
Considerazioni storico-epistemologiche sul principio cosmologico.

Vincenzo Fano

Dipartimento di scienze pure e applicate, Università di Urbino

Giovanni Macchia

Dipartimento di scienze pure e applicate, Università di Urbino

Il "principio cosmologico", cioè l'ipotesi che l'universo sia omogeneo e isotropo, è stato introdotto implicitamente da Einstein nel 1917, nell'articolo che di fatto fondò la moderna cosmologia relativistica. Questo principio è ancora il mattone fondamentale dell'intero edificio teorico della cosmologia, nonostante il suo statuto epistemologico sia stato spesso frainteso dagli stessi scienziati. Qui presentiamo un breve excursus critico e storico delle riflessioni che, a partire dagli anni Trenta, hanno riguardato questo importante principio.

Nel 1917 Einstein aveva appena formulato la teoria della relatività generale, ma si rendeva conto di non avere ancora realizzato il compito filosofico che si era prefisso, cioè quello di eliminare ogni effetto inerziale dovuto allo spazio in quanto tale, ovvero non aveva ancora dimostrato quello che chiamerà [1] "il principio di Mach".

Prendiamo due sfere uguali di materiale deformabile ([2], pp. 771-772). Ipotizziamo che una ruoti rispetto all'altra in un universo per il resto vuoto. Secondo la fisica newtoniana risulterebbe che quella che ruota si dovrebbe deformare. Questa deformazione sarebbe dovuta solo alla sua rotazione rispetto allo spazio. Einstein voleva dimostrare che questo è impossibile. La deformazione non deve essere causata dallo spazio, ma dalle altre masse.

Einstein non era sicuro che le sue equazioni avrebbero rispettato questo principio. Per tale ragione provò ad applicarle all'universo inteso come un tutto, cioè al fine di dimostrare il principio di Mach. In realtà non riuscì in questo intento, poiché pochi mesi dopo De Sitter mostrò che esiste una soluzione delle equazioni in assenza di materia che attribuisce capacità fisiche allo spaziotempo in quanto tale [3]. Tuttavia con il suo saggio "Considerazioni cosmologiche sulla teoria generale della relatività" [4] egli ha fondato forse senza rendersene pienamente conto la

cosmologia scientifica. Per prima cosa egli mostra che l'universo newtoniano è instabile. Infatti, per il teorema di Poisson, o teorema del guscio sferico, se togliamo da una distribuzione infinita e omogenea di stelle una sfera con tutto il suo contenuto, al suo interno la gravità dovrebbe essere nulla. Dunque se rimettiamo al suo posto le stelle della sfera, esse dovrebbero collassare verso il centro. Occorre quindi aggiungere alla forza attrattiva di gravità una qualche forza repulsiva. Dopo di che Einstein passa ad applicare a livello cosmologico la relatività generale. Vale la pena rileggere le sue parole: *Il carattere metrico (curvatura) del continuo spazio-temporale quadridimensionale, secondo la teoria della relatività generale, viene determinato in ogni punto dalla materia stessa che vi si trova e dal suo stato. Quindi la struttura metrica di questo continuo, a causa della disomogeneità della distribuzione della materia, deve essere per forza fortemente avviluppata. Se però noi arriviamo alla struttura all'ingrosso, possiamo rappresentarci la materia come omogeneamente distesa in uno spazio enorme, cosicché la sua funzione di densità di distribuzione cambierà in modo immensamente lento. Ovvero noi procediamo in modo simile a quello dei geodeti, che approssimano con degli ellissoidi le forme molto complicate a livello micro della superficie della terra.* ([4] p. 547, trad. nostra)

Come giustamente nota il grande storico della cosmologia Merleau-Ponty ([5] pp. 51-52, nell'edizione italiana) di fatto il merito della fondazione della cosmologia scientifica non va solo ad Einstein, ma anche a de Sitter, con il quale egli era già in rapporto epistolare da tempo. Sta di fatto che qui Einstein formula quello che Milne ([6] pp. 24 e 68) chiamò "il principio cosmologico di Einstein" (PC). Dal punto di vista strettamente fisico, tale principio afferma che lo spazio-tempo è omogeneo e isotropo, cioè che rispetto a qualsiasi punto la distribuzione della materia è più o meno la stessa - come nell'acqua del mare - e che ogni direzione è equivalente - come per lo spruzzo di un innaffiatoio da giardino in una situazione stazionaria. Non proseguiamo qui nella presentazione dell'articolo di Einstein, che esula dai limiti della nostra riflessione.

