

SABINO MATARRESE*

Universi separati, universi silenziosi e... l'universo osservabile

La ricerca di simmetria nei fenomeni naturali ha svolto un ruolo di enorme importanza nello sviluppo della fisica per la gran parte del secolo scorso, diventando un vero e proprio principio guida nella ricerca teorica, ed esercita tuttora un notevole fascino sulla comunità dei fisici. L'idea di fondo è che alcune simmetrie, dette "interne", ovvero non attinenti allo spazio-tempo nel quale i fenomeni avvengono, ma alle caratteristiche dinamiche proprie delle interazioni tra le particelle, permettano di stabilire una connessione intima tra differenti fenomeni fisici, consentendo una lettura unificata di tutte le forze agenti in Natura. Tale unificazione – se compiuta – permetterebbe di interpretare le quattro interazioni, elettromagnetica, nucleare debole, nucleare forte e gravitazionale, come differenti manifestazioni di un'unica interazione fondamentale. Questo approccio si è rivelato estremamente produttivo, consentendo l'unificazione delle forze elettromagnetica e nucleare debole, che ad energie sufficientemente elevate si manifestano come un'unica interazione "a lungo range", chiamata "eletro-debole". Successivamente, la stessa procedura ha portato alla scoperta della loro unificazione con la forza nucleare forte, la cosiddetta "Grande Unificazione".

L'idea di unificare sotto l'egida di una simmetria che tutto descrive le forze agenti in Natura si scontra, però, con la difficoltà – sin qui apparsa insormontabile – di ottenere una teoria coerente della gravità quantistica, pre-condizione per la sua unità con le altre forze. I molteplici tentativi in questa direzione, con l'introduzione del concetto di super-simmetria, l'ausilio di extra-dimensioni (oltre alle 3 + 1 dello spazio-tempo) e l'estensione del concetto di particella puntiforme, con l'introduzione di "stringhe" e "membrane", pur avendo riportato indubbi successi sul piano formale, non sono finora riusciti ad ottenere

* Professore ordinario di Astrofisica e Cosmologia, Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei", Università degli Studi di Padova.

La bellezza possibile

le necessarie conferme sperimentali né, soprattutto, hanno raggiunto l’obiettivo dell’unificazione delle forze elettromagnetiche, forte e debole con la quarta interazione, quella gravitazionale, sin qui descritta con successo da una teoria “classica” (vale a dire non quantistica), la Relatività Generale di Einstein. È lecito domandarsi se il principio ispiratore delle teorie unificate delle particelle elementari, basato sull’idea di elementi comuni semplici da cui discenderebbero tutti i fenomeni naturali, dopo decenni di indubbi successi, non inizi a mostrare i primi “acciacci” dell’età.

In questo contributo, discuterò di come la ricerca di simmetria abbia per molti aspetti ispirato la ricerca teorica anche nel mio campo di indagine, la cosmologia, e di come stiano gradualmente emergendo vari tentativi di superare questa visione, varcando i confini angusti di una rigida regola di simmetria, stabilita nella prima metà del secolo scorso e tuttora ampiamente applicata nell’analisi, e conseguente interpretazione teorica, dei dati osservativi. Nella mia personale esperienza di ricerca nell’ambito della cosmologia teorica, l’idea se non di abbandonare, almeno di rivedere in senso approssimato e meno rigido, questo onnipresente principio di simmetria, mi ha guidato consapevolmente, e più spesso inconsapevolmente, da almeno trent’anni, da quando cioè iniziai a studiare e catalogare fenomeni legati alla violazione dell’ipotesi Gaussiana nella statistica delle perturbazioni cosmologiche, per poi interessarmi alle soluzioni anisotrope e inomogenee delle equazioni di Einstein, continuando poi con l’analisi della cosiddetta *back-reaction* (“contro-reazione”) delle disomogeneità cosmiche sull’espansione dell’universo. In queste pagine, più che descrivere queste idee singolarmente, cercherò di illustrare il contesto scientifico all’interno del quale esse si sono sviluppate.

