

# Cosmologia moderna. Storia e trama dell'Universo nel XXI secolo.§

## 1. Simmetrie antiche: l'uomo diventa cosmologo

Non ostacolato dalla luce artificiale dei centri abitati o dalle preoccupazioni quotidiane, l'uomo è sempre stato conquistato dalla profondità del cielo notturno e di qui condotto a porsi le domande ultime: dove sono i confini di cielo e terra? Il cosmo è immobile o in divenire? Se c'è un'origine, di che natura è? Che posto occupa l'uomo? Come accade in tutte le scienze naturali, la speculazione muove dai fenomeni percepiti *hinc et nunc* e passare dal microcosmo osservato al macrocosmo è spesso il risultato di un'estrapolazione più o meno consapevole dell'esperienza quotidiana; le risposte tendono così a riflettere il contesto storico e geografico intorno al filosofo che si interroga, riflettendo acume e limiti del suo ingegno. Spesso fino all'età moderna, quando gli strumenti a disposizione si rilevavano insufficienti o ignorando fini scientifici per perseguirne di più terreni, l'inaudace "filosofo del tutto" si rifugiava in immagini allegoriche e spiegazioni sovranaturali, adattando magari la propria visione ad esigenze dottrinali d'altra natura. In epoche e luoghi del tutto distanti furono così formulate cosmografie e cosmogonie che hanno similitudini solo apparentemente sorprendenti: l'universo di Maya, Norreni e Dogon (popolazione dell'altipiano di Bandiagara, Africa occidentale) era a simmetria cilindrica, con uno o più piani come le terre da essi abitate, circondate da foreste, ghiacci o serpenti, costruito attorno ad un asse che è un albero o un palo di ferro per giustificare la struttura "sopra-sotto" del quotidiano e sorreggere quanto altrimenti sarebbe caduto, come il cielo o la pioggia; la simmetria era invece sferica per Babilonesi e Greci, culminando nella sfera delle stelle fisse così chiaramente percepibile da chi viaggia per mare e deserto; la frequente esigenza di confini, limite rassicurante della geometria quotidiana, si traduceva spesso in rifiuto dello spazio infinito, umanamente incommensurabile — eccezion fatta

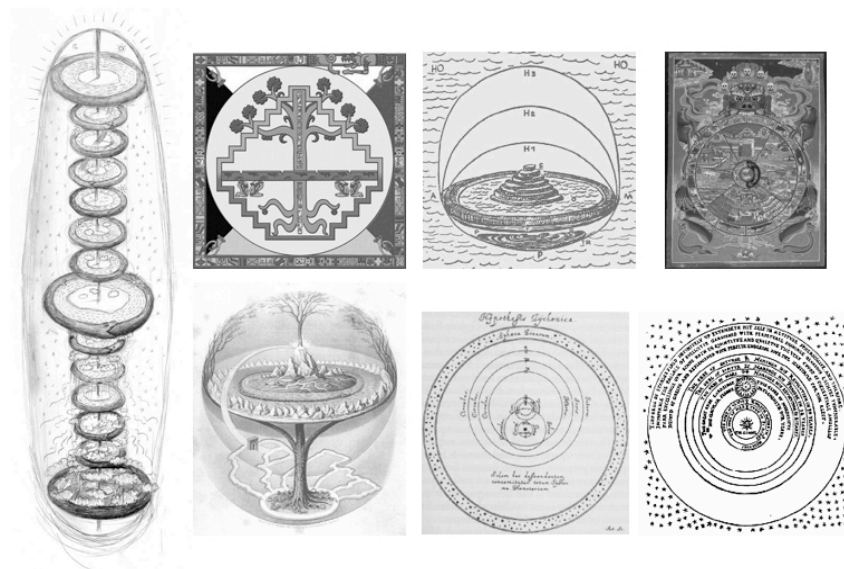


Figura 1. Alcune concezioni del cosmo negli ultimi millenni: *a sinistra*, cosmologia dogon (Africa occidentale); *prima riga, da sinistra*, le cosmologie maya, babilonese e tibetana; *seconda riga, da sinistra*, la cosmologia norrena, il sofisticato sistema geo-elio-centrico di Tycho Brahe con sfera delle stelle fisse, e l'evoluzione del sistema eliocentrico di Nicolò Copernico esteso ad uno spazio infinito (Thomas Digges, 1576).

§ Carlo Schimd, Aix-Marseille Université & Laboratoire d'Astrophysique de Marseille.

per alcuni arditi (e ardenti!) tentativi come quelli di Aristarco di Samo, Thomas Digges e Giordano Bruno.<sup>1</sup> Quanto all'evoluzione dell'Universo, veniva spesso postulata a confortevole immagine di quella degli esseri viventi, con nascita (da un uovo o dal Caos) e morte (l'Apocalisse), ma diventava ciclica nelle cosmologie orientali secondo la visione induista e buddista.

Questa prospettiva antropometrica, “cieco veder di filosofi volgari”,<sup>2</sup> cominciò a cambiare radicalmente intorno al XVI secolo, con la diffusione di razionalismo ed empirismo di René Descartes e Francis Bacon. Il punto di svolta arrivò con Galileo Galilei: dopo aver fatto per la prima volta un uso astronomico del cannocchiale, con rinnovata coscienza fisica egli pervenne ad usare la matematica (che all'epoca in Europa era essenzialmente la geometria euclidea) per spiegare tanto il mondo naturale quanto gli strumenti utilizzati per osservarlo e misurarlo, ponendo così le basi della scienza moderna:

“La filosofia [cioè la scienza naturale, in particolare la fisica, *NdA*] è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto”.<sup>3</sup>

Questa sarà, da allora in poi, la nuova metodologia adottata da tutte le scienze naturali, cosmologia compresa. Con una difficoltà supplementare, per questa come per tutte le scienze astronomiche: agli oggetti celesti non si può metter mano né se ne possono modificare proprietà e condizioni al contorno per studiarne la risposta, come invece accade nelle scienze galileiane.

Cosa s'intenda oggi per Universo, l'oggetto di studio del cosmologo, fu definito in modo più rigoroso e meno ingenuo solo a partire dagli inizi del XX secolo. Da allora il rapido progresso delle osservazioni astronomiche cominciò a svelare oggetti e distanze fino ad allora impensabili, ridefinendo la scala delle distanze e dei tempi: i pianeti del Sistema Solare e le stelle fulcro delle cosmologie del passato, e in particolare di quella aristotelico-tolemaica, non occupano che una infinitesima parte del cosmo; le due “nebulose” visibili dall'emisfero australe, le Nubi di Magellano, si rivelano essere due galassie satelliti della “nostra” galassia, la Via Lattea, composta come ogni galassia da miliardi di stelle, polvere (silicati) e gas (idrogeno soprattutto), con dimensioni 10 - 100 milioni di volte quella del Sistema Solare; innumerevoli galassie ben più distanti si svelano al di là, isolate o in interazione tra loro, emettendo radiazione elettromagnetica non solo visibile, ma anche radio, a microonde, infrarossa, ultravioletta o X, a seconda dei processi fisici che avvengono al loro interno.<sup>4</sup>

Abbandonando così la pretesa che fu già di Platone di voler descrivere il «tutto» che ci circonda, compreso l'uomo con i suoi problemi e il suo destino, il cosmologo moderno usa gli strumenti del fisico e dell'astronomo per studiare la struttura e la dinamica dell'Universo, da intendersi come quel sistema (astro)fisico — per definizione unico — che si estende su distanze rispetto alle quali le galassie appaiono puntiformi. La cosmologia moderna si interessa perciò ai fenomeni fisici su scale tipicamente maggiori di 10 Mega parsec,<sup>5</sup> in particolare alle proprietà «medie» se non addirittura «globali» dell'Universo. Da qui in poi è una nuova, audace storia di limiti da superare e sofisticati orizzonti invalicabili, di presa di coscienza sempre più matura e tecnologicamente temeraria, in cui nozioni comuni come quelle di spazio, tempo e misura vanno profondamente riviste e interpretate.

