



Accademia Pontaniana



Società Nazionale
di Scienze, Lettere e Arti

La Relatività Generale a cento anni dalla sua formulazione

Convegno tenuto nell'ambito delle attività congiunte
della Società Nazionale di Scienze, Lettere e Arti
e dell'Accademia Pontaniana

Anno accademico 2016-2017

a cura di
Leonardo Merola

GIANNINI EDITORE
NAPOLI 2018

© 2018 Società Nazionale di Scienze, Lettere e Arti e Accademia Pontaniana.

ISBN 978-88-7431-923-7

Il presente volume è stato pubblicato con il contributo di



Regione Campania



Ministero
dei beni e delle
attività culturali
e del turismo

MiBACT



Università di Napoli Federico II

SALUTO

Siamo lieti di rinnovare, qui congiuntamente, i saluti augurali che, nella nostra qualità, rendemmo ai Relatori del convegno “*La Relatività Generale a cento anni dalla sua formulazione*” organizzato dal collega prof. Leonardo Merola.

Il problema della relatività è tal tema di rivoluzionaria incidenza da dover lambire anche studiosi, quali entrambi siamo, di altro ambito disciplinare, quello della storia della filosofia. E qui non possiamo ignorare, come infatti non ignoriamo, almeno il grande libro di Ernst Cassirer, *Zur Einstein'schen Relativitätstheorie* del 1921, che è parte di una grande trilogia – gli altri due lavori sono *Substanzbegriff und Funktionsbegriff* (1910) e *Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik* (1937) –, la quale affronta le conseguenze della liquidazione del determinismo classico conseguita dalla nuova fisica sub-atmica sul sistema delle categorie della logica trascendentale. Dunque un gran problema che fa rilevare come, nella nostra età più che mai, si debba riflettere sulla interazione dei saperi positivi, che ci appare il livello determinante della ricerca scientifica, quali che siano gli ambiti specificamente investigati con piena consapevolezza della rilevanza delle questioni affrontate. Ma di certo non è questa la sede, né è il nostro compito qui, per andare avanti sulla linea della filosofia e della storiografia filosofica del Cassirer. Ci piace tuttavia richiamare un'altra rilevante presenza della teoria della relatività nei nostri studi, in quelli da noi due filologicamente trattati, che ci appare di non poco momento in sé e per la possibilità che offre di sottolineare quanto siano interagenti gli ambiti disciplinari, la cui specificità è data dai criteri filologici con cui specificamente si coltivano, senza nulla concedere a cippi confinari, sempre meno eloquenti nella ricerca scientifica.

In una importante opera di filosofia, *Der Historismus und seine Probleme* di Ernst Troeltsch (edita nel 1921, in parte rielaborando scritti anche precedenti), si legge una pagina di non poco momento, che ricordiamo anche per togliere ogni convenzionalità al nostro doveroso saluto accademico e perché davvero indica quella che abbiamo chiamato l'interazione dei saperi, senza palme di precedenza da riconoscere a questo o a quello. In questa pagina la relatività storica dei valori si ritiene che abbia una qualche analogia con la dottrina fisica della relatività quando questa con Einstein dissolve il principio di inerzia e afferma il principio di una crescente velocità dei movimenti, tanto da inserire anche la “posizione”, la stabilità dell'esistere in un movimento reciproco e mutevole. Tuttavia senza con ciò negare il principio dell'assoluto affidato al carattere calcolabile del sistema di riferimento della realtà naturale. Il che è tendenzialmente messo in discussione dallo storicismo che fa centro sull'idea di individualità storica della “posizione” dell'esistere. Queste tesi furono poco più tardi (1927) riprese da un grande storico come Otto Hintze proprio in una articolata discussione del libro di Troeltsch. E si potrebbe ancora ricordare un altro saggio, stavolta di un autorevole studioso spagnolo, Ortega y Gasset, che nel libro *El tema del nuestro tiempo*, con la eleganza sintetica del gran scrittore che era, sostiene, efficacemente, che se prima del principio di relatività in filosofia e in fisica si partiva dal presupposto che la realtà è assoluta e la conoscenza relativa, dopo la situazione si inverte: la realtà è relativa

e la conoscenza è assoluta. In altre parole siamo vicini a un'altra analogia tra la fisica (questa volta dei "quanta") e la filosofia storica, quella del principio di "indeterminazione", tanto centrale nelle riflessioni filosofiche di Max Weber.

Abbiamo ricordato, pur tanto sommariamente, questi momenti del nostro sapere contemporaneo soltanto per ribadire l'importanza di quella che abbiamo chiamato la interazione dei saperi positivi, che, almeno tendenzialmente, serve a negare, se non altro, ogni logica degli "horti conclusi".

Tale logica fu senz'altro superata anche da uno dei maggiori scrittori del Novecento, Thomas Mann, che, oltre a essere molto interessato alle scienze, fu amico di Einstein, di cui scrisse un necrologio commosso all'indomani della morte, avvenuta nell'aprile del 1955 (Mann lo avrebbe seguito soltanto pochi mesi dopo, nell'agosto dello stesso anno). Si tratta di un testo breve e profondo, che dall'esaltazione della grande personalità di Einstein trascorre anche ai pericoli dell'applicazione tecnico-pratica di quella scienza – la fisica teorica – di cui Einstein era ormai divenuto come un rappresentante mitico. Con Einstein – scrive Mann – era scomparso «un paladino dell'onore umano». Finché egli era stato in vita, si era potuto sperare, forse irrazionalmente, che la sua «mitica autorità» sarebbe stata sufficiente a scongiurare, dopo Hiroshima e Nagasaki, la «spaventosa minaccia» che derivava dal padroneggiamento tecnico dell'atomo. Ma adesso, chissà...

Auguri di buon lavoro.

Domenico Conte

Fulvio Tessitore

PRESENTAZIONE DEL CONVEGNO

A cento anni dalla sua formulazione, la Relatività Generale può considerarsi una delle teorie concettualmente più proficue e prolifiche della Fisica Moderna. Essa è in grado di influire sui più svariati aspetti della ricerca, partendo dalla concezione stessa dello spaziotempo fino all'astrofisica, alla cosmologia e alle teorie di grande unificazione.