Invarianza per rotazioni e traslazioni spaziali

Supponiamo che ci si chieda di descrivere quello che ci circonda, sulla base dell’esperienza quotidiana. Parleremmo di persone, cose, etc. ed avremmo bisogno di utilizzare un gran numero di informazioni dettagliate per rendere conto della complessità del mondo circostante. La cosmologia, in effetti, non pretende né di descrivere né di predire in dettaglio tale livello di complessità, ma ambisce a render conto delle condizioni fisiche che hanno reso possibile la complessità, focalizzandosi sulle scale più grandi, quelle astronomiche, o più esattamente quelle galattiche e super-galattiche, dalle quali si assume discendano molti dei fenomeni che avvengono ai livelli più dettagliati. Per circoscrivere il campo di indagine, è opportuno aggiungere che, a livello cosmologico, delle quattro interazioni sopracitate,

la sola che agisce in modo coerente dalla scala galattica in su è quella gravitazionale.

Per certi aspetti, la cosmologia si situa all'estremo opposto delle fisica delle particelle elementari, in quanto ambisce a descrivere fenomeni macroscopici sulle scale più grandi che possiamo osservare, per altri aspetti essa ne utilizza gli strumenti di interpretazione e fornisce un laboratorio privilegiato per la verifica delle leggi che governano le interazioni tra le particelle elementari. Queste ci consentono, ad esempio, di conoscere quale fosse lo stato termico dell'universo, fin dai primi istanti: sappiamo quindi che l'universo ha attraversato fasi di altissima temperatura nel suo passato remoto e che, in tali condizioni, l'unificazione delle forze, almeno per quanto attiene alle tre interazioni descritte dalle teorie di Grande Unificazione, ha avuto modo di dispiegarsi pienamente. Via via che l'universo è invecchiato, la simmetria interna delle interazioni fondamentali si è ridotta ("spontaneamente rotta"), fino ad arrivare allo stato attuale di completa diversificazione tra le quattro forze della Natura.

L'idea di base della cosmologia moderna è quindi che, partendo da condizioni "iniziali" – relative alla nascita dell'universo – di estrema semplicità e simmetria, descrivibili per mezzo di pochissimi parametri, si sia arrivati, in poco meno di 14 miliardi di anni, all'universo attuale, caratterizzato dalla totale diversificazione tra le interazioni fondamentali e dall'esistenza di una gerarchia di sistemi astronomici complessi, che, partendo dalla scala più grande, comprendono super-ammassi, ammassi e gruppi di galassie. Le condensazioni di materia hanno dato luogo alla nascita delle galassie, all'interno delle quali si sono poi formate le stelle. Sappiamo inoltre che attorno ad alcune stelle orbitano sistemi planetari e che su alcuni di questi pianeti, come la nostra Terra, sono state possibili condizioni ambientali favorevoli all'origine della vita, nelle sue varie forme. La storia cosmica procede quindi dal semplice al complesso, dal disordine all'ordine, dalla massima simmetria alla graduale perdita di simmetria.

Prima di entrare nel merito di queste affermazioni, a prima vista così generali e perfino pretenziose, è necessario descrivere, almeno a sommi capi, il modo in cui la cosmologia contemporanea affronta la descrizione globale dell'universo. La moderna descrizione delle leggi del cosmo si basa sul modello cosmologico "standard", detto "modello di Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker" (FLRW), dal nome dei suoi principali proponenti. Questo è basato sulle leggi della Relatività Generale di Einstein e sul cosiddetto "Princípio Cosmologico" – naturale estensione del Princípio Copernicano – secondo il quale l'universo appare isotropo (cioè con le stesse proprietà in tutte le direzioni) ad ogni osservatore "co-movente". Possiamo enunciare questo principio