---

<sup>1</sup> “Solo due cose sono infinite, l'universo e la stupidità umana, e del primo non sono sicuro” (A. Einstein).

<sup>2</sup> Giordano Bruno, *Cena delle Ceneri*, 1584.

<sup>3</sup> Galileo Galilei, *Il Saggiatore*, VI, 1623.

<sup>4</sup> Fa sorridere la sicurezza ostentata nel *Cours de philosophie positive* (1865) da Auguste Comte: “Per quanto riguarda le stelle, non sapremo mai studiare, in alcun modo, la composizione chimica o la loro struttura mineralogica e a maggior ragione la natura dei corpi organizzati che vivono alla superficie”. Da notare: non era uno scienziato.

<sup>5</sup> Il parsec, l'unità di misura delle distanze comunemente usata in astronomia, corrisponde a circa  $10^{13}$  km ed è la distanza tipica tra le stelle che formano una galassia. Il Sistema Solare si estende su circa 0,0002 parsec, le dimensioni caratteristiche di una galassia sono di 1-100 kilo parsec, quelle di un ammasso di galassie 1-10 Mega parsec.

## 2. Cosmologia relativistica: storia gravitazionale

**Spaziotempo 4D.** Struttura e dinamica di ogni sistema fisico sono definite da lunghezze, tempi ed energie caratteristici, i quali sono determinati dalle interazioni (o forze) dominanti. Per la propria intensità e portata, tra le quattro forze «fondamentali» sperimentate nei nostri laboratori — gravitazionale, elettromagnetica, nucleare forte e nucleare debole — è anzitutto la forza di gravità a determinare l'aspetto del cosmo; anzitutto di questa si deve occupare il cosmologo moderno.<sup>6</sup>

I fenomeni gravitazionali d'esperienza quotidiana (la mela che cade, il satellite in orbita, le maree indotte dalla Luna, il moto dei pianeti) sono “universalmente” descritti dalla ben nota teoria newtoniana, secondo la quale lo stato di moto di ogni corpo è *istantaneamente* determinato dalla forza attrattiva dovuta agli altri corpi massivi, “decrecendo in proporzione inversa al quadrato delle distanze”.<sup>7</sup> Ma quando a inizio del '900 si allargò lo sguardo, emersero due difficoltà. Benché straordinariamente precisa per i descrivere e prevedere i fenomeni «locali», questa teoria risultava incapace di spiegare alcune anomalie gravitazionali, come la precessione del perielio di Mercurio (ogni secolo l'orbita del pianeta si sposta di 5600 secondi d'arco, contro i 5557 previsti dalla teoria newtoniana, e ciò anche tenendo conto dei debolissimi effetti perturbativi indotti dagli altri pianeti del Sistema Solare) e l'ampiezza dell'effetto «lente gravitazionale» (la luce emessa da sorgenti distanti è deviata, dai corpi celesti vicini, di un angolo pari al doppio di quanto invece previsto con Newton). La teoria di Newton risultava inoltre del tutto incompatibile con la recente teoria della Relatività Ristretta, promossa dai nuovi esperimenti di elettromagnetismo, fisica nucleare e subnucleare, che coinvolgevano velocità prossime o uguali a quella della luce («relativistiche»): questa nuova teoria postulava che la propagazione delle interazioni avvenisse *al più alla velocità della luce* ( $c$ ), quasi 300000 km/s, e non istantaneamente, cioè a velocità infinita.<sup>8</sup> Estendere questo risultato alla meccanica dei gravi era inevitabile. Con una violenta rottura del solido paradigma concettuale difeso da nomi illustri quali Lagrange, Hamilton, Jacobi e Poincaré, questi argomenti condussero agli inizi del XX secolo alla formulazione della teoria della Relatività Generale, comunemente attribuita ad Albert Einstein (1916).<sup>9</sup> Grazie a questa tutto tornava, ma con qualche nuova sfida.

---

<sup>6</sup> L'interazione tra materia e radiazione elettromagnetica fa il resto, “colorando” il cielo così come appare al telescopio, ma con effetti secondari sulle scale cosmologiche. Interazioni nucleari e subnucleari hanno rilevanza soprattutto su scale più piccole, all'interno delle stelle, o ai primordi dell'Universo, lasciando deboli seppur fondamentali tracce nel cosmo osservabile come i protoni, i neutroni e gli elettroni di cui è composta la materia visibile — l'uomo compreso.

<sup>7</sup> Isaac Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, 1687.

<sup>8</sup> La Relatività Ristretta portò così al superamento della nozione newtoniana di *tempo assoluto* elevandolo dallo stato di «parametro» uguale per tutti gli osservatori, utile a ordinare gli eventi, a quello di «coordinata», dipendente dallo stato di moto dell'osservatore; la distinzione è apprezzabile però solo nei fenomeni «relativistici». Di conseguenza la simultaneità — ma non la causalità — non ha più un valore assoluto. La nozione di *spazio assoluto* era invece già stata abbandonata con Galileo, che formalizzò l'invarianza dei fenomeni fisici rispetto allo stato di moto (rettilineo uniforme) dell'osservatore; in particolare dunque la posizione «relativa» rispetto al laboratorio (non apparentemente accelerato, ad esempio non posto su una giostra) non ha alcuna rilevanza rispetto al fenomeno descritto dallo sperimentatore.

<sup>9</sup> J. Eisenstaedt, *Einstein et la relativité générale. Les chemins de l'espace-temps*, CNRS Editions, 2002.

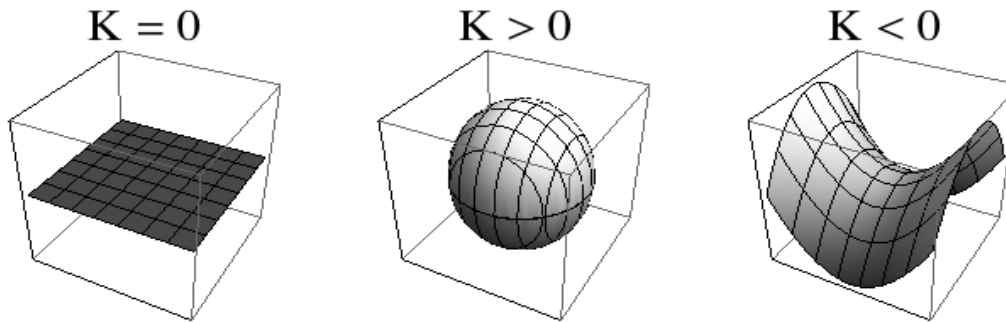


Figura 2. Le uniche tre geometrie spaziali compatibili col Principio Cosmologico, di cui è rappresentato l'analogo bidimensionale: «piatta» o euclidea, con curvatura  $K = 0$ ; «sferica» o di Riemann,  $K > 0$ ; e «iperbolica» o di Lobačevsky,  $K < 0$ . Le traiettorie più brevi tra due punti, come quelle percorse dalla luce emessa da stelle e galassie, sono rispettivamente segmenti di rette, di ellissi (o cerchi) e di iperboli. Localmente, in regioni sufficientemente piccole intorno ad ogni punto, lo spazio è tuttavia sempre approssimativamente euclideo: una geometria (sensibilmente) diversa da quella piatta è percepibile solo osservando distanze (sufficientemente) grandi, come sono quelle cosmologiche.

