

cMc
CENTRO CULTURALE DI MILANO

“Osservazioni cosmologiche: i fatti”
Gli indizi che gettano luce sull’origine

interviene

Marco Bersanelli

Docente di astrofisica all’università degli studi di Milano

Milano
14/11/1996

©cMc
CENTRO CULTURALE DI MILANO
Via Zebedia, 2 20123 Milano
tel. 0286455162-68 fax 0286455169
www.cmc.milano.it

Giovedì 14 Novembre 1996

***“Osservazioni cosmologiche: i fatti”.
Gli indizi che gettano luce sull’origine.***

A cura di M. Bersanelli

Questa conversazione si propone di esporre alcuni fatti messi in evidenza dalla ricerca scientifica in relazione al problema cosmologico. Dunque tratteremo il problema di una conoscenza dell’universo nella sua globalità, nella sua evoluzione, nella sua struttura. Visto che di fatti vogliamo parlare, innanzi tutto vorrei partire dal fatto più evidente. Osserviamo la prima immagine. Quando guardiamo il cielo stellato in una notte limpida (avvenimento raro a Milano) possiamo vedere qualche migliaio di stelle. Questa è una fotografia di una regione di cielo che è più o meno la stessa regione ritratta nella prossima diapositiva pur se con l'utilizzo di uno strumento moderno. Quando esaminiamo con attenzione il cosmo notiamo come le stelle colmino lo spazio profondo con una densità, con una numerosità impressionante. Fin dall’antichità la domanda alla base della curiosità dell’uomo, che ha guardato a questo firmamento, è sempre stata: fino a dove? Qual’è l’estensione? Qual’è la continuità di ciò che noi osserviamo? Queste stelle innumerevoli, di cui il sole fa parte, riempiono l’universo in modo omogeneo? Diciamo che nell’ultimo secolo la risposta evidente è no. Noi sappiamo che le stelle sono raggruppate in punti, in regioni, in sistemi ben localizzati come lo mostra la prossima immagine che è uno schema che mostra la nostra galassia o una qualunque galassia. Le stelle che noi osserviamo a occhio nudo o con il telescopio sono raggruppate in un sistema che ha una estensione enorme: parlando di centomila anni luce vuol dire che la luce, viaggiando a 300000 km al secondo, impiega mille secoli per attraversare questo sistema di stelle, di gas e di polvere, che costituiscono una galassia come quella in cui noi viviamo. Il nostro sole è una delle centinaia di miliardi di stelle che formano la nostra galassia e si trova, vedete, in una regione periferica della nostra galassia. Quindi le stelle a un certo punto finiscono. Fuori dalla nostra galassia abbiamo un grande spazio vuoto, salvo questo alone formato da ammassi globulari e ammassi di stelle molto vecchie che si dispongono in una simmetria sferica intorno alle galassie. La prossima immagine fa vedere che la nostra non è l’unica galassia; andando più in profondità, a milioni di anni luce da noi, vediamo che la nostra galassia è circondata da miliardi di altre galassie simili alla nostra o di morfologia diversa, ma sostanzialmente di una quantità innumerevole di galassie. Questa immagine mostra un’altra galassia, analoga alla precedente, ma vista di fronte. La prossima diapositiva ci mostra che queste galassie, non distribuite in modo omogeneo nello spazio ma su scale inferiori ai 100 milioni di anni luce, tendono a raggrupparsi. Questo è infatti un grande gruppo di galassie che ha un’estensione di qualcosa come 100 milioni di anni luce. Però, quello che le osservazioni mettono in evidenza, e questo è un fatto fondamentale, è che su scale molto più grandi dei 100 milioni di anni luce, su scale cosmologiche, la materia, gli ammassi e le galassie si distribuiscono in modo pressoché uniforme. Per mostrarvi come questo capiti, vedete in questa immagine il risultato di una survey fatta a frequenze radio a poche giga-hertz, per la verità, nelle microonde: ogni puntino qui mostra una sorgente extragalattica lontana. Vedete come su scale superiori, molto più grandi di 100 milioni di anni luce, l’universo è una realtà estremamente semplice, distribuita in modo pressoché omogeneo. Questo è un fatto molto

