campi. Secondo questa teoria le interazioni sono mediate da particelle fantasma che vengono scambiate e che si generano spontaneamente intorno alle particelle. La presenza di queste particelle fantasma è dimostrata indirettamente perché modifica ad esempio il momento magnetico dell'elettrone ruotante che, tenendo conto del campo quantistico, risulta maggiore di uno ed il suo valore è stato verificato fino alla 12° cifra. Per il resto questi fantasmi violano tutti i principi di conservazione che però sono validi per l'insieme delle particelle che interagiscono. Quindi oggi non si parla più di azioni a distanza ma di interazioni legate ad una "carica"; ad esempio la carica della gravitazione è la massa. Così l'elettrone ha una carica gravitazionale, la sua massa, e una carica elettromagnetica che vale -1 ma non ha carica di colore (forte). L'unità di massa si misura in Mega Electron Volt (MeV) e l'elettrone ha massa 0,5 MeV.

Vediamo ora come è costituita la materia. La costituzione discreta della materia è stata dimostrata per la prima volta da Einstein nel 1905 con una sua memoria sul moto browniano. Il moto browniano è il fenomeno per cui particelle molto piccole in un liquido subiscono un moto irregolare come se vengano casualmente urtate da altre particelle. Einstein spiegò quantitativamente il moto osservato con l'urto delle molecole del liquido in agitazione termica. Per inciso nel 1905 Einstein produsse altri due lavori: quello sulla relatività speciale (Saggio sull'elettrodinamica dei corpi in moto) e quello sull'effetto fotoelettrico che portò poi allo sviluppo della meccanica quantistica e solo per quest'ultimo ebbe il premio Nobel. La struttura dell'atomo fu infine dedotta come formata da protoni, neutroni ed elettroni ma già nel 1940 si dubitò che il neutrone fosse una particella semplice perché aveva un momento magnetico e quindi doveva avere delle cariche al suo interno. Il problema di vedere la struttura interna della materia può sembrare un problema di ingrandimento del microscopio ma questo è limitato dalla lunghezza d'onda della luce usata: non si può vedere un oggetto più piccolo della lunghezza d'onda usata e la luce visibile arriva a 0,4 micron. Si possono usare radiazioni a lunghezza d'onda più piccola o elettroni accelerati (microscopio elettronico) o particelle più pesanti a cui è associata una lunghezza d'onda ancora più piccola. Ma lunghezza d'onda piccola significa anche energia elevata e questa può distruggere l'oggetto da osservare, come succede per i tessuti viventi che devono essere "preparati" prima di osservarli al microscopio elettronico. Gli acceleratori di particelle servono quindi per vedere la struttura della materia ma si tratta di una visione indiretta perché deve essere ricostruita al computer dalle deflessioni subite dalle particelle che collidono. Oggi si usano elettroni accelerati al 99,999 999 999 % della velocità della luce

nell'anello del CERN di Ginevra del diametro di 26 km a 100 m sotto terra e con questi proiettili si entra dentro la struttura dei protoni. Oggi il più potente acceleratore è il Tevatron in USA ma entro 5 anni l'Europa ne avrà uno più potente con cui si potrà avere una definizione di un capello supposto il protone del diametro di 1 m. Dalla decomposizione del neutrone in protone e elettrone si scoprì una terza particella: il neutrino che ha solo carica debole. I neutrini sono emessi in gran quantità dal sole, 1 cmq della nostra pelle è attraversato in un secondo da un miliardo di neutrini ma, per la loro scarsissima interazione, in tutta la nostra vita solo una decina colpirà un atomo del nostro corpo. Le particelle più leggere, elettroni e neutrini si chiamano leptoni (leptos = leggero) e sono quasi puntiformi; i protoni e neutroni sono invece più grandi. Verso il 1960 si sviluppò il modello a quark della materia introdotto prima come artificio matematico poi i quark divennero i mattoncini di questo Lego cosmico che costituisce la materia. Così ci sono due quark Up (U) e Down (D) che costituiscono protoni e neutroni; il protone è costituito da due Up e un Down, il neutrone da due Down ed un Up; i due quark hanno le seguenti caratteristiche:

quark Up	quark Down
carica gravitaz. 5	carica gravitaz. 8
carica elettrica +2/3	carica elettrica -1/3
carica debole si	carica debole si
carica di colore si	carica di colore si

Nasce subito il problema di come mai la massa di un protone è 939 MeV mentre dalla somma dei quark di ottiene solo 18. Qui entra in gioco la teoria delle interazioni quantistiche che introduce le particelle fantasma, i mediatori dell'interazione forte detti gluoni (da glue = colla), particelle che hanno a loro volta carica forte e quindi interagiscono con i quark e fra di loro, ma non hanno né massa né carica elettrica. I quark rivestiti della nuvola di gluoni hanno una massa corrispondente all'energia di scambio di circa 300 e questo spiega la massa del protone. I mediatori delle forze deboli e forti si chiamano bosoni; per la forza debole si hanno due bosoni detti W e Z, per la forza forte si hanno i gluoni. La forza che tiene i quark nel nucleo è enorme ed un residuo di questa forza che affiora all'esterno del protone o del neutrone è la forza nucleare che lega queste particelle nell'atomo. I quark singoli non possono esistere in natura perché se si cerca di strapparli l'energia fornita genera nuove configurazioni di particelle con carica elettrica intera. Tutto l'universo stabile è formato dai due quark Up e Down e dai due leptoni, elettrone e neutrino, ma esistono altre due famiglie simili portando quindi a 6 i quark diversi ed i leptoni e queste nove particelle sono diverse per la massa e per il tempo di vita:

	1° famiglia	2° famiglia	3° famiglia
leptoni	elettrone	elettrone mu	elettrone tau
“	neutrino	neutrino mu	neutrino tau
quark	quark up	quark charm	quark top
“	quark down	quark strange	quark bottom

Le cariche di colore che legano i tre quark in un protone o in un neutrone sono inoltre di tre tipi dette convenzionalmente red, green, blue (R, G, B) come i tre colori fondamentali e tutti e tre si neutralizzano come si neutralizzano le cariche elettriche positive e negative in un atomo neutro (vale l'analogia: rosso + verde + blu = bianco). I portatori di queste cariche sono i gluoni e ciascun gluone porta due cariche: un colore ed un anticoloro o colore complementare e quando un quark assorbe uno di questi gluoni dalla parte del suo anticoloro cambia colore.

Per completare il quadro esistono poi altrettante (12) antiparticelle che si annichiliscono quando incontrano le loro corrispondenti. Le antiparticelle si generano negli acceleratori o si trovano nei raggi cosmici. Tutte queste particelle si scoprono facendo collidere protoni contro protoni o elettroni contro antielettroni o protoni e l'ultima scoperta è stata quella del top quark. La verifica delle teorie correnti sulla particelle richiede quindi energie sempre più alte che confinano con quelle presenti durante il big bang e questo collega la fisica delle particelle con l'astrofisica.

Le teorie di unificazione e superunificazione tendono a semplificare forze e particelle. Si è riusciti ad unificare ad un certo livello di energia forza elettromagnetica e forza debole e forse si potrà unificare anche la forza di colore. Non c'è invece apparente contatto fra forza gravitazionale e meccanica quantistica che spiega i meccanismi delle altre forze. Se la carica gravitazionale è la curvatura dello spaziotempo il big bang è il momento in cui sono esplose le tre dimensioni dello spazio ed il tempo e si è creata la massa; il perché le particelle hanno una massa diversa sembra sia legato al cosiddetto bosone di Higgs, particella di intermediazione della massa, per scoprire la quale bisogna ancora attendere i nuovi acceleratori. Fra le ultime teorie è quella delle stringhe per la quale le particelle sono increspature di uno spaziotempo a 10 dimensioni nel quale solo tre più il tempo si sono espanse mentre le altre sono rimaste collassate alla dimensione di 10E-33 m, le antiparticelle hanno poi una curvatura opposta a quelle normali e per questo si annichiliscono fra di loro.

1.2 L'ASTRONOMIA E L'INFINITAMENTE GRANDE.

IL BIG BANG.

03.06.98 - 18:30 -CCCDs - Via Nomentana, 175.

Relatore Dott. I. Mazzitelli - Istituto Fisica Stellare - CNR.

Alla base delle teorie cosmologiche è lo spazio tempo, un concetto non intuitivo e fuori delle nostre esperienze sensibili perché condiziona i fenomeni solo per velocità vicine a quelle della luce; esso può essere imbrigliato solo attraverso il linguaggio matematico. La teoria sull'origine del nostro universo, ad oggi sostenuta dalle osservazioni sperimentali, è quella del big bang definito come il punto-istante in cui si è verificata un'esplosione che ha espanso materia spazio e tempo. L'universo di oggi è il prodotto di questa esplosione e della sua storia nei primi 300000 anni. Va subito premesso che il big bang non è "creazione" e che non va confuso con concetti metafisici perché la scienza risponde ai come e non ai perché. D'altra parte le nostre conoscenze partono da un decimiliardesimo di secondo dopo l'inizio perché prima non ci sono fatti o osservazioni su cui costruire ma solo teorie.

Alla base di questa teoria è la relatività generale sviluppata da Einstein nel 1916 con cui si spiega la forza di gravità ed i concetti di dinamica applicati a spazio, tempo e materia. Einstein si accorse che le equazioni del campo applicate all'intero universo portavano a concludere che questo non poteva essere in quiete ma o si espandeva o si contraeva. Poiché Einstein era un assertore dell'equilibrio introdusse nelle sue equazioni una costante cosmologica che rendeva stabile l'universo. A questo punto interviene Hubble, direttore dell'osservatorio di Monte Wilson dotato allora del telescopio più potente da 2,5 m. Le osservazioni sullo spettro delle galassie lontane mostrava che queste si allontanavano con velocità crescente con la distanza provando che l'universo era in espansione per cui, ripercorrendo la storia a ritroso, materia, spazio e tempo si sarebbero trovate tutte concentrate in un punto. Hubble raccolse dati per 15 anni perché non voleva sbagliarsi e la notizia fu data nel 1931. Guardando sempre più lontano la velocità di allontanamento delle galassie può superare quella della luce perché lo spaziotempo non ha un limite nella velocità di espansione mentre all'interno dello spaziotempo nulla può muoversi a velocità maggiore di quella della luce; si dedusse che circa 13 miliardi di anni fa tutto era concentrato in un punto ma non ha senso chiedersi cosa c'era prima, prima c'era il "nulla", il big bang esplose nel nulla e lo riempie; lo spazio vuoto è diverso dal "nulla" che è un concetto metafisico, ciò che noi chiamiamo vuoto è invece una struttura complessa dove ci sono le leggi della fisica e la geometria dello spaziotempo, le leggi della fisica che riempiono il vuoto sono l'insieme delle particelle virtuali previste dalla meccanica quantistica ed il vuoto ha degli effetti misurabili, infatti due piastre parallele nel vuoto si attraggono per effetto delle coppie di particelle ed antiparticelle di cariche opposte che si generano spontaneamente e si depositano su di esse.