La novità della Relatività Ristretta fu l'introduzione della nozione di *spaziotempo*, superficie geometrica a quattro dimensioni, una sorta di palcoscenico inerte sul quale si esibiscono i fenomeni naturali e i villani che li osservano — i cosiddetti «eventi», punti su questa superficie, sono identificati perciò da quattro coordinate, una temporale e tre spaziali. In Relatività Generale lo spazio-tempo non è più statico ma dinamico e potenzialmente curvo: come se fosse una superficie di gomma, la sua geometria è determinata dalla massa-energia dei corpi — siano essi massivi, come pianeti, stelle o galassie, o senza massa, come i fotoni, descrizione moderna delle onde elettromagnetiche. Contemporaneamente, ma non intuitivamente, la sua geometria ne ridefinisce localmente la massa-energia:<sup>10</sup> in conseguenza di ciò vengono determinate le traiettorie dei corpi “liberi”. La geometria (o «curvatura») dello spaziotempo descrive insomma le interazioni gravitazionali, è la gravità.

**Simmetrie e principi del XX secolo.** L'uso della Relatività Generale in ambito cosmologico trovò immediato supporto nelle osservazioni di Slipher, Strömberg, Wirtz, Hubble e Lemaître intorno agli anni '30 del secolo scorso. Con contributi e meriti diversi, costoro constatarono che gli oggetti celesti allora considerati più distanti (all'epoca detti «nebulose extragalattiche» e che oggi sappiamo essere galassie) si allontanano ad una velocità *media* proporzionale alla distanza da noi osservatori; in tutto ciò c'era poco di newtoniano, e le distanze in gioco conducevano presto a velocità prossime a quelle della luce... se non maggiori! Una sfida per la Relatività Ristretta.

Bisogna aspettare il 1965 per una seconda osservazione di rilevanza cosmologica, la scoperta accidentale di Penzias e Wilson della «radiazione cosmica di fondo», predetta dagli studi di Gamow vent'anni prima: microonde come quelle emesse da un corpo all'equilibrio termodinamico (praticamente perfetto, il più preciso che esista in natura) che si trovasse oggi a una temperatura di  $-270,425 \pm 0,002^\circ\text{C}$ , provenienti con la stessa intensità *da tutte le direzioni, indistintamente*. Esclusane la natura terrestre o galattica, questa radiazione proveniente da distanze maggiori, cosmologiche, rivelerebbe così l'*isotropia* dell'universo su larga scala. Adottando di seguito la versione generalizzata del Principio Copernicano, secondo il quale né l'uomo né alcun osservatore occupano una posizione privilegiata nell'Universo, l'isotropia su larga scala da chiunque di essi osservata implicherebbe l'invarianza delle osservazioni rispetto a qualunque posizione, cioè *omogeneità* su larga scala.<sup>11</sup> Si giunge così al «Principio Cosmologico», che estende a tutto l'Universo omogeneità e isotropia osservate *su larga scala*, facendone così delle proprietà *globali*. Come corollario, un teorema di Geometria Differenziale prova che queste «simmetrie» dello spazio tridimensionale sono compatibili con tre e tre sole geometrie, quelle

<sup>10</sup> Matematicamente ciò si traduce in equazioni *accoppiate non lineari*: causa ed effetto non sono più distinguibili.

<sup>11</sup> Matematicamente isotropia e omogeneità si traducono, rispettivamente, in invarianza delle osservazioni (e delle equazioni che le descrivono) rispetto a rotazioni e traslazioni dell'osservatore.

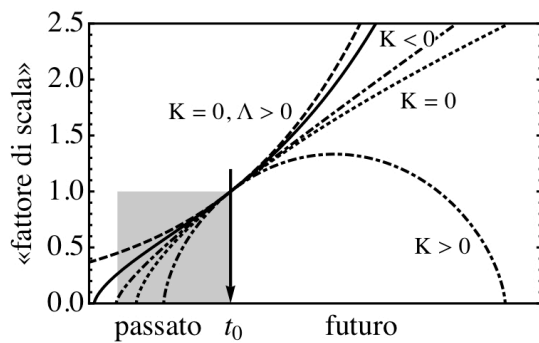


Figura 3. Cinque possibili soluzioni delle equazioni di Friedmann, ciascuna descrive l'espansione *media* dell'Universo in funzione del tempo. La pendenza di ogni curva rappresenta la "velocità specifica" di espansione, oggi  $H_0$ . La curva continua è il modello favorito dalle osservazioni. La curva a tratti corti corrisponde ad un Universo "vuoto": non c'è alcun Big-Bang e l'espansione accelera costantemente.

spazio; punti che sono eventualmente occupati da oggetti "puntiformi" come le galassie, che poco o per nulla perturbano l'evoluzione dello spazio-tempo *globale* tracciandone la struttura — come uvetta nel panettone in lievitazione. È così possibile con gli opportuni ingredienti, cioè le giuste quantità di materia e radiazione, la giusta geometria ed una componente «oscura» dominante (la «costante cosmologica», o qualcosa di simile), ottenere un *modello* capace di rendere conto quantitativamente delle osservazioni di Hubble e di quelle analoghe più recenti. La soluzione favorita descrive un Universo con ottima approssimazione geometricamente piatto, in espansione nel passato e nel futuro, oggi ad una "velocità specifica" di  $72 \pm 4$  chilometri al secondo per ogni Mega parsec (è la celebre «costante di Hubble»,  $H_0$ ), in accelerazione negli ultimi 7 miliardi di anni, con un tempo caratteristico di evoluzione di circa 10 miliardi di anni (definito dal rapporto  $1/H_0$ ) e una taglia dell'ordine del Giga parsec (che è circa la distanza percorsa dalla luce in un «tempo di Hubble»,  $c/H_0$ ). Ma c'è un inizio?

**Big-Bang e orizzonti.** Molte soluzioni delle equazioni di Friedmann, inclusa quella maggiormente compatibile con le osservazioni, prevedono che esista un istante nel passato in cui le distanze si annullano: è il cosiddetto «Big-Bang». Tutti i punti dello spazio percepiti oggi come distinti sarebbero stati allora coincidenti, la massa-energia dell'Universo sarebbe stata concentrata in un punto raggiungendo valori di densità *infinita*, e *infinito* sarebbe il campo gravitazionale ad essa associato; matematicamente si parla di «singolarità», che è un'evidente patologia della teoria:

“La teoria [della Relatività Generale] è basata sulla separazione dei concetti di campo gravitazionale e materia. Mentre questa può essere una valida approssimazione per i campi deboli, essa può presumibilmente essere abbastanza inadeguata per densità di materia molto elevate [«di Planck»]. Non si può quindi assumere la validità delle equazioni per densità molto alte ed è solo possibile che in una teoria unificata non ci sia tale singolarità”.<sup>12</sup>

Un orizzonte concettuale insomma, che è opportuno ridefinire. Le cure proposte devono tutte, inevitabilmente, contemplare una descrizione *quantistica* delle interazioni gravitazionali, al pari delle altre tre forze fondamentali già "unificate" (in senso algebrico) nel cosiddetto Modello Standard della fisica delle particelle elementari; nuove, elaborate teorie della gravitazione come quella «a loop», in cui

<sup>12</sup> Si tratta di «equazioni differenziali». La soluzione di questo tipo di equazioni è una funzione, nella fattispecie una funzione unicamente del tempo chiamata «fattore di scala», che descrive la distanza relativa tra punti.

<sup>13</sup> A. Einstein, *The principle of relativity*, 1950. Un celebre esempio di unificazione è la teoria di Kaluza-Klein, che propone gravitazione ed elettromagnetismo come manifestazioni di un unico «campo», definito però in cinque dimensioni.

lo spazio-tempo sarebbe quantizzato (cioè discreto, non più continuo), o le teorie delle «super-stringhe», in cui nuove simmetrie dovrebbero apparire e le dimensioni dello spazio potrebbero essere non più tre ma quattro, cinque, fino a dieci, non visibili ma non per questo inesistenti. Teorie serie ma ancora precarie, che riguardano distanze o tempi così piccoli ed energie così elevate da non risultare verificabili sperimentalmente né osservativamente, oggi... A meno di non scoprire nuovi effetti più sottili e indiretti, “ombre” ancora non del tutto chiaramente identificate nei segnali astronomici, che permettano infine di ricostruire la storia dell’Universo prima della cosiddetta «era di Planck», al di là della quale è difficile accettare ci sia solo una geometrica e fisicamente insignificante “singolarità iniziale”. Più plausibile il «caos» — che evidentemente non è il *Chaos* di Esiodo, ma il caos quantistico intrinseco al mondo atomico e subatomico, conseguenza della natura ondulatoria della materia e del conseguente «principio di indeterminazione» di Heisenberg, dove la nozione comune di tempo potrebbe perdere di significato.