importante. La diapositiva che improvvisamente ci riporta nel cortile di casa è l'immagine della nostra terra che sta tramontando sul lembo della luna. Per la verità in questa immagine si vedono principalmente tre cose: la luna in primo piano, la terra che sta tramontando e poi si vede un'altra cosa molto importante, visibile anche in tutte le altre immagini viste fino adesso, il fondo nero. Il fatto che noi osserviamo sullo sfondo di qualunque oggetto celeste questo fondo nero pone una questione molto rilevante dal punto di vista cosmologico. In verità è difficile spiegare perché il fondo dell'universo sia nero, (se abbiamo un'immagine semplicistica dell'universo e ora cerco di approfondire). Se noi assumiamo, ma i primi due punti in realtà non sono delle assunzioni perché vi ho appena fatto vedere che effettivamente c'è questa omogeneità, ma comunque supponiamo che il numero di galassie per unità di volume nello spazio è indipendente dalla distanza, vale a dire che le galassie sono distribuite in modo omogeneo su grandi scale e questo è un fatto osservato così come si osserva che la luminosità media delle galassie non dipende dalle distanze. Le galassie sono simili le une alle altre. La terza assunzione è che l'universo fisico è statico; essenzialmente non ci sono movimenti significativi sulla grande scala delle galassie. Questa immagine la potremmo avere immediatamente dell'universo. E' qualcosa che c'è, che sempre ci sarà e che sempre c'è stata. Bene con queste tre assunzioni si può dimostrare che il flusso totale che riceviamo dalle galassie lontane dell'universo diverge, cioè è un numero grandissimo. Ci aspetteremmo una temperatura di qualche migliaio di gradi, vale a dire ci aspetteremmo che tutto il cielo sia brillante come la superficie del sole, come la superficie fotosferica, come la superficie delle stelle che fanno le galassie a qualunque distanza da noi. Detto in modo intuitivo se è vero che queste galassie riempiono fino all'infinito (questa curvatura è una immaginazione dell'infinito, immaginate che questi punti che vanno all'infinito), in qualunque direzione, tra me e il fondo del cielo, io scelgo di guardare, andrò ad intercettare una sorgente luminosa ad altissima temperatura. Vale a dire: per me il fondo del cielo sarebbe qualcosa di molto simile a un guscio solido che riempie tutto quanto il cielo alla temperatura di brillantezza della singola sorgente. Questa osservazione, che contrasta in modo paradossale col fatto che il cielo è nero, è stata messa in evidenza dall'Olbers. Matematicamente il fatto si esprime dicendo che questo integrale diverge, cioè assume valori molto grandi. E' difficile togliersi di dosso questo problema, che è il terzo oggetto di quest'immagine. Le cose però sono cambiate radicalmente quando Hubble nel 1929 ha scoperto un'altra evidenza. Hubble è un grandissimo astronomo, che con grande cura, pazienza e capacità ha misurato per anni le distanze delle galassie, ma non solo: ha trovato il modo, poi cercherò di entrare minimamente nei dettagli, di misurare anche la velocità delle galassie lontane e si è accorto di un fatto di rilevanza formidabile per tutta la cosmologia anzi forse si può dire che la cosmologia moderna nasca proprio da questa evidenza. Questo dunque è il fatto che ha rilevato mettendo in relazione la distanza di ogni galassia che lui osservava con la sua velocità; notava una relazione all'incirca lineare tra la velocità e la distanza, i punti cioè si dispongono circa su una retta. Ciò significa che l'aumento della distanza di una galassia rispetto a noi coincide con l'aumento della sua velocità di allontanamento, cioè più una galassia è lontana e più si allontana da noi con velocità sempre più grande. La costante di proporzionalità che esprime tale relazione tra velocità e distanza è nota come costante di Hubble. Io vorrei cercare di darvi un qualche sentore del fatto, perché penso che la domanda che qualcuno di voi avrà sia: come si fa a misurare questa distanza? E' stato mostrato un grafico, ma qual'è l'evidenza sperimentale che Hubble ha trovato davanti ai suoi occhi? Passo alla prossima immagine. Immaginiamo che la galassia è in qualche modo simile ad un sasso che venga lanciato in uno stagno: la sorgente emette delle

