

OLTRE LA FISICA *NORMALE*
INTERPRETAZIONI ALTERNATIVE
E TEORIE NON STANDARD
NELLA FISICA MODERNA

a cura di

Isabella Tassani

WANTED



NEITHER DEAD NOR ALIVE

Isonomia Epistemologica

Isonomia – Epistemologica

Volume 3

OLTRE LA FISICA NORMALE

**INTERPRETAZIONI ALTERNATIVE E TEORIE NON STANDARD NELLA FISICA MODERNA
PER IL 75-ESIMO COMPLEANNO DI FRANCO SELLERI**

Volume 1
Il realismo scientifico di Evandro Agazzi
Mario Alai (a cura di)

Volume 2
Complessità e riduzionismo
Vincenzo Fano, Enrico Giannetto, Giulia Giannini, Pierluigi Graziani (a cura di)

Volume 3
Oltre la fisica normale
Isabella Tassani (a cura di)

ISONOMIA - Epistemologica Series Editor
Gino Tarozzi

gino.tarozzi@uniurb.it

OLTRE LA FISICA NORMALE

**INTERPRETAZIONI ALTERNATIVE E TEORIE NON STANDARD NELLA FISICA MODERNA
PER IL 75-ESIMO COMPLEANNO DI FRANCO SELLERI**

A cura di

Isabella Tassani

© ISONOMIA – Epistemologica
All rights reserved.

ISSN 2037-4348

Scientific Director: Gino Tarozzi
Managing Director: Pierluigi Graziani
Department of Foundation of Sciences
P.za della Repubblica, 13 – 61029 Urbino (PU)

<http://isonomia.uniurb.it/>

Design by massimosangoi@gmail.com

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form, or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise without prior permission, in writing, from the publisher.

Sommario

GINO TAROZZI, ISABELLA TASSANI <i>Introduzione</i>	7
ALESSANDRO AFRIAT <i>La topologica</i>	13
GENNARO AULETTA <i>Features, not waves!</i>	19
STEFANO BORDONI <i>Widening the boundaries of classical physics: from Einstein's 1909 paper back to late nineteenth-century theoretical physics</i>	25
MARCO BUZZONI <i>Kuhn: l'esperimento mentale fra scienza normale e scienza rivoluzionaria</i>	53
CLAUDIO CALOSI, VINCENZO FANO <i>Di due analoghi dilemmi: forza di gravità e correlazioni a distanza</i>	69
ALBERTO CAPPI <i>Cosmologia standard e oltre</i>	95
GIOVANNI MACCHIA <i>Quasar, redshift e controversie: l'espansione dell'universo è da rivedere?</i>	115
FABIO MINAZZI <i>La questione epistemologica del realismo nel programma di ricerca di Franco Selleri</i>	181
ARCANGELO ROSSI <i>La scienza tra normalità e rivoluzione</i>	209
GINO TAROZZI <i>Oltre la fisica normale. Realtà della funzione d'onda e delle proprietà fisiche prevedibili nell'interpretazione di Selleri della meccanica quantistica</i>	223

Introduzione

Nonostante il suo grande potere predittivo e la vastità del suo campo di applicazione, la meccanica quantistica nella sua formulazione *standard*, meglio nota come “interpretazione ortodossa”, contiene una vera e propria rinuncia a quelle esigenze esplicative che caratterizzano ogni autentica teoria scientifica, rinuncia che è stata sintetizzata dall’affermazione di Feynman, secondo la quale «è tutto assolutamente misterioso e più ci riflettiamo più ci appare misterioso».

Nel corso della sua straordinaria opera scientifica Franco Selleri si è sempre opposto a questa rinuncia alla comprensione della struttura della realtà fisica, mostrando i limiti e le conclusioni paradossali cui conduceva l’idea largamente condivisa che la meccanica quantistica, così come altre teorie della fisica del ‘900 su cui egli ha in un secondo tempo concentrato le sue ricerche e analisi critiche, rappresentassero, per dirla con Popper, “la fine della strada in fisica”.

Tale carattere antiesplicativo e di radicale rinuncia epistemologica da parte della teoria quantistica *standard* si è tradotto in primo luogo nell’abbandono del principio di causalità, come è stato sottolineato molto efficacemente da Selleri, in *Quantum Paradoxes and Physical Reality* (1990), con riferimento alla legge quantistica del decadimento radioattivo, che definisce una vita media per una data classe di particelle atomiche, ma non spiega il perché del differente comportamento individuale di ciascuna particella appartenente a questa classe:

La fisica attuale non fornisce una comprensione di queste cause e accetta infatti una filosofia acausale: ogni decadimento è un processo spontaneo e non ammette una spiegazione causale. La questione della differente vita individuale di simili sistemi instabili, come i neutroni, secondo questa linea di pensiero rimarrà per sempre senza una risposta e dovrebbe essere pertanto considerata come una questione “non scientifica”.

Nato a Bologna il 9 ottobre del 1936, Franco Selleri ha compiuto i suoi studi presso l’Università della sua città, l’antica e celebre *Alma Mater*

studiorum, con scienziati da lui definiti “indimenticabili”: il chimico Giovanni Battista Bonino, il matematico, e fisico matematico, Antonio Pignedoli e il fisico Giampietro Puppi. Nel 1958 si è laureato in Fisica *cum laude* e, solo un anno dopo, è diventato borsista all’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN).

Il primo articolo della sua lunga carriera scientifica riguarda una delle sue idee originali, l’*one-pion exchange model* per i processi anelastici ad alta energia in fisica delle particelle. Il notevole successo di questo modello gli ha aperto la strada a diverse esperienze internazionali: borsista al CERN di Ginevra (1959-61), *collaborateur étranger* a Saclay (Francia, 1962/63), *research associate* alla Cornell University (USA, 1963/65), ecc. Nel 1966 Selleri torna in Italia, prima a Bologna e poi, dal 1968 come docente e direttore di ricerca dell’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (I.N.F.N.) al Dipartimento di Fisica dell’Università di Bari, dove dal 1980 è stato chiamato come professore ordinario di Fisica teorica.

Risale ai tardi anni ‘60 l’elaborazione e lo sviluppo della sua prospettiva critica nei confronti delle teorie fondamentali della fisica moderna, in particolar modo della teoria delle particelle elementari e della meccanica quantistica, che verrà ben presto a configurarsi uno dei principali elementi caratterizzanti del suo programma di ricerca.

Nel corso della sua intensa e infaticabile attività scientifica, Selleri è entrato in proficuo contatto con molti grandi fisici e filosofi della scienza, ma quelli che ritiene lo abbiano più significativamente influenzato sono stati Louis de Broglie, John Bell e Karl Popper.

Egli ha molto apprezzato l’idea di de Broglie che la funzione d’onda della meccanica quantistica dovrebbe descrivere oggettivamente onde reali che si propagano nello spazio ordinario. Perciò egli è arrivato a ritenere che la teoria quantistica, considerata così “misteriosa”, per riprendere le parole di Feynman, potrebbe essere riformulata in modo tale da apparire comprensibile anche a un normale essere umano pensante. Con la sua ipotesi delle onde vuote, più tardi definite “onde quantistiche”, Selleri può essere considerato a pieno diritto un originale continuatore dell’opera di de Broglie, che in una lettera a Franco Selleri (11 aprile 1969), individuò in tale nuova prospettiva

un importante tentativo volto a ottenere un’interpretazione della meccanica ondulatoria più soddisfacente di quella che viene attualmente adottata e una conferma delle idee che mi avevano guidato nel momento in cui avevo proposto nel 1923-24 le concezioni di base della meccanica ondulatoria,

che rispetto alla teoria dell'onda pilota presenta, come rileva sempre de Broglie nella stessa lettera, la possibilità di un appello all'evidenza sperimentale:

L'esperienza che lei propone per provare l'esistenza dell'onda sarà di estremo interesse per provare l'esistenza di quest'onda debolissima (*très faible*) che trasporta le particelle [...].