Volendo tracciare una storia dell'universo lo si può fare su un diagramma con gli assi in scala logaritmica, con in ascissa il tempo da meno infinito (tempo 0) fino ad oggi e oltre, ed in ordinate il logaritmo dell'energia o della temperatura. Un secondo dopo il big bang la temperatura era di circa 10 miliardi di °K ($\log T = 10$ per $\log t = 0$), oggi si possono far misure con il Tevatron fino a $\log T = 16$ e ciò corrisponde ad un tempo $\log t = -10$ e si potrà arrivare a poco più giù con i prossimi acceleratori. Tutto ciò che è successo prima è solo oggetto di teorie. Oggi vi sono due teorie ben sviluppate ma inconciliabili: la teoria geometrica della gravitazione che copre la dinamica della materia nello spaziotempo e la teoria quantistica dei campi mediati dalle particelle virtuali; ambedue queste teorie sono precise e verificate sperimentalmente con grande accuratezza ma ogni tentativo di metterli insieme sfocia in assurdi logici e matematici. Si deduce con quasi assoluta certezza che per $\log t = -44$ tutte le quattro interazioni debbono unificarsi e questo è un orizzonte di conoscibilità perché non c'è una teoria che sappia mettere insieme le 4 interazioni. Quello del Tevatron è l'orizzonte galileiano dove ancora tutto è misurabile. Dall'orizzonte galileiano e quello di conoscibilità di $\log t = -44$ ci sono solo teorie. Così da $\log t = -44$ a $\log t = -33$ ci sarebbero distinte la forza gravitazionale e le altre tre interazioni unificate, a $\log t = -33$ si sarebbe staccata l'interazione di colore e sarebbero comparsi i quark, a $\log t = -9$ c'è il punto di unificazione dell'interazione debole e di quella elettromagnetica, verificata sperimentalmente da Rubbia, e da questo momento in poi tutte le 4 interazioni sono separate. A $\log t = -2$ si formano i protoni e neutroni, a $t = 1$ secondo ($\log t = 0$) si formano i primi nuclei atomici, a $t = 100$ s inizia la nucleosintesi ed alla fine il 25% della materia è formata da elio 4 ed il restante da idrogeno. L'universo è ancora dominato dalla radiazione e la materia è un plasma ionizzato in cui i fotoni sono continuamente intercettati dagli elettroni liberi, passa circa 1 milione di anni ($\log t = 13$) e solo allora si scende al di sotto di 5000 °K, si ha la ricombinazione, cioè gli elettroni si legano ai nuclei e l'universo diventa trasparente. Questo è il tempo del passato più lontano fin dove possiamo vedere l'universo perché prima c'è un muro di radiazione e questo muro è stato registrato dal satellite COBE come radiazione infrarossa diffusa con le fluttuazioni di densità che poi hanno generato le galassie. Nel 1964 era stata scoperta per la prima volta la radiazione di fondo a 2,73 °K, residuo raffreddato dall'espansione dell'universo, della radiazione di ricombinazione.

Si discute ancora su due punti. Il primo è il fenomeno dell'inflazione assimilabile ad un cambiamento di stato che sarebbe avvenuta da $\log t = -37$ a $\log t = -34$ provocando un'espansione rapidissima dello spaziotempo e portando le dimensioni dell'universo da $10E-90$ a $10E-35$ cm, questo spiegherebbe l'omogeneità osservata nella radiazione di fondo. Un altro punto è la mancanza di antimateria nel nostro universo. Prima di $10E-33$ secondi si suppone che ci fossero particelle superpesanti dette X e Y che, scesa la temperatura, sarebbero decadute in quark e antiquark ma questo decadimento ha una piccolissima asimmetria di una parte su un miliardo a vantaggio delle particelle di materia. Una volta annichiliti tutti gli antiquark è rimasta l'attuale materia e questo spiega perché oggi esista un miliardo di fotoni per ogni protone mentre prima i fotoni erano in equilibrio con le particelle X e Y.

Poco chiaro è anche il futuro dell'universo: questo si espanderà all'infinito se la densità di materia/energia fosse inferiore ad una certa quantità critica, se avesse questo valore esatto cesserebbe di espandersi a tempo infinito, per un valore maggiore finirebbe con il ricollassare in un big crunch. Attualmente considerando la materia ordinaria presente nell'universo sembra che questa sia insufficiente e pari a 0,15 / 0,20 del valore critico, ma ci potrebbe essere una massa nascosta, ad esempio nei neutrini, che ancora non si sa se siano dotati di massa, o portata da particelle esotiche, con scarsissima interazione con la materia, o dovuta al "peso del vuoto".

1.3 L'ASTRONOMIA E L'INFINITAMENTE FORTE.

BUCHI NERI E VIAGGI NEL TEMPO.

10.06.98 - 18:30 - CCCDS - Via Nomentana, 175.

Relatore Dott. I. Mazzitelli - Istituto Fisica Stellare - CNR.

La preistoria dei buchi neri parte dal calcolo della velocità di fuga da un pianeta che ha una sua forza di gravità, cioè la velocità che bisogna imprimere ad un oggetto che si trova sulla superficie del pianeta in modo che non ricada sul pianeta stesso. Il primo a calcolare questa velocità di fuga fu Newton ed ora sappiamo che per esempio per la Terra la velocità di fuga è 11,2 Km/s, per la Luna 2,0 km/s e per il Sole 600 km/s. Nel 1799 Laplace valutò che in oggetto celeste avente densità di 1 g/cm³ (come l'acqua) e grande quanto l'intero sistema solare avrebbe avuto una velocità di fuga pari a quella della luce di 300000 km/s, velocità già misurata da Roemer sulla base del ritardo osservato nelle eclissi dei satelliti di Giove quando questo si trovava alla massima distanza dalla Terra, 300 milioni di km più lontano. Laplace osservò che in questo caso un tale oggetto non sarebbe stato più visibile perché neppure la luce avrebbe potuto abbandonarlo e si sarebbe rivelato solo per i suoi effetti gravitazionali sui corpi circostanti. La comprensione dei buchi neri ha però richiesto la comprensione di come agisce la gravitazione. Newton stesso si era chiesto come potesse agire una forza di attrazione a distanza che sembra comportarsi come un elastico cosmico ma non era riuscito a dare una risposta esauriente e bisogna arrivare al 1916, con la relatività generale di Einstein, per afferrarne il meccanismo. Prima ancora si è dovuto capire il principio di relatività. Galileo aveva dimostrato la relatività dello spazio, cioè che le misure di spazio dipendono dal moto dell'osservatore, tuttavia il tempo rimaneva assoluto perché le velocità con cui si aveva esperienza erano molto piccole rispetto a quelle della luce. Le prime perplessità si ebbero con l'esperienza di Michelson che voleva verificare se la velocità della luce si combinava con quella della Terra di circa 30 km/s e, con un sistema estremamente sofisticato, cercò di misurare di quanto variava la velocità della luce di una stella rispetto alla Terra quando questa, nel suo moto orbitale, si avvicinava e si allontanava. Benché il sistema avesse una accuratezza migliore di 1 km/s, Michelson non riuscì a misurare nessuna variazione. La cosa era spiegabile solo se anche l'orologio di chi si muove rallenta e quindi anche il tempo doveva essere relativo. Einstein comprese che la velocità della luce era una costante universale, costante rispetto a qualsiasi sistema di riferimento inerziale e nacque la relatività ristretta dello spaziotempo. Il tempo si confronta con le dimensioni spaziali ma come prodotto $t \cdot c$, cioè 1 secondo di tempo corrisponde ad una dimensione spaziale di 300000 km e tutta la cinematica si può studiare in termini geometrici ma in uno spazio a 4 dimensioni. Con la relatività generale Einstein ridusse anche la massa a spazio ed anche la dinamica si poté spiegare in termini geometrici. Furono necessari 11 anni, dal 1905 al 1916, per capire che la massa incurvava la geometria dello spaziotempo e Poincaré aiutò Einstein a dare una formulazione matematica alla nuova geometria sulla base delle geometrie non euclidee già sviluppate nell'800 da Gauss e Riemann. Gli oggetti che si trovano nello spaziotempo continuano il loro moto inerziale seguendo le geodetiche dello spaziotempo curvo cioè seguono sempre percorsi a spaziotempo costante. La forza di gravità non esiste e la curvatura del tempo si traduce in accelerazione quindi un oggetto che cade si trova in una traiettoria a spaziotempo costante dello spaziotempo curvo, la massa cioè risucchia continuamente lo spaziotempo verso di sé. L'esempio intuitivo è quello di una superficie bidimensionale elastica dove si formano degli avvallamenti in corrispondenza delle masse; delle palline da golf in moto su questa superficie seguiranno delle traiettorie curve come soggette a forza attrattiva dalle masse presenti mentre invece seguono soltanto le geodetiche della superficie. Nello spaziotempo curvo tutti i sistemi sono inerziali. Nel 1916 la teoria della relatività generale era appena uscita che un soldato prussiano, Karl Schwarzschild, dalle trincee di guerra inviò a Einstein una memoria in cui risolveva le equazioni dello spaziotempo nel caso di masse a simmetria sferica. Schwarzschild morì di setticemia prima di avere una risposta e ci vollero ancora altri 20 anni prima che si comprendessero tutte le conseguenze e le proprietà del buco nero la cui superficie critica fu detta di Schwarzschild. Al centro del buco nero si ha una singolarità dove lo spaziotempo è risucchiato dalla massa con una velocità maggiore di quella della luce e tutto si disintegra e svanisce.

Per dimostrare l'esistenza dei buchi neri si può: a) ricorrere al principio totalitario della fisica secondo cui "tutto ciò che non è vietato è obbligatorio", cioè si verifica necessariamente, b) si possono cercare i buchi neri primigeni del big bang ma ancora non sono stati trovati, c) si può dimostrare la formazione di buchi neri da stelle di massa superiore a 10 masse solari, d) si possono osservare i buchi neri dell'universo. La formazione di una stella parte da una nube di gas diffusa dove lo spaziotempo è ancora euclideo; quando la nube si addensa il nucleo si riscalda e, a 10 milioni di °K, inizia la reazione di fusione dell'idrogeno in elio; una volta consumato

l'idrogeno il collasso gravitazionale aumenta la temperatura e si innescano le altre reazioni di fusione che portano alla formazione degli elementi più pesanti. A 100 milioni di °K l'elio fonde formando carbonio ed ossigeno, segue un ulteriore collasso ed aumento di temperatura ed a 2 miliardi di °K anche l'ossigeno fonde e rapidamente il nucleo della stella si trasforma in ferro. A questo punto la fusione del ferro, per generare elementi ancora più pesanti, assorbe energia e la stella collassa definitivamente. Se la massa non supera le 3 masse solari si ha la formazione di una stella di neutroni o pulsar per la quale la curvatura dello spaziotempo è ancora il 30% di quella critica. Oltre le 10 masse solari il collasso porta alla formazione di un buco nero. I buchi neri si osservano nelle stelle binarie in cui una è visibile e l'altra invisibile ma la prima è deformata e risucchiata dalla compagna invisibile formando un vortice che emette raggi X e gamma prodotti dal plasma che spiralizza verso il buco nero. Al centro delle galassie si trovano buchi neri di milioni o miliardi di masse solari.

I buchi neri sono stati studiati teoricamente e sono degli oggetti strani e terribili. Intanto un buco nero riflette più di una sfera perfettamente riflettente. Infatti mentre una sfera riflettente, illuminata lateralmente, fa vedere l'immagine della sorgente come un punto luminoso, un buco nero fa vedere due punti luminosi ai lati, corrispondenti ai due raggi che hanno ruotato di 90° e 270° intorno al buco nero; se si illumina invece di fronte, si vedrà il buco nero circondato da un'aureola formata da tutti i raggi che hanno compiuto una rotazione di 180° intorno ad esso. Se si invia poi un robot verso un buco nero, man mano che esso si avvicina alla superficie di Schwarzschild, la superficie di non ritorno, lo si vedrà rallentare, secondo il tempo del nostro orologio, fino a fermarsi sulla superficie mentre la sua immagine si attenuerà fino a svanire. I fotoni infatti perderanno sempre più energia per risalire lo spaziotempo che si muove con il robot risucchiato dal buco nero. Il robot però non si accorge di aver attraversato la superficie di non ritorno, inizialmente non risentirà di nessuna forza, perché si muove con lo spaziotempo, ma man mano che si avvicina al centro del buco nero comincerà a sentire una forza di marea che tenderà ad allungarlo perché il risucchio dello spaziotempo diventa sempre più veloce nei punti più vicini alla singolarità, il robot verrà disintegrato, poi lo saranno anche le molecole, i nuclei, verranno separati i quark e tutto sparirà nel nulla, nell'infinito della singolarità. C'è un modo di sfuggire a questo destino? Il robot è costretto ad andare verso il centro muovendosi nello spazio ma se si muovesse anche nel tempo potrebbe sfuggire alla singolarità; se riuscisse a uscire poi dal buco nero si troverebbe nell'universo di partenza in un tempo diverso, passato o futuro. Questa è però una possibilità che potrebbe mettere in crisi le leggi di causalità: una persona tornando nel passato potrebbe uccidere i propri genitori; dovrà quindi esistere una "censura cosmica" che impedisca ciò. Questa censura potrebbe essere data dalla superficie di Schwarzschild che non può essere riattraversata in senso inverso, ma c'è ancora una possibilità. Stephen Hawking ha considerato il caso del buco nero rotante. Tra le qualità che non vengono annientate in un buco nero ci sono la massa, che determina le dimensioni del buco nero, la carica elettrica, che però in media sarà nulla, e la rotazione che nella relatività generale è una proprietà dello spaziotempo. La struttura di un buco nero rotante sarà diversa da quella di un buco nero non rotante. In un buco nero rotante lo spaziotempo ruoterà anche lui intorno al centro, la singolarità non sarà più un punto ma un anello di spessore infinitesimo e con apertura finita ed il robot potrebbe passare attraverso aiutato nelle possibilità di manovra dalla rotazione dello spaziotempo. Il matematico Kerr ha trovato che si forma una seconda superficie, un secondo orizzonte, per effetto di questa rotazione, superficie che si dilata all'aumentare della rotazione mentre l'orizzonte di Schwarzschild rimane fisso, dipendente dalla massa. Per un certo valore di rotazione l'orizzonte di Kerr raggiunge quello di Schwarzschild, i due si annullano e la singolarità diventa "nuda" cioè visibile, il robot allora potrebbe tornare indietro avendo viaggiato nel tempo. Rimane il problema della "censura cosmica" che viene a mancare. Qualcuno parla di universi paralleli dentro cui si finirebbe ma si spazia nel campo della fantasia.