Nel 1932 Einstein ([7]p. 235), tornando sulla questione, sarà più esplicito, evidenziando le "assunzioni" del suo lavoro del '17: 1. *tutte le posizioni dell'universo hanno ugual valore* e 2. *la*

struttura dello spazio e la densità devono restare costanti nel tempo (trad. nostra). Egli manterrà la prima, ma respingerà la seconda, sotto la spinta dei nuovi dati astronomici prodotti da Hubble¹.

Prima di proseguire, è importante una precisazione metodologica: Milne formula così il PC: due particelle-osservatori A e B si dicono equivalenti se quello che osserva A di B è uguale a quello che osserva B di A. Un sistema di particelle-osservatori soddisfa il PC se due particelle-osservatori equivalenti ottengono in tutte le loro misurazioni riguardanti il sistema lo stesso risultato. Allora il PC afferma che nel nostro universo tutte le coppie di particelle-osservatori equivalenti trovano gli stessi risultati in tutte le misurazioni che eseguono. Questo in realtà non è ciò che aveva detto Einstein, il quale aveva fornito una definizione *ontologica* e non *epistemologica* del principio. L'assunzione che sta alla base dei modelli cosmologici non è di natura operazionistica, ma sulla realtà fisica. Ovvero il PC non afferma che tutti gli osservatori equivalenti hanno gli stessi risultati, ma che i punti dello spazio-tempo sono equivalenti. D'ora in poi ci riferiremo sempre a questa forma ontologica del principio.

Il PC negli anni Trenta, mentre la cosmologia relativistica stava muovendo i primi passi, subì un attacco frontale da parte di autorevoli fisici sostenitori di una forma radicale di empirismo.

Tali critiche culminano in un enfatico intervento su *Nature* da parte di Herbert Dingle [9]. L'articolo dell'autorevole scienziato e filosofo provocò un'ampia messe di risposte da parte di studiosi molto noti. A distanza di ottanta anni è divertente vedere i pregiudizi storiografici che agivano e purtroppo agiscono ancora nella cultura scientifica. Aristotele, fondatore dell'empirismo, veniva considerato l'alfiere dei razionalisti, contro Galileo, ben noto platonico! A parte questo folklore, nella risposta ulteriore di Dingle [10] appare la fonte del suo pensiero, cioè Newton, che dichiarò di "dedurre dall'esperienza" e di "non fare ipotesi"². È ben noto che né Newton³, né Galileo⁴ erano consapevoli del metodo che stavano

¹Su Einstein e la cosmologia si veda [8].

²Sull'intero dibattito si veda [11]

³Koyré, [12] pp. 27ss., nota che Newton è stato interpretato come empirista più di quanto egli stesso lo fosse.

⁴Si veda ad esempio [13]. p 267 e ss.

inventando, adeguatamente espresso invece da Christian Huygens all'inizio del Trattato sulla luce del 1690 ([14] p. X):

Vedremo alcune dimostrazioni che non producono una certezza così grande come quelle della geometria, che inoltre differiscono molto da queste ultime, poiché mentre i geometri provano le loro proposizioni da principi certi e incontestabili, qui i principi si verificano sulla base delle conclusioni che se ne traggono; la natura di queste cose non accetta che si faccia diversamente. È tuttavia possibile arrivare a un grado di verosimiglianza che spesso non è da meno dell'evidenza completa. Cioè quando le cose, che si sono dimostrate dai principi supposti, si rapportano perfettamente ai fenomeni che l'esperienza ha messo in risalto; soprattutto quando ce ne è un gran numero, e ancor di più quando si formano e si prevedono fenomeni nuovi, che devono seguire dalle ipotesi che si usano, e si trova che in quel caso l'effetto corrisponde alle nostre attese. (Trad. nostra)