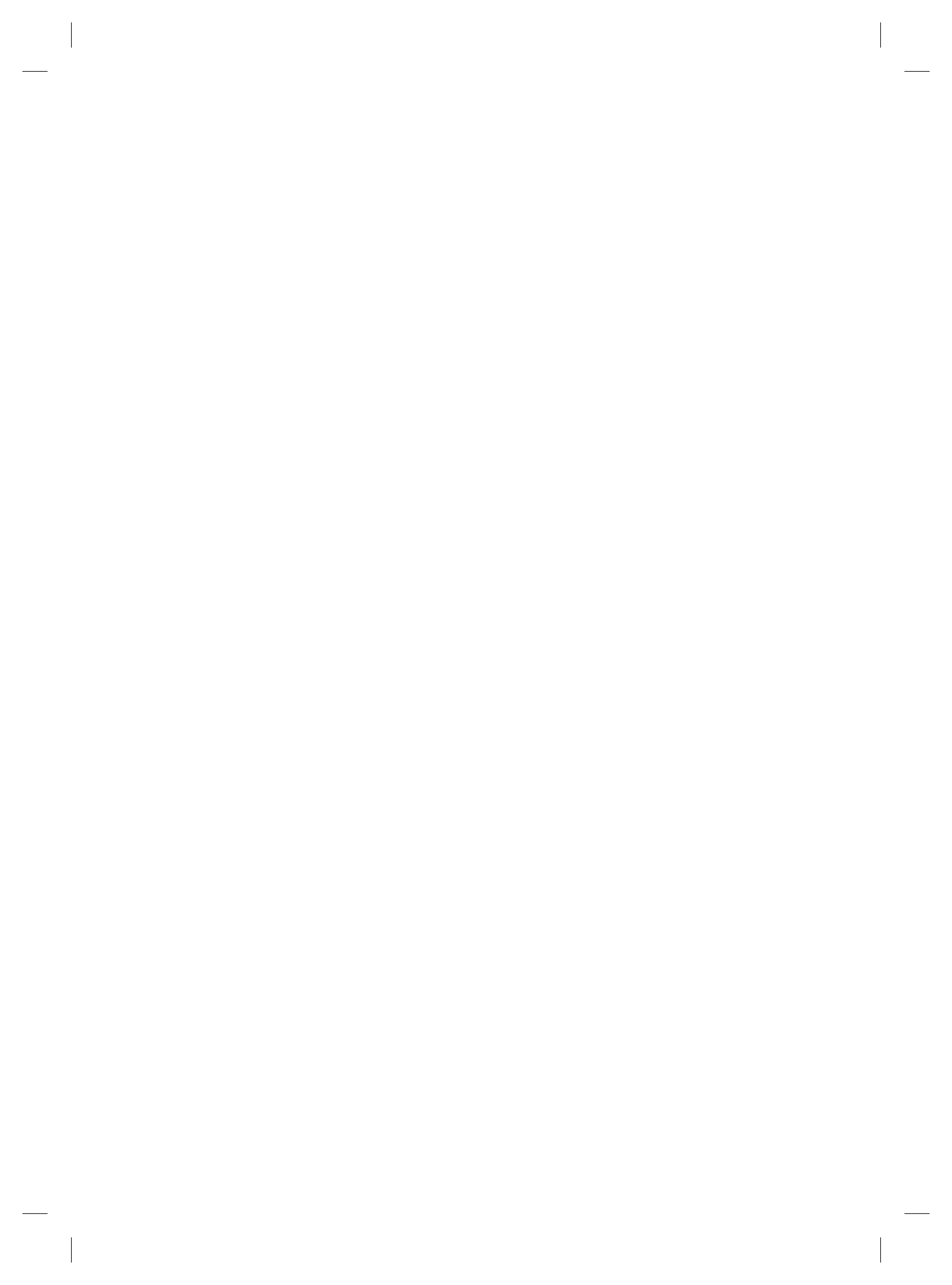
Pur avendo un secolo di storia, il paradigma proposto da Einstein e le previsioni ad esso connesse continuano a fornire una mole strabiliante di risultati teorici e sperimentali, culminata quest'anno con la scoperta delle onde gravitazionali e l'evidenza definitiva dell'esistenza dei buchi neri.

Il convegno, di cui il presente volume riporta gli interventi dei relatori, è stata organizzata dal Dipartimento di Fisica "Ettore Pancini" dell'Università degli Studi di Napoli Federico II e dalla Società Italiana di Relatività Generale e Fisica della Gravitazione (SIGRAV), con la collaborazione e il patrocinio dell'Accademia Pontaniana e della Società Nazionale di Scienze, Lettere e Arti. Si è svolto il 9 dicembre 2016 presso la sede delle accademie napoletane in via Mezzocannone, 8 in Napoli.

In questo incontro, ci siamo proposti, senza pretesa di completezza, di tracciare un percorso nella teoria. L'idea è quella di fornire una chiave di lettura non specialistica sugli aspetti fisici, matematici, filosofici e storici della Relatività Generale. In particolare, è stato presentato l'impatto della teoria sulla Fisica Moderna (Salvatore Capozziello), la sintesi matematica operata da Einstein (Roberto Giambò), la nuova concezione cosmologica (Vincenzo Fano) e la storia di una ricerca, quella delle onde gravitazionali, che cento anni fa sembrava impossibile (Adele La Rana).

Scopo finale della conferenza è quello di fornire un quadro coerente in cui vengono sottolineati non solo i risultati acquisiti, ma, soprattutto, le prospettive per una ricerca futura che, visti i risultati, sembra appena agli inizi.