1.4 LA VITA DELLE STELLE.

27.05.99 - 18:30 -CCCDs - Via Nomentana, 175.

Relatore Dott. I. Mazzitelli - Istituto Fisica Stellare - CNR.

L'evoluzione delle stelle dalla loro nascita alla loro morte è un argomento di astrofisica affascinante del quale ancora non si conosce tutto ed anche se sono noti i meccanismi di base non si sa prevedere con esattezza che cosa accadrà ad una stella nel prossimo futuro, il Sole ad esempio ha cicli di luminosità che comportano variazioni di parecchi per mille fino all'1% ma non si sa prevedere quando avverranno. Solo l'osservazione di un gran numero di stelle che si trovano in fasi diverse della loro vita ha permesso di comprendere la loro evoluzione. Così si conosce ora il meccanismo della nascita delle stelle e si sa che numerose sono le stelle che non riescono a nascere; durante la loro vita le stelle hanno una lunga fase stabile ma la fase più interessante è la loro morte, molte fanno una brutta fine e lasciano solo il loro fantasma.

Una prima domanda è perché le stelle, che sono fatte di gas, non collassano per la forza di gravità. A sproposito si attribuisce alla pressione di radiazione la forza che compensa la gravità, in realtà è l'effetto della pressione che varia dal centro alla periferia: ogni elemento di volume unitario è sottoposto alla forza di gravità ma fra la superficie interna e quella esterna esiste una differenza di pressione che equilibra questa forza. La pressione dipende dalla temperatura e dalla densità ed è dovuta all'insieme delle forze di rimbalzo degli atomi che si urtano ma se si continua a comprimere si arriva ad un primo limite in cui gli elettroni si "toccano" questo

perché le dimensioni quantistiche degli elettroni, che sono le particelle più leggere, sono più grandi delle dimensioni quantistiche delle particelle più pesanti come i protoni. Quando gli elettroni si “toccano” non ci sono più urti ma la pressione è quella di degenerazione degli elettroni che si oppongono all’ulteriore compressione.

Le stelle nascono dalle nubi di gas che riempiono gli spazi. In una nube ogni singola particella di massa m trova un equilibrio fra velocità dovuta all’agitazione termica $V_t = \sqrt{3KT/m}$ e velocità di fuga $V_f = \sqrt{2GM/r}$ dove M è la massa totale che agisce su m . Quando una perturbazione, come l’onda d’urto provocata da una supernova, comprime la nube di gas, aumenta la velocità di fuga e le particelle cadono verso il centro di massa; questa è la prima fase della nascita di una stella. Ma non tutte le stelle nascono; man mano che le particelle della nube cadono verso il centro, accelerano trasformando la loro energia potenziale in energia cinetica ed il gas si riscalda, nasce una stella solo se si raggiunge la temperatura di 10 milioni di °K quindi solo se la nube originaria è abbastanza grande. Questo limite di massa è 8/100 della massa del Sole, in caso contrario il volume si contrae fino alla degenerazione degli elettroni, a questo punto la stella mancata comincia a perdere energia per irraggiamento e diventa una nana bruna invisibile. Questi corpi sono i fratelli maggiori di Giove fino a 80 volte la sua massa che è 1/1000 di quella del Sole. Le nane brune devono essere molto numerose, forse tante quante le stelle visibili ma possono essere scoperte solo dai loro effetti gravitazionali su altri corpi o da emissioni al di sotto dell’infrarosso. Se la massa della nube permette di raggiungere i 10 milioni di °K si innesca la reazione nucleare di fusione dell’idrogeno; è la temperatura che, aumentando l’energia cinetica degli atomi, fa superare la loro repulsione elettromagnetica e li porta nel raggio di azione della forza attrattiva nucleare favorendo la fusione dei nuclei con liberazione di energia. La formazione di una stella per contrazione avviene in circa 100000 anni; una volta nata il primo effetto è quello di fare evaporare la nube circostante in circa 10000 anni; un altro effetto della contrazione è di aumentare la velocità di rotazione per il principio della conservazione del momento angolare; a volte la rotazione può essere così veloce da fratturarla e si creano le stelle multiple. Una di queste stelle in formazione che ruota velocemente è la Eta Carinae che, oltre ad avere getti di materia sul piano equatoriale, emette due getti sull’asse polare dove formano due escrescenze a causa della forza centrifuga. Intorno alla stella, sul suo piano equatoriale, rimangono degli anelli di materia da cui si formeranno i pianeti, corpi che accompagnano quindi tutte le stelle.

Il processo di fusione dell’idrogeno avviene secondo una sequenza di reazioni con passi successivi in cui si formano prima il deuterio, poi berillio e litio ed infine elio 4, l’energia prodotta è quella di attrazione nucleare. Nel Sole la fusione dell’idrogeno dura già da 4,5 miliardi di anni e continuerà per altri 5 miliardi di anni, l’elio si va concentrando nel nucleo e la reazione si sposta sempre più all’esterno, aumenta la superficie attiva ed andrà accelerando, il Sole aumenterà progressivamente di diametro ma per un altro miliardo di anni almeno non ci sarà un apprezzabile aumento; alla fine diventerà una gigante rossa ed ingloberà la Terra. Nel frattempo, quando il nucleo di elio avrà una massa pari alla metà di quella del Sole ed il 30% della massa sarà evaporato, il nucleo si contrae e si riscalda ulteriormente fino a 100 milioni di °K. A questo punto si innesca la reazione di fusione dell’elio in carbonio e poi in ossigeno:



Questo processo dura circa 100 milioni di anni e si forma un nucleo duro di carbonio e ossigeno sopra il quale una pellicola di elio continua a bruciare ed ancora all’esterno una pellicola di idrogeno che continua a trasformarsi in elio. L’involucro esterno si espande ancora e si forma una supergigante rossa che comprenderà l’orbita di Marte. Poi prima finisce l’idrogeno quindi anche l’elio, il nucleo di carbonio e ossigeno si contrae e si ha la degenerazione degli elettroni; si forma una nana bianca con un raggio di 1/100 dell’attuale Sole che continuerà a perdere energia fino a trasformarsi in una nana nera in alcuni miliardi di anni. Non ci sono ancora nane nere perché non è passato sufficiente tempo per la loro formazione dall’origine dell’universo. Il processo di evaporazione che accompagna la formazione delle nane bianche produce intorno alla stella le cosiddette nebulose planetarie, anelli di materia gassosa, a volte anche multipli corrispondenti a più fasi di formazione di gigante rossa; nel caso poi di presenza di un forte campo magnetico si formano getti di materia sull’asse polare che creano altre protuberanze. La prima nana bianca trovata è stata la Sirio B, compagna quasi invisibile di Sirio la cui presenza era evidenziata dal moto leggermente sinusoidale di Sirio. Sirio B aveva in origine circa 5 masse solari, ora ha circa una massa solare ed un raggio di 1/100 di quello del Sole. Tolomeo diceva che Sirio era rossa e forse ha assistito ad una breve fase di gigante rossa di Sirio B oppure c’è stato un errore di trascrizione. Si dice anche che il nucleo di una nana bianca è un grande diamante per la pressione a cui sono sottoposti gli atomi di carbonio.

Le stelle di 8-10 masse solari, contraendosi ancora il nucleo di carbonio e ossigeno, si alza la temperatura raggiungendo gli 800 milioni di °K alla quale brucia il carbonio producendo magnesio; portandosi la temperatura a 1 miliardo di °K, brucia anche l’ossigeno e si formano elementi più pesanti, dal silicio al ferro. Il nucleo della stella diventa con strati successivi come una cipolla; la reazione del carbonio dura 10000 anni, quella dell’ossigeno pochi anni (2-5), quella del magnesio alcuni giorni, il silicio brucia in pochi minuti ed il ferro in 2 secondi. Dal ferro in poi però la reazione assorbe energia, il nucleo si raffredda e si contrae rapidamente, l’onda d’urto fa esplodere l’involucro esterno e si ha il fenomeno di supernova. Nel collasso del nucleo gli elettroni vengono assorbiti dai protoni e si forma una stella di neutroni con raggio dell’ordine di 10 km ruotanti a velocità altissima e che producono segnali elettromagnetici di grande regolarità: sono le pulsar. I neutroni non degenerano come gli elettroni perché le loro dimensioni quantistiche sono troppo piccole. Nell’esplosione di supernova la maggior parte della massa viene perduta nello spazio ma, se la massa rimanente è maggiore di 3 masse solari, la contrazione inizia un processo rigenerativo nel quale l’energia di pressione

aumenta la gravitazione e questa a sua volta aumenta la pressione. Si forma un buco nero invisibile se non fosse per la gravità che rimane come un fantasma e per i suoi effetti come l'assorbimento di materia da una vicina compagna visibile.

Una stella nella sua ultima fase è Betelgeuse nella costellazione di Orione; in questo momento sta bruciando carbonio una fase che dura 10000 anni e Betelgeuse è nota così da 5000 anni e quindi potrebbe essere sul punto di esplodere o è già esplosa essendo a 1200 anni luce dalla Terra. All'esplosione la sua luminosità diventerà come quella della Luna ma concentrata in un punto. Se si guarda quando arriva il lampo dell'esplosione si ha bruciata la retina; per una settimana circa arriveranno intense radiazioni X e gamma e dopo un certo ritardo arriverà il fascio di particelle ad alta energia che provocherà nell'atmosfera sciami secondari capaci di suscitare radioattività indotta anche di lunga durata. Potrebbe avvenire una catastrofe biologica e un'estinzione di massa delle specie viventi terrestri come quella del Permiano 250 milioni di anni fa.

1.5 EVOLUZIONE DEGLI AMMASSI STELLARI.

02.06.99 - 18:30 -CCCDs - Via Nomentana, 175.

Relatore Dott. I. Mazzitelli - Istituto Fisica Stellare - CNR.