La bellezza possibile

come l'assunzione di omogeneità – invarianza per traslazioni spaziali – ed isotropia – invarianza per rotazioni – a “tempo cosmico” fissato. Il Principio Cosmologico è l'affermazione dell'esistenza di una *simmetria* cosmica globale, detta “massimale”, per rotazioni e traslazioni spaziali, che caratterizza lo spazio tridimensionale ad ogni dato tempo cosmico. Affinché un osservatore cosmico possa effettivamente verificare sperimentalmente tale simmetria, egli deve essere “co-movente”, ovvero saldamente ancorato alla materia-energia cosmica. Occorre però fare una precisazione che ci riporta all'ossevazione con la quale ho aperto questo paragrafo: omogeneità e isotropia vanno intese solo come proprietà medie dell'universo osservabile. Queste proprietà sono verificate solo se immaginiamo di smussare idealmente le irregolarità (ovvero cancellare le complessità) dell'universo su una scala spaziale estremamente grande, dell'ordine di qualche centinaia di Megaparsec (il Megaparsec, o brevemente Mpc, corrisponde ad un milione di parsec, circa 3 milioni di anni-luce).

Su scale di distanza inferiori a qualche centinaia di Mpc l'universo è caratterizzato dalla tendenza della materia ad ammassarsi in una gerarchia di strutture cosmiche: galassie, gruppi, ammassi e super-ammassi di galassie tendono a formarsi laddove la materia (detta “oscura”) si addensa maggiormente: filamenti e membrane di materia si estendono per decine e centinaia di Mpc, formando una gigantesca “tela cosmica” (*cosmic web*) sulla quale troviamo distribuite le galassie, al cui interno trovano poi posto le stelle, i pianeti, etc.. All'estremo opposto, l’“orizzonte cosmologico”, una superficie sferica ideale, con raggio di alcune migliaia di Mpc, centrata su ogni osservatore cosmico co-movente, segna i confini dell'universo conoscibile. Solo tra questi due estremi, ovvero per scale di lunghezza comprese tra qualche centinaia e qualche migliaia di Mpc, è lecito descrivere l'universo come omogeneo e isotropo, in accordo con il Principio Cosmologico. Al di là dell'orizzonte cosmologico, l'assunzione di isotropia e omogeneità è puramente basata su un pregiudizio teorico, non potendo esistere, nemmeno in linea di principio, alcuna osservazione capace di confermare o falsificare tale ipotesi.

Il modello cosmologico vigente rende perfettamente conto dell'espansione universale, regolata dalla cosiddetta Legge di Hubble, secondo la quale tutte le galassie (con l'eccezione di quelle più prossime a noi) si allontanano dalla nostra galassia con velocità approssimativamente proporzionale alla loro distanza da noi. Esso inoltre ci consente di ricostruire la storia termica dell'universo con estrema precisione. Se ne deduce che il cosmo ha attraversato una fase primordiale “calda”, caratterizzata da temperatura e densità così elevate da permettere fenomeni fisici non riproducibili nei nostri laboratori terrestri. L'estra-

polazione di queste caratteristiche all'indietro nel tempo porta infine all'idea del *big bang*, una sorta di grande scoppio iniziale da cui tutto avrebbe avuto origine: spazio, tempo, materia e radiazione. Il *big bang*, la cui inevitabilità è prescritta da alcuni fondamentali teoremi della Relatività Generale (e.g. Hawking & Ellis 1974), corrisponde ad una singolarità dello spazio-tempo, un istante in prossimità del quale densità di energia cosmica, e – di conseguenza – curvatura dello spazio-tempo, tendono ad un valore infinito. Se tale singolarità iniziale sia davvero esistita o se si tratti solo di un'estrapolazione delle leggi della fisica classica (*i.e.* non quantistica) ad un regime nel quale l'interazione gravitazionale stessa necessita di una trattazione quantistica, è questione per molti aspetti marginale: tutto avviene “come se” nel passato l'universo avesse davvero sperimentato un *big bang*.