Cioè quello che verrà chiamato "metodo ipotetico-deduttivo", che ancora nella seconda metà dell'Ottocento faceva fatica ad affermarsi, tranne importanti eccezioni⁵. Tra le risposte a Dingle, l'unico che sembra avere le idee chiare è l'astrofisico William McCrea ([16] p.1002):

Dingle ha semplicemente riaperto la questione della relazione fra fisica matematica e fisica sperimentale, nella misura in cui egli afferma di aver riscontrato un punto di vista nuovo e perverso nella prima. Ora, un sistema di fisica matematica, al di là della presunta perversione, è l'elaborazione delle conseguenze matematiche di certe ipotesi. Il valore di una teoria è giudicato da un lato dal basso numero e dalla semplicità delle ipotesi, e dall'altro dalla vicinanza dell'accordo delle sue predizioni con i risultati dell'osservazione. (Trad. nostra)

Negli anni Trenta il dibattito epistemologico sui fondamenti delle scienze era molto ampio⁶, tanto che dopo la migrazione di molti studiosi europei negli Stati Uniti, venne fondata a Chicago la rivista *Philosophy of science*. Sul primo

⁵A tutt'oggi, a nostra conoscenza, non esiste una storia del metodo ipotetico-deduttivo nel pensiero scientifico moderno. Vedi però Losee [15], capp. 9 e 10. Non è nostra intenzione contrapporre metodo induttivo e ipotetico-deduttivo, che sono complementari nella pratica scientifica, ma notare come molti fisici sono particolarmente rassicurati dal primo e diffidenti nei confronti del secondo, almeno a parole.

⁶Sulla rivista *Erkenntnis* fondata da Carnap e Reichenbach.

numero ci troviamo un bell'articolo di Einstein: *Sul metodo della fisica teorica*, [18] dove si leggeva:

La struttura del sistema è compito della ragione; il contenuto empirico e la loro mutua relazione devono trovare la loro rappresentazione nelle conclusioni della teoria. Nella possibilità di tale rappresentazione sta il solo valore e giustificazione dell'intero sistema e specialmente dei concetti e principi fondamentali che stanno alla base. A parte ciò questi ultimi sono libere invenzioni dell'intelletto umano, che non possono essere giustificate né dalla natura di questo intelletto, né in un'altra maniera a priori. (Trad. nostra)

Sulla stessa rivista McCrea torna a discutere il problema della storia e dello statuto delle teorie cosmologiche nel 1939 [17], allorché egli difende l'approccio di Milne, attribuendogli una procedura ipotetico-deduttiva. Ovvero assunzione a priori del principio cosmologico e controllo a posteriori della sua validità sulla base della comparazione del modello di universo così costruito con l'universo dell'esperienza (p. 151, trad. nostra). In realtà, benché McCrea abbia chiara la natura del metodo ipotetico-deduttivo che forse aveva evinto anche dall'articolo di Einstein di cinque anni prima, l'affermazione che segue secondo cui lo stesso Milne ne sarebbe consapevole è dubbia. Infatti quest'ultimo nel suo celebre libro del '35 [6] afferma:

Se dobbiamo aspettarci o meno che l'universo sia rappresentabile mediante un sistema che soddisfa il principio cosmologico è una questione metafisica. [...] La mia opinione privata è che l'universo deve soddisfare il principio cosmologico, perché sarebbe impossibile per un atto di creazione ottenere qualcosa di diverso. [...] Con Dio non tutto è possibile. (p. 69, trad. nostra)

Gli anni Quaranta e Cinquanta di certo non sono stati molto vivaci sia per la relatività generale che per la cosmologia⁷. È il periodo in cui si afferma la teoria dello stato stazionario di Bondi, Gold e Hoyle, che nega l'evoluzione dell'universo, ipotizzando l'infinità e l'eternità dell'universo e la creazione di nuova materia. La posizione di Bondi, così come è ricostruita da Gale e Urani [20] sarebbe stata influenzata dal falsificazionismo di Popper e rispetterebbe in pieno il metodo ipotetico-deduttivo. Bondi assume il principio cosmologico *perfetto*, cioè la tesi secondo cui non solo l'universo è omogeneo e isotropo, ma ugua-