Selleri fu molto impressionato dalla scoperta della famosa diseguaglianza di Bell, che discrimina a livello empirico tra la teoria quantistica e tutte le descrizioni realistiche locali della natura, che per lui significava la possibilità di scegliere sperimentalmente tra differenti prospettive filosofiche; inutile dire che egli preferisce il realismo locale alla perfetta validità della teoria quantistica convenzionale, considerandosi insoddisfatto degli esperimenti realizzati finora, che ha criticato in diversi lavori mettendo in luce le ipotesi addizionali, tipicamente quantistiche, che vengono di solito introdotte sotto varie forme.

Alle ricerche sul problema dell'incompatibilità sia logica che empirica tra meccanica quantistica e realismo locale, e al duplice problema da una parte delle ipotesi in gioco nella dimostrazione del teorema di Bell, dall'altro del suo dominio di validità, Selleri ha dato un contributo che può essere difficilmente sopravvalutato nella fisica del '900; già nel 1974 il grande storico della scienza Max Jammer, nel suo classico *The Philosophy of Quantum Mechanics* (1974), metteva in rilievo come egli avesse da una parte dimostrato la forma più forte della diseguaglianza di Bell, dall'altro mostrato, in alcuni articoli scritti con V. Capasso e D. Fortunato, la possibilità di discriminare a livello empirico tra descrizione attraverso stati *entangled* e descrizione attraverso vettori di stato fattorizzabili, quest'ultima implicata dal realismo locale, anche rispetto ad altre osservabili, definite "osservabili sensibili".

Della filosofia popperiana, Selleri ha apprezzato e condiviso l'atteggiamento critico verso la fisica moderna, il suo realismo e razionalismo, piuttosto che la sua specifica teoria della conoscenza. E a sua volta le idee di Selleri sulla meccanica quantistica sono state altrettanto influenti sul grande filosofo viennese, che dopo aver sostenuto per molti anni un'interpretazione statistica strettamente corpuscolare, aderì poi pienamente all'interpretazione realistica della funzione d'onda:

Franco Selleri ha suggerito (continuando l'opera di Louis de Broglie) che possono esistere onde senza particelle [...]. Le conseguenze [*di tale possibilità*] sembrerebbero essere rivoluzionarie [...] esse stabilirebbero, in luogo del

carattere “complementare” di particelle e onde (ondicelle) l’interazione di due tipi di oggetti reali: onde e particelle.

Analogamente Popper fece propria la critica di Selleri e Tarozzi alla dimostrazione probabilistica di Clauser e Horne del teorema di Bell, critica che sembrava restringere alla sola classe delle teorie deterministiche locali di variabili nascoste l’ambito di validità di tale teorema, sembrando così aprire una prospettiva di riconciliazione tra meccanica quantistica e teorie probabilistiche locali:

F. Selleri e G. Tarozzi hanno trovato un modello che soddisfa la definizione di Bell di località ma non la definizione di località di Clauser e Horne (conosciuta anche come “condizione di fattorizzabilità”); questo sembra mostrare ancora una volta che Clauser e Horne non hanno soddisfatto la pretesa di universalità [*del teorema di Bell*].

Franco Selleri ha pubblicato, prevalentemente su prestigiose riviste internazionali, più di trecento articoli riguardanti principalmente la fisica delle particelle, i fondamenti della teoria quantistica e della relatività ma, anche se in misura minore, la storia e la filosofia della fisica. Infine, egli ha scritto molti libri, pubblicati presso editori europei e americani, che hanno generalmente ricevuto critiche molto positive. Riguardo a *Paradossi quantistici e realtà fisica*, un noto fisico americano ha scritto:

Il Professor Selleri è quasi unicamente qualificato come un vero scettico che, ciononostante, ha una profonda comprensione dell’Interpretazione di Copenaghen. Se si aggiunge a questo un’instancabile onestà intellettuale e un’imparzialità di fondo, ci si può rendere conto quanto sia speciale questo libro.

Selleri è stato ed è tuttora membro del comitato scientifico di molte riviste internazionali, quali *Foundations of Physics Letters*, *Fundamental Theories of Physics*, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, e *Apeiron*, svolgendo la funzione di *referee*, tra le quali *Foundations of Physics*, *Physics Letters*, *Journal of Physics*, *Europhysics Letters* e *Nuovo Cimento*. Fa parte di molte istituzioni e società scientifiche, come la Società Italiana di Fisica (S.I.F.), l’*American Physical Society*, la Società Italiana di Logica e Filosofia della Scienza (S.I.L.F.S.), la *New York Academy of Sciences*, la *Fondation Louis de Broglie* di Parigi, la *Gdanskie Towarzystwo Naukowe* e il Centro interuniversitario di ricerca in Filosofia e Fondamenti della Fisica (C.I.R.F.I.S.) degli atenei di Bologna, dell’Insubria, del Salento e di Urbino.

Negli anni recenti, ha stabilito l’esistenza di una, a suo parere, inaccettabile discontinuità tra qualunque ragionevole descrizione dei sistemi

di riferimento accelerati e la descrizione relativistica dei sistemi di riferimento inerziali. Ha suggerito come si possa superare la precedente difficoltà distinguendo il gruppo di trasformazioni di Lorentz da altre trasformazioni che implicano un ritorno alla nozione di simultaneità assoluta.

Come curatori di questo numero speciale di *Isonomia* siamo onorati di fare omaggio a Franco Selleri come amico e collega speciale, sia per la sua passione instancabile e la sua profonda conoscenza dei fondamenti delle teorie della fisica contemporanea che ha generosamente profuso nel cercare risposte alle fondamentali questioni concettuali aperte, sia e forse ancor più per la prospettiva perennemente critica che egli ha sempre seguito con particolare rigore ed estrema determinazione per raggiungere questo scopo.

Siamo certi di esprimere anche il pensiero dei colleghi che hanno contribuito a questo numero della rivista, augurandogli ancora molti anni di un'altrettanto eccellente creatività scientifica.

Gino Tarozzi e Isabella Tassani,
Dipartimento di Scienze di Base e Fondamenti
Università di Urbino *Carlo Bo*

Cosmologia standard e oltre

Alberto Cappi
INAF – Osservatorio Astronomico di Bologna
alberto.cappi@oabo.inaf.it

1. Introduzione

Nel corso della seconda metà del XX secolo si è progressivamente sviluppata ed affermata una cosmologia “standard”: vedremo in che cosa consiste e come si è costituita. Vedremo anche quali sono i suoi limiti e quali nuove teorie si candidano per superarli. Vorrei comunque chiarire subito che la cosmologia standard, per quanto possano sembrare sorprendenti i suoi risultati (qualche specialista parla di *preposterous universe*, ovvero di un assurdo universo), si fonda su esperimenti ed osservazioni, ed avrebbe potuto essere falsificata tante volte: ciò non è finora accaduto. Al cuore della cosmologia standard abbiamo quella che viene chiamata “teoria del *Big Bang*” la quale, offrendo una descrizione quantitativa dell’origine comune e dell’evoluzione di tutto l’universo osservabile, rappresenta una delle grandi conquiste intellettuali del XX secolo. Detto questo, nel quadro della teoria del *Big Bang* sono ancora possibili molti modelli diversi: soltanto alla fine del XX secolo si è finalmente avuta la convergenza su un modello particolare, che costituisce il modello standard (detto anche *concordance model*).

Che cosa possiamo invece definire come cosmologia non standard? A parte le teorie alternative al Big Bang che appartengono al passato (come quella dello Stato Stazionario), abbiamo oggi teorie che si propongono di andare al di là del *Big Bang* e di spiegare ciò che la cosmologia standard per sua natura non è in grado di spiegare. Abbiamo così l’inflazione, i modelli di *pre-Big Bang*, gli universi-brana, il Multiverso, che a livelli diversi si basano su una nuova fisica non verificata sperimentalmente: siamo dunque

in un campo altamente speculativo, ricco di ipotesi e molto lontano dalla pratica quotidiana dell'astronomo.