Consistentemente con l’esistenza di un Big-Bang si può tuttavia fissare lo zero del “cronometro cosmico” e *definire* «età dell’Universo» il tempo misurato da un qualunque osservatore (immobile rispetto alla trama spazio-temporale in espansione) trascorso da allora ad oggi. Secondo una delle più recenti analisi, il confronto tra dati e modello di Friedmann dice  $t_0 = 13,80 \pm 0,06$  miliardi di anni (il valore “esatto” dipende dai parametri del modello). D’altra parte, *ti con zero* non è che un concetto di comodo, utile come riferimento per i processi “lenti”. Propagandosi a velocità finita, la luce di qualunque oggetto celeste giunge oggi ai nostri occhi e telescopi dopo esser stata emessa, riflessa o diffusa tempo fa, il tempo necessario per raggiungerci: 8 minuti quella emessa dal Sole, 24 minuti quella riflessa da Saturno, 2,7 milioni di anni quella emessa dalla galassia di Andromeda. Il cosmologo quindi, come ogni astronomo, vede solo il passato ed è meno interessato al futuro; è naturale dunque che misuri il tempo “all’indietro”, incontrando un universo via via più giovane man mano che osserva oggetti più distanti, fino a giungere al limite dei propri limiti strumentali (il bordo sinistro della banda grigia in figura 3). Non basta: nonostante ogni sforzo tecnologico, egli può tuttavia aver unicamente accesso alla luce proveniente da distanze non superiori a quelle percorribili in 13,8 miliardi d’anni. Ciò definisce un «orizzonte causale», oggi a circa 14 Giga parsec da noi (o da *qualunque* osservatore, per l’omogeneità dello spazio), da sempre in espansione a velocità *maggiore della luce* e pertanto irraggiungibile,<sup>14</sup> oltre il quale egli non ha, né avrà mai strumentalmente accesso: è questo l’universo, con la “u” minuscola, al quale sono abilitati *gli occhi* dello scienziato.

### 3. Cosmologia fisica: storia termodinamica

**Universo primordiale.** Immediatamente dopo l’era di Planck, per  $10^{-32}$  secondi, l’Universo subisce una fase d’espansione accelerata, approssimativamente esponenziale, durante la quale le fluttuazioni quantistiche dello spazio-tempo si dilatano estendendosi sino a scale cosmologiche e “trasformandosi” poi in radiazione e materia: è quanto prevede la teoria della «inflazione primordiale», la più semplice e solida teoria oggi capace di spiegare l’origine delle strutture cosmiche, oltre ad alcuni delicati problemi altrimenti non facilmente risolvibili.<sup>15</sup> Nulla vieta poi, in linea di principio, che questa fase inflazionaria riguardi solo una “bolla” d’universo, e che altre parti evolvano diversamente, con tempi e modi differenti, ciascuna con la sua «era di Planck», magari con le stesse leggi ma con altri valori dei parametri e quindi con un’altra fenomenologia: altri universi connessi al “nostro” in modo non banale, altre cosmogonie e cosmografie, per ora altra materia di speculazione.

---

<sup>14</sup> Si noti che ciò non viola il postulato relativistico d’insuperabilità della velocità della luce, poiché non si tratta di una grandezza osservabile: solo le informazioni, sotto forma di onde elettromagnetiche, onde gravitazionali (le perturbazioni dello spazio-tempo) o d’altro tipo, devono rispettare questo limite.

<sup>15</sup> Perché la geometria spaziale dell’universo è così piatta? Perché su larga scala l’universo è così omogeneo? E perché appare così simile in direzione di regioni che mai avrebbero avuto il tempo di entrare in contatto causale?



Nei tre minuti successivi l'espansione continua, ma rallentando. L'universo entro l'orizzonte causale si raffredda adiabaticamente, cioè senza cedere calore, subendo delle «transizioni di fase» come l'acqua che da vapore diventa liquido. Le particelle elementari fanno allora la loro comparsa e alcune di esse, i quark, interagiscono formando protoni e neutroni secondo le leggi della fisica subnucleare. Una frazione assai esigua di questi, seguendo una catena di reazioni termonucleari mediate da elettroni e neutrini, dà infine vita ai primi elementi leggeri: idrogeno, elio, litio, berillio e tutti i loro isotopi: è la «nucleosintesi primordiale», predetta da Alpher e Gamow nel 1948, raffinata negli anni '70 e di seguito rigorosamente verificata.<sup>16</sup>

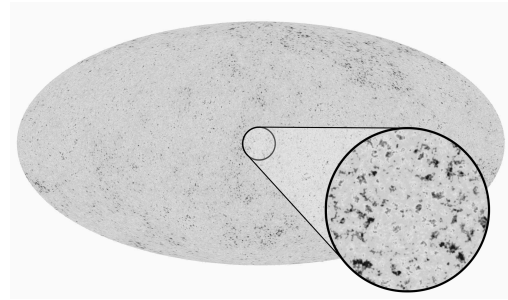


Figura 4. Fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo, proiettate sul planisfero celeste (dati PLANCK, ESA). Rispetto al valor medio della temperatura, circa  $-270^{\circ}\text{C}$ , le differenze (visibili nell'ingrandimento) sono dello 0,001%.

Nel corso dei primi 300000 anni dopo il Big Bang l'universo si trova in uno stato di «plasma», in cui protoni, elettroni e radiazione elettromagnetica si comportano come un unico fluido, quasi del tutto omogeneo: sono presenti delle debolissime fluttuazioni, in misura di una parte su 100000, traccia delle fluttuazioni quantistiche primordiali. Al termine di questo periodo l'universo si è sufficientemente espanso e raffreddato da permettere a protoni ed elettroni di ricombinarsi in atomi d'idrogeno; da questi la radiazione elettromagnetica è assai poco efficacemente diffusa ed è così libera di propagarsi quasi indisturbata in tutto l'universo... giungendo anche a noi, nati quasi 14 miliardi d'anni più tardi: è la «radiazione cosmica di fondo», il cui valor medio era stato rilevato da Penzias e Wilson. Ma ad occhi più attenti, come i bolometri e i radiometri del satellite PLANCK, essa mostra piccolissime e preziosissime anisotropie (figura 4), traccia delle fluttuazioni del plasma primordiale se le leggi della termodinamica nel cosmo sono le stesse che si sperimentano nei laboratori terrestri. Fluttuazioni capitali per fare cosmologia: scrutare questo «orizzonte elettromagnetico» per misurare la geometria media dell'universo (punti caldi e freddi appaiono mediamente più separati sulla sfera celeste se la geometria sottostante è sferica; più vicini se invece è iperbolica), determinarne abbondanza e natura del contenuto, studiarne l'infanzia quantomeccanica. Verifica dei modelli, misura dei parametri: questione di raffinate analisi statistiche.