Data la loro vita lunghissima, l'uomo non può osservare nella sua breve esistenza una apprezzabile parte dell'evoluzione delle stelle e quindi deve adottare una diversa strategia osservando e classificando tutti i diversi tipi di stelle, che si trovano presumibilmente in periodi diversi della loro vita, e ricostruire il processo della loro evoluzione. Poiché poi l'evoluzione delle stelle è diversa a seconda della loro composizione chimica, è opportuno considerare separatamente l'evoluzione di gruppi di stelle con la stessa composizione che presumibilmente sono nate insieme. Popolazioni di stelle con la stessa composizione sono gli ammassi stellari. Queste si sono formate da una unica nube e le stelle costituenti differiscono per la loro massa. Gli ammassi più piccoli sono detti Associazioni che sono anche di formazione più giovane, al massimo di 10 milioni di anni fa, e comprendono un numero limitato di stelle per cui l'autogravitazione che le tiene unite è debole e con il tempo tendono a sparpagliarsi. Il nostro Sole ad esempio fa associazione con alcune stelle del Grande Carro che si sono ormai sparpagliate. Gli ammassi veri e propri sono costituiti da un gran numero di stelle vicine con una forte autogravitazione e quindi una velocità delle singole stelle inferiore alla velocità di fuga. Si distinguono ancora in ammassi aperti e globulari. Gli ammassi aperti sono costituiti da alcune centinaia a alcune migliaia di stelle che durano diversi miliardi di anni e si trovano nel disco galattico. Fra queste ci sono le Pleiadi, o Gallinelle, nella costellazione del Toro che si presentano come una macchia grande quanto la Luna, vi si distinguono a occhio nudo 4-6 stelle ma ve ne sono fino a un migliaio. Ci sono poi le Iadi fra Aldebaran e le Pleiadi, il Praesepe, lo M35 visibile con un binocolo. Gli ammassi globulari sono i più grandi e formano un alone intorno alla nostra galassia, ciascuno è formato da centinaia di migliaia di stelle, fino ad un milione. Sono tutti nati con le origini della galassia, nel loro moto possono attraversare il piano galattico ed allora possono subire collisioni gravitazionali e delle stelle possono essere strappate; gli ammassi globulari sono come piccole galassie molto compatte, le distanze fra le stelle sono dell'ordine del mese luce, al centro si possono avere collisioni frequenti e formarsi sistemi binari e ternari che tendono a raccogliersi al centro dove si possono trovare buchi neri e stelle di neutroni, questi a loro volta risucchiano la materia dalle stelle vicine e si hanno forti emissioni X. Gli ammassi globulari sono le formazioni più antiche del nostro universo, formati 0,5 miliardi di anni dopo il big bang, lo dimostra anche il loro basso contenuto di metalli, 1/100 di quello contenuto nel Sole che è circa il 2%. All'interno degli ammassi globulari non si possono trovare quindi pianeti di tipo terrestre. Per quanto piccolo, esiste sempre un contenuto di metalli e quindi ci sarà stata una precedente generazione di stelle. I metalli riducono la trasparenza delle stelle alla luce e quelli più pesanti come il Fe e Ti le rendono opache. L'età degli ammassi globulari è stata valutata inizialmente a 16-20 miliardi di anni dalla luminosità delle nane bianche e dalla loro distanza valutata con il periodo delle variabili RR Lyrae. L'età dell'universo dalla costante di Hubble veniva valutata però a 8 miliardi di anni e questo creava una evidente contraddizione. Solo recentemente si è scoperto un errore nella luminosità delle RR Lyrae che ha ridotto l'età degli ammassi a 10-12 miliardi di anni e nello stesso tempo le misure hanno abbassato il valore della costante di Hubble alzando l'età dell'universo verso i 15 miliardi di anni.

1.6 PERCHÉ STUDIARE L'UNIVERSO.

09.06.99 - 18:30 -CCCDs - Via Nomentana, 175.

Relatore Dott. I. Mazzitelli - Istituto Fisica Stellare - CNR.

Sono legittime alcune considerazioni sulle finalità ed il perché dello studio dell'universo; la prima domanda è perché studiare l'universo e si possono dare diverse risposte, quella più banale ed autosufficiente è "perché si

può fare e quindi si fa”, una risposta di carattere sociale è “perché contribuisce al progresso”, un’altra risposta più umana è che “contribuisce a conoscere noi stessi”, risponde cioè all’imperativo di “conosci te stesso”. In realtà il progresso della scienza fa parte della storia culturale dell’uomo che nei secoli ha portato a maturità discipline diverse; ad esempio nel 1500 si è avuto l’apice delle arti figurative, nel 1600-1700 quello della musica, nel 1800 della letteratura mentre dal 1900 in poi è la scienza ad aver avuto il predominio. Maturità significa che il linguaggio di una certa disciplina ha assunto universalità ed il suo contenuto informativo è divenuto chiaro e comune alla maggioranza. In questo senso si è raggiunto un accordo obiettivo sui risultati della scienza. Seguendo le tappe del progresso della scienza si può affermare che essa nasce nell’età preellenistica. Euclide inventa il metodo deduttivo: dagli assiomi, proposizioni evidenti per se stesse, si possono dimostrarne altre proposizioni vere; Archimede crea la statica su basi logico deduttive e dimostra la sfericità della Terra; Eratostene misura la circonferenza terrestre con una precisione dell’1 %. Questo slancio si perde con l’ellenismo, per i greci due ipotesi che portavano alla stessa conclusione erano equivalenti, non era importante sapere come era fatto il mondo in realtà ma dare solo una spiegazione ed un modello. La riscoperta della scienza greca avviene nel medioevo da parte di alcuni matematici italiani come Fibonacci (1170-1250), Tartaglia (1500-1557) e Cardano (1501-1576) che compiono anche dei progressi, nel 1400 compare Leonardo, genio disordinato, ma bisogna attendere il 1600 per avere il certificato di nascita della scienza moderna. Galileo Galilei definisce lo scopo della fisica: è sapere come è fatto il mondo e per questo è necessario il metodo sperimentale che può darci conferma delle nostre ipotesi. Da questo momento inizia il progresso inarrestabile; dopo Galileo, Cartesio imposta le basi della geometria analitica poi Newton crea le tre leggi della meccanica e con l’aiuto del calcolo differenziale risolve il moto dei corpi sulla terra e nello spazio. Laplace crea l’ideologia del meccanicismo: la meccanica è la scienza fondamentale e viene sistematizzata, il passato ed il futuro dell’universo sono scritti nelle equazioni del moto e nelle condizioni iniziali, basta conoscere ad un certo istante posizione e velocità di tutte le particelle dell’universo. Fenomeni e modello teorico sono perfettamente coerenti e la scienza descrive pienamente il mondo. Con Laplace si ha la separazione fra scienza e umanesimo, Kant è l’ultimo esempio di scienziato umanista e con Leopardi si inizia l’umanesimo moderno. Una prima dissonanza con il meccanicismo si ha con la termodinamica di Carnot: c’è una forma di energia, il calore, che si conserva come le altre ma si degrada come qualità e non può essere trasformata integralmente in energia meccanica. Boltzman riporta però anche il calore nel meccanicismo riducendo la temperatura a energia cinetica disordinata delle molecole ma introduce una trattazione statistica e si comincia a perdere l’intuibilità dei fenomeni. Anche l’elettromagnetismo è fuori dalla meccanica ma presto Faraday, sperimentatore perfetto, passa i risultati dei suoi esperimenti a Maxwell e questi scrive le quattro equazioni che descrivono tutti i fenomeni elettrici, magnetici e luminosi. Il linguaggio matematico descrive tutto l’elettromagnetismo ma si è persa completamente l’intuizione. Dalle equazioni compare la velocità della luce come costante fondamentale ma non è chiaro rispetto a quale riferimento viene misurata. Il relativismo delle velocità richiede che la luce si muova in un mezzo, l’etere, con caratteristiche contraddittorie, rigido più dell’acciaio ma che non offre nessuna resistenza al moto dei corpi. Nonostante questi problemi, nel 1890 lord Kelvin, massimo rappresentante della scienza britannica, può affermare in una conferenza che la scienza ha raggiunto tutti i suoi obiettivi e nel prossimo secolo non ci potranno più essere grandi scoperte, segnala solo due piccole nuvolette all’orizzonte: l’emissione del corpo nero che sembra dover emettere un’energia infinita e lo strano esperimento di Michelson per il quale sembra che la velocità della luce non risenta del moto della terra. Queste due nuvolette saranno nel nuovo secolo alla base della teoria quantistica, la prima, e della relatività, la seconda. Einstein e Bohr contribuiscono al crollo dell’intuizione ma fra i due c’è ancora una diversificazione. La relatività ristretta e generale sono un’evoluzione della scienza di Galileo e di Newton e rimangono ancora all’interno del realismo; la fisica descrive il mondo ma tramite la matematica e a scapito dell’intuizione, lo spazio tempo è qualche cosa fuori dalla nostra esperienza quotidiana. La meccanica quantistica di Bohr è invece completamente contraria all’intuizione, gli eventi quantistici funzionano in modo opposto alla nostra intuizione, anche il principio di causalità può venire meno. Per la meccanica quantistica il mondo non è congruente con il nostro modo di pensare ed è fuori dalla nostra intuizione, risponde a delle equazioni la cui interpretazione è fuori dal nostro modo di pensare. Mondo scientifico ed umanistico sono ormai separati ma nel modo di pensare corrente si parla di relativismo falsando la teoria di Einstein e di indeterminazione applicando questi concetti alla vita ed alla società. Meccanicismo e determinismo non fanno più parte del mondo fisico ma sono una nostra invenzione. Se poi la matematica è il linguaggio del mondo è anche vero che la matematica è un prodotto della nostra mente e sembra di essere arrivati ad un limite epistemologico cioè della nostra possibilità di conoscenza. Eddington faceva l’esempio del pescatore che dopo aver raccolto tutti i pesci del mare in un peschiera si accorge che i pesci più grandi mangiano i pesci più piccoli e sopravvivono ma i pesci più piccoli muoiono di fame, può immaginare che nel mare esistano pesci ancora più piccoli di cui si alimentano ma non può dimostrarlo perché la sua rete ha delle maglie con una dimensione finita. Quindi se noi non riusciamo a capire la natura può significare che ciò dipenda dai limiti della nostra mente. Anche il principio riduzionista porta a un circolo chiuso; se è vero che si può dedurre il complesso dal semplice, l’uomo partendo dalla logica trova la matematica, poi la fisica, la chimica, la biologia molecolare, la biologia, l’antropologia ed infine la psicologia cioè il cervello, ma la logica è un prodotto del cervello ed il cerchio si chiude. Nel 1930 il matematico Gödel dimostrò che in un sistema logico assiomatico si possono sempre trovare delle proposizioni vere che non possono essere dimostrate nell’ambito degli assiomi fissati, si possono dimostrare in un sistema più ampio di assiomi ma anche in questo si troveranno altre proposizioni indimostrabili. Finché si rimane dentro un sistema quindi non si potranno dimostrare tutte le

verità del sistema stesso; bisognerebbe uscire fuori dal sistema e poi rientrarvi. Noi non sappiamo ancora come è fatto il nostro cervello, i suoi meccanismi logici sono diversi da quelli di una macchina di Turing che si può dimostrare impiega tempi infiniti per trovare soluzioni accessibili alla nostra mente. Penrose avanza l'ipotesi che la mente possa sfruttare principi quantistici.

1.7 LA MISURA DELL'UNIVERSO.

07.06.2000 - 18:30 - CCCDS - Via Nomentana, 175.

Relatore Dott. I. Mazzitelli - Istituto Fisica Stellare - CNR.

Alla domanda di quanto è grande l'universo la scienza ha cominciato a dare una risposta dal 1916 quando la Relatività Generale di Einstein ha fornito per l'universo una descrizione matematica semplice ed elegante. Già prima si discuteva se l'universo fosse infinito e contro questa ipotesi andava il paradosso di Olbers secondo il quale in un universo infinito, con un infinito numero di stelle uniformemente distribuite, il cielo sarebbe stato luminoso e non buio; infatti mentre la luminosità apparente delle stelle decresce con il quadrato della distanza, il numero delle stelle contenuto in un qualsiasi angolo solido intorno ad ogni direzione cresce con il cubo della distanza. La spiegazione del cielo oscuro può essere allora:

- a) che l'universo sia finito nel tempo e oltre la sua età la luce non arriva;
- b) che l'universo sia finito nello spazio ed oltre una certa distanza non ci sono più stelle;
- c) che l'universo sia in espansione.

