

La candela

Ci eravamo lasciati, la volta scorsa, a metà del mio racconto su ciò che ho detto agli studenti di Pordenone a proposito di modelli cosmologici e dell'esperimento "Boomerang." Avevo concluso con due domande:

- che segno ha la curvatura?
- come varia nel tempo? (accelerata? rallentata?)

e dicevo che la risposta poteva venire solo da un confronto più o meno indiretto fra la teoria (equazioni di Einstein) e le osservazioni.

Molti confronti sono stati tentati, da quando esistono i modelli cosmologici; e si capisce che la quantità di dati raccolti è andata crescendo nel tempo, purtroppo però insieme con la complessità della loro interpretazione. Cercherò ora di dare un'idea, estremamente sommaria, di che cosa si va a guardare per rispondere a quelle domande.

Ma prima di cominciare, un commento a margine, di carattere epistemologico. Credo sia noto a tutti che sulla cosmologia è sempre in corso una discussione circa il suo status di scienza sperimentale. La critica, ovvia, è che "non è possibile fare esperimenti sull'Universo"; di conseguenza, non si può considerare a pieno diritto la cosmologia come scienza sperimentale, "galileiana," né tanto meno considerarla parte della fisica.

È probabile che al lettore biologo la critica che ho appena richiamata non faccia troppa impressione, visto che anche la biologia si trova in larga misura nella stessa situazione, senza che per questo la si debba considerare "meno scienza" per questo. Caso mai, la s'include nella categoria delle "scienze storiche," alla quale quindi potrebbe anche appartenere la cosmologia. Non voglio ora pronunciarmi sulla biologia (problema che avrebbe un po' a che fare con le discussioni delle puntate precedenti: quelle delle rondini, per chi le ricorda) ma credo che sulla cosmologia si possa approfondire un po' il discorso, proprio prendendo spunto dai ragionamenti che sto esponendo.

Certamente non possiamo fare esperimenti sull'Universo, e di questo oggetto di studio abbiamo un solo esemplare, che è quello che è (è stato quello che è stato) e non abbiamo modo di cambiarlo a piacere, "per vedere l'effetto che fa." Però abbiamo una possibilità, più debole se vogliamo, meno ambiziosa di quelle cui sono abituati i fisici sperimentali, che si ricreano in laboratorio l'ambiente più adatto per mettere a confronto teoria ed esperimento, o comunque per "interrogare la natura." Voglio dire che possiamo fare alcune osservazioni, da queste partire con la costruzione di un modello teorico; fare previsioni dedotte da questo modello, e poi nuove osservazioni per controllare se quelle previsioni sono verificate.

La parola “previsioni” può a prima vista suonare strana trattandosi di Universo e della scala dei tempi con cui abbiamo a che fare: non intendo certo dire che ci metteremo ad aspettare che cosa accadrà in futuro, per vedere se si conforma a ciò che ci aspettiamo... Qui “previsione” va inteso in un senso diverso: l’Universo è già lì, ma noi non lo conosciamo tutto; da quel poco che possiamo vedere, arriviamo a indovinare come potrebbe essere fatta qualche parte che non abbiamo ancora osservata. Andiamo a guardare, e due casi sono possibili: è fatta come ci aspettavamo, e allora diremo che la previsione è verificata; o risulta diversa, e allora il nostro modello teorico andrà modificato.

Oppure ci possiamo trovare in una situazione un po’ differente: il modello teorico è incompleto, nel senso che contiene dei parametri incogniti. A seconda del valore di quei parametri, certe proprietà dell’Universo (magari nella parte non ancora osservata) risulteranno diverse. Allora le nuove osservazioni permettono di completare il modello, per fare in modo che esso si accordi con tutte le osservazioni.

Bisogna dire che qui la questione si fa delicata, perché si sconfinava facilmente nelle cosiddette “ipotesi ad hoc”: disponendo di parametri liberi, può darsi che si riesca sempre a far tornare le cose; ma una teoria così costruita è debole, perché non dispone di verifiche *forti*, prive di arbitrarietà.

Forse uno o due esempi di carattere opposto chiariranno meglio il punto. Il primo esempio ci è dato dal modello atomico di Bohr. Non importa ora neppure descriverlo: ciò che conta è che Bohr riuscì col suo modello a render conto in gran dettaglio dello spettro dell’idrogeno, *senza disporre di alcun parametro arbitrario*. Se andate a riguardare la formula di Bohr dei livelli energetici, troverete che in essa compaiono solo costanti fondamentali già note: massa e carica dell’elettrone e costante di Planck. Non c’era niente da fare: o quella formula riproduceva lo spettro osservato, o no. Non c’era spazio per nessuna scappatoia.