**Medioevo e illuminismo cosmico: «età oscura» e «prime luci».** Con un meccanismo analogo a quello delle onde del mare, le fluttuazioni di materia si propagano nello spazio fino al momento di essere «abbandonate» dalla radiazione e restare «congelate», formando così i germi da cui nasceranno le prime strutture cosmiche: le regioni più dense attireranno la materia circostante e, in modo via via più debole, quella più distante, creando delle vere e proprie correnti di materia. Per i primi 600 milioni d'anni, tuttavia, l'universo resta ancora buio. Solo quando *localmente* la densità diventa sufficientemente elevata s'innescano allora quei processi idrodinamici e quelle reazioni nucleari che danno origine alle «prime luci», stelle od oggetti più esotici come i quasar, forse i responsabili dei violenti lampi di raggi gamma osservati a partire dagli anni '60 del secolo scorso. L'universo si sta accendendo, e — 13 miliardi d'anni più tardi — l'ingegno dell'uomo con lui: sono in fase avanzata progetti internazionali spaziali e terrestri di taglia impressionante dedicati allo studio di *questa parte di universo*, come il JAMES WEBB SPACE TELESCOPE (telescopio spaziale con specchio grande sette volte quello dello HUBBLE SPACE TELESCOPE), l'EUROPEAN EXTREME LARGE TELESCOPE (telescopio con specchio primario segmentato di 40 metri di diametro, sarà installato sul Cerro Amozones, in Cile) e lo SQUARE KILOMETER ARRAY (radiotelescopio costituito da migliaia di antenne per una superficie totale equivalente di un chilometro quadrato, disposte in due regioni di 6000 km di diametro ciascuna, una in Sud Africa e l'altra in Australia, atteso per il 2025).

<sup>16</sup> Gli elementi più pesanti, i metalli, saranno prodotti solo molto tempo dopo, nelle stelle più fredde e nelle supernovae.

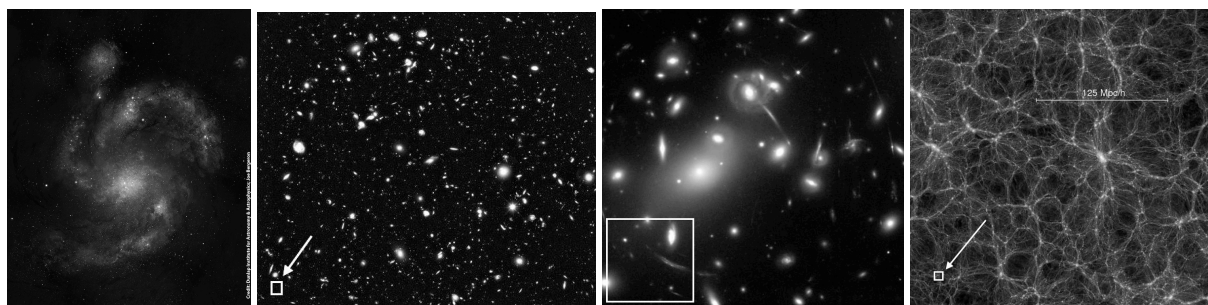


Figura 5. Gli oggetti del cosmologo. Da sinistra: una galassia (BX442, la più distante spirale mai osservata; la sua luce è stata emessa 10,7 miliardi d'anni fa, quando l'universo aveva un quinto della sua attuale età), un campo galattico (Hubble eXtreme Deep Field, ogni punto è una galassia), un ammasso di galassie (Abell 2218) e la «rete cosmica» (simulazione numerica). In ogni figura, un quadrato bianco ha le dimensioni della figura alla sua sinistra.

**Galassie, ammassi e struttura su larga scala.** In 14 miliardi di anni, sotto l'azione della forza gravitazionale la materia si distribuisce nello spazio formando una sorta di «rete cosmica» fatta di «fogli», «filamenti» e «nodi» di materia, lasciando la maggior parte dello spazio vuota; le prime evidenze osservative risalgono alla metà degli anni '80. Di questa «struttura a larga scala» sono maggiormente visibili le parti più brillanti, che in un lento processo gerarchico crescono e si fondono dando vita prima alle galassie, poi a gruppi di 5 – 10 galassie, quindi ad ammassi di 100 – 10 000 galassie e infine ai superammassi — i grossi nodi della rete (figura 5). In ciascuno di questi oggetti, che una volta formati sono gravitazionalmente insensibili all'espansione dell'universo, diventano successivamente rilevanti interazioni elettromagnetiche e processi chimici che modificano l'ambiente circostante, talvolta anche fino a scale cosmologiche. Ad esempio, con un processo di percolazione analogo all'acqua che filtra attraverso i grani di caffè, la radiazione ultravioletta emessa dalle stelle più calde, dalle galassie ordinarie o con nuclei galattici attivi e dalle supernove ionizza il gas neutro intorno ad esse formando delle bolle di gas ionizzato; queste, espandendosi, pervadono tutto lo spazio ad eccezione delle regioni dove il gas è estremamente denso. Il risultato è un universo oggi quasi interamente ionizzato.

**Epilogo numerico (verso la complessità).** Coniugare la dinamica su scale cosmologiche (dai Mega parsec ai Giga parsec), dominata dalle pure interazioni gravitazionali, con la complessità dei processi astrofisici su piccola scala (dai parsec ai kilo parsec), cioè tutta la fisica e la chimica alla base della formazione di stelle e galassie, è possibile solo con una semplificata descrizione analitica, tipicamente statistica, richiedendo altrimenti calcoli lunghissimi e di disumana potenza; è questo un destino comune a tutte quelle discipline che hanno a che fare con «sistemi complessi», come la biofisica o la meteorologia.<sup>17</sup> A ritmo esponenzialmente crescente i computer permettono oggi però di affrontare questa complessità con sempre maggior accuratezza e precisione, impensabile solo pochi anni fa, svelando spesso «nuovi mondi».<sup>18</sup>

Le simulazioni numeriche stanno così cambiando lo status delle scienze astronomiche, elevandole forse al rango di scienze galileiane permettendo infine le «sensate esperienze», benché virtuali: il cosmologo del XXI secolo può creare Universi a piacimento, testare teorie e modelli modificandone i parametri e limitando fortemente le semplificazioni, e confrontarli infine con quanto si osserva.

<sup>17</sup> Si chiamano «sistemi complessi» tutti quei sistemi (naturali, sociali, economici) caratterizzati da molti «gradi di libertà»: non più il sistema a due corpi Terra-Luna, ma miliardi di galassie; non più una molecola d'acqua fatta di tre atomi, ma proteine fatte di centinaia o migliaia di molecole immerse in milioni di molecole d'acqua; non più il contagio dell'influenza tra due fratelli, ma la propagazione di epidemie su scala continentale. Fenomeni così diversi manifestano spesso dei comportamenti collettivi apparentemente «casuali», ma macroscopicamente del tutto analoghi. Tradotto in linguaggio galileiano, la matematica sottostante che permette di descriverli è sostanzialmente la stessa... tentazione o successo del riduzionismo scientifico?

<sup>18</sup> «I computer sono incredibilmente veloci, accurati e stupidi. Gli uomini sono incredibilmente lenti, inaccurati e intelligenti. Insieme sono una potenza che supera l'immaginazione» (A. Einstein).



## 4. Cosmologia oscura: sfide del «modello standard»

**Materia visibile ed invisibile.** Quale sia la natura della materia che costituisce galassie, ammassi e tutte le strutture cosmiche, finora non s'è detto. Quella direttamente osservata, “luminosa”, ha per ciò necessariamente interagito con le onde elettromagnetiche: si tratta quindi di atomi, neutri o ionizzati, talvolta sotto forma di molecole o polveri.<sup>19</sup> Ma non è tutto: questa materia “ordinaria”, ovunque essa sia, non costituisce che *un sesto* di tutta la materia gravitante. La maggior parte, benché sottoposta all'attrazione gravitazionale, non risulta visibile — per ciò chiamata «materia oscura». L'ipotesi della sua esistenza risale agli anni '30 del secolo scorso, ad opera dell'astrofisico Fritz Zwicky, ed è la spiegazione a tutt'oggi più facilmente accettata per spiegare numerosi fenomeni gravitazionali: la velocità di rotazione dei lembi più esterni delle galassie a spirale, destinati altrimenti a ruotare molto più lentamente; la stabilità gravitazionale e la forma conseguentemente ellissoidale degli ammassi di galassie, che altrimenti non si formerebbero così; le lenti gravitazionali, spettacolari miraggi o deformazioni di immagini attorno a galassie ed ammassi (in figura 5, archi nell'ammasso Abell 2218; si veda anche la figura 6 al centro), altrimenti molto meno visibili e con geometrie apparenti decisamente differenti. Questione chiave per comprendere la struttura del cosmo, capitolo ancora aperto, è poi la relazione tra le fluttuazioni primordiali, la distribuzione della dominante materia oscura e quella degli oggetti luminosi.