Oggi si concorda sulle ipotesi a) e c) ma non si sa se lo spazio sia finito. Con la teoria del big bang la nascita dell'universo viene posta a circa 14 miliardi di anni fa e questa in anni luce è la dimensione del nostro universo causale cioè la massima distanza da cui può arrivare un raggio di luce, oltre non abbiamo informazioni. Le distanze in gioco in questo universo sono difficili da concepire e si possono fare solo dei rapporti di scala. Rimanendo solo alle dimensioni del nostro sistema solare i rapporti sono già enormi; se si pone la distanza Terra-Luna (massima distanza percorsa dall'uomo nello spazio) pari ad 1/2 mm, la distanza dal sole dei pianeti interni fino a Marte, ancora nelle attuali possibilità dell'esplorazione diretta dell'uomo, è di circa 40 cm. Il sistema solare, che va ben oltre l'orbita di Plutone e comprende al di là anche lo spazio occupato dalla nube di Oort dove hanno origine le comete, ha il raggio di un anno luce (9,46 trilioni di km o 63000 AU) ed oltre questa distanza gli effetti della gravità del Sole sono trascurabili; con le unità di misura scelte in precedenza questa distanza è di circa 15 km, il raggio del raccordo anulare di Roma. Se ora dal sistema solare si passa alle dimensioni (raggio) della galassia i rapporti rimangono approssimativamente gli stessi: da un anno luce a 50000 anni luce circa. All'interno della nostra galassia si trovano circa 100 miliardi di stelle che sono estremamente distanziate fra di loro ed è trascurabile la probabilità di scontri diretti, ogni stella come il Sole ha un raggio di azione di un anno luce e la nostra stella più vicina è la Proxima Centauri a 4,3 anni luce. Molto più grandi sono le nubi oscure di materia sparse all'interno della nostra galassia, con dimensioni di centinaia di anni luce, che formano delle macchie oscure intercettando la luce delle stelle. Qui si formano le nuove stelle e ciascuna richiama a sé la materia vicina entro un raggio di un anno luce e se esiste un momento angolare la materia si schiaccia secondo un disco dove si formano i pianeti. Le stelle hanno dimensioni molto diverse, alcune sono dei mostri; la Eta Carinae occupa 10 anni luce ed in pratica nasce e muore allo stesso tempo date le sue dimensioni. Vi sono stelle grandi come l'orbita di Marte e stelle doppie in cui una compagna invisibile, stella di neutroni o buco nero, risucchia la materia di quella visibile. Quando una stella muore si ha in genere una fase esplosiva e la materia eiettata forma una nebulosa planetaria che si estende a 1 o 2 anni luce ed oltre; le supernove espandono la materia fino a 10-100 anni luce e possono comprimere le nubi di materia presenti ed innescare il processo di formazione di nuove stelle. Se il diametro di una galassia come la nostra è di 100000 anni luce, la distanza fra galassie è dell'ordine di 1 milione di anni luce, la galassie sono quindi relativamente vicine ed è facile che entrino in collisione ma anche in questo caso non si hanno collisioni fra le stelle, la galassie si mescolano, si deformano o si attraversano semplicemente e solo le nubi di materia subiscono effetti violenti di compressione che innescano la formazione di nuove stelle. Fra le galassie ve ne sono alcune che emettono enormi quantità di energia, sono le galassie attive; una di queste, la Centauro A, ha una parte centrale con il raggio di un anno luce ed un vortice delle dimensioni dell'orbita di Marte intorno ad un buco nero e domina la galassia con getti di materia fino a 100000 anni luce.

Oggi noi possiamo vedere fino a 12-13 miliardi di anni luce e, entro questa distanza, ci potranno essere 100 miliardi di galassie. L'universo osservabile si mostra in tutte le direzioni simile a se stesso, simmetrico ed omogeneo ed è attualmente in espansione. Quando Einstein propose con la Relatività Generale una descrizione matematica dell'universo si accorse che questo non era stazionario e poteva espandersi o contrarsi; per renderlo stazionario introdusse allora una costante cosmologica "Lambda", una forza repulsiva che contrastava la gravità. Nel 1926 l'astronomo Hubble pubblicò i risultati delle sue misure sulla velocità delle lontane galassie che mostravano come l'universo fosse in espansione e si affermò la teoria del big bang. Einstein considerò l'introduzione della costante cosmologica il suo più grande errore ma i problemi non erano tutti risolti. Ci si chiese se l'espansione sarebbe durata per sempre o l'universo sarebbe alla fine collassato in un big crunch e quale sarebbe stata la geometria dell'universo nel corso della sua evoluzione: aperta, chiusa o euclidea (piatta).

Per questo era importante conoscere la quantità di materia presente nell'universo e gli astronomi iniziarono l'inventario delle stelle e della materia oscura. Il valore trovato è stato da 10 a 100 volte più piccolo del valore critico, quello per cui l'espansione si sarebbe fermata in un tempo infinito; la quantità di materia dovrebbe essere però più grande di quella inventariata per dare ragione del moto delle galassie indotto dalla gravità e questo porta a ritenere che la materia sia pari al 30% del valore critico. Molte novità sono emerse nell'ultimo anno: la misura della velocità di espansione sulle più lontane galassie non solo non ha mostrato un rallentamento ma denota un'accelerazione, inoltre le ultime misure del Cosmic Microwave Background (CMB), eseguite da un pallone sopra il polo sud, indicano che le fluttuazioni non sono distorte come ci si aspetta in uno spazio curvo e quindi l'universo risulta piatto cioè euclideo. Questi risultati ridanno un ruolo alla costante cosmologica il cui valore dovrebbe essere 0,7, essendo la somma di Lambda e della gravità uguale all'unità in un universo piatto. Nei prossimi 5 anni si potranno avere misure ancora più accurate del CMB che ridurranno l'attuale fascia di indeterminazione e lo stesso si avrà nei prossimi 10 anni per le misure della velocità di espansione; così il valore di Lambda potrà essere noto con maggiore precisione chiarendo il modello di inflazione e la sua influenza sulla struttura dell'universo. Oggi si può dire che l'universo si espande in modo accelerato e con il passare del tempo si vedrà sempre meno materia perché la più lontana supererà la velocità della luce e uscirà dal nostro universo causale.

1.8 LA DIMENSIONE DEL TEMPO.

14.06.2000 - 18:30 - CCCDS - Via Nomentana, 175.

Relatore Dott. I. Mazzitelli - Istituto Fisica Stellare - CNR.

Siamo tutti abituati a considerare il tempo come una coordinata; un appuntamento o un evento viene definito dalle coordinate spaziali del luogo e dal tempo ma tutti sappiamo che il tempo è una coordinata speciale, si può stare fermi nello spazio ed andare in tutte le direzioni ma non ci si può fermare o andare indietro nel tempo. La unidirezionalità del tempo ha fatto sempre pensare; alla fine del 1700 la meccanica classica era ormai completamente sviluppata e tutte le sue leggi erano simmetriche rispetto al tempo, il meccanicismo spiegava tutto con le leggi di Newton perché conoscendo posizione e velocità di tutte le particelle materiali si poteva tracciare la storia passata e futura di tutto il mondo materiale. Non tutto però era riducibile alla forza gravitazionale, fra le forme di energia capaci di compiere lavoro, oltre a quella meccanica, c'era il calore utilizzato nelle macchine a vapore della seconda metà del 1700 ma questo sembrava qualcosa di diverso e veniva equiparato ad un fluido, il calorico, che muoveva la macchina come l'acqua muoveva le pale di un mulino. La comprensione del funzionamento della macchina a vapore si deve a Sadi-Nicolas Carnot, figlio del più noto Lazare-Nicolas Carnot matematico e politico francese e generale di Napoleone. Carnot figlio, che fu volontario con Napoleone e morì poi di colera nel 1832, affrontò il problema di ottimizzare il rendimento della macchina a vapore. Capì che il lavoro, che in meccanica è la forza per lo spostamento, in una macchina termica è il prodotto della pressione per la variazione di volume e studiò il ciclo di una macchina a vapore rappresentandolo in un diagramma pressione volume. Nella schematizzazione di una macchina a vapore c'è un cilindro con uno stantuffo il cui moto produce lavoro e due sorgenti, una calda ed una fredda ambedue a temperatura costante. Nel piano pressione-volume il funzionamento della macchina è ciclico, ha cioè un percorso chiuso e l'area racchiusa è il lavoro prodotto ad ogni ciclo. La prima fase è di espansione isoterma in cui il fluido del cilindro riceve calore dalla sorgente a temperatura elevata e fornisce lavoro, si stacca poi questa sorgente e si lascia espandere (fase adiabatica senza scambio di calore) il fluido che si raffredda fino a portarsi alla temperatura più bassa della seconda sorgente. La terza fase si ha mettendo in contatto il cilindro con la seconda sorgente a cui il fluido cede calore riducendo il suo volume a temperatura costante; nell'ultima fase il fluido si comprime riscaldandosi (in modo adiabatico) e si porta allo stato di temperatura, pressione e volume iniziale, ed il ciclo può ricominciare. Solo nella prima e terza fase si ha scambio di calore, la quantità ceduta a bassa temperatura è sempre più piccola di quella prelevata ad alta temperatura e la differenza è quella che si trasforma in lavoro. Non esiste un fluido calorico che si conserva perché parte del calore si è trasformato in lavoro, ma non tutto; quello che è stato ceduto a temperatura più bassa è calore degradato e può produrre ancora lavoro, ma solo in parte, se si trova un'altra sorgente a più bassa temperatura. Il lavoro invece si può trasformare completamente in calore e si scopre quindi un'asimmetria del mondo fisico insita nella irreversibilità delle trasformazioni termodinamiche. La fisica è la scienza dell'energia e questa si conserva in un sistema isolato ma progressivamente si degrada come calore sempre a più bassa temperatura, questa degradazione viene misurata da una grandezza: l'Entropia che non può mai decrescere (secondo principio della termodinamica). La diversità fra le leggi della dinamica di Newton e quelle della termodinamica vennero spiegate da Boltzmann con la teoria cinetica dei gas dimostrando (1894) su base meccanica come sistemi composti da un grandissimo numero di parti tendono ad assumere configurazioni più probabili e si evolvono con un verso preferenziale per ragioni probabilistiche. Il calore non si propaga dai corpi più freddi a quelli più caldi perché a livello cinetico è estremamente improbabile. L'Entropia fu definita da Boltzmann come $S = K \log W$, dove K è la costante che ha preso il suo nome e W è il numero di configurazioni possibili del sistema. Questa formula è scritta sulla sua tomba (morì suicida nel 1906).

L'irreversibilità fa nascere la freccia del tempo sulla base di una visione caotica del mondo, ma fenomeni irreversibili si trovano anche in fisica delle particelle, nel fenomeno di violazione CP che porta all'asimmetria fra materia ed antimateria (uno a un miliardo). Anche in meccanica quantistica lo stato quantistico di una particella caratterizzato dalla sovrapposizione di più stati con probabilità simmetrica può solo collassare in uno stato macroscopico quando si effettua una misura e questo è un processo asimmetrico irreversibile.

Con la teoria della relatività il tempo è diventato relativo. Il problema è nato dalla misura della velocità della luce che Maxwell aveva trovato dalle sue equazioni come assoluta e riferita ad un mezzo (l'etere) non ben identificato ma di caratteristiche contraddittorie. Se la luce era un'oscillazione dell'etere, data la sua elevata velocità, il mezzo doveva avere una rigidità milioni di volte quella dell'acciaio ma allo stesso tempo non influenzava il moto dei corpi celesti. Un altro problema era che se la velocità della luce veniva riferita all'etere in modo assoluto si doveva poter trovare la velocità assoluta della Terra, per il principio di composizione delle velocità, misurando la velocità della luce in diverse direzioni dello spazio. Questa misura, eseguita da Michelson e Morley, con grande precisione dimostrò invece che la velocità della luce era sempre la stessa. Nel 1905 con la Relatività ristretta Einstein accettò come principio l'invarianza della velocità della luce ed introdusse la relatività del tempo accanto a quella galileiana dello spazio. Nella composizione delle velocità applicò le trasformazioni di Lorentz alla legge galileiana della velocità relativa: $u' = u - v$. Nella Relatività ristretta si ha allora che: $u' = (u - v)/(1 - (uv/c^2))$ e l'invarianza della velocità della luce rispetto ad ogni riferimento viene rispettata. Il tempo trascorre in modo diverso per chi sta fermo sulla Terra rispetto a chi compie un viaggio di andata e ritorno a velocità vicine a quelle della luce, quest'ultimo al ritorno troverà che il suo tempo è trascorso più lentamente e si scoprirà più giovane del suo gemello; ha fatto così un viaggio nel futuro degli altri. Questo fenomeno di contrazione del tempo viene verificato nei mesoni μ prodotti dai raggi cosmici nell'alta atmosfera; queste particelle hanno una vita di un microsecondo e non avrebbero il tempo di attraversare l'atmosfera ma, poiché si muovono ad una velocità prossima a quella della luce, la loro vita si allunga rispetto al tempo terrestre.

Se il viaggio nel futuro è possibile, in principio non lo è quello nel passato perché mette in discussione il principio di casualità: tornando nel passato si possono modificare le condizioni del presente da cui si è partiti creando delle situazioni assurde (un uomo torna nel passato e uccide il futuro padre e non potrebbe più nascere). Ma secondo la Relatività generale esistono delle situazioni nello spaziotempo in cui il tempo può procedere all'inverso. Una di queste è all'interno di un buco nero dove, una volta passato l'orizzonte di Schwarzschild di non ritorno, si viene risucchiati verso il centro dallo spaziotempo secondo un percorso a spaziotempo costante ma, se ci si muove lateralmente descrivendo una spirale, ci si muove nel tempo. Lo spaziotempo è ancora diverso se il buco nero è rotante con sufficiente velocità, il centro del buco non sarà più un punto, dove tutto si annulla, ma un anello, inoltre si crea una seconda superficie, detta di Kerr, dentro la quale è ancora possibile muoversi in tutte le direzioni nello spazio e nel tempo passando in mezzo all'anello. All'aumentare della rotazione del buco nero, se questo ad esempio ingloba altra materia rotante, la superficie di Kerr cresce e può raggiungere quella di Schwarzschild annullandola e rendendo la singolarità "nuda" cioè visibile. A questo punto l'uscita dalla singolarità sarebbe possibile ma forse si finirebbe su un altro universo per evitare di entrare in conflitto con il principio di causalità.