Orizzonte cosmologico e inflazione

L'*orizzonte cosmologico* è definito come la distanza percorsa idealmente da un raggio di luce dall'istante del *big bang* fino ad un dato tempo cosmico. È facile dimostrare che, nell'ambito del modello cosmologico standard, tale distanza è limitata e cresce col tempo, più velocemente di quanto non cresca la distanza tra oggetti cosmici per l'espansione universale. Questo risultato conduce ad un paradosso noto come “problema dell'orizzonte”: ogni osservatore cosmico può ricevere messaggi solo da una regione dello spazio la cui dimensione massima è quella dell'orizzonte cosmologico; col passare del tempo tale osservatore potrà ottenere informazioni da regioni sempre più distanti dell'universo. Il paradosso sta nel fatto che ogni nuova informazione che ci giunge dalle regioni più remote del cosmo, attraversando il nostro orizzonte, appare essere perfettamente coerente con le proprietà fisiche dell'universo precedentemente conosciuto. Ad esempio: l'orizzonte cosmologico attuale è assai più esteso dell'orizzonte al tempo del *last scattering*, ovvero dell'ultima interazione efficace tra radiazione e materia, epoca alla quale è stata prodotta la *radiazione cosmica di fondo* nella banda spettrale delle microonde (*Cosmic Microwave Background*: CMB). Se un osservatore misura la temperatura della CMB in direzioni opposte, troverà la stessa temperatura (a meno di una piccola correzione di pochi millesimi, chiamata “anisotropia di dipolo”, che trae origine dal nostro moto rispetto alla CMB, e di differenze intrinsche in temperatura di qualche milionesimo, che qui non descriveremo). Ma la radiazione cosmica, proveniente da due direzioni opposte del cielo, essendo stata emessa all'epoca del *last scattering*, proviene da regioni del cosmo che non potevano comunicare tra loro al momento dell'emissione, in quanto la loro mutua distanza era maggiore dell'o-

La bellezza possibile

rizzonte cosmologico di allora. Per quale motivo la CMB testimonia di regioni caratterizzate dalla stessa temperatura? Come hanno potuto tali regioni concordare le medesime proprietà fisiche, pur non avendo mai comunicato tra loro? Una spiegazione possibile di tale uniformità nelle condizioni del nostro universo è che essa sia stata impartita già nelle condizioni iniziali, ovvero che il cosmo sia *nato* omogeneo e isotropo. Questa sarebbe tuttavia una spiegazione del tutto insoddisfacente: un universo che fosse nato con un così elevato grado di simmetria sarebbe del tutto improbabile: se immaginassimo di selezionare le condizioni iniziali del nostro universo estraendole *a caso* tra tutte le possibili condizioni iniziali cosmiche, non ci capiterebbe *mai* di estrarre i dati iniziali corrispondenti ad un universo omogeneo e isotropo quale quello in cui viviamo!

Come risolvere quindi questo paradosso? Una brillante soluzione venne proposta all'inizio degli anni Ottanta da vari studiosi, tra cui Alan Guth (1981), il quale propone un modello che lui stesso chiama *inflazione cosmologica* e che enorme fortuna avrà fino ai giorni nostri. Per poterla comprendere, occorre fare una premessa. È assai probabile che l'universo nelle sue prime fasi fosse invece caratterizzato da un alto livello di disomogeneità. Conviene quindi ipotizzare che nel corso della storia cosmica vi siano stati processi fisici che hanno consentito lo svilupparsi di regioni sufficientemente "levigate", ovvero caratterizzate da un grado di omogeneità e isotropia compatibile con i vincoli posti dalle osservazioni; è dall'interno di una di queste regioni che oggi noi possiamo osservare il cosmo e interrogarci sulle sue leggi. Occorre perciò trovare un meccanismo fisico capace di smussare le disomogeneità iniziali. La dinamica dell'inflazione rappresenta, come vedremo, un convincente esempio di processo fisico molto efficace nel ridurre, fino a cancellarle, le irregolarità inizialmente presenti nel cosmo. Secondo il modello inflazionario, l'universo ha attraversato nei suoi primi istanti una fase transitoria di espansione accelerata che ne ha causato un'enorme dilatazione. È questo il motivo per cui tale fase è detta *inflazione (inflation)*, letteralmente "gonfiamento". Durante l'inflazione la velocità di espansione dell'universo cresce col tempo, è *accelerata*. Se l'espansione accelerata dura per un periodo sufficientemente lungo, il problema dell'orizzonte è risolto. Infatti, la prima e più importante conseguenza di una fase di espansione accelerata è che il rapporto tra la dimensione dell'orizzonte e qualsiasi altra lunghezza fisica decresce col passare del tempo. La legge precedentemente esposta, valida per le 'normali' fasi di espansione decelerata, secondo cui il raggio di connessione causale aumenta col tempo più velocemente dell'espansione cosmica, viene invertita: regioni dotate di reciproca correlazione causale perdono via via la possibilità di comunicare