Leonardo Merola e Salvatore Capozziello
Dipartimento di Fisica "Ettore Pancini"
dell'Università degli Studi di Napoli Federico II



Inseguendo la verità.
Il lungo viaggio di Albert Einstein
alla ricerca delle equazioni della Relatività Generale

ROBERTO GIAMBÒ

Sezione di Matematica della Scuola di Scienze e Tecnologie – Università di Camerino

GIULIO MAGLI

Dipartimento di Matematica – Politecnico di Milano

1. Dopo la relatività speciale

All'indomani della pubblicazione, nel 1905, di diversi lavori tra cui quello¹ “*Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*”, Albert Einstein era definitivamente uscito da quel limbo che fino a quel momento aveva caratterizzato il suo rapporto con il mondo accademico. La fama internazionale del 26enne impiegato all'Ufficio Brevetti di Berna crebbe in modo rilevante proprio da allora, e questo fu reso possibile anche – e forse soprattutto – grazie all'*endorsement* di uno dei più eminenti scienziati dell'epoca, Max Planck. Il fisico di Berlino, infatti, fu in pratica il primo accademico di rilievo a interagire con Einstein dopo la pubblicazione del saggio del 1905, il quale conteneva i principi di quella che oggi chiamiamo relatività *speciale* o *ristretta*, per distinguerla dalla relatività *generale* che ancora era di là da venire. Planck convinse diversi colleghi ad interessarsi ed appassionarsi alle ricerche sulla relatività, e in breve tempo il nome di Einstein circolò negli ambienti scientifici di tutta Europa, tanto che a partire dal 1910 egli venne sistematicamente candidato al Premio Nobel per la Fisica, premio che, come è ben noto, vinse nel 1921 – assegnato in realtà nel 1922 per l'anno precedente, in cui era rimasto vacante. Proprio riguardo a questo punto è curioso osservare che, secondo la motivazione ufficiale, il premio fu assegnato ad Einstein “per i suoi contributi alla fisica teorica e specialmente per la scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico”, scoperta che risale ad un lavoro² anch'esso del 1905, decisamente il suo

¹ “*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*“, *Annalen der Physik* 17, 891-921 (1905).

² “*Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*“, *Annalen der Physik*, 17, 132-148 (2005): “*Un punto di vista euristico sulla produzione e la trasformazione della luce*”.

annus mirabilis [AP]. Nessun accenno esplicito si fa quindi, nelle motivazioni dell'Accademia delle Scienze di Svezia, alla relatività generale, e ciò è senza dubbio dovuto ad un iniziale atteggiamento di grande cautela degli ambienti scientifici nei confronti di questa teoria. Torneremo su questo aspetto nelle conclusioni.

La relatività speciale, invece, aveva degli indubbi pregi che le permettevano di far breccia nelle menti degli scienziati più diffidenti. Anzitutto, la matematica necessaria per svilupparla era abbastanza semplice, tanto che lo stesso Einstein – le cui conoscenze matematiche non erano poi, intorno al 1905, così avanzate – reinventò inconsapevolmente le trasformazioni di coordinate tra sistemi di riferimento inerziali, già scoperte qualche anno addietro dal fisico olandese Hendrik Lorentz, il quale forse non ne aveva compreso appieno la portata – oggi, tuttavia, queste leggi sono note proprio come *trasformazioni di Lorentz*³. Un altro pregio della relatività speciale era senza alcun dubbio la semplicità costitutiva dei suoi principi: il principio di equivalenza per sistemi inerziali, già cardine della meccanica galileiana, e quello di invarianza della velocità della luce in sistemi inerziali, che risolveva in modo ingenuo e geniale al tempo stesso le incongruenze tra le leggi della meccanica classica e le evidenze sperimentali. Il pegno da pagare era, come ben sappiamo, la rinuncia al concetto di tempo assoluto (e di spazio assoluto): una rinuncia ben accettabile, se la contropartita era la possibilità di spiegare in modo semplice e privo di incongruenze le equazioni dell'elettromagnetismo che James Clerk Maxwell aveva formulato 40 anni prima.

2. Dal pensiero alla forma

L'opera di promozione della relatività speciale da parte di Planck ne aumentò, come già detto, l'interesse presso i circoli accademici. Molti lavori di quel periodo servirono a migliorare e semplificare il formalismo matematico: nozioni oggi familiari per i relativisti, come quelle di vettori *di tipo tempo* (*timelike*) o di *cono-luce* (*lightcone*), furono inventate in quegli anni dal ma-

³ Si veda ad esempio [DI], cap. 2, per una esposizione, basata su una matematica elementare, in cui le trasformazioni di Lorentz vengono ricavate dai principi della relatività speciale. L'unico passo su cui in [DI] – e in verità in molti altri autori – si sorvola, è l'assunzione che queste leggi siano *lineari*. In effetti, anche questo fatto, cruciale per determinare le trasformazioni di Lorentz, è dimostrabile – seppur in modo meno immediato – a partire dai principi della relatività, si veda [VF], par. I.8.

tematico di origine lituana Hermann Minkowski. Einstein, invece, praticamente si disinteressò di questo lavoro di sgrossamento matematico e formale, e com'era nella sua natura di curioso, cercò di andare oltre la sua stessa teoria, intravedendo nella distinzione tra sistemi di riferimento “inerziali” e “non inerziali” una criticità da superare. Da sempre affascinato dalla possibilità di spiegare le leggi dell'universo in modo semplice, Einstein comprese, intorno al 1907, che gli effetti della forza di gravità sono localmente indistinguibili da quelli di un osservatore accelerato e quindi non inerziale. Esiste davvero una forza che ci spinge verso il centro della terra, o il nostro è il punto di vista di un osservatore accelerato uniformemente nella direzione opposta? Einstein risolve il dualismo “osservatore inerziale – non inerziale” semplicemente rimuovendolo: le leggi della Fisica devono essere scritte in modo indipendente da chi le osserva!