Un secondo esempio possiamo prenderlo dalla relatività generale. Quando Einstein arrivò alla fine del suo lungo lavoro, ed ebbe in mano le famose equazioni (in realtà ancor prima di averle nella forma definitiva che oggi conosciamo), ebbe subito l’idea di metterle alla prova studiando il moto dei pianeti. E venne fuori che la soluzione prevedeva per Mercurio una precessione del perielio, in ottimo accordo col valore già noto da più di mezzo secolo e del tutto inspiegato. Ora le equazioni di Einstein non contengono parametri liberi: ci compare la velocità della luce e la costante di gravitazione, i cui valori erano già ben noti. Applicare le equazioni a Mercurio significava solo assegnare semiasse ed eccentricità dell’orbita (anch’essi valori arcinoti) ... et voilà: la precessione saltava fuori giusto quella che doveva.

I modelli cosmologici non sono in una condizione così felice, perché contengono alcuni parametri incogniti. Per di più, come vedremo subito, le osservazioni non sono facili e lasciano spesso ampi margini d’incertezza; per cui sono lecite

diverse opinioni sulle conclusioni da trarne. Ma ora mi premeva mettere in chiaro che cosa possa significare in cosmologia il confronto fra teoria e osservazioni. La cosa comunque dovrebbe chiarirsi meglio in ciò che segue. (Come avrete certamente capito, le considerazioni appena fatte non sono entrate nella conversazione di Pordenone; sia per ragioni di tempo, sia perché troppo complesse, a mio giudizio, per una chiacchierata a 200 ragazzi).

* * *

Il confronto più “facile” (fra virgolette, perché è facile solo in senso relativo, rispetto a ciò che viene dopo) si fa cercando la correlazione fra distanza e redshift: secondo la legge di Hubble dovrebbero essere proporzionali, ma già sappiamo che la legge di Hubble è solo una prima approssimazione, valida per distanze relativamente piccole. La teoria completa prevede come il redshift debba dipendere dalla distanza a seconda del modello di universo; se si avessero dati adeguati, si potrebbe quindi scegliere il modello su questa base. Purtroppo le cose non sono così semplici, soprattutto perché è molto difficile stimare accuratamente le distanze, che debbono essere grandi.

Tanto per non restare troppo nel vago: ci si può aspettare deviazioni di qualche per cento dalla legge di Hubble per distanze attorno al miliardo di a-l o superiori; e i metodi di misura di distanze così grandi sono ancor oggi piuttosto incerti.

Più indirettamente, si può studiare la relazione fra luminosità e redshift. È ovvio che questa relazione è imparentata con l'altra, perché un oggetto più distante apparirà più debole, per cui la luminosità è un indicatore della distanza. Anche qui ci sono delle difficoltà: il confronto ha senso solo se si usano oggetti che sarebbero ugualmente luminosi se fossero alla stessa distanza, ma questo non è facile capirlo. Ci si può basare, in linea generale, sull'ipotesi che oggetti di struttura simile siano di uguale luminosità intrinseca. Il criterio viene ad es. applicato alla popolazione (senti senti, chi salta fuori ...) di galassie di due diversi ammassi, diversamente distanti. Oppure a supernovæ che mostrino simili curve di luce (andamento della luminosità nel tempo). Di più non posso dire, anche perché l'argomento diventa rapidamente specialistico, e non è esattamente la mia specialità.

Se ricordate il rumore di un paio d'anni fa sulla “accelerazione dell'espansione,” si trattava del risultato di osservazioni fatte appunto su supernovæ distanti.

* * *

Il confronto teoria-osservazioni realizzato con “Boomerang” è molto più indiretto di questi, e ora passo a spiegare di che si tratta. A Pordenone avevo mostrato a questo punto un'immagine, che era apparsa anche nei TG, e presentata come “fotografia del big bang.” Non so se la ricordate, e credo inutile proporla qui, perché si perderebbe il colore e anche molti dettagli, causa la stampa a retino. Potete però trovarla ad es. in

http://www.physics.ucsb.edu/~boomerang/press_images/index.html

insieme con varie altre immagini e con numerose informazioni che integrano quanto qui posso scrivere.

L'immagine mostra uno sfondo rossastro, movimentato da numerose "macchie" più chiare o più scure, e anche tendenti al giallo. Al margine superiore c'è una scala di colori, essenziale per l'interpretazione.

Prima di spiegare che cosa mostra questa "fotografia," mi è sembrato utile spiegare i molti sensi in cui il termine "fotografia del big bang" è fuori luogo, anche se forse di grande effetto (confesso di non saper giudicare coi parametri giornalistici ...). Prima di tutto, non è affatto una fotografia: non è stata presa con una tecnica fotografica, non è stata impiegata radiazione visibile, e i colori sono una rielaborazione a posteriori, utile per visualizzare ciò che interessa, ma privi di qualsiasi riscontro con la realtà. Inoltre il big bang c'entra molto poco, come vedremo meglio fra breve; in realtà ciò che si vede nella "fotografia" rispecchia (se mai) lo stato dell'Universo circa 300 000 anni dopo il vero e proprio big bang.