Volendo rinunciare alla materia oscura, l'alternativa sarebbe rinunciare alla Relatività Generale e provare altre teorie della gravitazione, e non manca chi tenta questa strada impervia. Scegliendo invece la tradizione, restano invece da scoprire le proprietà intrinseche (cioè non gravitazionali) di questa *materia* oscura: massa, carica, spin... Dal cielo qualche segnale, forse negli ancora misteriosi raggi gamma; ma negli acceleratori di particelle come l'LHC del CERN ancora non se n'è trovata traccia, si procede per esclusione. Statistica esclusione.

**Energia oscura, costanti-non-costanti, topologia dell'Universo.** Dopo la fruttuosa applicazione della Relatività Generale alla cosmologia e le numerose e straordinarie conferme osservative, agli inizi degli anni '90 la concezione dell'Universo era pressoché consolidata, limiti compresi: le proprietà geometriche medie e l'origine quantistica delle strutture cosmiche fornivano un quadro stabile entro cui studiare formazione ed evoluzione dei singoli oggetti celesti, fare astrofisica insomma. Ma nel 1997 nuove accurate osservazioni misero in crisi il paradigma.<sup>20</sup>

Il flusso di luce proveniente dalle supernove (di tipo Ia) più distanti risultava più debole di quanto ci si aspettasse in un universo con la quantità di materia osservata, incompatibile con qualsivoglia forma ragionevole di assorbimento. D'altra parte questa quantità di materia non era sufficiente a garantire la

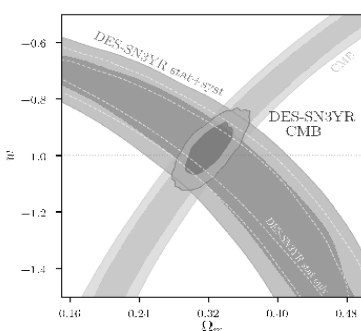


Figura 6. Analisi statistica dello spazio dei parametri dell'energia oscura nella sua formulazione più semplice, un fluido omogeneo caratterizzato da un'equazione di stato ( $w$ ), in funzione della frazione di materia oscura ( $\Omega_m$ ). Le bande chiare (scure) indicano l'intervallo di valori con affidabilità del 68% (95%) e sono ottenute dalle analisi di supernove Ia (progetto DES-SN3YR; Abbott et al. 2018) e radiazione cosmica di fondo (CMB, progetto PLANCK). La combinazione statistica favorisce un modello con  $\Omega_m = 0.321 \pm 0.018$ , cioè circa il 32% dell'universo sarebbe composto da materia (e il restante 78% di energia oscura), spazialmente piatto e con  $w = -0.978 \pm 0.059$ . Compatibile con una costante cosmologica ( $w = -1$ ), questo risultato ammette anche — seppur in modo statisticamente meno robusto — valori  $w < -1$ , indice di un fluido con proprietà dinamiche del tutto innaturali.

<sup>19</sup> Benché questione più astrofisica che cosmologica, resta ancora incompreso dove sia “nascosta” la maggior parte della materia luminosa, in deficit rispetto alla quantità prodotta nelle primissime fasi di vita dell'universo e “pesata” con straordinaria precisione misurando le proprietà statistiche delle fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo. L'ipotesi più plausibile è che sia molto rarefatta, e quindi interagisca assai debolmente con la radiazione elettromagnetica, richiedendo sensibilità strumentali più evolute di quelle attuali per poter essere rilevata.

<sup>20</sup> Osservazione sconvolgente, tanto da far meritare ai suoi tre portavoce il Premio Nobel per la Fisica nel 2011.

piattezza della geometria, così come dedotta dalle accuratissime misure delle fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo. Restando fedeli al modello di Friedmann, ciò si traduce in una espansione accelerata dell'universo negli ultimi 7 miliardi d'anni. La più immediata spiegazione si otterrebbe introducendo una nuova forma di "materia", chiamata «energia oscura» o «quintessenza», circa tre volte più abbondante della materia oscura e distribuita nello spazio omogeneamente, almeno sulle scale osservate (al contrario di materia oscura e luminosa, che si addensano in aloni e filamenti di "piccola" scala). Questa avrebbe anomale proprietà gravitazionali repulsive tali da permettere l'accelerazione tracciata dalle supernove: una forma di "antigravità". Il candidato più semplice è la celebre «costante cosmologica», introdotta con argomenti geometrici già da Einstein per assicurare la staticità dell'Universo, ipotesi poi scartata dalle osservazioni di Hubble. Fisicamente potrebbe corrispondere alla densità d'energia del «vuoto», lo stato di minima energia delle particelle elementari presenti nell'universo, equilibrio quantistico di «particelle virtuali» di materia e antimateria in continua creazione e annichilazione, lo stesso che si manifesta nel provatissimo effetto Casimir; ma stime teoriche e valori misurati sono ampiamente incompatibili, diversi addirittura di  $10^{120}$  volte, almeno nella versione più comune dei calcoli. Eppoi, perché il rapporto tra densità d'energia del vuoto e della materia oscura sarebbe di circa 3:1 proprio *oggi*? Un'impercettibile variazione nelle condizioni iniziali sposterebbe sensibilmente quest'equivalenza ad un'altra epoca cosmologica e il cosmo ci apparirebbe drammaticamente diverso. Soluzioni alternative alla costante cosmologica spesso meno problematiche e talvolta innaturali sono numerosissime, ancora tutte sul banco di prova (figura 6).

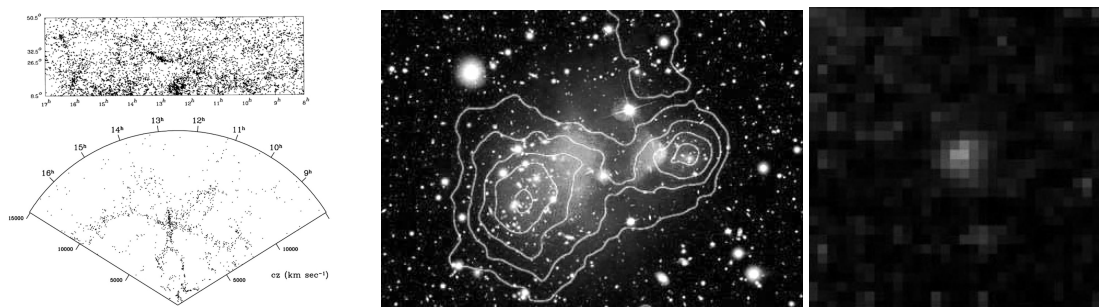
Una spiegazione alternativa potrebbe riporre su un altro fallimento della Relatività Generale, questa volta su larga scala: così come accadeva per il Big-Bang, teorie gravitazionali più complesse — magari le stesse incontrate in quell'occasione? — potrebbero spiegare anche questa nuova fenomenologia cosmologica. Talvolta con risvolti inaspettati, ma tutt'altro che esclusi dagli attuali dati spettroscopici: costanti della natura come la «costante gravitazionale», il rapporto tra carica elettrica e massa dell'elettrone, o il rapporto tra massa del protone e massa dell'elettrone potrebbero non essere "costanti", ma variare nel tempo e nello spazio — su scale cosmologiche, ben s'intende.<sup>21</sup>

Un'ultima soluzione all'espansione accelerata potrebbe essere più pacata, ma matematicamente assai delicata e ancora non del tutto digerita: nessuna nuova forma di energia oscura, nessuna nuova teoria della gravitazione, ma il segnale che le ipotesi di partenza, omogeneità e isotropia estrapolate all'intero Universo, erano troppo forti, da intendere piuttosto valide solo statisticamente e su scala «di Hubble»,  $c/H_0$ . Bisognerebbe in tal caso rivedere accuratamente la definizione operativa di media che sta alla base delle equazioni di Friedmann: "semplici" effetti gravitazionali locali, intrinseci alla Relatività Generale, potrebbero ripercuotersi su larga scala ed essere erroneamente interpretati come proprietà globali... vedi il peso delle fluttuazioni! Spingendosi oltre, potrebbe essere addirittura messa in discussione la «topologia» dello spaziotempo Universo: non più "liscia" e "tutta d'un pezzo", come finora tacitamente ammesso, ma con "pieghe", "tagli" e "buchi", come quella «3-toroidale» o quella «dodecaedrica di Poincaré»; e allora potrebbe succedere che, come in un caleidoscopio, punti visti come distinti sulla sfera celeste sarebbero di fatto lo stesso punto...