In questo contributo cercherò di seguire una traccia storica e, per quanto riguarda la bibliografia, salvo poche eccezioni rimanderò ad una piccola selezione di *review* e libri nei quali il lettore potrà trovare i riferimenti agli articoli originali e specialistici. Per un'introduzione aggiornata in lingua italiana alla cosmologia, segnalo il testo a livello universitario di Bonometto (2008)¹.

2. La cosmologia prima del XX secolo

L'inizio della cosmologia come spiegazione razionale di un cosmo considerato come comprensibile all'uomo risale ai filosofi presocratici (VI secolo a.C.). Ad Anassimandro le fonti attribuiscono la prima grande rivoluzione cosmologica: l'idea che la Terra è sospesa nel vuoto. La seconda rivoluzione cosmologica fu invece la scoperta della sfericità della Terra, che divenne nota ai Greci a partire dal V secolo a.C. ed è attribuita a Parmenide o a Pitagora. Ma l'apogeo della scienza e della cosmologia scientifica nell'Antichità fu raggiunto nella prima età ellenistica (Russo 1999): fra il III e il II secolo a.C., il cosmo divenne oggetto di studio *quantitativo*, come testimoniano la misura precisa della circonferenza terrestre da parte di Eratostene, e quella più approssimativa delle distanze e delle dimensioni della Luna e del Sole da parte di Aristarco di Samo. Lo stesso Aristarco fu il primo a comprendere che il moto della sfera celeste e quello del Sole possono essere spiegati assumendo che la Terra ruoti su se stessa e orbiti intorno al Sole. Furono proposte teorie della gravità alternative a quella aristotelica (come quella descritta nel dialogo di Plutarco *De Facie quae in Orbe Lunae Apparet*). Risale all'epoca ellenistica anche il celebre meccanismo di Antichitera, un vero e proprio calcolatore meccanico grazie al quale era possibile calcolare la posizione del Sole e della Luna (e forse dei pianeti) per una data qualsiasi (Freeth *et al.*, 2006). L'epoca d'oro della scienza antica si spense con la conquista romana dei regni ellenistici, anche se nei primi due secoli dell'Impero Romano si ebbe un parziale risveglio dell'interesse scientifico, senza però l'impulso creativo di un tempo. Risale a questo periodo l'*Almagesto* di Tolomeo, il cui raffinato

¹ Il libro è eccellente; unica pecca sono alcune affermazioni di carattere storico e filosofico a mio parere discutibili che si trovano nel capitolo iniziale e in quello conclusivo.

modello geocentrico avrebbe costituito il punto di riferimento dell'astronomia e della cosmologia fino alla rivoluzione copernicana.

Nel corso dei decenni successivi alla pubblicazione del libro di Copernico *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (1543), il sistema eliocentrico rese implausibile l'esistenza di una sfera delle stelle fisse, che fu pertanto sostituita da un cosmo popolato di altri soli. Dopo la pubblicazione nel 1687 dei *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis* di Isaac Newton fu infine possibile descrivere la dinamica dell'universo, una volta stabilita la distribuzione iniziale della materia nello spazio, tranne nel caso in cui la materia sia disposta uniformemente in uno spazio infinito: oltre a un problema matematico di definizione della forza di gravità, si pone in questo caso anche il paradosso di Olbers: poiché il flusso luminoso proveniente da una stella diminuisce con l'inverso del quadrato della distanza, ma il numero di stelle aumenta col quadrato della distanza, e se l'universo è infinito il flusso tende all'infinito; anche tenendo conto che le stelle più vicine nascondono quelle più lontane, il cielo dovrebbe essere luminoso come la superficie del Sole. La soluzione che oggi sappiamo essere valida è l'età finita dell'universo: poiché anche la velocità della luce è finita, noi non possiamo osservare stelle la cui distanza è superiore a quella che può percorrere la luce in un tempo uguale all'età dell'universo (Harrison, 1989).

Non è stato facile stabilire la struttura dell'universo: William Herschel a cavallo del XVIII e XIX secolo scoprì l'esistenza di un gran numero di nebulose. Si trattava di ammassi di stelle paragonabili alla Via Lattea ma di cui non era possibile distinguere le stelle a causa della distanza, oppure di vere e proprie nebulose di gas? Inoltre nel 1796 Pierre Simon de Laplace pubblicò in coda alla sua opera *Exposition du système du monde* una settima nota, nella quale spiegava le regolarità osservate nel Sistema Solare ipotizzandone la formazione in seguito alla contrazione gravitazionale di una nube di gas in rotazione. Le nebulose osservate erano forse ricollegabili a questo processo? L'ipotesi di Laplace fu discussa nel corso del XIX secolo, analogamente a quello che sarebbe avvenuto nel XX secolo con la teoria del *Big Bang*, senza che si arrivasse ad un risultato conclusivo. Fu lo sviluppo della fotografia e della spettroscopia a permettere di identificare la natura dei diversi tipi di nebulose.

3. Redshift e relatività: la nascita della cosmologia moderna

All'inizio degli anni '20 del XX secolo cominciavano ad esserci forti indizi che le nebulose come quella di Andromeda fossero grandi sistemi stellari come la Via Lattea. Nel 1923 l'astronomo americano Edwin Hubble, avvalendosi del telescopio di 2,5 metri di diametro di Mount Wilson, riuscì ad identificare alcune Cefeidi nella nebulosa di Andromeda. Le Cefeidi sono stelle variabili, e il periodo di variazione della loro luminosità è correlato alla loro luminosità intrinseca. La misura della loro luminosità apparente e del periodo permette così di misurarne la distanza. I risultati di Hubble, annunciati nel 1925, mostravano che le nebulose come quella di Andromeda erano lontani sistemi stellari paragonabili alla Via Lattea.

Nel frattempo, l'astronomo americano Vesto Slipher aveva scoperto che le righe negli spettri delle galassie erano quasi sempre spostate verso il rosso (il *redshift*) il che, interpretato come effetto Doppler, indicava un loro sistematico allontanamento. Lo stesso Hubble, nel 1929, a partire dalle misure dei *redshift* e delle distanze delle galassie, mostrò che il *redshift* z di una galassia è proporzionale alla sua distanza D : $z=(H/c)\times D$ (dove H è la costante di Hubble e c è la velocità della luce). L'interpretazione naturale della legge di Hubble nel contesto della relatività generale è che le galassie si allontanino le une dalle altre perché l'universo è in espansione. In tal caso la proporzionalità fra *redshift* e distanza vale solo per piccole scale: la relazione fra distanza e *redshift* dipende infatti dai parametri del modello cosmologico. Si noti che H è costante nello spazio ma non nel tempo: il suo valore all'epoca attuale è solitamente indicato con H_0 . Infine, va precisato che le galassie legate da attrazione gravitazionale, come quelle che appartengono a gruppi o ammassi, non si allontanano fra loro.

Se l'interpretazione cosmologica del *redshift* è la più immediata e si è imposta fin dall'inizio, vi è stata anche qualche voce critica. In particolare l'astronomo Halton Arp, in base alle osservazioni di coppie di galassie (o associazioni galassie-*quasar*) apparentemente collegate da ponti di materia ma con *redshift* molto diversi, sostiene da molti anni che il *redshift* non sia di natura cosmologica. Di questo si parla in un altro contributo del presente volume; qui mi limito a sottolineare che l'interpretazione standard è ampiamente confermata dalle numerose misure di distanza indipendenti dal *redshift*, mentre nessuna analisi statistica è riuscita a dimostrare che gli allineamenti di Arp non siano casuali.