In realtà si tratta di una mappa di una porzione di cielo, che è stata spazziata da un radiometro montato su pallone stratosferico, per misurare l'intensità della radiazione cosmica di fondo (che, vi ricordo, è una radiazione nel campo delle microonde, con lunghezze d'onda dominanti di qualche mm). Questa radiazione di fondo è isotropa, con ottima approssimazione, ma non proprio. Le piccole anisotropie hanno un'estensione e un'entità, la cui misura era appunto lo scopo dell'esperimento. La scala di colori indica la grandezza delle differenze di temperatura (ossia d'intensità) misurate: si vede che siamo a meno di un millesimo di kelvin, pari a circa un decimillesimo della temperatura media, che è circa 2.7 K.

Tutto qui: e la piccolezza delle differenze misurate indica la difficoltà dell'esperimento. Per fare un solo esempio: i rivelatori dovevano essere schermati dalla radiazione solare e mantenuti a 0.3 K, altrimenti il rumore termico avrebbe sovrastato ciò che si voleva vedere.

Ma cosa ha a che fare tutto ciò con i modelli di universo? Ricordiamo il principio cosmologico: se fosse rigorosamente rispettato, la radiazione di fondo dovrebbe essere esattamente isotropa, e non ci sarebbero quelle fluttuazioni che si vedono. D'altra parte l'isotropia non può essere esatta, dal momento che nell'Universo ci sono oggetti ben distinti (galassie) e dello spazio vuoto (quasi vuoto) interposto. Ma le galassie sono oggetti relativamente recenti, mentre la radiazione di fondo si propaga indisturbata dall'epoca dell'"ultimo scattering," appunto circa 300 000 anni dopo il big bang.

Avvertenza: qui vi sto dicendo di più di quanto ho detto a Pordenone, per cui debbo anche dare maggiori chiarimenti. Che cos'è questo "ultimo scattering"? Teniamo presente che l'Universo nel corso della sua espansione si raffredda, o meglio si raffredda tutto ciò che vi si trova: particelle di vario tipo, poi atomi, fotoni, ecc. Quando la temperatura è alta (diciamo sopra 10 000 K, ma

non troppo sopra) non ci sono atomi, ma un plasma di nuclei positivi ed elettroni negativi, più un “mare” di fotoni. Le particelle cariche interagiscono coi fotoni: li assorbono e li riemettono, processi che globalmente chiamiamo appunto “scattering.”

Quando però la temperatura si abbassa, si formano atomi neutri, che non sono in grado d’interagire con la radiazione e.m. se non a particolari frequenze; intanto anche la radiazione si è raffreddata, il che vuol dire che la frequenza dominante è scesa sotto quelle che possono essere assorbite dagli atomi. A quel punto quindi la radiazione (i fotoni) viaggiano come se la materia atomica non ci fosse, e conservano tutte le caratteristiche (anche se con lunghezze d’onda spostate) che avevano al momento dell’ultimo scattering.

Già nelle fasi precedenti si sono prodotte nella materia delle differenze di densità e di temperatura (precursori dei nuclei di formazione delle galassie) che hanno lasciato traccia nella radiazione di fondo. Questa continua a raffreddarsi con l’espansione, fino alla temperatura attuale, ma conserva il “ricordo” di quelle differenze di temperatura (piccolissime). Ed è ciò che oggi possiamo misurare.

D’altra parte, dimensioni e ampiezza delle fluttuazioni possono essere previste in base ai diversi modelli di universo, e perciò le misure sono una verifica indiretta di quale modello è migliore. Molto indiretta: occorrono un bel po’ di calcoli per vedere come la struttura in grande dell’Universo determina i dettagli di quelle fluttuazioni. Ma la connessione è obbligata, sicché dalle fluttuazioni si può risalire ai parametri incogniti che dicevo all’inizio. Tra questi parametri, uno è la curvatura delle sezioni spaziali, e il risultato è che l’Universo è piatto con grande probabilità: il suo raggio di curvatura è quasi certamente maggiore di 40 miliardi di a-l.

* * *

Con questo è terminato il riassunto della mia chiacchiarata pordenonese, che anzi, come ho già detto, qui ho anche un po’ allungata. Ciononostante, ho dovuto sorvolare su molte questioni non di poco conto, e che ora ricordo di volo: problema dell’isotropia, orizzonti e inflazione; formazione delle galassie; la materia oscura; costante cosmologica sì o no? E l’elenco non sarebbe finito. . .