Moderne allegorie? Piuttosto ipotesi ad oggi non scientificamente eliminabili, in attesa di nuovi sofisticati strumenti di misura come i satelliti PLANCK ed EUCLID dell'Agenzia Spaziale Europea — lavoro per centinaia di istituti e migliaia di ricercatori, motore di tecnologia non programmata.

---

<sup>21</sup> Si legga ad esempio *L'importanza di essere costante*, di J.-P. Uzan e B. Leclercq (edizioni Dedalo, 2008). Si noti che in fisica non si misurano grandezze assolute ma solo rapporti di grandezze omogenee, confrontando grandezze incognite ad unità di misura «standardizzate». La cosmologia così come la meccanica quantistica o tutte le "scienze degli estremi" obbligano a riconsiderare attentamente il significato dell'operazione di misura.



**Figura 7.** Fantasmai cosmici. *Sinistra:* Galassie del catalogo CfA2 (pubblicato nel 1986), disposte lungo la linea di vista dell'osservatore posto al vertice del cono, la cui base curva rappresenta la dimensione longitudinale della sottile fetta di cielo osservato (mostrata sopra). Esse sembrano distribuirsi nello spazio formando una figura umana, con le cosiddette «Dita di Dio»: si tratta evidentemente di un effetto di prospettiva, dovuto alla velocità di recessione delle galassie lungo la linea di vista (moti peculiari ed espansione di Hubble) e alla limitatezza della regione osservata; osservazioni più recenti, compiute su porzioni di cielo molto più ampie e profonde e in cui si sia adeguatamente corretto l'effetto della velocità, mostrano distribuzioni più «anonimamente» naturali. *Centro:* Bullet Cluster, esito dello scontro di due ammassi di galassie, visto simultaneamente in banda ottica (punti biancastri, quasi tutti sono galassie) e attraverso l'emissione di raggi X da parte del plasma che lo permea, scaldato dall'urto a 162 milioni di gradi centigradi (luminosità diffusa al centro dell'immagine; si vedono chiaramente due coni formati dalle onde d'urto). La maggior parte della materia che lo compone è però non visibile, ma «oscura» (rappresentata artificialmente da curve di iso-densità). Questa è rilevata attraverso l'effetto di lente gravitazionale, la distorsione creata da tutta la materia che compone l'ammasso (in particolare quella oscura, sei volte più abbondante della materia ordinaria) sulla forma intrinseca delle galassie retrostanti, che quindi appaiono coerentemente deformate: la materia visibile, da sola, non assicurerebbe deformazioni di tale entità. *Destra:* Immagine all'infrarosso ottenuta col satellite SPITZER della galassia candidata ad essere la più distante mai osservata: la sua luce sarebbe stata emessa 13,3 miliardi di anni fa. Se confermata, la teoria di formazione delle galassie dovrebbe rispettare dei vincoli molto forti, giacché questa avrebbe avuto solamente circa 400 milioni di anni per formarsi.

## 5. Colonne d'Ercole

**Il Principio Antropico e i sacri testi: l'importanza degli errori.** Capita talvolta, quando si è particolarmente fortunati, di dover affrontare dei «fantasmai cosmici», rompicapi che mettono in crisi i paradigmi; alcuni celebri esempi sono mostrati in figura 7. Quasi sempre si tratta di una visione distorta, parziale o prospettica dell'oggetto osservato. Con spirito responsabilmente cauto (e chi fa scienze naturali è uso stimare l'errore dell'errore) si riesce spesso a ricondurre il fenomeno non immediatamente evidente ad una falla dell'esperimento, dell'osservazione, della teoria o dell'interpretazione della teoria. Ma di fronte alle domande più ardue e compromettenti, anche nella laica cosmologia moderna qualcuno è di tanto in tanto tentato dal ricorrere al Principio Antropico: «L'universo (e quindi i parametri fondamentali che lo caratterizzano) dev'essere tale da permettere la creazione di osservatori all'interno di esso ad un dato stadio [della sua esistenza]» (B. Carter, 1973). Un atteggiamento rinunciatario, indice molto probabilmente di mancanza di idee. Più stimolante *fare gli eroi*, come Prometeo – e qualcuno magari riuscirà a «transire suum pectus mundoque potiri».<sup>22</sup>

Atteggiamento altrettanto limitante è quello di adagiarsi fideisticamente sui sacri testi, che un tempo erano quelli religiosi, testi «come l'Iliade e l'Orlando furioso, libri ne' quali la meno importante cosa è che quello che vi è scritto sia vero».<sup>23</sup> L'errore fu considerare questi testi punto d'arrivo e non invece punto di partenza o di passaggio — senza considerare che probabilmente l'universo in essi descritto era piuttosto quello umano, ed «è ofizio de' saggi espositori affaticarsi per trovare i veri sensi de' luoghi sacri».<sup>24</sup> Tuttavia è un rischio questo non solo della teologia: molto spesso «sacri» diventano quei manuali scientifici su cui si formano generazioni intere; per i «fedeli» diventa difficile pensare a «costanti»

<sup>22</sup> Manilio, *Astronomica*, 4, 392. La frase è incisa sulla Medaglia Fields, la massima onorificenza per i matematici.

<sup>23</sup> Galileo Galilei, *op. cit.*

<sup>24</sup> Galileo Galilei, *Lettera a Benedetto Castelli*, 1613.

che costanti non sono, a “gravi” che antigravitano, a geometrie non lisce o a direzioni privilegiate nell’Universo.

Al contrario “nelle dispute di problemi naturali non si dovrebbe cominciare dall’autorità di luoghi delle Scritture, ma dalle sensate esperienze e dalle dimostrazioni necessarie”.<sup>25</sup> Senza fare appello a qualsivoglia infallibilità, esperimenti («sensate esperienze») e modelli matematici («dimostrazioni necessarie») sono intrinsecamente imperfetti, ed è grazie a quest’imperfezione che c’è spazio per la speculazione, germe del progresso. Il risultato che ne scaturisce, ad esempio il Modello Cosmologico Standard, è lungi dall’essere una verità assoluta; è piuttosto, secondo le categorie e i canoni scientifici del momento, che sono certamente anche estetici, una rappresentazione sempre più accurata e precisa di tutti fenomeni (cosmologici) fino ad ora osservati. Per le innovazioni radicali, i cambi di paradigma, le rivoluzioni, serve però di più: uno “spirito inquieto, che subverte gli edifici di buone discipline e si fa fondatore di machine di perversitate”.<sup>26</sup> Fortunatamente oggi andare e venire dalle Colonne d’Ercole non è più a rischio di condanna eterna.