Ma in che cosa consistono i modelli cosmologici relativistici? Attraverso la soluzione delle equazioni della relatività generale, a partire da alcune ipotesi semplificatrici, si ottengono dei modelli matematici che descrivono

la dinamica dell'universo; questi modelli sono definiti da un certo numero di parametri, legati alla costante di Hubble e ai contributi delle varie componenti di materia ed energia. L'ipotesi più importante alla base dei modelli standard è che l'universo sia omogeneo e isotropo, ovvero che la densità di materia ed energia abbia lo stesso valore in tutti i punti dello spazio, anche se può variare nel tempo, e che non esistano direzioni privilegiate. Da ciò deriva come conseguenza la legge di proporzionalità tra velocità di allontanamento e distanza delle galassie. Naturalmente l'ipotesi non è vera *localmente*: le galassie si trovano in gruppi ed ammassi, e vi sono strutture ancora più estese e grandi vuoti; ma si presume che a grandi scale l'universo sia omogeneo. Pietronero e collaboratori hanno messo in discussione questa convinzione, osservando che le proprietà statistiche sono quelle di una distribuzione frattale senza alcuna evidenza di una scala dell'omogeneità (Gabrielli *et al.*, 2005). La maggioranza dei cosmologi rimane però convinta dell'esistenza di questa scala, anche se la sua esatta definizione è difficile.

Fu lo stesso Einstein nel 1917 a proporre il primo modello cosmologico relativistico, in cui l'universo non ha limiti, ma ha un volume finito. Siccome un tale universo collaserebbe su se stesso per la propria gravità, Einstein introdusse nelle equazioni una costante, la celebre costante cosmologica, che assumendo un valore positivo ha l'effetto newtoniano di una forza repulsiva. Ben presto risultò però evidente che l'equilibrio era instabile e che comunque l'universo deve o contrarsi o espandersi, come dimostrato dal russo Alexander Friedmann nel 1922 e indipendentemente nel 1927 dal belga Georges Lemaître. In questi modelli l'omogeneità permette di definire un tempo cosmico, col quale si possono sincronizzare tutti gli osservatori semplicemente misurando lo stesso valore della densità.

Nei modelli cosmologici con sola materia e senza costante cosmologica, la densità di materia ρ determina sia la geometria dello spazio che l'evoluzione dinamica dell'universo. Se la densità è superiore ad una soglia critica ρ_c , allora l'universo è destinato in futuro a rallentare e fermare la propria espansione, per poi collasare su se stesso e la geometria dello spazio è l'equivalente tridimensionale della geometria su una superficie sferica: il volume dell'universo è finito, ma non ha limiti, come nel caso dell'universo di Einstein. Di solito si usa il rapporto fra densità dell'universo e densità critica per definire il parametro $\Omega = \rho/\rho_c$; in questo caso $\Omega > 1$, e si parla di universo "chiuso". Se l'universo ha invece una densità inferiore alla densità critica ($\Omega < 1$), allora, pur rallentando, è destinato ad espandersi per sempre, è infinito spazialmente ed ha una geometria iperbolica; infine, se l'universo ha esattamente la densità critica

($\Omega = 1$), allora esso è infinito e destinato ad espandersi per sempre ed ha una geometria euclidea (universo “piatto”). Il valore della densità critica è legato alla costante di Hubble: $\rho_c = 3H / (8\pi G)$, e all’epoca attuale vale circa 10^{-29} g/cm³.

Oggi però sappiamo che la costante cosmologica è diversa da zero: in questo caso rimane il legame fra densità e geometria, ma non quello fra densità ed evoluzione dinamica. Anticipiamo comunque che, dato il valore misurato della costante cosmologica, il destino dell’universo è quello di un’espansione accelerata e senza fine.

4. Il Big Bang

4.1. L’istante iniziale

Se l’universo è in espansione, allora nel passato le galassie dovevano essere più vicine fra loro. Andando indietro nel tempo, l’universo doveva essere sempre più caldo e denso, finché si arriva ad un’epoca in cui non potevano esistere le stelle, ma solo gli atomi, e prima solo i nuclei atomici, e così via fino ad arrivare alla remota epoca dei *quark*, le particelle elementari che costituiscono i protoni e i neutroni. Lemaître suggerì nel 1931 che l’universo fosse nato dalla frammentazione di “un atomo primordiale”, un’idea che rappresenta il primo passo verso la teoria del Big Bang (curiosamente ebbe un’idea molto simile, in versione newtoniana, lo scrittore americano Edgar Allan Poe, il quale nel 1848 sostenne che l’universo fosse nato dalla frammentazione di una particella primordiale; si veda Cappi, 1994). Andando ancora a ritroso nel tempo, si giunge ad un istante iniziale in cui la densità era infinita: è la singolarità iniziale, inevitabile nell’ambito della relatività generale. Il tempo cosmico viene misurato a partire da questo istante iniziale, che rimane però un’extrapolazione dei modelli: infatti la relatività generale non è più applicabile quando gravità e fenomeni quantistici divengono entrambi importanti su scale microscopiche. Per questo motivo è in corso già da molti anni un intenso lavoro teorico, su strade diverse, per edificare una nuova teoria che concili la teoria quantistica e la relatività generale. Una strada è quella della *Loop Quantum Gravity* (Rovelli, 2011); l’altra strada, molto più popolare, è la *String Theory*, o Teoria delle Stringhe (Mukhi, 2011).

4.2. Le conferme

Big Bang, o “grande botto”, è un termine che voleva essere spregiativo, coniato negli anni ‘50 da Fred Hoyle, il quale era scettico e filosoficamente ostile all’idea di un inizio dell’universo e concepì insieme a Bondi e Gold una teoria alternativa, la teoria dello Stato Stazionario, in cui l’universo esiste da sempre ed è in continua espansione, ma vi è creazione continua di materia che mantiene la sua densità costante nel tempo (per una storia della controversia fra le due teorie si veda Kragh, 1999). Le osservazioni hanno confutato la teoria dello Stato Stazionario mostrando che l’universo nel passato era diverso da come è nel presente.

La teoria del *Big Bang* descrive l’evoluzione dell’universo a partire da una fase primordiale ad alta densità e temperatura. Diverse e convincenti sono le conferme della sua validità, in particolare la spiegazione della formazione degli elementi leggeri e la predizione delle loro abbondanze. Infatti, attorno al primo secondo dopo il *Big Bang*, la temperatura era di 10 miliardi di gradi, e l’universo era popolato da protoni, neutroni, elettroni, fotoni, e neutrini. Non solo la densità, ma anche la temperatura era molto elevata. Per qualche minuto vi fu una serie di reazioni nucleari che portò alla formazione di nuclei di elio e, in misura minore, di altri elementi leggeri. Le abbondanze osservate di questi elementi sono in buon accordo con quelle previste dalla teoria, anche se c’è attualmente un problema riguardante l’abbondanza osservata del Li^7 , che è 3-4 volte inferiore alle predizioni della nucleosintesi primordiale sulla base della densità di barioni (un termine che propriamente definisce le particelle composte da tre quark come protoni o neutroni) stimata attraverso le misure della radiazione cosmica di fondo effettuate dal satellite della NASA WMAP. Vi sono comunque diverse possibili spiegazioni: errori sistematici nelle misure, risonanze poco note nelle reazioni nucleari, o forse nuova fisica (Fields, 2011). Col procedere dell’espansione, e la diminuzione di densità e temperatura (la temperatura della radiazione è inversamente proporzionale al fattore di espansione), la nucleosintesi primordiale si è arrestata senza poter produrre gli elementi pesanti, che troviamo in abbondanza sulla Terra e che sono essenziali per la vita, come il carbonio, l’azoto o l’ossigeno. Questi elementi sono invece stati prodotti dalla fusione nucleare all’interno delle stelle e diffusi nello spazio dall’esplosione delle stelle di grande massa (supernovae).