Nel momento in cui occorre tradurre il pensiero in forma, Einstein capì la necessità di dover trovare una formulazione delle leggi di gravitazione che fosse in accordo con il nuovo postulato di equivalenza, esteso a tutti gli osservatori. L'equazione di Poisson

$$\Delta\phi(x, y, z) = 4\pi G \rho(x, y, z) \quad (2.1)$$

che esprime il potenziale gravitazionale che si trova dalla legge di gravitazione universale di Newton in funzione della densità di massa ρ , non soddisfa questo requisito: il potenziale gravitazionale, e lo stesso operatore differenziale

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

– detto operatore di Laplace o *laplaciano* – agendo solo sulle coordinate spaziali, presuppone la scelta di uno specifico osservatore, in evidente contrasto con i principi di relatività. Occorreva quindi generalizzare questa equazione ad una legge, da cui la “vecchia” equazione potesse scaturire come *approssimazione newtoniana*, proprio come le trasformazioni di Galileo scaturiscono da quelle di Lorentz come approssimazione per osservatori che si muovono di velocità non comparabile con quella della luce. Questa era la strategia per attaccare il problema. Ma nonostante i propri sforzi, il generale Einstein dovette ben presto rendersi conto di non disporre delle truppe necessarie per poter vincere la battaglia: non aveva ancora le conoscenze matematiche adeguate per

affrontare la questione. Inoltre, Einstein in questo periodo entra stabilmente nell'accademia: a Berna nel 1908, per passare poi a Zurigo l'anno successivo e a Praga nel 1911, con conseguente aumento dell'attività didattica, che egli probabilmente sopportava appena, ritenendola una fonte di distrazione dalle proprie ricerche. Infine, il crescente interesse dei circoli scientifici attorno alla teoria quantistica aveva contagiato anche Einstein, che a causa di tutti questi motivi smise per qualche anno di pensare seriamente alla teoria della gravitazione.

Il nuovo attacco al problema avvenne in coincidenza col ritorno, nell'estate del 1912, di Einstein a Zurigo, dove egli prestò servizio presso il Politecnico Federale per un paio di anni, prima di trasferirsi a Berlino – invogliato anche, probabilmente, dalla promessa di esonero da carichi didattici. Questo nuovo soggiorno in Svizzera è cruciale per la scoperta della relatività generale, e il merito va ascritto in gran parte ad un suo vecchio amico di studi, di origine ungherese: Marcel Grossmann.

Marcel e Albert si conoscono dai tempi della scuola: avevano frequentato insieme il Politecnico a Zurigo, ed Albert si era trovato così bene lì – complice forse anche qualche affare... di cuore – che cercò di trovarsi un lavoro in Svizzera. Fu il padre di Marcel a raccomandare l'amico del figlio al direttore dell'Ufficio Brevetti di Berna, ufficio presso il quale il giovane Einstein lavorò a partire dal 1902, fino alla nomina come professore universitario. Anni dopo Grossmann, divenuto nel frattempo Preside della Facoltà di Matematica e Fisica al Politecnico di Zurigo, convinse il suo vecchio amico, in quel momento a Praga, a tornare in Svizzera. Grossmann era esattamente il collega di ricerca che in quel momento serviva ad Einstein: un matematico scrupoloso, se necessario disposto – a differenza sua – a “sporcarsi le mani” con meticolose ricerche bibliografiche, ma anche un amico fidato pronto a collaborare. Ora, come abbiamo detto prima, Einstein era alle prese con il problema che l'estensione del principio di equivalenza a tutti gli osservatori implicava che le leggi cercate dovevano essere indipendenti dalla scelta del sistema di coordinate. Occorreva quindi un modo intrinseco di descrivere lo spazio – più precisamente, lo spaziotempo – ed Einstein aveva un vago ricordo degli anni in cui, da studente, aveva appreso delle ricerche che Gauss aveva condotto circa un secolo prima sulla descrizione delle superfici nello spazio per mezzo di invarianti, cioè di quantità intrinseche alle superfici stesse. Einstein chiese dunque a Grossmann di aggiornarlo sui progressi da Gauss in avanti: si dice

che, preso dalla disperazione, egli abbia implorato⁴: «*Grossmann, aiutami altrimenti impazzisco!*».

Ripercorriamo allora brevemente i quasi 100 anni che, da Gauss, hanno condotto alla progressiva scoperta della matematica che Einstein avrebbe usato per le equazioni della relatività generale.

3. Le ricerche di Grossmann

Interi generazioni di matematici avevano per secoli cercato di dimostrare che il quinto postulato di Euclide, quello delle parallele, fosse in realtà conseguenza dei primi quattro, senza ovviamente riuscirci. I contributi del tedesco Carl Friedrich Gauss, così come quelli del russo Nikolaj Ivanovič Lobačevskij e dell'ungherese János Bolyai, avevano cambiato radicalmente la prospettiva: era dunque possibile costruire una geometria nella quale il quinto postulato non fosse valido. Anche se non era molto chiaro all'epoca a cosa servisse tutto ciò dal punto di vista pratico (la geometria del nostro spazio, dopotutto, è *ovviamente* euclidea, no?), le idee di Gauss appassionarono il giovane matematico tedesco Bernhard Riemann, che nella dissertazione []] che tenne nel 1854 di fronte alla Facoltà di Filosofia di Gottinga per ottenere l'abilitazione come *privatdozent*, gettò le basi per la geometria moderna. Riemann generalizzò le idee di Gauss sulle superfici nello spazio a *varietà* di dimensione qualunque – il che a dire il vero entusiasmò poco i matematici dell'epoca: il nostro spazio, dopotutto, è *tridimensionale*, no? – ma andò oltre, distinguendo tra l'analisi qualitativa delle proprietà di una varietà e la struttura quantitativa che serve per determinare la distanza tra due punti della varietà: come diremmo oggi, tra la struttura topologica di una varietà e la sua struttura metrica. Questo costituì un significativo passo in avanti rispetto all'opera di Gauss il quale, pur avendo avuto il merito di introdurre gli strumenti del calcolo differenziale per studiare le superfici, prendeva in considerazione solo la struttura metrica che esse ereditano in quanto immerse nello spazio euclideo (i geometri oggi la chiamano *prima forma fondamentale*). Riemann invece introduce il concetto, che si rivelerà decisivo per l'analisi einsteiniana, che un ente geometrico, una varietà, può essere dotata di diverse definizioni di distanza tra loro distinte, e intuisce che la curvatura – che Gauss definì come pro-

⁴ La frase «*Grossmann, Du mußt mir helfen, sonst werd' ich verrückt!*» è riportata nel lavoro di L. Kollros, "Albert Einstein en Suisse: souvenirs", *Helvetica Physica Acta*, 29 271-281 (1956), che ricostruisce gli anni svizzeri di Einstein.

prietà intrinseca di una superficie che misura quantitativamente quanto essa si discosti dall'essere piana – dipende in realtà dalla struttura metrica, cioè dalla distanza, che si considera sulla varietà. Ancora oggi, in onore di queste bellissime scoperte, chiamiamo le strutture metriche su una varietà *strutture Riemanniane*, e parliamo di *curvatura di Riemann*.