(“escono dall’orizzonte”), ma preservano, nelle proprie caratteristiche fisiche, memoria della loro coerenza, quella stessa coerenza che ritroveremo osservando tali regioni nelle fasi post-inflazionarie fino ad oggi (e probabilmente per molti miliardi di anni a venire), quando esse ri-entrano nell’orizzonte.

Va subito detto che, nelle sue normali forme, la presenza della materia implica che l’espansione cosmica sia *decelerata*, cioè che la velocità di espansione cali col procedere del tempo. Questa proprietà segue dal fatto che la forza gravitazionale – almeno secondo la teoria di Newton – ha carattere attrattivo. In Natura non esistono infatti ‘cariche gravitazionali’ di segno opposto, a differenza di quanto accade con le cariche elettriche. I corpi possono solo attrarsi gravitazionalmente, grazie alla loro massa-energia. La presenza della materia nel cosmo non può quindi che condurre ad un rallentamento dell’espansione impartita all’istante iniziale, il momento del *big bang*. Assumere che sia esistita una fase di espansione accelerata equivale quindi a dire che esiste in Natura una sostanza capace di impartire ai corpi una forza gravitazionale repulsiva (antigravità), in netto contrasto con la nostra esperienza. La teoria della gravitazione di Einstein, a differenza di quella di Newton, prevede che questa antigravità sia possibile senza che venga violato alcun principio fisico fondamentale. La forza gravitazionale che agisce su un elemento di fluido è generata, secondo Einstein, sia dalla sua energia che dalla sua pressione. La pressione – a differenza dell’energia – può, in particolari condizioni, risultare negativa. La forza gravitazionale generata da fluidi con pressione negativa ci permette di comprendere il meccanismo alla base dell’inflazione. Quale tipo di fluido è caratterizzato da una pressione negativa? La risposta sta nelle proprietà dello stato di vuoto in meccanica quantistica. Secondo la teoria quantistica relativistica, infatti, lo stato di vuoto non è banalmente uno stato ‘senza particelle’: grazie, infatti, al principio di indeterminazione di Heisenberg, lo stato di vuoto ‘pullula’ di particelle, dette *virtuali*, che vengono continuamente create e distrutte, rimanendo in vita per un tempo inversamente proporzionale alla loro energia. Sono quindi le proprietà del vuoto quantistico nell’interpretazione della fisica contemporanea ad aver causato l’accelerazione nell’espansione universale durante l’inflazione.