Mi resta ancora qualche commento. Va da sé che in un discorso di un’ora non si può fare di più, se si vuol mantenere una serietà scientifica appena decente (ossia se non si vuol raccontare barzellette travestite da scienza) e al tempo stesso consentire a chi ascolta di seguire il filo. Sono pienamente consapevole della grande difficoltà di questi discorsi, che non viene tanto dall’intrinseca complicazione dei singoli punti, quanto dall’articolazione complessiva: ogni cosa si lega con un’altra, e per capire il ragionamento bisogna tener presente il tutto. Cosa già difficile da fare con un libro davanti, figuriamoci poi quando si può solo ascoltare uno che parla . . . come si fa a non distrarsi neppure un momento?

Come ho già detto, ho una certa esperienza di lezioni e conferenze, e le cose non vanno sempre allo stesso modo; questa volta sono andate bene. Lo si

è visto anche alla fine, quando è arrivato il momento della fatidica frase: “ci sono domande?” Con qualche difficoltà iniziale, le domande sono arrivate, pertinenti all’argomento; e senza che l’attenzione si allentasse. Mi prendo un po’ di merito, ma molto dipende dall’argomento, che notoriamente esercita un grande fascino.

E qui s’innesta un’ultima considerazione. Si può (si deve) trattare di cosmologia nelle ore ordinarie di scuola, come parte del curriculum? È ovvio che se ci si propone di tener vivo l’interesse di una classe, le questioni cosmologiche sono eccellenti; inoltre si prestano a considerazioni interdisciplinari, in varie direzioni. Quindi la risposta non può che essere positiva. Ma . . . c’è un ma. Come trattarne? Quale preparazione si richiede all’insegnante?

È questo il momento per confessare il secondo fine di questo mio resoconto. Non c’era solo l’intento di approfittarne per proporvi alcune notizie su risultati più o meno recenti della cosmologia; c’era anche il sottinteso di proporre la mia esposizione come la possibile traccia (parziale, molto parziale . . .) per un lavoro didattico da svolgere in classe. Pur con l’estrema stringatezza che mi sono imposto, spero di aver mostrato che parlare di cosmologia significa integrare considerazioni matematiche (tra l’altro, tutt’altro che usuali nella nostra scuola secondaria) con argomentazioni a carattere fisico (osservazioni, modelli, metodi di misura, incertezze) e con conoscenze di fatto sugli oggetti visibili. Questo per i contenuti; la risposta all’altra domanda a questo punto ne segue automaticamente.

Del resto, il mio punto di vista lo conoscete, e potrei anche fare a meno di ripeterlo. L’ho esposto in particolare, con una certa ampiezza, giusto quattro anni fa, e non ho avuto motivo di cambiare idea. Non ritengo che un insegnante che non abbia avuta un’adeguata preparazione fisica e matematica possa affrontare questi argomenti in modo accettabile.

Intendiamoci: non sto dicendo che i vostri colleghi che insegnano fisica sarebbero del tutto a loro agio. . . In primo luogo, ben pochi ricevono nella loro carriera universitaria le conoscenze adeguate; poi debbono anche loro fare i conti con le ore che non bastano mai, già per affrontare questioni fisiche più terra terra ma irrinunciabili; infine, oggi sono sotto la pressione della “fisica moderna,” con che s’intende un po’ di relatività, un po’ di fisica quantistica, e magari una spolveratina di astrofisica. . . Perciò saranno egoisticamente ben felici di non doversi occupare anche di cosmologia; ma secondo me è proprio a loro che spetta, se non vogliamo che la cosmologia resti un argomento nebuloso, facile preda di speculazioni pseudofilosofiche costruite su fondamenti che di scientifico non hanno che le parole.

Detto questo, so bene che le cose andranno (continueranno ad andare) diversamente, per varie ragioni, la prima delle quali è che chi dovrebbe operare le scelte fondamentali per la scuola pensa a tutt’altro: oggi imperano le tre “I,” e “cosmologia” (più in generale “scienza”) non comincia per “i.”

* * *

Ero stato facile profeta: le puntate uscite nei nn. 2 e 3 dello scorso anno hanno stimolato qualche reazione. Ne sono felice. Ora non faccio commenti né repliche: voglio solo dire che ringrazio caldamente tutti coloro che sono intervenuti, sia su questa rivista, sia sul forum ANISN. Non ha importanza se dissentono da me, più o meno ampiamente: è importante che sono stati spinti a discutere, e che io stesso da questa discussione ho imparato qualcosa. Non mancheranno le occasioni per riprendere il discorso. Ma per la prossima volta ho in mente qualcos'altro, e come al solito non do anticipazioni... A presto.