onde, sferiche in questo caso, cioè intorno a sé emette a una certa lunghezza d'onda; per la galassia queste onde sono elettromagnetiche, nel caso del sasso saranno le onde dell'acqua . Cosa succede se questa sorgente, anziché essere ferma rispetto a noi che osserviamo e misuriamo tali onde, è in movimento? Ciò è illustrato in questa seconda parte. Se la sorgente ha una velocità, in una certa direzione, vuol dire che un osservatore che si trovasse nella direzione del moto osserverebbe queste onde accorciate, una più addossata all'altra. La lunghezza d'onda, che non è altro che la distanza fra due fronti d'onda, diminuisce e l'osservatore ne misura una inferiore a quella che è stata emessa come effetto di questa velocità. Analogamente, dall'altra parte, se la sorgente si allontana la lunghezza d'onda cresce, quindi l'osservatore misura una lunghezza d'onda più grande. Se questa persona conosce la lunghezza d'onda emessa dalla sorgente e misura quella che arriva a lui, da tale variazione della sua lunghezza è in grado di risalire alla velocità con cui questa sorgente si allontana. Andiamo alla prossima immagine. Nel caso di una galassia o di una stella questo gioco è possibile, cioè noi possiamo scomporre la luce che ci arriva da una galassia in tutte le sue lunghezze d'onda che, come sapete, sono associate ai colori che vediamo ma che continuano anche là dove diventano invisibili al nostro occhio: nell'infrarosso, negli ultravioletti e così via. Scomponiamo le lunghezze d'onda: la fisica ci insegna che la comparsa di certe righe di assorbimento è dovuta alla presenza di gas più freddi che circondano le sorgenti, e che tali righe stanno a delle lunghezze d'onda ben precise. Quindi uno che ha studiato la fisica, può prevedere quale lunghezza d'onda è quella emessa. Quando, dunque, la sorgente si avvicina all'osservatore egli rivela che queste righe e questi segni stanno leggermente a sinistra, (verso il violetto) più di quanto avrebbe osservato se la sorgente fosse stata ferma. Quando invece la sorgente si allontana, l'osservatore se ne accorge dal fatto che quelle righe si spostano più a destra; dalla misura quantitativa che può essere veramente precisa, da questa discrepanza tra la lunghezza d'onda di riferimento e quella delle righe osservate; è quindi possibile misurare con grande accuratezza qual è la velocità di allontanamento dell'oggetto che sto osservando.

La prossima immagine ci fa vedere come è in realtà: abbiamo lo spettro di uno degli oggetti più distanti che esistano, quindi con gli spostamenti di queste righe più forti, un *quasar 3 c 273*. Vedete bene la differenza tra i numeri blu in *Armstrong* delle lunghezze d'onda osservate rispetto a quelle previste. Questa differenza, che può essere controllata in vari punti, ci dà con grande precisione la velocità di allontanamento; quindi Hubble per primo con dei mezzi notevolmente inferiori a tutti quelli che possiamo avere oggi si è reso conto che sistematicamente c'era una velocità sempre maggiore via via che le galassie che osservava si allontanavano. Quindi la prossima immagine ci illustra la situazione: se, via via che io osservo nel profondo del cielo, mi accorgo che la velocità di allontanamento cresce, allora mi trovo in una situazione in cui lo spazio e le galassie che occupano questo spazio si espandono, l'universo cioè si espande in tutte le direzioni. Questa è la grande scoperta di Hubble e oggi tale legge è verificata su distanze ben più grandi di quelle che lui ha potuto investigare; in questo *plot*, che tra l'altro non è uno dei più recenti, si vede fino a che punto si riesce ad andare. Oggi Hubble è riuscito ad estrapolare la sua legge di linearità con galassie che si trovavano a distanze molto inferiori a quelle da cui possiamo partire oggi e vedete con quanta evidenza questa linearità è confermata, fino ai limiti di quello che oggi possiamo osservare. Quindi, consideriamo questo: le righe delle galassie lontane sono spostate verso il rosso; girando la questione, il fatto che le galassie si allontanino porta ad un aumento della lunghezza d'onda, della radiazione della luce che noi osserviamo. Questa è una conseguenza importante, perché significa che l'energia che è associata alla radiazione è

inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda; di conseguenza, se aumenta la lunghezza d'onda l'energia diminuisce. Quindi più è forte questo incremento della lunghezza d'onda nello spazio profondo a causa dell'espansione, minore sarà l'energia che io osservo provenire da quella direzione, quindi, tenendo conto di questo effetto si spiega pienamente che il cielo è nero.

Il paradosso di Olbers trova allora una spiegazione naturale. Lasciando cadere la terza ipotesi su cui il paradosso si fondava, e cioè che l'universo è statico, e introducendo l'espansione e le conseguenze dell'espansione, si verifica un "*retched*", cioè una perdita di energia del fotone osservato rispetto a quello emesso, il cui integrale dà un certo risultato che vuol dire un flusso bassissimo, non uguale a zero, ma bassissimo. Vuol dire buio.

L'universo si espande, e insieme a questa apparentemente abbiamo fatta un'altra grande scoperta: sembrerebbe che siamo al centro dell'universo; noi infatti osserviamo questa espansione in modo isotropo in tutte le direzioni, e le galassie non vanno più veloci se guardo dall'emisfero nord piuttosto che dall'emisfero sud. In tutte le direzioni quello che osservo è questa linearità con la distanza verificata allo stesso modo. Dunque siamo al centro dell'universo? Bene, la risposta è negativa. Infatti l'analogia che uno può fare per rendersi conto di questo è quella con un palloncino con tanti puntini disegnati sopra che venga gonfiato. Se io scelgo uno qualunque di questi puntini, ciò che l'osservatore che sta nel puntino nero osserva è un allontanamento di tutti gli altri puntini che lo circondano, in perfetto accordo con la legge di Hubble, cioè, più lontano è il puntino più la velocità è grande. Qualunque altro puntino osserva la stessa legge di espansione; l'universo si espande, e il fatto che noi osserviamo un'isotropia di questa espansione non implica che siamo al centro dell'universo: la centralità dell'uomo nel cosmo non è geografica, il che non significa che non ha una centralità o che non può avere una centralità.

Che cosa intendiamo fare allora con questo universo, adesso che abbiamo visto che si espande, quali altri fatti possiamo andare a cercare per approfondire la nostra ipotesi? Se l'universo si espande ha una storia, il che significa che nel passato le galassie che oggi sono ad una certa distanza dovevano trovarsi a distanze inferiori, tutto quanto doveva essere più concentrato. Posso misurare con una certa precisione qual è il ritmo di questa espansione? Ebbene, conosciuta questa espansione e conosciuta la legge di Hubble, posso estrapolare indietro nel tempo, e domandarmi se questa espansione è rimasta costante nel passato, quando due galassie qualsiasi nell'universo dovevano essere a distanza zero, cioè quando tutto l'universo era rinchiuso in un volume piccolissimo; si potrebbe dare una stima dell'età dell'universo, se l'espansione che noi oggi misuriamo, se la velocità con cui due galassie si allontanano l'una dall'altra fosse stata costante anche nel passato, allora l'età dell'universo, cioè il punto in cui questa distanza fra le due galassie va a zero, corrisponderebbe all'inverso della costante di Hubble. Se provo a calcolare ottengo un tempo che va dai dieci ai venti miliardi di anni: questa è l'età dell'universo. Si può fare una approssimazione molto più precisa di quella che abbiamo fatto tramite la teoria della relatività generale che ci dà il contesto geometrico entro il quale inserire un modello cosmologico molto più raffinato di quello che stiamo discutendo oggi, basato esclusivamente su fatti osservativi. In base alla teoria della relatività generale ci si rende conto che in realtà la costante di Hubble non è una vera e propria costante ma un parametro che dipende dal tempo: in altri termini, l'espansione delle prime fasi della storia dell'universo deve esser stata molto più rapida di quelle di oggi: questo significa che la misura così calcolata dell'universo è una sovrastima: in realtà, il tempo che è trascorso dalla generazione della singolarità sarebbe più breve. Ma