Universi separati

Come abbiamo visto, secondo le moderne teorie cosmologiche, l’universo primordiale ha attraversato un periodo di inflazione, ovvero un’era transitoria di espansione accelerata che ne ha causato un’enor-

La bellezza possibile

me dilatazione. Successivamente, l'universo è passato attraverso un breve periodo di riscaldamento (detto *reheating*) durante il quale sono state generate tutta la materia e la radiazione oggi presenti nel cosmo. Nel corso dei 35 anni successivi all'articolo di Guth, sono state proposte molte varianti al modello originario di inflazione. Vale qui la pena di citare una classe di modelli che più di ogni altra è dotata di caratteristiche innovative: l'*inflazione caotica*, proposta da Andrei Linde (1983). L'idea di Linde è che, a causa del principio di indeterminazione di Heisenberg, l'universo abbia attraversato una fase, detta "caotica", durante la quale regioni distanti del cosmo sarebbero state caratterizzate da condizioni fisiche diverse e tra loro incoerenti. Da tale fase iniziale avrebbe poi avuto origine l'inflazione, con modalità diverse da regione a regione. In una successiva elaborazione, Linde stesso propone lo scenario detto *inflazione caotica eterna* (1986), secondo cui la maggior parte del volume dell'universo si troverebbe ancora oggi in una fase di inflazione, che non ha avuto inizio né avrà mai fine. All'interno dell'universo globale, che vivrebbe in una sorta di "stato stazionario" di inflazione, esistono alcuni domini che hanno terminato la fase di inflazione e hanno potuto sviluppare caratteristiche simili a quelle della regione in cui noi viviamo, e molti altri domini che proseguono la loro espansione inflazionaria. Scrivono a tal proposito Linde e collaboratori (Linde, Linde, Mezhlumian, 1994): "la parte osservabile dell'universo può ancora venire accuratamente descritta dal modello omogeneo ed isotropo del big bang. Tuttavia, su scale estremamente grandi (ben al di là dell'orizzonte visibile) l'universo è fortemente disomogeneo. Su scale ancora più grandi questa disomogeneità produce una sorta di struttura frattale, che si auto-riproduce su scale di tempo e di lunghezza sempre maggiori". Ne consegue che quelle condizioni ambientali che hanno permesso la nascita di galassie, stelle, pianeti e quindi lo svilupparsi del fenomeno umano non sono da considerarsi in alcun modo tipiche, ma specifiche della regione cosmica da noi conosciuta e analizzata e valide solo per una frazione assolutamente minoritaria dell'intero volume del cosmo. Si noti che, poiché con grande probabilità il volume globale del cosmo è *infinito*, tale minuscola frazione risulta composta anch'essa da un numero infinito di "universi separati"! Le condizioni che si sono realizzate nel nostro orizzonte locale rappresenterebbero la conseguenza non solo di un'evoluzione deterministica, governata dalle equazioni di Einstein, ma anche di un processo stocastico, dovuto sia al ruolo di condizioni iniziali "casuali" che all'azione delle fluttuazioni quantistiche sulla dinamica della nostra porzione di universo. All'inevitabile domanda: "per quale fortunato motivo ci troviamo proprio in una di queste rarissime regioni "abitabili"?", si risponde con l'ausilio

del Principio Antropico Debole (Barrow, Tipler, 1986): "perché, se così non fosse, non esisterebbero esseri pensanti capaci di osservare ed analizzare il cosmo". In termini meno tautologici, possiamo dire che la presenza di vita intelligente nella regione del cosmo da noi abitata rappresenta un vincolo oggettivo, un criterio di selezione che ci induce ad utilizzare probabilità "condizionate", anziché probabilità pure: alla domanda "quanto è probabile che una regione del cosmo sia uscita dallo stato di inflazione?" va sostituita la (meno ambiziosa, ma più realistica) "quanto è probabile che una regione del cosmo sia uscita dallo stato inflazionario, *dato che* in essa ha potuto svilupparsi la vita?". Soddisfacente o meno che possa apparirci questa interpretazione, appare difficile, allo stadio attuale delle nostre conoscenze, farne a meno. Rifuggendo da spiegazioni di tipo finalistico, nella cosmologia moderna si tende sempre più spesso a rispondere allargando di fatto le maglie del principio copernicano: "nell'universo si sono realizzate tutte le possibilità che la teoria prevede". In altri termini, non abbiamo il diritto di utilizzare le nostre conoscenze empiriche, inevitabilmente relative ad una porzione limitata del cosmo, per dedurne leggi globali e rigidamente applicabili all'intero universo!