Circa 380.000 anni dopo l’istante iniziale, la temperatura divenne sufficientemente bassa, attorno al migliaio di gradi, da permettere ad elettroni e protoni di legarsi stabilmente, formando atomi di idrogeno: questa è detta l’epoca della ricombinazione. Soltanto allora i fotoni poterono

propagarsi liberamente nello spazio e l'universo divenne "trasparente". Oggi continuiamo ad essere circondati da quei fotoni che, perdendo energia durante l'espansione, si trovano ora ad una temperatura di 2,73 gradi sopra lo zero assoluto, e costituiscono la cosiddetta radiazione cosmica di fondo. Questa radiazione fu scoperta casualmente nel 1965: il suo spettro di corpo nero e la sua isotropia confermano le predizioni della teoria del *Big Bang*. In particolare la proprietà di isotropia è in accordo con l'ipotesi che l'universo su grandi scale sia omogeneo. Al tempo stesso, nel 1992 il satellite COBE della NASA ha rivelato piccole fluttuazioni, di ampiezza 10^{-5} rispetto alla temperatura media, corrispondenti alle fluttuazioni primordiali di densità da cui sono nate, per accrescimento gravitazionale, le grandi strutture osservate. Nel 2000, le osservazioni condotte con un pallone-sonda in Antartico (esperimento italo-americano BOOMERANG, de Barnardis *et al.*, 2000) hanno misurato le fluttuazioni su scale più piccole, e rivelato la traccia delle oscillazioni acustiche del plasma all'epoca della ricombinazione: l'analisi di queste tracce permette di ricavare preziosissime informazioni sui parametri cosmologici, tra le quali la densità totale di materia, che è risultata pari² alla densità critica: dunque lo spazio ha una geometria euclidea. Dopo il già citato satellite della NASA WMAP, il satellite europeo PLANCK ha ottenuto misure ancora più precise della radiazione cosmica di fondo.

4.3. Formazione delle galassie e materia oscura

Abbiamo visto che l'universo locale non è omogeneo: negli ultimi decenni sono state osservate strutture complesse, grandi vuoti e filamenti di galassie, su scale di 100 milioni di anni-luce. La presenza di fluttuazioni nella radiazione cosmica di fondo conferma lo scenario dell'accrescimento gravitazionale delle strutture, ma c'è un problema con la loro ampiezza. Infatti le fluttuazioni sono così piccole, che non ci sarebbe stato il tempo per formare le galassie e le strutture che si osservano oggi con la sola materia barionica. È qui che si rende necessario l'intervento della materia oscura.

Nell'universo è effettivamente presente una grande quantità di materia che noi non vediamo, ma che possiamo rivelare indirettamente studiando il

² L'impressionante lista dei parametri cosmologici misurati da WMAP, in combinazione con altri tipi di osservazione, si veda <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/parameters.cfm>. La pagina web della missione Planck è invece al seguente indirizzo: <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=Planck>.

moto delle stelle e del gas nelle galassie, o delle galassie stesse negli ammassi. Si stima che nelle galassie vi sia ~10 volte più massa di quella che noi possiamo osservare sotto forma luminosa. Negli ammassi di galassie si misura addirittura una massa ~100 volte superiore a quella visibile sotto forma di galassie. Parte di questa materia oscura è gas caldo che si rende visibile soltanto alle osservazioni nella banda X, ma la maggior parte non può essere materia barionica, a causa dei limiti imposti dalla nucleosintesi primordiale. I neutrini sono un candidato possibile per la materia oscura, ed in effetti recenti esperimenti mostrano che sono dotati di massa, ma questa è troppo piccola per dare un contributo cosmologico dominante; inoltre si muovono a velocità relativistiche, il che non permette loro di formare strutture a piccola scala. Si ritiene invece che la materia oscura sia per la maggior parte costituita da particelle più massicce, suggerite dalle estensioni al modello standard della fisica delle particelle (il neutralino, oppure il neutrino sterile, per citarne un paio). In astrofisica, si parla di *Cold Dark Matter* (CDM), Materia Oscura Fredda, per indicare questa componente di materia ancora ignota, che si deve muovere a velocità non relativistiche e non interagisce se non attraverso la gravità. Questo tipo di materia avrebbe dunque cominciato a formare concentrazioni di materia per accrescimento gravitazionale prima della ricombinazione, senza provocare variazioni della temperatura della radiazione cosmica di fondo. Dopo la ricombinazione, le buche di potenziale degli aloni di materia oscura già formati avrebbero poi attratto la materia barionica, portando alla nascita di stelle e galassie. Grazie agli aloni di materia oscura, il processo di formazione delle strutture è dunque risultato accelerato. Per questo tipo di studi sono fondamentali le simulazioni numeriche, che permettono di riprodurre la formazione delle strutture e di confrontarne le proprietà statistiche con l'universo osservato.

5. L'inflazione

La cosmologia classica lascia però senza risposta un certo numero di interrogativi, legati sostanzialmente al fatto che assume come condizioni iniziali alcune importanti e specifiche proprietà del nostro universo. Rimangono in particolare prive di giustificazione: la presenza di fluttuazioni di densità in un universo che viene peraltro considerato omogeneo, e la loro origine; il fatto che in regioni distanti di universo, le quali secondo i modelli classici non avrebbero mai avuto alcun contatto causale, si misuri la stessa temperatura della radiazione cosmica di fondo; la piattezza della geometria dell'universo. Una spiegazione è invece data dalla teoria dell'inflazione,

nella quale si ipotizza che nei primi istanti dopo il *Big Bang* l'universo abbia avuto una fase di espansione accelerata. In tal caso, una regione microscopica di spazio avrebbe potuto dare origine a quello che oggi è l'intero universo osservabile, e qualunque regione noi oggi possiamo osservare sarebbe stata in contatto causale con le altre nel passato: ciò spiega l'alto grado di isotropia della radiazione cosmica di fondo. Inoltre, l'espansione rapidissima avrebbe reso trascurabile la curvatura spaziale rendendo piatta la geometria dell'universo. Infine, le particelle eventualmente presenti prima dell'inflazione (come i monopoli magnetici), sarebbero state diluite a tal punto da risultare inosservabili, mentre la materia che è oggi presente nell'universo si sarebbe formata dopo la fine di questa espansione esponenziale. Naturalmente l'inflazione è basata su un possibile processo fisico: potrebbe essere stata causata da una transizione di fase nell'universo primordiale, forse quella che ha portato alla rottura della Supersimmetria, associata all'esistenza di un campo scalare che, avendo pressione negativa, ha l'effetto repulsivo di una costante cosmologica.

Una predizione chiave della teoria è la forma dello spettro delle perturbazioni di densità iniziali, che risulta in accordo con le misure della radiazione cosmica di fondo. L'inflazione è divenuta così un'estensione "standard" del modello standard, anche se ne esistono numerose versioni.

6. L'accelerazione dell'Universo

L'attuale modello standard ha uno dei suoi fondamenti osservativi più importanti nella scoperta dell'accelerazione dell'universo.

Dati i parametri di un modello cosmologico (H_0 , densità di materia, densità di energia) si ha una relazione fra *redshift* e distanza. Cambiando i parametri del modello, cambia la relazione. Per determinare dunque qual è il modello che descrive il nostro universo si può utilizzare una classe di oggetti di luminosità intrinseca nota, in modo tale che misurando la luminosità apparente se ne possa determinare la distanza indipendentemente dal *redshift*. In un diagramma distanza – *redshift*, i punti seguono una certa curva, e il confronto con i vari modelli permette di determinare qual è quello che meglio si accorda con le osservazioni. Le Cefeidi possono essere osservate solo in galassie relativamente vicine e sono state utili per la determinazione della costante di Hubble, ma per andare oltre occorre un'altra classe di oggetti: le Supernovae.

Le Supernovae sono suddivise in due grandi classi, in base all'assenza (classe I) o alla presenza (classe II) delle righe dell'idrogeno nel loro spettro.