**Nemesi del Cosmo.** La conoscenza dell’Universo è una questione di approccio o di progresso? Questa probabilmente è la domanda più profonda nascosta sotto la matematica, le osservazioni e gli esperimenti, tecnicismi inevitabili di ogni scienza moderna matura, inclusa la cosmologia. Con istinto olistico si potrebbe convenire con Einstein nel riconoscere che tutte le religioni, le arti e le scienze sono rami dello stesso albero; pericolosamente però, così facendo, si sconfinerebbe in un mestiere che non è più quello del cosmologo-scienziato. Fondamentale per costui è definire dall’inizio l’oggetto di studio, l’*Universo* fisico, ed i confini, l’*universo* osservabile, con le loro scale temporali, spaziali e di energia. Necessario è constatare i limiti degli strumenti d’indagine, osservatore incluso, e la circostanzialità delle conclusioni, che in tutte le scienze naturali, e in particolare in quella fondamentale, la fisica, dovrebbero limitarsi a spiegare il *come* dei fenomeni, non il *perché*: “È sufficiente che la gravità esista di fatto, agisca secondo le leggi da noi esposte, e spieghi tutti i movimenti dei corpi celesti e del nostro mare”.<sup>27</sup>

Fenomeni, distanze e tempi a cui il cosmologo s’interessa sono stati e sono inevitabilmente destinati a mutare nel corso della storia. Analoga sorte tocca al linguaggio di cui si serve, i cui caratteri oggi non sono più soltanto “triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche”, ma quelli dell’Analisi Funzionale, della Geometria Differenziale, della Topologia Algebrica e di tutte quelle discipline matematiche in continua, rigorosa, geniale e talvolta inquietantemente autonoma evoluzione, frutto del pensiero astratto eppure astutamente adattabili a descrivere, con *irragionevole efficacia*,<sup>28</sup> la varietà dei fenomeni naturali. Fenomeni che, se osservati su scale molto grandi o molto piccole, per propria natura o per “difetto di vista” appaiono «complessi»: il determinismo lascia allora spazio ai fenomeni «caotici», o «stocastici», non univocamente prevedibili e tuttavia con codificate regolarità. La Probabilità e la Statistica sono altre matematiche necessariamente onnipresenti, non solo nell’analisi dei dati osservati e misurati, ma anche intrinsecamente nella Natura delle cose.<sup>29</sup>

Pur limitandoci agli ultimi quattrocento anni, il cosmologo ha continuato a commettere *hybris* in pensieri, parole, opere e omissioni, avendo formulato teorie e concetti oltre l’evidenza quotidiana, costruito strumenti che mettono in crisi l’intelletto umano e quanto da sè ideato, dismesso i risultati che non confortavano il momentaneo senso dell’estetica. Risultato a *ti con zero*, omaggio a Italo Calvino: l’universo osservabile è grande un miliardo di volte *al cubo* la dimensione tipica delle galassie, non è nato da una esplosione, circa 14 miliardi d’anni fa c’era un caos quantistico da cui sono nate le strutture

---

<sup>25</sup> Galileo Galilei, *Lettera a Madama Cristina di Lorena granduchessa di Toscana*, 1615.

<sup>26</sup> Giordano Bruno, *De l’infinito, universo e mondi*, 1584.

<sup>27</sup> Isaac Newton, *op. cit.* Detto altrimenti, “Gravitation is not responsible for people falling in love” (A. Einstein).

<sup>28</sup> Eugene Wigner, “The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences”, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 13, 1-14 (1960); Richard Hamming, “The Unreasonable Effectiveness of Mathematics”, *The American Mathematical Monthly*, 87 (1980).

<sup>29</sup> “As far as the law of mathematics refer to reality, they are not certain; and as far as they are certain, they do not refer to reality” (A. Einstein). È qui opportuno ricordare alcuni nomi celebri che hanno onorato e celebrato la casualità nella scienza moderna: Schrödinger, Ehrenfest, Boltzmann, Gibbs, Feynman.

cosmiche, oggi si espande accelerando ad un ritmo umanamente ridicolo ma drammaticamente chiaro e potrebbe nascondere più di quattro dimensioni; la maggior parte del “contenuto” è di natura oscura ma non ha senso parlare di “contenitore”, ed è sostanzialmente vuoto; e c’è spazio per le certezze solo semplificando. Questa la visione supportata dall’unico strumento veramente riproducibile ed inequivocabile in quanto rigorosamente circoscritto *ab initio*, la matematica. Alla fine, tuttavia, per gli eredi di Galileo fin dove sia lecito spingersi lo decidono solo i dati sperimentali ed osservativi: questa la rude, brutale *nemesis* del Cosmo.

\* \* \*

**Avvertimento e ringraziamenti.** Molti argomenti d’attualità e rilevanza per la cosmologia moderna non sono stati affrontati, altri solo parzialmente citati: «pre-Big Bang» e «multiverso», «bariogenesi» e «anti-materia», «neutrini massivi» e «difetti topologici», «onde gravitazionali» e «buchi neri supermassivi» sono solo alcuni esempi. La ragione della scelta sta unicamente nella sensibilità dell’autore a certi temi. Questo testo è il frutto di una conferenza tenutasi a Portogruaro nel marzo 2012 (revisione: maggio 2019). Ringrazio gli studenti del Liceo di questa città e i loro professori per la straordinaria attenzione, e un paio di loro per il coraggio delle domande e la gentilezza delle loro repliche; il pubblico familiarmente partecipe; gli Amici sempre presenti, per insistere nel non farmi sconti; il prestigioso collega e amico Paolo Cassata, per l’attenta e critica rilettura del manoscritto; e la mia Urania, anzi Tersicore, o Calliope.

\* \* \*

### **Altri riferimenti bibliografici**

- Abbott et al., arXiv:1811.02374, 2018.
- Buchert T., in «General Relativity and Gravitation», 33, pp.1381-1405, 2001.
- Clowe D. *et al.*, in «The Astrophysical Journal», 648, L109, 2006 (fig. 7.2, immagine ottica e curve d’isodensità della materia, ricostruite dalla misura dall’effetto lente gravitazionale).
- Coe D. *et al.*, in «The Astrophysical Journal», 762, p. 32, 2013 (fig. 7.3).
- De Lapparent V., Geller M., Huchra J., in «The Astrophysical Journal», 302, L1, 1986 (fig. 7.1).
- Ellis, G. F. R., *Issues in the philosophy of cosmology*, in «Handbook in Philosophy of Physics», Elsevier, 2006.
- Ellis, G. F. R., Buchert T., in «Physics Letters A», 347, pp. 38-46, 2005.
- Guzzo L., VIPERS team, *VIPERS: An unprecedented view of galaxies and large-scale structure halfway back in the life of the universe*, in «The ESO Messenger», 151, 39, 2013.
- Illingworth G. *et al.*, American Astronomical Society, AAS Meeting #221, #147.44, 2013 (fig 5.2).
- Haddad L., Duprat G., *Mondes : Mythes et images de l'univers*, Editions du Soleil, 2006.
- Kneib J.-P. *et al.*, in «The Astrophysical Journal», 471, p. 643, 1996 (fig. 5.3).
- Law D. *et al.*, in «Nature», 487, pp. 338-340, 2012 (fig. 5.1).
- Lyth D. H. e Riotto A., in «Physics Report», 314, pp. 1-146, 1999.
- Markevitch M., *Proceedings of the X-ray universe*, ed. A. Wilson, 723, 2005 (fig 7.2, immagine in banda X).
- Planck Collaboration, *Astronomy & Astrophysics*, 571, pp.1-48, 2013 (fig. 4).
- Peebles J. P. E., *Physical cosmology*, Princeton series in physics, 1974.
- Regge T., Peruzzi G., *Spazio, tempo e universo. Passato, presente e futuro della teoria della relatività*, ed. UTET Università, 2005.
- Springel V., Virgo Consortium, in «Nature», 435, pp. 629-636, 2005 (fig. 5.4).
- Uzan, J.-P., in «Reviews of Modern Physics», 75, pp. 403-455 (2003).
- Weinberg S., *Gravitation and cosmology: Principles and applications of the general theory of relativity*, ed. John Wiley & Sons, 1972.