⁷Si veda ad esempio Ref. [19]

le nel tempo, esattamente come Einstein aveva ipotizzato nel '17 e negato nel saggio già citato del '32 spinto da Hubble. Di fatto anche Bondi sarà costretto ad abbandonare il suo punto di vista, anche a seguito della scoperta della radiazione di fondo nel 1965 da parte di Penzias e Wilson [22], che conferma invece, la teoria del big bang e quello che diventerà il modello cosmologico standard.

Gli anni Settanta sono un momento di rinascita per la relatività generale e per la cosmologia. Vediamo, ad esempio, che cosa sostiene Weinberg nel suo importante trattato del 1973:

Però la ragione effettiva per la nostra adesione al principio Cosmologico non è che sia sicuramente corretto, ma piuttosto che ci permette di fare uso dei dati molto limitati che l'astronomia osservativa fornisce alla cosmologia. Se facciamo una qualsiasi assunzione più debole, come nei modelli anisotropi o gerarchici, allora la metrica conterrebbe così tante funzioni indeterminate (sia se usiamo che se non usiamo le equazioni di campo), che i dati sarebbero del tutto inadeguati per stabilire la metrica. D'altra parte adottando la cornice matematica piuttosto restrittiva descritta in questo capitolo abbiamo una effettiva possibilità di confrontare la teoria con l'osservazione. Se i dati non si adattano a questa cornice, potremo concludere che o il Principio Cosmologico oppure il Principio di equivalenza sono sbagliati. Nulla può essere più interessante. (p. 480)

Tuttavia negli ultimi quaranta anni, a seguito della raccolta di dati sempre più ampia⁸ sulla radiazione cosmica di fondo (CBR), che hanno confermato la sua isotropia fino a 1 parte su 10^5 , il punto di vista induttivista o radicalmente empirico, alla Dingle, che non era mai morto, ha ripreso fiato. Abbastanza paradigmatico del nuovo atteggiamento è il ragionamento proposto da Ellis, autorevole cosmologo, nella sua voce dell' *Handbook of philosophy of physics* (2007, pp. 1220ss.). L'universo visibile è di circa 10 miliardi di anni luce. D'altra parte noi, guardando lontano nello spazio, di fatto stiamo anche osservando nel nostro cono luce passato, ovvero, da un lato non abbiamo informazioni su ciò che capita al di fuori del nostro cono luce, dall'altro, ciò che veniamo a sapere sugli oggetti astronomici riguarda come erano e non come sono. Ciò malgrado abbiamo serie di dati che ci fanno pensare che a livello di 300 milioni di anni luce da noi, a differenza

⁸Si veda il recentissimo articolo di D. Saddeh et al. [23].

di quanto capita nel nostro sistema solare, nella Via Lattea e nell'ammasso di galassie di cui facciamo parte, la distribuzione della materia sia omogenea. Non solo, come abbiamo già detto, la radiazione di fondo è fortemente isotropa.

Questi dati osservativi non sono sufficienti, però, a giustificare empiricamente l'assunzione dell'isotropia e dell'omogeneità. Ricordiamo che l'omogeneità non implica l'isotropia, tuttavia l'isotropia rispetto a tutti i punti implica l'omogeneità. Inoltre teniamo conto che per noi è impossibile ottenere dati osservativi da un altro punto dell'universo. Visto che stiamo parlando di un cono luce di 10 miliardi di anni luce, anche se ci spostassimo per 20mila anni alla velocità della luce non saremmo in un altro luogo dell'universo.

Per passare dai nostri limitati dati osservativi, che ci suggeriscono l'isotropia e l'omogeneità, al principio cosmologico dobbiamo assumere quello che viene chiamato "principio copernicano": noi non ci troviamo in una posizione privilegiata dell'universo.