quello che ci interessa è l'ordine di grandezza dell'universo, dai 10 ai 20 miliardi di anni, quello che poi succederà nel futuro non lo affrontiamo.

Adesso vorrei cercare di rinforzare con delle evidenze le ipotesi a cui è giunto. Se le cose stanno così, che cosa possiamo sperare di osservare? Innanzitutto il primo dato è che via via che ci avviciniamo a tempi sempre più vicini alla singolarità la temperatura dell'universo tende a valori più elevati, perché la stessa quantità di energia che oggi è diluita in un grandissimo spazio, che si misura in miliardi di anni luce, nelle prime fasi doveva essere la stessa quantità chiusa in volumi sempre più piccoli. Questo fatto porta i fisici a domandarsi quali siano i dati osservativi che si possono ricavare da ciò che si conosce della fisica delle altissime temperature. Vorrei perciò accennare a due fatti che sostengono questa immagine della storia dell'universo e che si riferiscono ad eventi accaduti nei primi secondi della vita dell'universo di cui abbiamo oggi testimonianza. Il primo è la formazione cosmologica dei nuclei atomici e il secondo è la radiazione elettromagnetica fossile che noi osserviamo oggi provenire direttamente da queste prime fasi della storia dell'universo (questo secondo fatto è formidabile per la possibilità di ulteriori passi avanti nella conoscenza delle prime centinaia di migliaia di anni di vita dell'universo).

I nuclei degli atomi che compongono la materia sono fatti principalmente da particelle elementari, protoni e neutroni. Per produrre un nucleo un po' più complesso di quello dell'idrogeno che è composto da un semplice elettrone, per un nucleo di deuterio, per esempio, fatto da un protone e da un neutrone, occorrono temperature grandissime così come per produrre i nuclei più pesanti, l'elio, il carbonio, e così via. Questa produzione di nuclei più pesanti a partire dai protoni avviene all'interno delle stelle e nelle prime fasi dell'espansione cosmica le temperature dovevano essere proprio analoghe a quelle che noi osserviamo nei nuclei stellari (da un miliardo ai dieci miliardi di gradi): a queste temperature la fisica nucleare ci spiega come i nuclei atomici possano essere messi assieme. Si è allora in grado di prevedere che nei primi 100 secondi della storia dell'universo, nuclei più pesanti si siano formati, a partire dai protoni del plasma originario, secondo certe quantità che la teoria ci permette di conoscere, via via che il tempo passa a partire dall'origine dell'universo. Le osservazioni che oggi possiamo fare confermano le previsioni: siamo di fronte all'evidenza di una corrispondenza tra l'ipotesi che si stava delineando sui primi momenti della storia dell'universo e quello che oggi possiamo osservare come conseguenza di quello che è accaduto nei primi secondi.