Purtroppo, nonostante l'entusiasmo del vecchio Gauss, le idee di Riemann non furono capite immediatamente, come del resto tutto ciò che atteneva al mondo delle “nuove geometrie”, e l'opera del matematico tedesco ebbe bisogno di una lunga fase di sedimentazione, durata decenni, per far breccia nei circoli scientifici. In quest'opera di diffusione (*dissemination*, come la chiameremmo oggi) ebbero un ruolo importante diversi matematici italiani [AB]. Proprio a Napoli, per esempio, Giuseppe Battaglini fonda nel 1867 il *Giornale di Matematiche* che divenne ben presto il punto di riferimento dei sostenitori delle geometrie non euclidee in Italia e non solo, ospitando i contributi di matematici illustri come il cremonese Eugenio Beltrami ed il tedesco Felix Klein. Ma l'opera dei matematici italiani andò anche nella direzione di migliorare gli strumenti dell'analisi matematica necessari per descrivere la geometria di Riemann, e in questo senso in particolare si distinsero i due amici-rivali emiliani Luigi Bianchi e Gregorio Ricci Curbastro, e l'allievo di quest'ultimo, Tullio Levi-Civita, che nel 1900 pubblicò sulla rivista *Mathematische Annalen* assieme al suo maestro il trattato sul Calcolo Differenziale Assoluto. Il *calcolo tensoriale* [DI, VF, CF], come oggi lo chiamiamo, è un potente strumento che generalizza agli spazi tangenti a una varietà il calcolo sugli spazi vettoriali, e che costituisce il modo per descrivere le varietà Riemanniane in termini di quei *campi tensoriali* che oggi prendono i nomi di questi illustri matematici: la stessa curvatura di Riemann è un tensore, da cui si costruisce un ulteriore tensore che oggi chiamiamo *curvatura di Ricci*. Quest'ultimo tensore, così come la curvatura scalare che da questo si ottiene, entrerà direttamente, come vedremo, nelle equazioni determinate da Einstein. La potenza del calcolo tensoriale è duplice: da un lato, esso permette la definizione degli invarianti in modo intrinseco, cioè indipendente dal sistema di coordinate; dall'altro, una volta scelto un comodo sistema di riferimento, le equazioni tensoriali si scompongono in un sistema di equazioni scalari, rendendo i conti relativamente più agevoli.

Il calcolo tensoriale sulle varietà aveva avuto sviluppi importanti nella stessa epoca, arrivando a introdurre, grazie ad un lavoro del 1869 ad opera del tedesco Erwin Bruno Christoffel, il concetto di *connessione* su una varietà topologica, che permette di definire una nozione di derivata tra campi vettoriali (la *derivata covariante*) che può essere data a prescindere dall'esistenza di una

struttura metrica Riemanniana, e che quindi permette una nozione di curvatura di Riemann indipendente dalla metrica – tant'è che il tensore di curvatura è anche denotato da alcuni come *tensore di Riemann-Christoffel*. La dipendenza della curvatura dalla struttura metrica, teorizzata da Riemann, viene ristabilita in modo brillante da un potente risultato matematico che afferma che una struttura Riemanniana su una varietà induce in modo naturale una connessione, che oggi chiamiamo *connessione metrica* o *di Levi-Civita*, in onore del matematico padovano. L'esistenza di connessioni non metriche è tuttavia di vitale importanza per gli sviluppi odierni della relatività generale, per quanto riguarda le cosiddette *teorie estese della gravitazione*, modelli alternativi⁵ alla relatività che tentano di inglobarla, spiegando altresì alcuni fenomeni tuttora poco chiari come quello della *materia oscura* dell'universo.

4. Verso le equazioni della Relatività

Grossmann, dunque, nell'agosto del 1912 comunica ad Einstein che molto probabilmente lo strumento teorico che a lui serve è il calcolo sulle varietà di Riemann e lo aggiorna sui risultati di Christoffel, Ricci e Levi-Civita. Le dimensioni dell'universo non sono solo tre, c'è anche il tempo, indivisibile dallo spazio, come l'esperienza della prima teoria della relatività insegnava, per cui forse quelle complicate ricerche su spazi con dimensione maggiore di tre servono a qualcosa, finalmente. Einstein dunque si mette alla ricerca della soluzione del suo problema: generalizzare l'equazione classica della gravitazione newtoniana. Non si tratta di un cammino semplice: i manoscritti con i suoi conti, giunti fino a noi, raccontano di un viaggio tortuoso, lungo diversi anni, e pieno di errori, che via via si diradano fino ad arrivare alla conclusione che tutti conosciamo [AP, DT].

Il primo e decisivo passo corretto che Einstein compie è quello di congetturare che il potenziale gravitazionale va sostituito con il tensore metrico dello spaziotempo, modellato da una varietà 4-dimensionale. Una volta scelto un sistema di riferimento sullo spaziotempo, cioè una maniera comoda per rappresentarne il generico elemento x per mezzo di 4 coordinate, che denoteremo d'ora in poi con (x^0, x^1, x^2, x^3) , l'espressione in coordinate⁶ del tensore metrico g è

⁵ Per un'introduzione sulle motivazioni alla base delle teorie estese della gravitazione, si veda [CF]. La rassegna [CD] fa riferimento anche a teorie basate su connessioni non metriche.