Il principio copernicano viene spesso legittimato mediante due argomenti storico-filosofici: Copernico, Bruno e Cusano hanno sgretolato l'immagine del cosmo tolemaico-aristotelico, secondo la quale la Terra e l'uomo sarebbero al centro dell'universo. Non bisogna quindi ritenere che noi siamo in una posizione particolare dell'universo, dunque vale il principio copernicano.

In realtà questo argomento è basato su una *quaternion terminorum*: infatti il termine "privilegiato" può voler dire due cose differenti: 1. essere al centro; 2. non essere in una posizione tipica, cioè da cui si osserva (nella media) qualcosa di speciale. La storia dell'astronomia ha dimostrato solo che la prima affermazione è sbagliata, non la seconda. Per capirci: siamo nel deserto del Sahara, in un punto qualsiasi: benché la probabilità che ci troviamo esattamente al centro geometrico della regione sia molto piccola, la probabilità che ci troviamo in un punto in cui si vedono (in media) cose che da un altro punto non si possono osservare è molto più alta. Infatti è chiaro che se siamo al centro del deserto vediamo solo sabbia, ma se ci troviamo non lontano dai limiti del deserto il paesaggio sarà molto più variegato. In altre parole, c'è un solo punto che è il centro geometrico del deserto, ce ne sono molti dai quali la visione

è omogenea e molti dai quali la visione è disomogenea. Quindi anche se la probabilità di trovarsi al centro dell'Universo è quasi nulla, quella di trovarsi in un punto che vede un particolare tipo di prospettiva è molto più alta.

Secondo argomento. Non abbiamo ragioni per ritenere che la nostra prospettiva sia diversa dalle altre. Anche questa è una fallacia. Non bisogna confondere il "non avere ragioni per credere che..." dal "avere ragioni per credere che non...". Non avere ragioni non è una buona giustificazione. A meno che non assumiamo già l'omogeneità e l'isotropia in tutti i punti dello spazio-tempo⁹.

Non siamo riusciti a trovare buoni argomenti a favore del principio copernicano se non un aprioristico desiderio di simmetria.

Dunque la giustificazione semi-empirica proposta da Ellis e da molti altri non è convincente. Lo stesso Ellis [25] si rende conto in fondo di questa situazione e conclude: *la geometria di Robertson-Walker [cioè l'omogeneità e l'isotropia dello spazio-tempo] per l'universo poggia su una plausibile assunzione filosofica. La deduzione dell'omogeneità dello spazio non segue direttamente dai dati astronomici.* (p. 1226)

Inoltre per ora non abbiamo dati su che cosa ci sta dietro alla CBR¹⁰, cioè su che cosa sia accaduto prima del disaccoppiamento fra materia e radiazione avvenuto circa 380mila anni dopo il big bang. Infine l'isotropia al momento del disaccoppiamento non implica l'isotropia in un qualsiasi altro momento della storia dell'universo.

Anche altri cosmologi, muovendo da una prospettiva induttivista, alla fine sono costretti a cadere nell'apriorismo. Paradigmatico è il caso di Wolfgang Rindler, che dopo pagine molto belle sulle basi empiriche della cosmologia e in particolare del principio cosmologico, conclude:

La richiesta a priori dell'omogeneità di un modello cosmologico si chiama principio cosmologico - sebbene un nome migliore sarebbe 'assioma cosmologico'. Esso è talvolta formulato in modo impreciso dicendo che ogni galassia è equivalente a ogni altra. Esso elimina modelli di per sé ragionevoli come gli universi isola, nei quali le galassie di confine sono atipiche,

⁹Questo è il famoso "principio di ragion insufficiente" o "principio di indifferenza", discusso nel calcolo delle probabilità da Laplace e Keynes. Si veda [24].