Nel 1985 fu identificata una sottoclasse della classe I, definita Ia, caratterizzata dalla presenza della riga del silicio ionizzato a 6150 Å. Si ritiene che una supernova di tipo Ia abbia origine dall'esplosione termonucleare di una nana bianca in un sistema binario, nel momento in cui la nana bianca riceve dalla sua compagna una quantità di materiale tale da farle superare la massa limite di Chandrasekhar di 1,4 masse solari. Queste supernovae raggiungono tutte un valore simile di luminosità al loro massimo, con una dispersione del 40%, dovuta alle differenze di composizione dell'atmosfera delle nane bianche. Il massimo di luminosità è però correlato con la curva di luce: maggiore è la luminosità massima, maggiore è il tempo di decadimento della curva di luce. Riscaldando dunque la curva di luce, si ottiene un indicatore di distanza quasi ideale. Verso la fine degli anni Novanta, due gruppi indipendenti hanno compiuto osservazioni sistematiche di Supernovae Ia, scoprendo che la luminosità apparente delle supernovae lontane è più debole di quella predetta da un modello che contiene solo materia. Ciò indica che esse sono più lontane del previsto, e che l'espansione sta accelerando: il modello che descrive meglio i dati è proprio quello con una costante cosmologica positiva. Queste osservazioni sono ben riprodotte da un modello piatto alla cui densità contribuiscono per il 25% la materia e per il 75% l'energia legata alla costante cosmologica (Leibundgut, 2001). Studi più recenti hanno confermato questi risultati.

Come gli elementi di un puzzle, diverse osservazioni convergono nel fornire un quadro coerente: le misure della materia rivelata direttamente o indirettamente, luminosa od oscura, presente nell'universo, confermano che la densità di materia è circa il 25% della densità critica; l'analisi della radiazione di fondo dà un valore della densità totale di materia pari alla densità critica; mentre grazie alle Supernovae sappiamo che più del 70% della densità non è materia, ma una forma di energia che sta facendo accelerare l'universo. Dato il valore attuale della costante di Hubble (~70 km/s/Mpc), un modello con densità critica ma senza costante cosmologica darebbe un'età dell'universo troppo piccola (meno di 10 miliardi di anni) se confrontata con quella delle stelle più vecchie; con il valore misurato della costante cosmologica l'età dell'universo risulta invece essere pari a circa 13,8 miliardi di anni.

7. La costante cosmologica e le sue alternative

7.1. Il problema della costante cosmologica

Per chi voglia approfondire i problemi che qui passerò rapidamente in rassegna, mi limito a segnalare il libro introduttivo ed accessibile di Gasperini (2008) sulla cosmologia basata sulla teoria delle Supercorde e quello specialistico di Amendola e Tsujikawa (2010) sull'energia oscura.

L'interpretazione più immediata dell'accelerazione dell'espansione e della componente dominante della densità dell'universo è la costante cosmologica. Infatti nelle equazioni di Einstein, la costante cosmologica Λ rappresenta la curvatura dello spazio-tempo, in assenza di materia ed energia. Ma in maniera del tutto equivalente può essere spostata al membro destro delle equazioni ed inglobata nel tensore energia-impulso: è così possibile interpretarla come l'energia dello vuoto. L'effetto repulsivo è dovuto alla presenza di un termine di pressione: il contributo all'accelerazione o decelerazione dell'espansione dipende infatti da un termine $-(\rho + 3 P/c^2)$. Per la materia, $P=0$, dunque il termine vale $-\rho$, dove il segno meno indica una decelerazione; per la costante cosmologica l'equazione di stato è $P = -\rho c^2$, e si ha dunque un contributo netto di segno opposto alla materia pari a $+2\rho$, ovvero una repulsione.

Per quanto riguarda il valore dell'energia del vuoto, le osservazioni implicano:

$$\rho_{\Lambda} \equiv \Lambda / (8 \pi G) \leq 2 \times 10^{-10} \text{ erg/cm}^3$$

Il valore dell'energia del vuoto che ci si aspetterebbe invece dalla teoria assumendo un taglio alla scala dell'energia di Planck, è invece:

$$\rho_{\text{Planck}} \sim 2 \times 10^{110} \text{ erg/cm}^3$$

Data l'enorme differenza di 120 ordini di grandezza, il valore dell'energia del vuoto è talvolta citato come la più errata predizione nella storia della fisica!

Un secondo possibile problema è la coincidenza che la densità di energia del vuoto appaia oggi paragonabile (in realtà circa due volte superiore) alla densità di energia della materia. Infatti, mentre la densità di energia del vuoto rimane costante nel tempo, la densità di materia cala in proporzione all'inverso del cubo del fattore di espansione.

In passato, dunque, la densità di materia era la componente dominante ed ha inizialmente rallentato l'espansione, e solo a partire da un redshift di circa 0.7 è prevalso l'effetto repulsivo della densità dell'energia oscura.

7.2. La quintessenza

Dati i problemi posti dalla costante cosmologica, sono state e sono attualmente esplorate strade alternative. Una di queste ricorre all'ipotesi di un nuovo campo scalare: in effetti, se è concepibile che un campo scalare abbia prodotto in passato un'accelerazione dell'espansione, perché non cercare una spiegazione analoga anche per l'epoca attuale? A differenza della costante cosmologica, la densità di energia associata a questo campo è variabile nello spazio (a grandi scale) e nel tempo. Questa ipotetica componente dell'universo è stata battezzata con il nome di "quintessenza", il nome latino del quinto elemento aristotelico. L'evoluzione nel tempo della densità di energia del campo scalare potrebbe essere legata a quella della materia (*tracking solution*), una proprietà che serve a spiegare i valori attualmente simili della densità di materia e di quella dell'energia oscura, senza però eliminare la coincidenza legata al fatto che l'accelerazione è cominciata recentemente. Come nel caso dell'inflazione, si possono immaginare numerosi modelli di quintessenza, che danno luogo a diverse equazioni di stato: analogamente alla costante cosmologica, anche la quintessenza ha pressione negativa, ma il rapporto fra pressione e densità, $w=P/c^2$, è superiore a -1 e inferiore a -1/3 (che è la condizione per cui ci sia l'accelerazione dell'espansione), e può variare col tempo. I limiti osservativi impongono un valore di w molto vicino a -1, ovvero molto simile a quello corrispondente alla costante cosmologica.

7.3. Modifiche alla gravità

Sappiamo che la relatività generale non può essere la teoria ultima, dato che non include i fenomeni quantistici ed è inapplicabile a scale microscopiche (dunque agli istanti iniziali del Big Bang o al centro di un buco nero), e può essere vista come una teoria efficace. La domanda è allora se gli effetti che attribuiamo all'energia oscura non richiedano invece un'altra teoria della gravità. Ci sono diversi approcci in questa direzione: abbiamo le teorie scalari-tensoriali (il cui esempio storico è la teoria di Brans-Dicke), e quelle $f(R)$, dove l'azione di Einstein-Hilbert non dipende direttamente dallo scalare di Ricci R ma da una sua funzione $f(R)$.

È possibile poi che l'interpretazione della costante cosmologica richieda un salto concettuale più radicale, come quello costituito dai modelli di universo a brana (*braneworld models*). L'idea che vi siano altre dimensioni oltre alle quattro (tre spaziali e una temporale) previste dalla relatività fu avanzata nel 1919 dal matematico tedesco Theodor Kaluza e ripresa dal fisico svedese Oskar Klein nel 1926. Il loro contributo ha rappresentato un tentativo fallito di unificare relatività ed elettromagnetismo, ma si è invece rivelato fruttuoso nell'ambito della Supersimmetria e della teoria delle Supercorde, dove le particelle non sono più rappresentate come dei punti ma come corde in vibrazione.

Lo sforzo di cercare una teoria fondamentale che unifichi la gravità alle altre interazioni fondamentali ha condotto allo sviluppo della teoria M, che unifica le precedenti versioni della teoria delle supercorde e la supergravità, e nella quale lo spazio-tempo ha 11 dimensioni, 10 spaziali e una temporale. Il motivo per cui non ci accorgiamo dell'esistenza di dimensioni supplementari riprende l'idea già avanzata a suo tempo da Klein: le dimensioni "extra" sono compatte, e lo spazio ci appare a tre dimensioni semplicemente perché le dimensioni supplementari sono troppo piccole per essere percepite.