1.9 I MODELLI DELL'UNIVERSO (1° Parte).

23.05.2001 - 18:30 - CCCDS - Via Nomentana, 175.

Relatore Dott. I. Mazzitelli - Istituto Fisica Stellare - CNR.

Ancora 40 anni fa sull'origine dell'universo si potevano formulare domande irrisolvibili, solo negli ultimi anni nuove osservazioni hanno dato una serie di risposte a domande di poco diverse e una svolta decisiva si è avuta praticamente meno di 6 mesi fa. Oggi si può dire che si hanno prove sperimentali di un 3% di tutto quello che esiste, un 30% è comprensibile ed il resto è incomprensibile, c'è ragione di pensare che entro 20 anni si potranno avere altre risposte.

Una conoscenza sperimentale dell'universo è iniziata nel 1700 quando Herschel, dopo essersi costruito uno specchio da 70 cm, cominciò a classificare le stelle e si rese conto dell'esistenza della Galassia. Sempre nel 1700 Kant, scienziato oltre che filosofo, calcolò per la prima volta il moto delle stelle nella Galassia secondo le leggi di Newton e suppose che alcune nubi fossero galassie esterne alla nostra, di questo si ebbe la certezza solo nel 1800 ma la risoluzione in stelle della M31 (la galassia di Andromeda) fu possibile solo agli inizi del 1900.

La prima domanda concreta sull'universo se la pose Olbers nel 1820 con il suo famoso paradosso. Se l'universo è infinito (e con esso le stelle) perché è buio? Infatti il volume, e quindi il numero di stelle, aumenta come il cubo del raggio mentre la luminosità delle stelle diminuisce con il quadrato del raggio, raddoppiando il raggio le stelle aumentano di 8 volte e la loro luminosità diminuisce di solo 4 volte e quindi non c'è limite all'aumento di luminosità del cielo. Anche l'ipotesi di presenza di nubi di materia oscura non cambia la conclusione perché queste con il tempo si scalderebbero ed alla fine comincerebbero ad emettere. Il paradosso rimase senza risposta fino al 1931.

All'inizio del 1900 l'universo era considerato infinito e statico ma nel 1916 Einstein con la Relatività Generale scoprì che l'universo poteva espandersi o contrarsi per effetto della gravità e, per rendere statico l'universo, aggiunse un termine cosmologico che introduceva una forza repulsiva. Nel 1931 Hubble, studiando l'effetto doppler delle stelle dimostrò che l'universo è in espansione; infatti classificando le galassie, supposte aventi la stessa luminosità intrinseca, come poste a distanze crescenti secondo la loro luminosità apparente decrescente, si accorse che le più lontane si allontanavano di più in proporzione alla distanza. Questo spiegava il paradosso di Olbers perché l'energia della luce si indebolisce fino ad annullarsi per effetto doppler aumentando la velocità di allontanamento con la distanza. La conseguenza maggiore della scoperta di Hubble fu la nascita di un modello esplosivo per l'universo perché guardando lontano in distanza si guarda anche nel passato ed in un certo istante tutto l'universo doveva essere concentrato in un punto. Questo modello fu però contestato per molto tempo e nel 1950 Hoyle propose il modello alternativo di un universo in espansione, secondo la teoria della relatività, ma omogeneo anche nel tempo in cui si creava continuamente della materia in modo distribuito, basta un atomo di idrogeno per metro cubo ogni milione di anni, e nuove galassie si potevano formare compensando la rarefazione dovuta all'espansione e sostituendo quelle che si spegnevano. Ma questo modello era sostanzialmente diverso da quello esplosivo perché in esso dovevano esservi mescolate in modo omogeneo galassie vecchie e giovani mentre si constatò che le galassie giovani erano le più lontane. Il modello esplosivo, o del big bang prevalse definitivamente quando venne scoperta la radiazione di fondo. La teoria del big bang infatti prevedeva che 300000 anni dopo l'istante iniziale la temperatura dell'universo era scesa fino 5000 °K ed a questa temperatura l'universo diventava trasparente e la luce poteva propagarsi, a temperature più alte la materia formava un plasma e la luce veniva emessa e riassorbita; questo punto di svolta viene detto "ricombinazione". Questo significa che se si guarda molto lontano, e quindi indietro nel tempo fino all'istante di 300000 anni dopo l'inizio dell'universo, si dovrebbe vedere una parete di fuoco a 5000 °K, non si possono vedere oggetti più distanti perché oltre l'universo era opaco alla luce. In realtà non si vede una parete a 5000°K perché l'effetto doppler di allontanamento dovuto all'esplosione dello spaziotempo degrada la radiazione emessa a quella di una parete a 2,73 °K. Nel 1964-65 due ricercatori della Bell Telephone, Penzias e Wilson, misurando il rumore di fondo di un'antenna per telecomunicazioni scoprirono che questo non scendeva mai al di sotto di 2,73 °K in qualunque direzione del cielo venisse puntata l'antenna e la teoria del big bang ebbe la sua prima conferma sperimentale. Altre osservazioni hanno permesso di verificare ciò che è successo in tempi più lontani ed a temperature maggiori, così è stata verificata la quantità di elementi leggeri formati nei primi tre minuti, infine le nostre esperienze con i grandi acceleratori permettono di arrivare fino a temperature (o energie) corrispondenti 10E-16 sec dopo il big bang ed altre osservazioni ci portano fino a 10E-35 sec ma queste temperature non sono raggiungibili sperimentalmente, ci sarebbe bisogno di un acceleratore grande come la nostra stessa galassia e la fonte di esperienze rimane lo stesso nostro universo. I primi attimi di vita dell'universo sono importanti perché è il momento in cui si è formato l'universo con le leggi fisiche quali noi le conosciamo.

Tutte le misure fanno pensare ad un'età dell'universo compresa fra 13 e 15 miliardi di anni e ciò che possiamo vedere arriva fino a questa distanza, questo è il limite del nostro Universo Causale, quello al quale abbiamo accesso con le nostre osservazioni; tutto ciò che nell'esplosione dello spazio tempo si è formato a distanza da noi maggiore dell'età dell'universo non è da noi ancora visibile. Quando guardiamo oggetti lontani dobbiamo necessariamente localizzarli nel passato ma dobbiamo apportare anche altre "riduzioni": la loro temperatura (o colore) è più bassa per l'effetto doppler di allontanamento, inoltre nel lontano passato l'universo aveva dimensioni più piccole e quindi gli oggetti che vediamo anche in direzioni opposte erano più vicini fra di loro, un'ultima "riduzione" è quella della curvatura. Al di là del nostro Universo Causale l'universo potrebbe continuare anche all'infinito ma potrebbe anche essere diverso; si pensa che per una sfera milioni di volte quella del nostro Universo Causale esso sia omogeneo, al di là si potrebbero incontrare buchi neri milioni di volte più grandi del nostro Universo Causale e più oltre discontinuità dello spaziotempo ed altri universi con leggi fisiche diverse da quelle dell'universo che conosciamo.

1.10 I MODELLI DELL'UNIVERSO (2° Parte).

06.06.2001 - 18:30 - CCCDS - Via Nomentana, 175.

Relatore Dott. I. Mazzitelli - Istituto Fisica Stellare - CNR.

La Teoria Generale della Relatività (TGR) di Einstein nel 1916 descrive la curvatura delle 4 dimensioni dello spaziotempo. Una rappresentazione intuitiva si può avere riducendo lo spazio a due sole dimensioni e rappresentandolo come una pedana elastica che venga osservata dall'alto. Una biglia che rotoli sulla superficie percorre traiettorie rettilinee ma se poniamo sulla superficie elastica una biglia pesante questa creerà un avvallamento ed a questo punto le traiettorie di una qualsiasi altra biglia non saranno più rettilinee in vicinanza della biglia pesante perché lo spazio si è localmente incurvato, l'osservatore che guarda dall'alto però non si accorge della geometria curva dello spazio ed interpreta la deviazione dal moto rettilineo come prodotto da una forza diretta verso il centro della biglia pesante.

Se ora si applica la TGR all'universo nel suo complesso la sua curvatura dipende dalla densità di materia presente "ro" (lettera greca) e si possono fare diverse ipotesi. Si può definire un valore di ro critico (roc) per il

quale l'espansione rallenterebbe fino a fermarsi in un tempo infinito, la gravità infatti contrasta l'espansione che in questo caso è come la velocità di fuga di un corpo che sfugge alla gravità terrestre e si porta a distanza infinita con velocità zero. Si possono verificare tre casi per la densità vera della materia:

a) $\rho_0 > \rho_{crit}$ b) $\rho_0 = \rho_{crit}$ c) $\rho_0 < \rho_{crit}$

nel caso a) la gravità domina sull'espansione e questa si fermerà in un tempo finito dopo il quale l'universo inizierà a contrarsi e finirà in un big crunch; nel caso b) la gravità equilibra l'espansione e si può dire che il big crunch avverrà in un tempo infinito; nel caso c) l'espansione domina sulla gravità ed il big crunch non avverrà mai. Al caso a) corrisponde una geometria chiusa o sferica ed in principio un raggio di luce percorre una linea chiusa tornando al punto di partenza ma, poiché nel frattempo l'universo si espande la sua traiettoria sarà una spirale. Al caso b) corrisponde una geometria piana o euclidea in tutte le quattro dimensioni. Al caso c) corrisponde un universo aperto con geometria iperbolica a sella di cavallo in cui due raggi di luce che partono paralleli tendono a divergere sempre più. Le tre geometrie hanno caratteristiche misurabili diverse: nella geometria sferica la somma degli angoli interi di un triangolo è sempre maggiore di 180° , nella geometria euclidea è uguale a 180° ed in quella iperbolica è minore di 180° . Normalizzando la densità vera con quella critica si definisce il parametro $\Omega = \rho_0/\rho_{crit}$ ed in questo caso i tre casi a), b), c) corrispondono a:

a) $\Omega > 1$ b) $\Omega = 1$ c) $\Omega < 1$

Il ritmo dell'espansione viene definito dalla costante di Hubble, H_0 , che si misura in km/s per MegaParsec dove un Parsec è pari ad una distanza di 3,26 anni luce. Oggi il valore di H_0 è noto con una precisione vicina al 5% ma a questo risultato si è giunti solo negli ultimi anni: $H_0 = 63 \pm 3$, questo valore significa che oggetti a distanza da noi di un Parsec si allontanano con una velocità di 63 km/s, quelli a due Parsec a velocità di 126 km/s e così via. Oggi si conosce anche il ρ_{crit} con una precisione del 5% ma più difficile è conoscere il valore effettivo di ρ_0 . Si possono usare due metodi; uno è l'inventario, si valutano tutti i corpi celesti presenti in un Parsec cubo di spazio in zone diverse dell'universo e si calcola in modo statistico la densità di materia; il secondo metodo è quello della pesa sfruttando la forza di gravità, si osserva il moto relativo di un ammasso di galassie intorno al loro baricentro e dalla velocità con cui si muovono si deduce la loro massa. Stranamente questo metodo da un risultato 10 volte maggiore di quello dell'inventario. Oggi con i nuovi grandi telescopi da 10 m l'inventario da solo il 3% del valore critico di ρ_{crit} e considerando anche il contributo della materia oscura che esercita pure la forza di gravità si arriva a $\Omega = 0,3$. Manca il 70% per arrivare al livello critico. Viene in aiuto la teoria della supersimmetria secondo la quale ad ogni particella corrisponde una "sparticella", la sua supersimmetrica, molto più pesante ma ad interazione debolissima e quindi molto difficile da rilevare; non c'è ancora certezza della loro esistenza anche se sono considerate molto probabili e qualche gruppo di ricercatori ne abbia annunciato una prima rivelazione. Se Ω è minore di 1 l'universo dovrebbe essere aperto ed iperbolico, ma la geometria dell'universo potrebbe essere misurata direttamente se si avessero a disposizione oggetti a grande distanza e di dimensioni cosmiche note, infatti in un universo curvo come nel caso a), per la curvatura convergente dei raggi di luce, l'oggetto sarebbe visto sotto un angolo maggiore di quello atteso in un universo piano ed euclideo, al contrario con un universo aperto ed iperbolico come il caso c), per la divergenza dei raggi di luce, lo si vedrebbe sotto un angolo più piccolo. Oggetti di dimensioni note si intravedono sulla parete di fuoco, lo sfondo a microonde osservabile che non è uniforme ma presenta delle chiazze con variazioni di intensità, fluttuazioni da cui si sono formate le prime galassie. Queste chiazze sono state misurate dal pallone BOOMERANG dall'Antartide alla fine del 1999 ed i dati sono stati elaborati nel 2000. Poiché l'universo a quel tempo aveva un'età di soli 300000 anni le dimensioni delle chiazze non possono essere maggiori di 0,3 miliardi di anni luce ed in un universo euclideo sarebbero visti sotto un angolo di circa 1 grado. Ci si aspettava di vederli sotto un angolo minore compatibile con un universo iperbolico ed invece l'angolo è proprio circa 1 grado e quindi l'universo ha una geometria euclidea. Manca qualche cosa alla TRG, forse bisogna ipotizzare la presenza di una quinta forza che a grande distanza compensa la gravità. Una conferma viene dalla misura della velocità di allontanamento delle galassie più lontane; si tratta di ripetere le misure di Hubble estendendole al passato più lontano per vedere come sia cambiato il ritmo di espansione dell'universo ma in questo caso è necessario misurare insieme velocità e distanza delle galassie lontane. La velocità viene misurata sempre con l'effetto doppler, la distanza viene misurata osservando le supernove di tipo Ia; queste sono nane bianche che acquisendo altra massa da una compagna vicina arrivano al limite di stabilità ed esplodono, la loro luminosità assoluta è sempre la stessa per tutte e raggiunge lo splendore dell'intera galassia, sono quindi ben visibili e funzionano come candele campioni; basta misurare la loro luminosità apparente per determinare la distanza della galassia dopo aver calibrato la loro luminosità assoluta con le supernove più vicine. Questa operazione di calibrazione ha richiesto molto tempo ed è stata molto laboriosa passando attraverso diversi passi; prima misurando la distanza assoluta delle Iadi e delle loro cefidi con le parallassi rilevate dal satellite Hipparcos e calibrando così le cefidi, da queste poi si sono calibrate le supernove vicine. Oggi si sono raccolte un numero sufficiente di supernove di tipo Ia per tracciare un diagramma di Hubble esteso alle distanze più lontane, riportando cioè in ascisse la velocità di allontanamento ed in ordinate in modo decrescente la luminosità apparente corrispondente ad una distanza crescente. Un rallentamento dell'espansione nel tempo dovuto alla gravità comporta un aumento dell'arrossamento doppler alle grandi distanze e quindi una curva che si scosta verso destra rispetto alla retta di H_0 costante, invece la curva si sposta verso sinistra e ciò dimostra che la velocità di espansione era minore nel lontano passato e l'universo è andato accelerando. Si ha così un'altra conferma che esiste una forza repulsiva che tende a correggere la curvatura dello spaziotempo rendendolo piatto cioè euclideo. Si pensa che questa forza dipenda dall'energia del vuoto, un'energia enorme, costante in

tutti punti che produce un attrito cosmico e questo permette alle particelle di avere massa attraverso il bosone di Higgs prodotto dall'oscillazione quantistica del vuoto. All'energia del vuoto è associata una forza repulsiva che è il 70% dell'energia totale dell'universo. Nei primi istanti dell'universo l'energia del vuoto era molto più grande ed ha provocato il fenomeno dell'inflazione nel quale lo spaziotempo si è espanso fra $10E-35$ a $10E-33$ secondi dalle dimensioni di un atomo a un anno luce; come si vede le nostre ipotesi sullo sviluppo dell'universo arrivano fino a $10E-35$ secondi dall'inizio mentre la nostra fisica copre solo il 3% di tutto ciò che esiste e nulla si sa con certezza del rimanente 97%. Il fatto che il nostro universo stia accelerando comporta infine che il nostro Universo Causale si va rarefacendo e man mano tutte le galassie usciranno dai confini del visibile e rimarranno solo quelle dell'ammasso locale.

1.11 TUTTI GLI UNIVERSI POSSIBILI (1° Parte).

22.05.2002 - 18:30 - CCCDS - Via Nomentana, 175.

Relatore Dott. I. Mazzitelli - Istituto di Astrofisica - CNR di Frascati.

L'uomo è stato sempre affascinato dal cielo e, nel corso della sua evoluzione culturale, molta parte ha avuto l'osservazione del cielo. Oggi la rivoluzione tecnologica ha allontanato l'uomo comune dall'osservazione del cielo e dal contatto immediato con la realtà dell'universo. L'astrofisica è questo legame fra mondo fisico ed universo ed i suoi legami con la fisica sono strettissimi. Poco più di un anno fa si è avuta una prova che l'espansione dell'universo è in fase di accelerazione e si è ipotizzata l'esistenza di una forza repulsiva dello spazio, ciò che porta a 5 le attuali forze fondamentali della natura, ma alle origini tutte le forze si unificano in una sola diversa. Lo sforzo dei fisici è stato sempre quello di unificare le leggi e le forze che regolano la natura; nel 1690 Newton unificò la forza di gravità che fa cadere gli oggetti sulla Terra e la forza che regola il moto dei corpi celesti, nel 1873-74 Maxwell unificò elettricità, magnetismo e luce tutte come manifestazioni del campo elettromagnetico. Oggi le 5 forze fondamentali in ordine crescente di intensità, sono:

- 1) la forza repulsiva dello spazio cosmico che è la più debole, detta anche quintessenza;
- 2) la gravitazione universale che è la forza attrattiva della materia;
- 3) la forza nucleare debole che è confinata all'interno del protone, si manifesta raramente ma ad essa sono dovute le reazioni nucleari che trasformano protoni in neutroni e viceversa ed in ultima analisi l'attività delle stelle;
- 5) la forza nucleare forte all'interno dei nuclei.

La materia che conosciamo è costituita da sole 4 particelle elementari, che oggi nella teoria delle stringhe sono viste come modi di vibrazioni dello spaziotempo, esse sono dotate di cariche interpretate come curvature dello spaziotempo. Le particelle sono dotate di massa, o carica gravitazionale, e di altre cariche, ma non possono avere solo massa perché sarebbero instabili e si trasformerebbero immediatamente in energia. La particella più piccola, la cui massa non è stata ancora misurata con precisione, è il neutrino che contiene anche carica debole; la seconda particella è l'elettrone dotata di massa, carica elettromagnetica unitaria negativa e carica debole; le altre due particelle sono due quark detti up e down che possiedono massa, carica elettrica, carica debole e carica di colore. Le cariche di colore sono di tre tipi: red, green, blue (R, G, B) e si neutralizzano combinandosi insieme (come i tre colori fondamentali che insieme producono il bianco). La carica elettrica dei quark è $+2/3$ per il quark up e $-1/3$ per quello down e per questo protoni e neutroni sono costituiti da tre quark ciascuno: due up e uno down per il protone e uno up e due down per il neutrone. Ci sono altre due famiglie di queste quattro particelle che portano il numero totale a 12 ma le altre 8 sono instabili e decadono rapidamente. In aggiunta esiste l'antimateria le cui particelle sono speculari a quelle della materia, hanno la stessa massa ma cariche di segno opposto; quando materia e antimateria entrano in collisione si annullano tutte le cariche e, rimanendo solo la massa, questa si trasforma tutta in energia. Nell'universo oltre alla materia normale esiste la materia oscura che si suppone sia il 70% del totale e per essa la teoria della supersimmetria viene in aiuto ipotizzando, per ogni particella normale, una superparticella dotata di grande massa e di carica debole, per questo la materia oscura è difficilmente rivelabile.

L'unificazione delle 5 forze è stato l'obiettivo principale dei fisici. Per prima cosa la forza di repulsione si può considerare un'anticurvatura dello spazio e quindi un altro aspetto della gravitazione, così le forze ritornano a 4. Nel 1965-72 Weinberg, Salam e t'Hooft mostrarono che forza elettromagnetica e forza debole sono due aspetti di un'unica forza e si unificano nella forza elettrodebole ad una temperatura di un miliardo di miliardi di gradi, temperatura raggiungibile con i nostri acceleratori e se ne è avuta la prova sperimentale. Infine la Teoria della Grande Unificazione (TGU) prevede l'unificazione della forza forte con quella elettrodebole a temperature non raggiungibili praticamente (l'acceleratore necessario sarebbe grande quanto la Terra stessa); non lo si potrà dimostrare sperimentalmente ma la teoria è molto attendibile. Le forze rimaste sono così solo due: la gravitazione e la forza della Grande Unificazione, la prima è fondata sulla relatività generale, la seconda sulla meccanica quantistica; ambedue le teorie sono state dimostrate esatte fino almeno a 12 cifre significative ma sono fra di loro incompatibili e si deve ammettere che ambedue o almeno una delle due sia incompleta. La relatività generale ad esempio non può spiegare ciò che succede al centro di un buco nero. Per ora una teoria

che unifichi le due forze non è disponibile, c'è solo una prospettiva con la nuova teoria delle superstringhe per la quale però non esistono ancora i mezzi matematici per svilupparla e non si possono fare previsioni.

Passiamo ora al capitolo del big bang, la teoria ormai accettata sull'origine dell'universo. Ci sono molti modi per definire il big bang:

- 1) ciò che è successo al tempo zero;
- 2) l'istante in cui la fisica può iniziare a indagare;
- 3) ciò che è successo nei primi tre minuti;
- 4) ciò che è successo nei primi 300000 anni.

Possiamo scegliere la seconda definizione e cominciare con modelli della realtà fisica che sono però solo analogie che aiutano l'intuizione. Non sappiamo che cosa ci sia stato prima del big bang perché l'esplosione ha cancellato tutto e lo spaziotempo è stato proiettato a velocità infinita in tutte le direzioni; lo spazio è quindi infinito fin dal primo istante e vi esiste solo la forza unificata. La separazione fra forza gravitazionale e forza della Grande Unificazione avviene $10E-44$ secondi dopo il big bang e questo è il primo orizzonte di conoscibilità dove dominano le fluttuazioni quantistiche e si dovrebbe applicare la Teoria della Grande Unificazione (TGU). Qui nasce il primo problema perché le fluttuazioni quantistiche porterebbero ad un universo formato solo da buchi neri e spazi vuoti. Intorno al 1960 si è applicata una ipotesi della TGU per la quale lo spazio ha dentro la sua struttura un campo di energia previsto da Higgs che si libera fra $10E-35$ e $10E-33$ secondi provocando quella che è stata chiamata inflazione che fa espandere ulteriormente l'universo tra $10E50$ e $10E80$ volte. Ciò che è rimasto dell'energia del campo di Higgs nello spazio potrebbe essere la causa della forza di repulsione cosmica scoperta recentemente. Prima dell'inflazione l'universo aveva zone di alta, media e bassa densità prodotte dalle fluttuazioni quantistiche ma si potevano osservare in una sfera di universo causale che è quella dove arriva l'informazione la quale si può muovere alla velocità della luce. L'universo causale all'istante di $10E-35$ secondi è una sfera di raggio $3 \cdot 10E-25$ cm. L'inflazione fa trasbordare le fluttuazioni al di fuori del raggio dell'universo causale e, quando finisce all'istante $10E-33$ secondi, all'interno di questa sfera causale rimane una distribuzione praticamente omogenea. Questo istante è un altro orizzonte di conoscibilità e tutti i modelli del big bang partono da esso. A $10E-33$ secondi non c'erano ancora le particelle elementari, quark, elettroni e neutrini, perché solo a $10E-9$ secondi si separano le 4 forze e possono cominciare a formarsi le particelle di materia ed antimateria. A questo punto bisogna spiegare come mai l'antimateria sia sparita e sia rimasta solo la materia; ciò si deve ad una leggera asimmetria nelle leggi della natura verificata sperimentalmente e pari a circa 1,6 su un milione; ciò significa che nel processo di annichilamento fra materia ed antimateria si salvano 1,6 atomi di materia su ogni milione. Questa strana asimmetria nel comportamento della materia forse si mette in relazione e si contrappone all'asimmetria nella direzione di scorrimento del tempo. A 1/100 di secondo compaiono i due quark, gli elettroni ed i neutrini, a 1 secondo i quark si uniscono a formare neutroni e protoni, a 1 minuto, con una temperatura di qualche miliardo di gradi, iniziano le reazioni nucleari e si formano gli elementi leggeri cominciando dal deuterio e dall'elio 3 e 4. A 3 minuti si congela la composizione chimica dell'universo primordiale con il 75% di idrogeno il 25% di elio circa e piccole quantità di litio e berillio. Dopo 300000 anni si ha la ricombinazione fra nuclei ed elettroni, la materia diviene trasparente e si può cominciare ad osservare l'universo e la sua composizione. Dalla composizione delle stelle più antiche possiamo verificare le percentuali di componenti formati a 3 minuti, molto prima quindi della ricombinazione. Con la parete di fuoco di 300000 anni, che vediamo nel fondo a microonde del cielo, inizia la storia dell'evoluzione del nostro universo causale.