¹⁰Forse la recente rilevazione diretta delle onde gravitazionali renderà possibile in futuro un'astrofisica basata su di esse.

oppure universi 'gerarchici' dove le galassie formano ammassi, gli ammassi formano super-ammassi e così via all'infinito, perché allora nessuna regione sarebbe abbastanza ampia da essere tipica. L'omogeneità è un'ipotesi semplificatrice di grande potenza. Mentre i modelli di universo non omogenei ci coinvolgono in questioni globali, la bellezza dei modelli omogenei è che essi possono essere studiati per lo più localmente: ogni loro parte è rappresentativa del tutto. L'assunzione dell'anisotropia in ogni punto è anche più forte. Come abbiamo visto nella sezione precedente essa implica l'omogeneità. Noi la accettiamo come un'ipotesi di lavoro sostenuta dalle evidenze empiriche. ([26] p. 358)

Dove si vede come il grande fisico teorico oscilla fra apriorismo ed empirismo, senza aver chiaro il carattere ipotetico-deduttivo del principio cosmologico.

Molto più esplicita invece, la posizione di un altro grande cosmologo, Jim Peebles, che proprio ribattendo a Ellis, osserva:

Noi dobbiamo convivere con il fatto che le osservazioni a grande distanza saranno sempre schematiche. [...] La consolazione, se ce ne è una, è che l'immagine del mondo messa assieme dai soli dati non è un modello realistico per nessun ramo della fisica. È passato molto tempo da quando la gente affermava con Newton che non si formulano ipotesi. Cioè che essi lavoravano muovendo dall'empiria verso la teoria. Questa non è mai stata l'intera verità ed è molto lontano dal modo in cui procede oggi la scienza. [...] Abbiamo imparato da questa [la meccanica quantistica] scienza fisica straordinariamente riuscita la tattica della convalida mediante controllo indiretto. Questo è il modo in cui si fa scienza e il modo in cui la cosmologia opera. ([27] p. 9)

Concludendo, l'osservazione di Gale [11] secondo cui oggi è ovvio che la fisica procede mediante un metodo ipotetico-deduttivo non è scontata. E va ribadito con forza che lo statuto epistemologico del principio cosmologico è appunto quello di un'ipotesi molto audace che assieme all'applicazione della relatività generale all'universo come sistema fisico produce conseguenze sperimentalmente controllabili, come la CBR e le quantità dei diversi tipi di atomi presenti nell'universo. Come in molti altri casi, un dato sperimentale che non concorda con le previsioni - come in un certo senso è stata la relativamente recente scoperta che l'espansione dell'universo

sta accelerando o come la presenza di lenti gravitazionali là dove non le avremmo aspettate in base alla materia che siamo in grado di rivelare - mette in discussione per *modus tollens* almeno una di tutte le assunzioni che abbiamo fatto¹¹.

Il grande fascino della cosmologia scientifica nata cento anni fa sta proprio in questo straordinario dialogo mediato da ipotesi e deduzioni fra teoria e dati osservativi concernenti la natura e l'origine dell'universo in cui viviamo.



- [1] A. EINSTEIN: "Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie", *Annalen der Physik* **55** (1918) 241-244.
- [2] A. EINSTEIN: "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie", *Annalen der Physik* **354** (1916) 769-822..
- [3] W. DE SITTER: "On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences", *Monthly Notices of Royal Astronomical Society* **76** (1917) 699-728.
- [4] A. Einstein, *Kosmologische betrachtungen zur allgemeine Relativitätstheorie*, Sitzungsberichte der königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, (1917) pp. 142-152.
- [5] M. MERLEAU-PONTY: *Cosmologie du XXe siècle*. Galliard, Paris (1965). (trad. it. *Cosmologie del secolo XX*, Il Saggiatore, Milano, 1974).
- [6] E. A. MILNE: *Relativity, gravitation and world structure*. Clarendon Press, Oxford (1935).
- [7] A. Einstein A. *Zum Kosnologischen Problem der allgemeinen Relativitätstheorie*, Verlag der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften, Sitzung vom 16 April 1931, (1932) pp. 235-37.
- [8] C. Smeenk *Einstein's role in the creation of relativistic cosmology*, in *The Cambridge companion to Einstein*, a cura di M. Jaansen, C. Lehner, Cambridge University Press, (2014) Cambridge.
- [9] H. DINGLE: "Modern Aristotelianism", *Nature* **139** (1937) 784-786.
- [10] H. DINGLE: "Deductive and inductive methods in science: A reply", *Nature, Supplement* **139** (1937) 1011-1012.
- [11] G. Gale, *Cosmology: Methodological Debates in the 1930s and 1940s*, (2015), <http://plato.stanford.edu/entries/cosmology-30s/>.
- [12] A. KOYRÉ: *Studi newtoniani*. Einaudi, Torino (1972).
- [13] L. GEYMONAT: *Galileo Galilei*. Einaudi, Torino (1969).
- [14] C. HUYGENS: *Traité de la lumière*. Gauthier-Villars, Paris (1920).