Questa stessa attitudine ci aiuta ad affrontare un problema assai più concreto: come si sono siluppate le disomogeneità che caratterizzano la struttura su grande scala dell'universo osservabile, partendo da una regione di universo resa omogenea e isotropa proprio dall'inflazione? La risposta a questa domanda va suddivisa in tre stadi: la nascita dei "semi", ovvero delle minuscole fluttuazioni a partire dalle quali si sono poi sviluppate tutte le disomogeneità attuali, la loro uscita dall'orizzonte inflazionario, dando luogo a quelli che i cosmologi oggi chiamano "separate universes" ("universi separati") e, infine, il loro rientro nell'orizzonte cosmologico, con il successivo svilupparsi delle strutture cosmiche. Non potendo qui affrontare l'intero percorso evolutivo delle fluttuazioni cosmologiche, voglio soffermarmi solo sul concetto di universi separati, che ci conduce verso una seppur "timida" via d'uscita dai rigidi confini del modello standard. Riproducendo infinite volte il modello di Friedmann-Roberston-Walker si riesce infatti a descrivere regioni dell'universo di dimensioni pari a quelle dell'orizzonte e quindi non in grado di comunicare tra di loro. Pur essendo questa idea in palese contrasto con il Principio Cosmologico, interpretato rigidamente, essa viene con successo utilizzata per descrivere il modo in cui parti dell'universo caratterizzate da valori leggermente diversi della densità di massa-energia abbiano creato le condizioni perché la forza gravitazionale potesse agire, portando alla nascita delle strutture cosmiche. Un "ensemble" statistico di universi separati rende quindi perfettamente conto dell'alto grado di disomogeneità locale osservato nell'universo.

Universi silenziosi

Nel luglio del 1983 si svolse a Padova il X Congresso mondiale di Relatività Generale. Ero allora un giovane borsista della Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati (SISSA) di Trieste. Ricordo di essere rimasto molto colpito dalla relazione generale di George F. R. Ellis (1984), un "relativista" sudafricano, che fu poi per alcuni anni professore proprio alla SISSA, prima di approdare definitivamente a Cape Town. Ellis proponeva una visione della cosmologia, radicalmente diversa da quella del modello standard di FLRW, che aveva battezzato "observational cosmology" ("cosmologia osservativa"), per metterne in risalto l'idea fondamentale: costruire il modello cosmologico con cui interpretare i dati empirici sulla base di ciò che possiamo – almeno in linea di principio – osservare, senza assunzioni di simmetria relative a regioni dell'universo a noi inaccessibili. Secondo questo approccio, perciò, l'omogeneità spaziale, conseguente all'ipotesi di isotropia attorno ad ogni osservatore cosmico (a tempo fisso), viene eliminata e la stessa isotropia si riduce ad un'utile ipotesi di lavoro, non più un dogma da accettare a priori. Quando, a metà degli anni Novanta, con alcuni colleghi, proponemmo l'idea degli "universi silenziosi" (Matarrese, Pantano, Saez, 1993; Bruni, Matarrese, Pantano, 1995) avevamo in fondo iniziato a muoverci proprio in questa direzione (Ellis, Maartens, MacCallum, 2012, pp. 501-502).