Si arriva così all'idea che il nostro universo sia una "ipersuperficie" (detta brana, una generalizzazione di membrana) a tre dimensioni spaziali in uno spazio a più dimensioni, detto *bulk*. Un aspetto importante di questo scenario è che le interazioni fisiche operano solo sulla nostra brana e non si diffondono nel *bulk*, tranne la gravità (e qualche particella esotica). Si giustifica così anche il fatto che la gravità sia un'interazione fondamentale così debole rispetto alle altre tre. 6 dimensioni spaziali possono essere compatte, lasciando dunque uno spazio-tempo a 4 dimensioni spaziali e una temporale. I vincoli sull'extra-dimensione spaziale sono dati dalle deviazioni dalla legge di gravitazione universale, verificata fino alla scala di un millimetro. Questi vincoli possono però essere aggirati: nel modello di Randall-Sundrum, ad esempio, la geometria dello spazio-tempo del *bulk* non è piana e il *bulk* ha una costante cosmologica negativa: in questo modo, sulla brana le deviazioni della legge di Newton rimangono piccole e in accordo con i limiti sperimentali anche se l'extra dimensione è infinita. In questo scenario, la costante cosmologica positiva da noi misurata è il residuo della somma fra la costante cosmologica negativa del *bulk* e la tensione della nostra brana. Però, sotto un'altra forma, si ritrova una coincidenza: come mai la costante cosmologica del *bulk* e quella della brana si compensano quasi esattamente? Un altro modello, quello epirotico di

Steinhardt e Turok (2002), reinterpreta il *Big Bang* come lo scontro fra due brane e resuscita l'idea di un universo oscillante.

Come è evidente, queste proposte sono altamente speculative, ed appare prematuro dare molto credito a modelli che non sono basati su una teoria coerente e pienamente sviluppata. Per discriminare i vari modelli proposti, un test importante è la misura del valore del parametro w nell'equazione di stato, ad esempio attraverso la misura della distorsione delle immagini delle galassie dovuta all'effetto di lente gravitazionale della distribuzione di materia che si trova fra noi e la galassia osservata (*weak gravitational lensing*) oppure misurando la correlazione e lo spettro di potenza delle galassie in un vasto volume dell'universo; in questo quadro, il progetto più importante è la missione spaziale EUCLID dell'ESA, che ha una significativa partecipazione italiana (Cimatti e Scaramella, 2012).

7.4. Vuoto e *Backreaction*

Veniamo ora a quello che nella lista di possibilità elencate rappresenta una sorta di *anticlimax*: supponiamo che l'energia oscura non esista e che la relatività generale sia corretta: è possibile trovare altre giustificazioni dell'accelerazione dell'universo? La risposta è in linea di principio affermativa.

Una possibile spiegazione è che noi ci troviamo in una regione dell'universo di densità inferiore alla media: un grande vuoto, insomma. Di conseguenza questa regione si espanderebbe più rapidamente del resto dell'universo. Ma siccome osservando più lontano andiamo indietro nel tempo, avremmo l'illusione che nel passato l'universo si espandesse più piano: staremmo confondendoci, in sostanza, fra spazio e tempo. Ci sono naturalmente limiti imposti da altre osservazioni, in particolare da quelle della radiazione cosmica di fondo. Naturalmente una caratteristica non appetibile di questa ipotesi è la sua natura "anticopernicana".

Un'altra possibile spiegazione è data dalla *backreaction*, che riguarda gli effetti dovuti alle disomogeneità sull'espansione. Infatti, come si è visto, i modelli cosmologici attraverso i quali stimiamo distanze e tempi a partire dalle quantità osservate sono soluzioni delle equazioni della relatività generale valide per un fluido omogeneo e isotropo. Però l'universo ha progressivamente sviluppato delle disomogeneità: forse otterremmo risultati diversi se prima risolvessimo le equazioni della relatività generale per un universo non omogeneo e facessimo la media successivamente. Secondo alcuni, le deviazioni dalla metrica di Robertson-Walker potrebbero effettiva-

mente produrre un effetto di accelerazione. Ci sono però sottili problemi tecnici ed è in corso un dibattito sulla reale rilevanza della *backreaction* per il problema dell'accelerazione.

8. Il principio antropico

Il principio antropico, la cui storia si ritrova nel classico libro di Barrow e Tipler (1988), sembrava inizialmente destinato a rimanere ai margini del dibattito scientifico, in una confusione di interpretazioni e varianti diverse (Bettini, 2001). Negli ultimi anni si è definita invece una ben precisa applicazione del principio antropico legata al concetto di multiverso, che ritengo abbia una sua plausibilità e non a caso è vista quantomeno con favore da molti specialisti.

Il principio copernicano (che, sia detto per inciso, non sarebbe certamente stato sottoscritto da Copernico) afferma che noi *non* siamo *osservatori privilegiati* nell'universo. Ma al tempo stesso *non* ci troviamo in un *luogo qualunque* dell'universo, indistinguibile da qualsiasi altro luogo. Siamo in orbita attorno ad una stella di tipo G vecchia di alcuni miliardi di anni, su un pianeta nella fascia di abitabilità, dove l'acqua si trova nelle tre fasi solida, liquida e gassosa. Tralasciando la possibilità che la vita possa nascere in condizioni completamente diverse da quelle terrestri, possiamo assumere che noi non siamo in condizioni privilegiate o diverse rispetto ad altri osservatori nell'universo, ma che al tempo stesso gli osservatori risiedono in regioni di universo che sono speciali rispetto ad altre: in sintesi, *essere un osservatore qualunque non significa essere in un luogo qualunque e in un tempo qualunque*.

L'accento posto sulla peculiarità delle condizioni che consentono la vita è alla base del principio antropico debole: i valori di tutte le quantità fisiche e cosmologiche che misuriamo non sono ugualmente probabili, ma sono vincolati dal fatto che devono esistere luoghi in cui la vita basata sul carbonio ha potuto evolvere e che l'universo deve essere abbastanza vecchio da aver permesso questa evoluzione. Si noti dunque che, contrariamente a quanto generalmente si afferma, il principio copernicano e quello antropico non sono in contraddizione, ma complementari: il principio copernicano riguarda l'equivalenza degli osservatori, mentre il principio antropico riguarda la specificità delle condizioni in cui si trovano gli osservatori rispetto al resto dell'universo.

In questa sua forma non controversa, il principio antropico permette di giustificare alcune coincidenze numeriche che sembrerebbero altrimenti