⁶ Nell'equazione (4.2) si sottintende il simbolo di sommatoria da 0 a 3 sugli indici α e β , usando una notazione, d'uso ormai comune, che proprio Einstein introdusse, ma

$$g = g_{\alpha\beta} dx^\alpha \otimes dx^\beta \quad (4.1)$$

e dovendo tale tensore essere simmetrico – come è giusto che sia per una distanza – i potenziali effettivi, funzioni di x , diventano $4+3+2+1=10$, in questa nuova formulazione. Occorre ora generalizzare la (2.1) e anche qui la congettura di Einstein è esatta: una tale generalizzazione deve essere del tipo

$$\Theta_{\alpha\beta} = k T_{\alpha\beta} \quad (4.2)$$

dove le quantità ai due membri sono le componenti di due tensori di rango 2 (cioè con due indici, proprio come le componenti $g_{\alpha\beta}$ nel tensore metrico (4.1)). A sinistra Θ , deve essere un operatore differenziale del second'ordine (cioè definito per mezzo di derivate seconde, proprio come il laplaciano nella (2.1)) applicato al tensore metrico. A destra c'è la generalizzazione della densità di materia ρ incontrata nella equazione di Poisson (2.1), cioè un tensore (che oggi chiamiamo *tensore di energia-momento*) il quale descrive la sorgente del campo gravitazionale: in altre parole, come la materia è distribuita nello spaziotempo. La costante k va determinata in modo tale che, quando di questa equazione se ne calcoli il limite newtoniano (velocità ed energie deboli), si ritrova la (2.1). A questo punto una considerazione erronea porta fuori strada Einstein e Grossmann, inducendoli in alcuni errori formali. In particolare, ritenendo necessario generalizzare il potenziale newtoniano classico ϕ con la metrica g , e l'operatore di derivata parziale con quello di derivata covariante, essi si scontrarono con la ben nota proprietà di compatibilità della connessione di Levi-Civita, secondo la quale la derivata covariante della metrica stessa è identicamente nulla. La generalizzazione del membro di sinistra della (2.1) che avevano inizialmente congetturato, quindi, li conduceva ad un vicolo cieco.

Fortunatamente, Einstein incontrò alcune persone che lo misero sulla buona strada. Una di queste fu l'olandese Adriaan Daniel Fokker, che aveva conseguito il dottorato con Lorentz, e in seguito lavorò con Einstein, poco prima che quest'ultimo si spostasse da Zurigo a Berlino. La collaborazione con Fokker portò Einstein a fare il passo decisivo, congetturando che il membro di sinistra nella (4.3) dovesse essere la curvatura di Ricci. Ancora non siamo alla forma definitiva delle equazioni, ma questo momento è cruciale, perché finalmente Einstein realizza il ruolo fondamentale della curvatura come espressio-

solo a partire dal 1916. Il simbolo \otimes è l'operatore di moltiplicazione tra tensori (*prodotto tensoriale*).

ne geometrica della forza di gravità: un tale passo non sarebbe stato possibile senza aver compreso in modo finalmente profondo le basi della geometria differenziale e del calcolo tensoriale. Lo capiamo direttamente dalle sue parole, scritte in un'altra corrispondenza⁷ di quel periodo: *“Una cosa è certa, in tutta la mia vita non ho mai lavorato tanto duramente, ed ora ho nell'animo un grande rispetto per la matematica, la parte più sottile della quale avevo considerato, nella mia ingenuità, un puro lusso. In confronto a questo problema, l'originaria teoria della relatività è un gioco da bambini”*.

Nella primavera del 1914 Einstein si trasferì a Berlino, dove finalizò le ricerche sulla teoria della relatività generale. In questa parte finale del cammino fu proprio Levi-Civita che, a partire dall'inizio del 1915, revisionò criticamente le sue ricerche, permettendogli di correggere alcuni errori sulla parte matematica – Einstein infatti soleva intrattenere fitte corrispondenze epistolari nelle quali si mostrava per nulla geloso ma anzi impaziente di esporre i risultati che via via andava trovando, e il matematico padovano fu uno dei pochi, o forse l'unico, che lo incoraggiò lungo questa strada irta di difficoltà, dovute soprattutto alla necessità di imparare, ed applicare correttamente, una matematica ostica anche per molti specialisti suoi contemporanei. Finalmente, il 25 novembre 1915, Einstein presentò all'Accademia Prussiana le equazioni⁸ in una forma che possiamo considerare equivalente alle equazioni della relatività generale così come le conosciamo oggi: le cosiddette *equazioni di Einstein*

$$R_{\alpha\beta} - \frac{S}{2}g_{\alpha\beta} = \frac{4\pi G}{c^4}T_{\alpha\beta} \quad (4.3)$$

dove R è il tensore di Ricci ed S è la curvatura scalare, che da esso si ottiene attraverso l'operazione di *contrazione di un tensore*, indotta dalla metrica [DI, VF, CF]. Il coefficiente $\frac{4\pi G}{c^4}$ a destra è proprio (c è la velocità della luce nel vuoto) il k che sta nella equazione (4.2), cioè la costante di proporzionalità “giusta” che permette di riottenere la (2.1) come approssimazione newtoniana. Una curiosità da osservare è che la (4.3) ha come conseguenza che l'operatore differenziale di *divergenza* – la sua generalizzazione ad una geometria curva, in

⁷ *“Aber das eine ist sicher, dass ich mich im Leben noch nicht annähernd so geplagt habe, und dass ich grosse Hochachtung für die Mathematik eingeflösst bekommen habe, die ich bis jetzt in ihren subtileren Teilen in meiner Einfalt für puren Luxus ansah! Gegen dies Problem ist die ursprüngliche Relativitätstheorie eine Kinderei”*, dalla lettera a Arnold Sommerfeld del 29 Ottobre 1912.

⁸ successivamente da lui consolidate nella celebre memoria *“Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie”*, Annalen der Physik 49, 769-822 (1916): *“Il fondamento della teoria generale della Relatività”*.

realtà – applicato al tensore T si annulla. Oggi sappiamo bene che questo fatto, fisicamente interpretabile come una legge di conservazione locale dell'energia, segue dalle cosiddette *identità di Bianchi*, che valgono per qualsiasi struttura Riemanniana. Ma Einstein non si accorse di ciò ed impose, nei primi lavori contenenti la (4.4), l'inutile ulteriore vincolo che T fosse a divergenza nulla.