Si definisce "universo silenzioso" ("silent universe") una soluzione delle equazioni di Einstein per la quale un particolare termine di curvatura (detto "parte magnetica del tensore di Weyl") sia nullo e abbia come sorgente un fluido con pressione uniforme. Per estensione, ciascun elemento di fluido che obbedisca a queste ipotesi costituisce un universo silenzioso a sé. Arrivammo a questa idea avendo notato che, sotto queste ipotesi, le equazioni di Einstein assumono una forma sorprendentemente semplice, riducendosi a sei equazioni differenziali ordinarie nel tempo. Fisicamente, questo implica che ogni elemento di fluido evolve in modo indipendente dal mondo circostante. Ecco perché decidemmo di chiamare queste soluzioni "universi silenziosi". Ogni soluzione descrive un elemento di fluido, in pratica una piccola porzione di cosmo, che evolve senza alcuna influenza esterna, se non quella ad essa impartita dalle condizioni iniziali. Questo avviene perché l'assunzione secondo cui la "parte magnetica del tensore di Weyl" sia nulla impedisce il propagarsi di onde gravitazionali, mentre l'assunzione di pressione uniforme vieta la propagazione di onde sonore. Così facendo si impedisce ad ogni elemento di fluido di interagire con quelli circostanti. Nell'universo reale le cose non sono in effetti così semplici, ma – come spesso accade in fisica – le idealizzazioni, o se si preferisce le approssimazioni

aiutano a comprendere la dinamica di un sistema meglio di modelli dettagliati. In effetti, la geometria del modello di FLRW appartiene proprio a questa classe di soluzioni. Gli universi silenziosi comprendono, però, anche soluzioni *anisotrope* (che violano la simmetria per rotazioni) e/o *inomogenee* (che violano la simmetria per traslazioni) e, ciò che più conta, descrivono *in modo approssimato* quello che avviene quando guardiamo l'universo a bassa risoluzione, ovvero su scale più grandi dell'orizzonte. È proprio questa caratteristica a rendere, a mio parere, interessante lo studio di queste soluzioni. Si può infatti speculare sulla possibilità di utilizzare gli universi silenziosi come strumento per affrontare il problema della caratterizzazione geometrica della regione di cosmo a noi accessibile osservativamente, nel contesto delle soluzioni cosmologiche delle equazioni di Einstein, superando il modello standard. Questo tipo di indagine potrebbe presto diventare assai più agevole, grazie all'utilizzo di simulazioni numeriche basate sulle equazioni di Einstein (Matarrese, 2016), simulazioni che solo recentemente hanno raggiunto uno stadio tale da renderle competitive con i più tradizionali metodi basati sulla dinamica newtoniana, nell'ambito del modello di FLRW.

Bibliografia

- Barrow J. D., Tipler F. J. (1986), *The Anthropic Cosmological Principle*. Oxford University Press, Oxford.
- Bruni M., Matarrese S., Pantano O. (1995), Dynamics of Silent Universes. *Astrophysical Journal* 445: 958-977.
- Ellis G. F. R. (1984), *Relativistic Cosmology: Its Nature, Aims and Problems*. In: B. Bertotti, F. de Felice, A. Pascolini (eds.), *General Relativity and Gravitation*. D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, pp. 215-288.
- Ellis G. F. R., Maartens R., MacCallum M. A. H. (2012), *Relativistic Cosmology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Guth A. H. (1981), The Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems. *Physical Review D* 23: 347-356.
- Hawking S. W., Ellis G. F. R. (1973), *The Large Scale Structure of Space-time*. Cambridge University Press, London.
- Linde A. D. (1983), Chaotic Inflation. *Physics Letters B* 129: 177-181.
- Linde A. D. (1986), Eternally Existing, Self-reproducing Chaotic Inflationary Universe. *Physics Letters B* 175: 395-400.
- Linde A. D., Linde D., Mezhlumian A. (1994), From the Big Bang Theory to the Theory of a Stationary Universe. *Physical Review D* 49: 1783-1826.

La bellezza possibile

Matarrese S. (2016), Computational Cosmology: A General Relativistic Approach. *Nature Physics, News and Views* 12: 293-294.

Matarrese S., Pantano O., Saez D. (1993), General Relativistic Approach to the Non-Linear Evolution of Collisionless Matter. *Physical Review D* 47: 1311-1323.

Sabino Matarrese
sabino.matarrese@pd.infn.it