sorprendenti. Un esempio spesso citato è la predizione dell'esistenza di un livello di risonanza del carbonio da parte di Fred Hoyle. Il carbonio, che è fondamentale per l'esistenza della vita sulla Terra, è prodotto all'interno delle stelle, ma negli anni '50 i calcoli mostravano che le reazioni coinvolte nella sua produzione erano troppo lente per giustificare l'abbondanza osservata. Hoyle intuì che si doveva ipotizzare l'esistenza di un livello di risonanza ad una energia ben precisa che rendesse efficienti quelle reazioni, e indusse i fisici a verificarne l'esistenza, che fu poi confermata. Questo esempio ci porta ad affrontare un aspetto più profondo del principio antropico. Una leggera differenza di energia della risonanza avrebbe infatti portato all'assenza di carbonio; ma in ultima analisi quella risonanza dipende dal valore delle costanti fondamentali. L'esempio è tutt'altro che unico o isolato: i cosmologi si sono da tempo resi conto che, se i valori delle costanti fondamentali della fisica fossero diversi anche di poco, non si avrebbe un universo con le condizioni necessarie per la nascita della vita. Si può obiettare che è difficile prevedere tutte le possibili combinazioni ottenibili variando tutte le costanti fisiche: sembra però probabile che i valori che permettono l'esistenza della vita (naturalmente si sottintende che si arrivi alla vita intelligente e ad osservatori dotati di autocoscienza) siano molto rari. Una di queste costanti è proprio la costante cosmologica: se il suo valore fosse stato un po' maggiore, l'universo avrebbe cominciato subito la sua espansione accelerata e non vi sarebbe stato il tempo per la nascita delle galassie. Di qui la versione forte del principio antropico, secondo la quale le costanti fondamentali della fisica *devono* avere dei valori che permettono la nascita della vita intelligente in qualche momento della storia dell'universo. Ma che cosa significa questa affermazione? Escludendo l'interpretazione teologica, dunque extrascientifica, rimane un'interpretazione di tipo statistico. L'ipotesi è che possano esistere altri universi, e che i valori delle costanti della fisica possano variare da un universo all'altro (si veda Carr, 2007). Naturalmente c'è stata una forte riluttanza a considerare seriamente un'ipotesi del genere, che si è progressivamente affermata per mancanza di alternative. Infatti si è visto che la teoria delle Supercorde non appare in grado di spiegare in maniera univoca le proprietà del nostro universo: predice anzi una quantità enorme, $\sim 10^{500}$, di possibili universi con proprietà fisiche differenti, e non appare in grado di poter selezionare da questo cosiddetto "Paesaggio" (*Landscape*) i valori che corrispondono al nostro universo: ad esempio il valore piccolo ma non nullo della densità di energia del vuoto. Si può allora pensare che tutte queste possibilità del Paesaggio si realizzino in diversi universi, ad esempio

attraverso l'inflazione caotica di Andrei Linde, dove, essendo il vuoto metastabile, si generano a cascata nuovi universi (Susskind, 2003).

Se i valori delle costanti fondamentali non sono dunque rigidamente determinati da una teoria fondamentale, ma possono variare secondo una legge probabilistica da universo a universo, il risultato è che, per quanto improbabili siano i valori che portano alla formazione della vita, per un evidente principio di selezione solo questi potranno essere osservati: negli altri universi, rimasti sterili, non vi sarà invece nessuno che li possa osservare. Un esempio è proprio il valore della costante cosmologica, predetto da Steven Weinberg piccolo ma non nullo proprio sulla base di un ragionamento antropico (Weinberg, 1989).

9. Conclusioni

Abbiamo visto gli straordinari progressi della cosmologia negli ultimi decenni. I risultati ottenuti dal confronto fra osservazioni, teoria e simulazioni hanno decretato il successo di quello che viene definito il modello standard o "*concordance model*" e indicato come Λ CDM, dato che è caratterizzato dalla presenza di una costante cosmologica e della materia oscura fredda. Quasi ironicamente, però, il modello cosmologico standard richiede una fisica non standard, ponendoci di fronte a profondi problemi riguardanti la natura delle componenti di materia ed energia che sono dominanti nell'universo e di cui ignoriamo la natura. Al tempo stesso, le nostre osservazioni sono limitate dalla distanza alla quale è stata emessa la radiazione cosmica di fondo che riceviamo oggi da tutte le direzioni e che costituisce un ultimo orizzonte; questa situazione ricorda quella degli antichi astronomi di fronte alla sfera delle stelle fisse, anche se in quel caso il limite era illusorio.

Si può constatare un cambiamento di attitudine filosofica nel campo della cosmologia scientifica. In effetti, all'epoca della cosmologia classica e del dibattito fra teoria dello stato stazionario e *Big Bang*, vi era la convinzione diffusa che con la teoria della relatività generale si potesse arrivare ad una descrizione dell'universo nella sua totalità, e che non avesse senso chiedersi che cosa ci fosse prima del *Big Bang*. Ora però, nel corso di un processo che è già avvenuto in passato, ad esempio quando si è scoperto che la nostra galassia non rappresentava l'intero universo ma che certe nebulose erano altre galassie (non a caso battezzate per un certo periodo universi-isola), si affaccia l'ipotesi dell'esistenza di altri universi, con proprietà differenti dal nostro, portando ad una confusione semantica dovuta

al fatto che chiamiamo universo qualcosa che non è la totalità di ciò che esiste.

Ho il sospetto che questo sia il limite autentico della cosmologia scientifica. La scienza, contrariamente alle affermazioni di quei cosmologi che affermano di spiegare la nascita dell'universo dal nulla, ignari evidentemente della lezione di Parmenide, permette invece di ipotizzare la nascita dell'universo dal vuoto: un vuoto fisico, brulicante di particelle virtuali, descritto da leggi fisiche e dunque legato all'Essere, non al Nulla. Ma allorché la scienza cerca di spiegare la nascita dell'universo da qualcos'altro, inevitabilmente questo qualcos'altro ci obbliga a ridefinire la nostra idea di totalità.

Non vi è dubbio, comunque, che se in futuro nuove teorie ci offriranno una nuova visione dell'universo, la teoria del *Big Bang* rimarrà una descrizione valida entro i suoi limiti, così come entro i suoi limiti la fisica newtoniana rimane ancora oggi una valida descrizione del mondo fisico che ci circonda.

Riferimenti bibliografici

Amendola, L., & Tsujikawa, S., 2010, *Dark Energy: Theory and Observations*, Cambridge, Cambridge University Press.

Barrow J., & Tipler F., 1988, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford, Oxford University Press.

Bettini, S., 2001, *Il labirinto antropico*. On-line:
www.swif.uniba.it/lei/saggi/antropico/indice.htm

Bonometto, S., 2008, *Cosmologia e Cosmologie*, Bologna, Zanichelli.

Cappi, A., 1994, "Edgar Allan Poe's Physical Cosmology", *The Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society*, vol. 35, pp. 177-192.

Carr, B. (ed.), 2007, *Universe or Multiverse?*, Cambridge, Cambridge University Press.

Cimatti, A., & Scaramella, R., 2012, "Euclid: a Space Survey Mission for Dark Energy and High Precision Cosmology", *Memorie della Società Astronomica Italiana*, vol. 19, p. 314. On-line:
<http://sait.oat.ts.astro.it/MSAIS/19/PDF/314.pdf>

- de Bernardis, P., *et al.* 2000, *Nature*, 404, pp. 955-959.
- Fields, B.D., 2011, “The Primordial Lithium Problem”, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol.61, pp. 47-68 (arXiv:1203.3551v1).
- Freeth T. *et al.* 2006, “Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism”, *Nature*, 444, p. 587.
- Gabrielli, A., & Sylos Labini, F., & Joyce, M., & Pietronero, L., 2005, *Statistical Physics for Cosmic Structures*, Singapore, Springer.
- Gasperini M., 2008, *The Universe before the Big Bang: Cosmology and String Theory*, Singapore, Springer.
- Harrison, E., 1989, *Darkness at Night. A Riddle of the Universe*, Harvard, Harvard University Press.
- Kragh, H., 1999, *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe*, Princeton, Princeton University Press.
- Leibundgut, B., 2001, “Cosmological Implications from Observations of Type Ia Supernovae”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol.39, pp. 67-98.
- Mukhi, S., 2011, *String Theory: a Perspective over the Last 25 Years*, Classical and Quantum Gravity 28 153001 (arXiv:1110.2569).
- Rovelli, C., 2011, *Quantum Loop Gravity: the First 25 Years*, Classical and Quantum Gravity, 28 153002 (arXiv:1012.4707).
- Russo, L., 1999, *La rivoluzione dimenticata*, Milano, Feltrinelli (*The Forgotten Revolution*, Singapore, Springer-Verlag, 2004).
- Steinhardt, P.J., & Turok, N., 2002, *Science*, 296, p. 1436.
- Susskind, L., 2003, “The Anthropic Landscape of String Theory”, *The Davis Meeting On Cosmic Inflation*, p. 26 (arXiv:hep-th/0302219).
- Weinberg, S., 1989, “The Cosmological Constant Problem”, *Review of Modern Physics*, 61, p. 1.