¹¹Ricordiamo che il *modus tollens* ha in generale la forma "A e B e ... implicano Z, non Z, quindi, implica non A o non B oppure...".

- [15] J. LOSEE: *A historical introduction to philosophy of science*. Oxford University Press, Oxford (1993).; trad. It. *Filosofia della scienza*, Il Saggiatore, Milano, (2001).
- [16] W. H. McCREA: "Physical Science and Philosophy", *Supplement to Nature* **139** (1937) 1001-1002..
- [17] W. H. McCREA: "The evolution of theories of space-time and mechanics", *Philosophy of Science* **6** (1939) 137-162.
- [18] A. EINSTEIN: "On the Method of Theoretical Physics", *Philosophy of Science* **1** (1934) 163-169.
- [19] G. MACCHIA: "La cosmologia relativistica, 1917-1965", *Giornale di astronomia* **24** (2016) 24-31.
- [20] G. Gale G., J. Urani J. (1999), *Milne, Bondi and the 'second way' to cosmology*, in H. Goenner, J. Renn, J. Ritter, T. Sauer, a cura di, *The expanding worlds of general relativity*, *Einstein Studies*, vol. 7, (1999), 343-375.
- [21] S. WEINBERG: *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*. Wiley & Sons, New York (1973).
- [22] A. A. PENZIAS AND R. W. WILSON: "A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s", *Astrophysical Journal* **142** (1965) 419-421.
- [23] D. SADDEH, S. M. FEENEY, A. PONTZEN, H. V. PEIRIS, J. D. McEWEN: "How isotropic is the universe?", *Physical Review Letters* **117** (2016) 131302.
- [24] M. STREVEN: "Inferring probabilities from symmetries", *Nous* **32** (1998) 231-246.
- [25] G. F. R. Ellis *Issues in the Philosophy of Cosmology* in: J. Butterfield, J. Earman (eds.), *Philosophy of Physics* Elsevier, Amsterdam (2007).
- [26] W. RINDLER: *Relativity: Special, General, and Cosmological*. Oxford University Press, Oxford (2006).
- [27] P. J. E. PEEBLES: *Principles of Physical Cosmology*. Princeton University Press, Princeton (1993).



Vincenzo Fano: insegna Logica e Filosofia della scienza nell'Università di Urbino, studioso di Storia e Filosofia della fisica nonché di Storia e Filosofia della psicologia; la sua ricerca si è concentrata soprattutto sul problema del rapporto fra modelli matematici, esperienza e realtà. Autore di più di 100 articoli pubblicati in Italia e all'estero, di *Filosofia dell'evidenza*, CLUEB, 1993, *L'orologio di Einstein*, CLUEB 2002, *Comprendere la scienza*, Liguori 2005, *I paradossi di Zenone*, Carocci 2012. È membro effettivo dell'Académie Internationale des Philosophie de la science.

Giovanni Macchia: laureato in Astronomia all'Università di Bologna, ha conseguito il dottorato in Scienze Umanistiche all'Università di Urbino, ed è stato post-doc alla *University of Western*

Ontario. Ha pubblicato per riviste quali *Synthese*, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, *Foundations of Science*. Si occupa principalmente di filosofia della scienza, in particolare di filosofia della fisica e di filosofia e storia della cosmologia moderna. Sta attualmente lavorando a una *Introduzione alla filosofia della cosmologia moderna* per Carocci.