Il secondo fatto è la scoperta della radiazione fossile. Uno dei protagonisti della storia di quei tempi, Wilkinson, ha detto che forse tutte le scoperte scientifiche hanno in esse qualche elemento di una buona storia di mistero, sicuramente è il caso di questa. E' la storia di una scoperta molto controversa avvenuta per caso dopo che, una ventina d'anni prima, era stata prevista teoricamente da Gamow in base all'ipotesi evolutiva dell'universo: l'esistenza di una radiazione che, in qualche modo, doveva riempire l'universo a una temperatura molto bassa, temperatura che lui aveva previsto tra i 5 e i 7 gradi Kelvin. Penzias e il suo collaboratore Wilson si sono accorti per caso di un eccesso di rumore, di energia, che il loro strumento registrava; questo eccesso di energia è stato spiegato a posteriori come dovuto a una radiazione elettromagnetica che proviene proprio dalle primissime fasi della vita dell'universo. Questi due scienziati hanno osservato, nel '65, un eccesso di energia in un punto preciso dello spettro elettromagnetico che corrisponde a una radiazione con la temperatura di circa 3 gradi Kelvin, molto vicina alle previsioni di quei 5-7 gradi di George Gamow di ben venti anni prima; Penzias e Wilson erano all'oscuro di questa previsione.

Il primo esperimento dedicato alla misura di questa radiazione ci dà una vera e propria testimonianza diretta dell'universo primordiale, perché è una radiazione che è cominciata circa 15 miliardi di anni fa; da quando è emersa questa evidenza la cosmologia ha puntato moltissimo sullo studio di questa radiazione, che è tutt'oggi il settore in cui si coltiva la più grande speranza di poter rispondere alle moltissime domande che sono ancora aperte a riguardo.

Abbiamo la possibilità di osservare in tempo reale quello che è successo molti miliardi di anni fa.

Negli ultimi tempi abbiamo fatto delle misurazioni di questa radiazione di fondo in Antartide, che è un luogo privilegiato per queste misurazioni per vari motivi, di cui il principale è il tipo di atmosfera. Queste misure sono rilevate con degli strumenti che noi progettiamo.

Se veramente l'origine di questa radiazione è cosmologica, i fisici si aspettano di vedere che la sua energia sia distribuita alle varie lunghezze d'onda secondo la curva di un corpo nero che caratterizza un equilibrio termodinamico che doveva sussistere in quelle fasi primordiali della nostra storia. Il primo esperimento all'inizio degli anni '80 è riuscito a dimostrare che effettivamente la curva prevista dall'ipotesi evolutiva della hot big-bang è seguita dai dati osservativi.

L'intensità con cui si riceve la radiazione di fondo dal cielo è con grande precisione la stessa in tutte le direzioni: questo è un fatto che uno si aspetta di vedere se effettivamente la radiazione è cosmologica. Supponiamo, infatti, che anziché essere così uniforme noi notassimo, per esempio, una intensità superiore sul piano del nostro sistema solare; molto probabilmente l'origine di questa radiazione sarebbe non cosmica ma locale, deriverebbe dal nostro sistema solare; questo non accade e l'isotropia della radiazione è confermata molto accuratamente.

Già nelle prime fasi dell'espansione l'universo doveva contenere piccole disomogeneità dalle quali sono poi nate le galassie e gli ammassi di galassie nei miliardi di anni successivi. L'universo che oggi noi osserviamo solo su scale superiori ai cento milioni di anni luce è omogeneo, ma su scale più piccole è molto disomogeneo; attorno a noi vediamo pianeti, stelle, galassie ma anche grandi vuoti tra una galassia e l'altra. L'origine di queste strutture doveva essere contenuta già nelle prime fasi della storia dell'universo sotto forma di piccole variazioni dell'intensità di questa radiazione, intensità che posso osservare; questa scoperta, fatta dal satellite Cobi, è una delle più grandi scoperte di questo secolo.

E' in previsione una nuova missione spaziale, molto più accurata grazie allo sviluppo della tecnologia, che ci consentirà di riosservare tutto quanto il cielo con maggiore dettaglio; questo potrà dare una serie di risposte alle grandi domande che ancora sono aperte e che ogni scoperta continuamente rievoca, il grande passo avanti di Cobi ha aperto domande ancora più entusiasmanti riguardo la storia del nostro universo.