Ancor più curiosamente va ricordato che pochissimi giorni prima della comunicazione di Einstein, il matematico tedesco David Hilbert aveva sottomesso all'Accademia delle Scienze di Gottinga il lavoro⁹ “*Sui fondamenti della Fisica*”. Questo lavoro contiene le stesse equazioni della Relatività Generale trovate da Einstein. La qual cosa non deve stupire, se si pensa che i due ebbero una fitta corrispondenza epistolare proprio nei mesi precedenti, ed Hilbert, da sempre alla ricerca di assiomi universali per spiegare le leggi dell'Universo, si era appassionato al problema, giungendo alla soluzione in contemporanea con Einstein. Certamente questo “arrivo al fotofinish” creò tra i due scienziati qualche accenno di screzio, che venne ben presto superato grazie anche alla reciproca stima che li legava. Oggi possiamo sicuramente affermare che il merito della forma finale delle equazioni di Einstein va ascritto in modo indipendente anche a Hilbert, ma le idee e i principi che ad esse hanno condotto, per giunta nel modo così travagliato che abbiamo discusso sopra, sono senza dubbio frutto della mente geniale di Einstein, al quale oggi intitoliamo il tensore le cui componenti sono rappresentate dal membro di sinistra della (4.3).

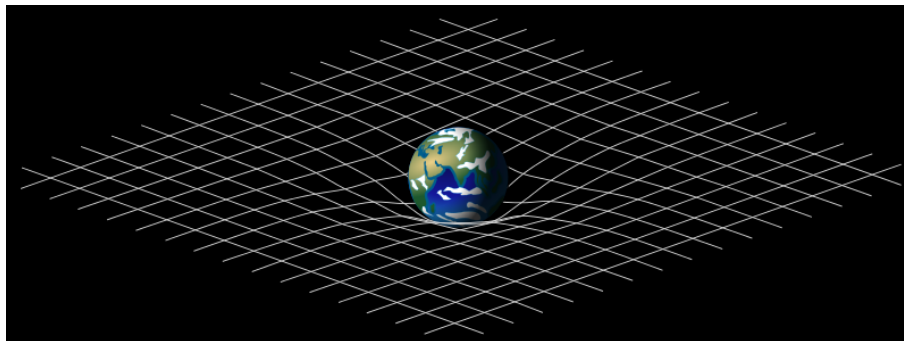
5. Conclusioni

Come promesso, torniamo all'osservazione fatta all'inizio di questo viaggio: Einstein non vinse il premio Nobel per merito della relatività generale. A cosa si deve tanta apparente miopia? Sicuramente, non vi fu da parte dei circoli scientifici lo stesso entusiasmo che accompagnò la nascita della relatività che oggi chiamiamo speciale.

Questo è dovuto principalmente a due fattori. Il primo lo abbiamo abbondantemente richiamato nel corso di queste note: la matematica che sta dietro alla relatività generale è difficile, perché ha bisogno di una geometria curva, che abbandoni i postulati euclidei, per di più applicata a spazi di dimensioni superiori a tre, e quindi non facilmente rappresentabili con l'intuizione. Anche

⁹ “*Die Grundlagen der Physik*”, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse 1915, 395-408 (1915).

oggi, quando cerchiamo di rappresentare graficamente l'idea alla base del rapporto tra curvatura e gravità, ci affidiamo a immagini come quella in figura¹⁰,



che può condurre a facili malintesi, producendo la falsa impressione, in un neofita, che a curvarsi sia un ente esterno alla sorgente di gravità. In realtà tale rappresentazione si basa sull'unico esempio facilmente intuibile di ente curvo, e cioè quello di una superficie bidimensionale immersa nello spazio. Praticamente, è l'idea iniziale di Gauss. Ma qui è *tutto* l'ambiente, cioè lo spaziotempo, ad essere curvo – nel senso matematicamente ben specificato da Christoffel, Ricci e Levi-Civita: un'idea non facile da accettare, all'inizio del XX secolo, anche per un matematico navigato. La materia, attraverso la gravità, modifica la curvatura e quindi la geometria dello spaziotempo di cui essa stessa è parte, ma anche viceversa: la curvatura, attraverso la gravità, agisce dinamicamente sulla distribuzione della materia nello spazio. E questo ci porta al secondo aspetto che giustificò una certa “impopolarità” iniziale della teoria di Einstein: la forza di gravità, definitivamente inglobata nelle proprietà geometriche dello spaziotempo, produce una nuova dinamica, deformando anche i cammini dei corpi, luce compresa, che ora si muovono lungo linee non necessariamente rettilinee, le cosiddette *geodetiche*. Non solo: come detto, la dinamica ora influenza l'evoluzione stessa dello spaziotempo, originando perfino regioni ad alta densità di materia – e quindi ad alta curvatura – in cui la luce stessa rimane intrappolata e non riesce ad uscire: i *buchi neri*. Cominciamo quindi a capire la cautela degli accademici del premio Nobel, e degli

¹⁰ https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ASpacetime_lattice_analogy.svg (immagine copyright free consultata il 26.3.2017). Un altro esempio del genere, ricorrente nelle presentazioni divulgative sulla cosmologia relativistica, è quello del palloncino che si gonfia, usato per descrivere l'espansione dell'universo e il progressivo allontanamento delle galassie.

ambienti scientifici in generale, ad accettare il complesso della nuova teoria di Einstein: i fenomeni da essa previsti non erano tutti facilmente osservabili, e quelli che lo erano – come la deflessione della luce, o la precessione del perielio dell’orbita di Mercurio – erano soprattutto serviti ad Einstein per accrescere la sua fiducia nella propria “creatura”, ma non ancora perché il mondo scientifico assegnasse alla relatività generale quella patente di credibilità che lui stesso considerava indispensabile, e per la quale provò a spendersi negli anni successivi in un’opera di divulgazione e convincimento a più livelli. Il grande sviluppo della relatività, e il numero di scienziati che vi lavoravano, crebbe di pari passo col progresso tecnologico a partire dagli anni ’50 e ’60 del secolo scorso, quando i risultati delle osservazioni astronomiche cominciarono a trovare una plausibile spiegazione nelle equazioni di Einstein. Lo stesso fenomeno delle onde gravitazionali, osservato per la prima volta nel settembre del 2015 dalla collaborazione sperimentale internazionale LIGO-Virgo, era stato predetto proprio dallo stesso Einstein, attraverso un procedimento di approssimazione lineare delle sue equazioni, in una comunicazione¹¹ all’Accademia Prussiana delle Scienze.