1.12 TUTTI GLI UNIVERSI POSSIBILI (2° Parte).

05.06.2002 - 18:30 - CCCDS - Via Nomentana, 175.

Relatore Dott. I. Mazzitelli - Istituto di Astrofisica - CNR di Frascati.

Agli inizi del 1900 Eddington combinando le grandezze fisiche fondamentali per ottenere dei numeri puri, indipendenti quindi dalle unità di misura, trovò ad esempio che il rapporto fra forza di attrazione elettrica e di attrazione gravitazionale fra protone ed elettrone è un numero pari a $10E39$ e lo stesso numero si ottiene calcolando il rapporto fra il tempo impiegato dalla luce per attraversare il nostro universo causale ed il tempo per attraversare un atomo. Calcolando poi il massimo numero di particelle elementari presenti nel nostro universo causale trovò una cifra di circa $10E78$ che è la radice quadrata di $10E39$. Poiché le dimensioni del nostro universo causale cambiano nel tempo, si può pensare allora ad una relazione fra la sua massa totale e le forze fondamentali elettrica e di gravitazione? Si trattava di curiosità che non avevano valore scientifico ma negli anni fra il 1920 ed il 1930 Dirac, uno dei fondatori della meccanica quantistica, si chiese se le costanti fisiche non variassero nel tempo. Non si arrivò ad una conclusione, nulla provava questa ipotesi, ma dalla discussione emerse un nuovo concetto: il Principio Antropico (PA). Si scoprì che con valori diversi delle costanti fondamentali l'universo sarebbe stato molto diverso dall'attuale. Così se la costante di gravitazione G fosse stata poco più alta la luminosità del Sole sarebbe stata molto più alta con una dipendenza da G^8 ed i pianeti sarebbero stati bruciati, se invece G fosse stata più bassa la Terra si sarebbe trasformata in una palla di ghiaccio e tale sarebbe rimasta. Anche un valore diverso per le altre grandezze fisiche portava a rivoluzionare l'evoluzione dell'universo. Se la forza nucleare fosse stata del 30% più bassa la repulsione elettrica avrebbe

impedito la formazione del deuterio nelle stelle e quindi la fusione nucleare, se invece la forza nucleare fosse stata del 13% più alta ogni collisione fra protoni avrebbe formato nuclei stabili e non si sarebbe formato l'idrogeno da bruciare nelle stelle. Molto più critica sarebbe stata la possibilità del sorgere della vita fondata sulla chimica del carbonio. Il carbonio si forma nelle stelle quando si fondono tre atomi di elio ma successivamente aggiungendo un altro atomo di elio si ha la trasformazione in ossigeno. Il carbonio esiste entro il +/- 1% dei valori attuali delle forze nucleari e solo con i valori attuali delle costanti di natura le stelle possono durare miliardi di anni per dare tempo alla vita di evolversi. Sembra che una specie di lotteria cosmica fra tutti i possibili valori delle costanti di natura abbia scelto quelli che sono compatibili con l'esistenza degli esseri viventi ed in particolare degli esseri autocoscienti. Da questa constatazione nasce il Principio Antropico secondo cui le proprietà dell'universo sono determinate dall'esistenza degli esseri umani. Questo concetto è in accordo con la meccanica quantistica e con l'interpretazione ortodossa di Copenaghen data da Bohr secondo cui un oggetto diviene reale nell'istante in cui viene eseguita la sua misura da parte di un essere autocosciente; l'universo diviene quindi reale con tutte le sue leggi appena un essere prende coscienza di sé e nessun altro universo che non dia vita ad esseri autocoscienti può essere reale. Si discute ancora su questa interpretazione così rigorosa della meccanica quantistica ma ad ogni modo il Principio Antropico ha una sua intrinseca validità, rimane il fatto che se l'universo fosse stato diverso nessuno si sarebbe posto il problema.

Tornando ai dati sperimentali, l'osservazione della parete di fuoco all'atto della ricombinazione, circa 300000 anni dopo in big bang, mostra uno stato dell'universo conforme alle conseguenze dell'inflazione che, producendo un'espansione colossale fra 10E-35 e 10E-33 secondi, ha reso omogeneo il nostro universo causale. Ma secondo la meccanica quantistica l'inflazione è avvenuta nello spaziotempo in punti diversi e quindi si sono gonfiati domini diversi secondo una struttura cellulare schiacciando della materia al confine fra i domini. Per avere un'idea il nostro dominio è 10E30 volte più grande del nostro universo causale e vi sono zone più vuote e zone più dense che possono essere piene di buchi neri ed al confine con gli altri domini si trova una parete impenetrabile con materia dove le forze sono ancora unificate. In ogni dominio, contemporaneamente all'inflazione si sono separate la forza forte e quella elettrodebole ma in questo processo ogni dominio ha congelato valori diversi per le costanti universali. Si è formato così un Universo Multiplo o Multiverso con cui si può spiegare il Principio Antropico perché solo nei domini (infiniti ma minoritari) dove le costanti cosmiche sono adatte alla vita si può assistere al sorgere di una vita intelligente, ma tutti i possibili universi sono reali e rispondono alla Teoria della Grande Unificazione (TGU) che ancora non è completa ma che potrà in futuro fornirci altre previsioni non sperimentabili, ipotetiche ma credibili.

2.93 UNIVERSO E DINTORNI.

27.05.2003 - 19:00 -CCCDS - Via Nomentana, 175.

Relatore Dott. I. Mazzitelli (Ist. Naz. Astrofisica, Tor Vergata, Roma).

La visione dell'universo causale e di ciò che lo circonda si è arricchita dalle esperienze degli ultimi anni ed oggi abbiamo raggiunto una maggiore precisione su certe grandezze numeriche ed un'elevata affidabilità su certe affermazioni che si possono considerare definitive. Ad esempio la data di nascita dell'universo dal big bang viene valutata a 13,7 miliardi di anni fa con un'incertezza di +/- 0,1-0,2 miliardi di anni, il big bang viene definito come l'istante di un'espansione forse infinita dello spaziotempo quando spazio e tempo hanno cominciato ad esistere; non conosciamo i dettagli del big bang, se si tratta di una singolarità o di una quasi singolarità, non si sa cosa sia successo prima di 10E-44 secondi da questa supposta singolarità e potrebbe essere che i big bang si ripetano ma ad intervalli molto lunghi o infiniti. Lo spaziotempo può aver subito al big bang una dilatazione infinita o molto grande ma la luce che arriva a noi può aver percorso al massimo 13,7 miliardi di anni luce e queste sono le dimensioni attuali del nostro universo causale così chiamato perché al suo interno si possono essere verificati eventi capaci di produrre conseguenze in altri punti dello stesso universo. Ciò che possiamo vedere al limite dell'universo casuale è la fase di esplosione dello spaziotempo che ha trascinato con sé i frammenti di materia che conteneva, non è esplosione di materia nello spazio ma esplosione dello spazio con la materia perché prima tutto lo spazio era concentrato in un punto. Ancora oggi l'universo continua ad espandersi e la sua velocità di espansione si misura dall'effetto doppler negli spettri delle lontane galassie (red shift). Hubble ha scoperto che il red shift cresce con la distanza e questa pendenza è di 23+/-1 km/s per milione di anni luce (costante di Hubble, H0), ad esempio una galassia a 10 milioni di anni luce si allontana alla velocità di 230 km/s. In realtà per sapere se la velocità di espansione sia stata la stessa anche in passato bisogna misurare la distanza delle galassie con un metodo assoluto che è quello delle candele campione se si individuano delle sorgenti luminose la cui luminosità assoluta sia nota per motivi fisici in modo che dalla misura della luminosità apparente si possa ricavare la distanza. Queste sorgenti sono le supernove del tipo Ia visibili a distanze cosmologiche perché quando esplodono brillano come una galassia intera. Il meccanismo delle supernove Ia è noto, si tratta di nane bianche in sistemi binari che risucchiano materia (idrogeno) dalla compagna vicina e, quando la loro massa raggiunge 1,44 la massa del nostro Sole, danno luogo ad un'esplosione di supernova e l'energia luminosa emessa è sempre la stessa; la stella si trasforma poi in una stella di neutroni di 10 km di diametro. Con i telescopi attuali si sono osservate supernove Ia fino a 7-8 miliardi di anni luce ed il risultato è che le velocità di espansione delle galassie più lontane non si dispone su una retta ma si sposta verso il basso e

quindi, ad esempio, 5 miliardi di anni fa l'espansione era più lenta, ne consegue che l'universo va accelerando e questo è un primo risultato inatteso. L'evoluzione dell'universo inoltre è legata alla densità di materia che dovrebbe condizionare anche la geometria dello spazio. Esiste un valore critico della densità di materia per cui l'espansione dovrebbe arrestarsi a tempo infinito perché la gravità verrebbe ad equilibrare l'energia di espansione, ciò succede quando $\Omega = \text{densità effettiva} / \text{densità critica} = 1$. Per $\Omega > 1$ l'universo finirebbe per collassare in un big crunch e per $\Omega < 1$ si espanderebbe all'infinito. La misura della densità di materia si è fatta con metodi diversi. Il primo è quello dell'inventario misurando in modo statistico in varie regioni dello spazio la quantità di materia visibile ma il risultato da solo $\Omega = 0,3$, il 3% del valore critico; il secondo metodo è quello di "pesare" la materia presente dal moto delle galassie che è condizionato dalla gravità e quindi dalla massa presente, il risultato è di $\Omega = 0,27$, circa 10 volte di più ma sempre insufficiente; un'altra verifica della massa presente è stata fatta misurando gli effetti di lente gravitazionale provocate da ampie zone dello spazio, e questo ha dato $\Omega = 0,25-0,30$ in buon accordo con il precedente valore. Sembra confermato quindi che manca il 70% di materia per arrivare al livello critico. Si cerca dell'altra materia oscura per raggiungere il valore critico (particelle supersimmetriche?), ma se effettivamente la densità di materia fosse bassa e $\Omega < 1$ la geometria dello spazio sarebbe iperbolica, una specie di sella in cui le geodetiche sono curve iperboliche e la somma degli angoli interni di un triangolo è minore di 180° . E qui è venuta un'altra sorpresa osservando la parete di fuoco, l'attuale Cosmic Microwave Background (CMB) cioè l'istante circa 380000 anni dopo il big bang quando con il raffreddamento dell'universo si verificò la combinazione degli elettroni ed i nuclei e lo spazio cominciò ad essere trasparente alla luce. Su questo sfondo le chiazze irregolari che corrispondono ad irregolarità quantistiche della temperatura (misurati 70 milionesimi di grado) e quindi della densità di materia, i semi da cui si sono originate le attuali galassie, hanno delle dimensioni angolari dell'ordine di un grado, proprio il valore atteso nel caso di una geometria euclidea dello spazio. Le chiazze devono avere infatti una dimensione assoluta che non può superare lo spazio percorso alla velocità della luce in 380000 anni e l'angolo sotto cui sono viste dopo 13,7 miliardi di anni luce dipende dalla geometria dell'universo. La misura dell'angolo è stata fatta successivamente dalle sonde COBE, Boomerang e WMAP con precisioni crescenti:

COBE	0,7 - 1,2 gradi
Boomerang	0,9 - 1,1 gradi
MAP	0,99- 1,01 gradi

il prossimo satellite PLANK ancora più preciso non potrà che confermare queste misure. Geometria euclidea ed espansione accelerata portano a concludere che l'universo è sottoposto ad una forza repulsiva, costante cosmologica o quintessenza, che si oppone alla gravità e che oggi prevale su di essa.

Altri riferimenti:

Italo Mazzitelli: Tutti gli Universi Possibili, Liguori Editore, 2002.