Per concludere, sottolineo il fatto che noi, come ricercatori, abbiamo bisogno di ricercare i fatti che verifichino le ipotesi che via via vengono fatte. Abbiamo cercato in questa sede di mettere in luce alcuni dei fatti su cui la cosmologia (che ha la pretesa di gettare luce, da un punto di vista scientifico, sulla realtà fisica nel suo complesso) punta la sua attenzione e abbiamo visto che ci sono delle evidenze di cui ciascuna interpretazione deve tener conto; abbiamo parlato dell'oscurità del cielo, della distribuzione omogenea della materia che oggi possiamo osservare con strumenti sempre più potenti, dell'evidenza dell'espansione da Hubble in poi, della misura dell'abbondanza degli elementi che ci portano ai primi minuti della storia dell'universo e che ci danno una verifica sperimentale di quello che deve essere

successo a quell'epoca, dell'esistenza della radiazione fossile cosmologica e delle sue caratteristiche; tutto questo ci porta vicini all'evidenza che l'universo in cui noi viviamo è un universo in movimento: per descrivere la realtà cosmica la cosmologia è costretta a cercare di conoscere le tappe della storia che sono basate sull'evidenza di fatti osservati.

Vorrei concludere con una frase di *Alexis Carrel* che è metodologicamente molto precisa: "Poca osservazione e molto ragionamento conducono all'errore, molta osservazione e poco ragionamento portano alla verità".

Evidentemente questa non è una sottovalutazione del ragionamento e tantomeno della ragione, ma sottolinea precisamente il modo in cui la ragione funziona, cioè andando ad appoggiarsi all'evidenza dei fatti che la natura, in questo caso la natura misurabile, ci concede di poter conoscere.

Domanda: Ma allora le galassie vanno a una velocità sempre maggiore nel futuro cosmico o la loro velocità diminuisce?

Risposta: Se la teoria della relatività è una buona approssimazione della verità, fin dall'inizio indipendentemente da quello che è il modello teorico che s'addice alla realtà, il tipo di curvatura ha una derivata seconda negativa; questo vuol dire che man mano che vado avanti nel tempo la velocità diminuisce. Quindi la velocità di espansione è stata massima all'origine e si sono verificate certe condizioni a cui non sappiamo ancora dare una risposta, ma che sono ben poste, a cui quindi possiamo sperare di dare risposta, può essere che la velocità di questa espansione diminuisca fino al punto di arrestarsi, per poi cominciare a prendere il segno opposto, quello che noi oggi osserviamo come espansione potrebbe diventare una contrazione nel lontano futuro. In ogni caso la velocità di espansione è sempre più rallentata e la ragione intuitiva è che associata alla massa di ogni galassia c'è un campo gravitazionale, allora noi possiamo immaginare questa espansione come in qualche modo frenata dal campo gravitazionale di ogni galassia su ciascuna altra galassia.

Domanda: (...)

Risposta: Via via che l'universo si dilata, finché siamo in una fase di espansione la temperatura dell'universo diminuisce sempre di più. Oggi la temperatura della radiazione dell'universo è di circa 3 gradi Kelvin, però vorrei far notare che se la densità di materia ed energia media nell'universo è superiore a un certo valore, questo raffreddamento arriva a un punto massimo, dopodiché inizia una contrazione a cui sarà associato un nuovo aumento della temperatura in modo simmetrico a quello che succede alle dimensioni in scala dell'universo.

Domanda: Nel diagramma di Hubble come si fa ad andare a scovare qual è la velocità di allontanamento di queste galassie ?

Risposta: Questo è un problema classico, per misurare una distanza cosmologica bisogna cercare di trovare un metodo per misurare le stelle che sono più vicine a noi con sufficiente accuratezza, si usano metodi trigonometrici sfruttando lo spostamento della Terra intorno al sole nella sua orbita e quindi spostamenti angolari che si fanno vedere nelle stelle più vicine, dopodiché questo ci permette di calibrare determinati tipi spettrali delle stelle in base alla loro luminosità, quindi attraverso la conoscenza della luminosità assoluta e la misura della luminosità apparente si può risalire alla distanza. Questo ci permette di calibrare altri metodi che si riferiscono per esempio a stelle variabili molto particolari in cui la variabilità della stella è in stretta relazione con la sua luminosità assoluta, per cui misurando questa variazione posso risalire alla sua luminosità assoluta e quindi, misurando il flusso, alla distanza in cui si trova. Si può calibrare la distanza delle galassie, cioè ci si rende conto che la stella più brillante in ogni galassia è più o meno della stessa luminosità, non esistono stelle infinitamente brillanti, ci sono dei limiti fisici, se le stelle più brillanti di ogni galassia si equivalgono questo ci permette di andare a calibrare fino a distanza veramente cosmologiche e infine si può usare anche la galassia più brillante in un ammasso di galassie e qui andiamo ai "*red shift*" che sono al limite dell'osservabile. Naturalmente ogni gradino risente degli errori possibili di tutti i gradini precedenti e gli errori crescono via via che si va in là, è questa la ragione principale per cui pur essendo ben verificata la relazione lineare tra

distanza e velocità nel diagramma di Hubble, il valore esatto della costante di Hubble è una delle più grandi controversie che agitano la cosmologia proprio perché ci sono degli errori sistematici molto importanti che soprattutto a riguardo del calcolo delle distanze entrano in gioco quando si vogliono fare le cose quantitativamente.

Domanda:(...)

Risposta: La cosmologia più recente e lo studio delle particelle più elementari vanno a braccetto perché l'energia a cui la cosmologia si riferisce nelle prime fasi di espansione dell'universo, l'energia delle particelle in quegli stati primordiali è uguale o superiore a quello che la fisica delle particelle studia quando fa scontrare nei grandi acceleratori di particelle, materia e antimateria in un volume piccolissimo dello spazio. Quello che la fisica delle particelle scopre è tenuto sott'occhio da chi fa della cosmologia e viceversa. Tanto per dirti, Cobra Samba, la missione spaziale che è stata approvata dall'agenzia spaziale europea dopo tre anni di un processo di selezione su tutta l'area scientifica (non solo la cosmologia o l'astrofisica) ha come uno dei punti forti sulla radiazione cosmica il supporto, l'interesse e la spinta della comunità dei fisici delle particelle del metano.

Domanda: Lei intende dire che l'universo, in qualche modo, ha una storia; ma facendo un paragone con la storia umana, se dicessimo ad esempio che non è contraddittorio pensare che Napoleone avrebbe potuto vincere la battaglia di Waterloo, potremmo dire lo stesso per la storia dell'universo, ossia esistono momenti nella storia dell'universo in cui si danno delle alternative? Insomma, il tutto è determinato, oppure no?

Risposta: Questa è una bella domanda che si addice alla chiacchierata che cercherò di fare la prossima volta anche se non so cosa ne verrà fuori, nel senso che quello che dirò adesso in risposta a questa domanda è che sicuramente quello che la scienza può fare è di osservare dei fatti e tentare di gettare dei ponti fra questi fatti, di collegare un fatto come causa di un altro fatto osservato. Il fatto qual è? In questo caso l'oggetto della nostra indagine scientifica è molto particolare, perché l'universo ha questo strano vizio, di essere lui, unico, e questo è l'unico caso della scienza in cui hai un oggetto. Quindi una risposta completa alla tua domanda richiederebbe una discussione che magari la prossima volta possiamo fare meglio. Quello che sicuramente noi constatiamo è che se determinate condizioni fisiche che noi osserviamo nell'universo, nella natura più in generale, fossero diverse da come le osserviamo, la storia sarebbe inevitabilmente molto diversa. Qui già però entriamo nel vivo di ciò che diremo la prossima volta.