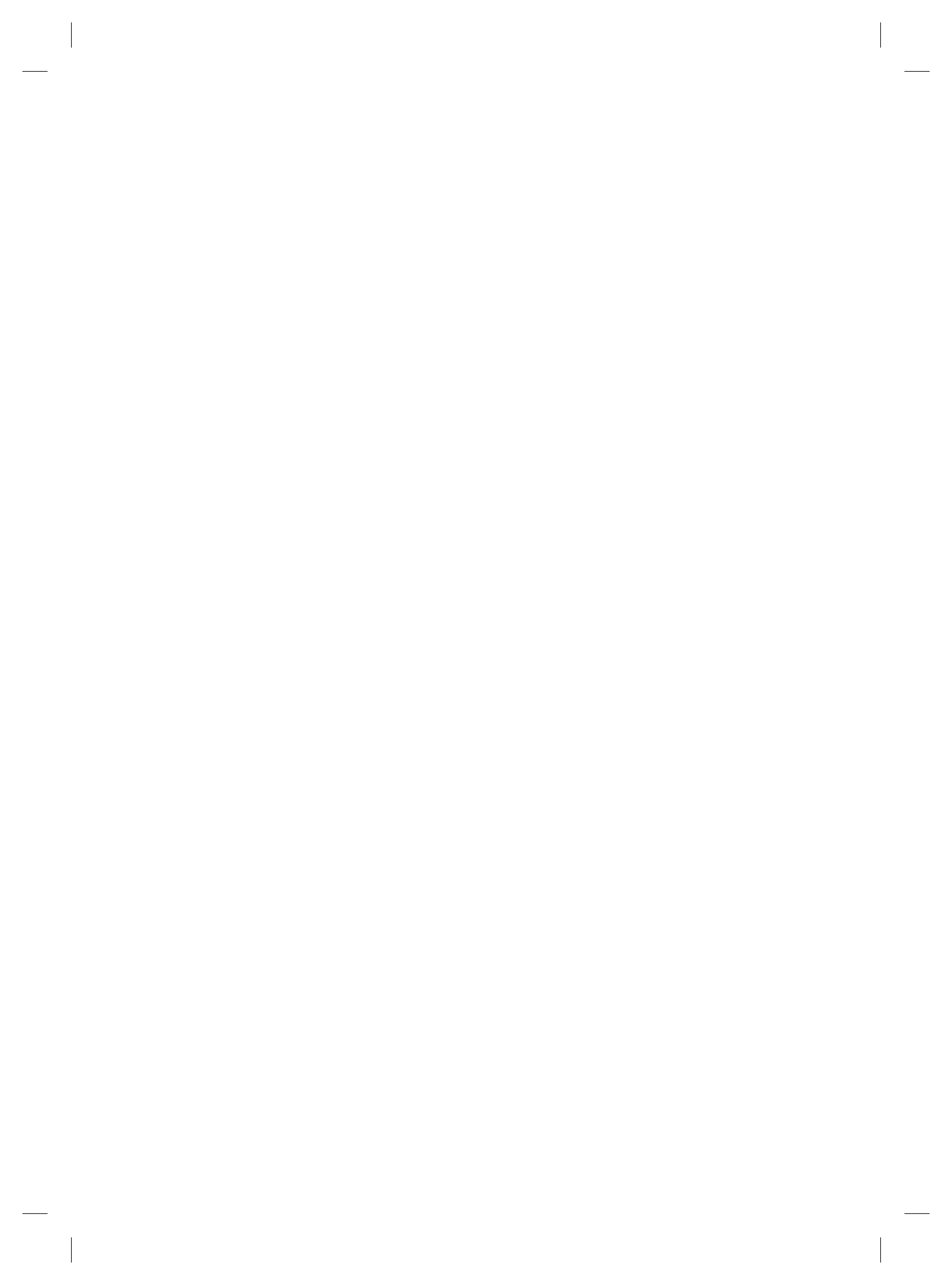
Oggi, la teoria della Relatività fa parte di quel sapere che il pensiero umano condivide come un momento d’imprescindibile progresso. Einstein, morto nel 1955 a Princeton, non visse abbastanza da poter godere appieno di questo successo. Ma che egli fosse convinto di essere arrivato a un punto fermo, per la determinazione delle Leggi della Natura, ne è testimonianza un passaggio di una conferenza che tenne nel 1933 a Glasgow, in Scozia, di fronte a 1500 persone¹²: *“Anni di oscure ed ansiose ricerche, con l’ansia di arrivare, l’alternarsi di fiducia e smarrimento, fino a giungere alla chiarezza: solo coloro che l’hanno provato possono capirlo”*.

¹¹ “*Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*”, Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin). Sitzungsberichte, 688–696 (1916): “*Integrazione approssimata delle equazioni di campo della gravitazione*”.

¹² “*The years of anxious searching in the dark, with their intense longing, their alternation of confidence and exhaustion and the final emergence into the light – only those who have experienced it can understand that.*”, da *Notes on the Origin of the General Theory of Relativity*, pubblicato nella raccolta *Ideas and Opinions by Albert Einstein*, Crown Publishers (1954).

Bibliografia

- [1] [AP] Abraham Pais, “*Sottile è il Signore...*” - *La scienza e la vita di Albert Einstein*, Bollati-Boringhieri (2012)
- [2] [DI] Ray D’Inverno, *Introducing Einstein’s Relativity*, Clarendon Press (1992)
- [3] [VF] Vladimir A. Fock, *The Theory of Space, Time and Gravitation*, Pergamon Press (1964)
- [4] [JJ] Jürgen Jost, ed., *Bernard Riemann - On the Hypotheses Which Lie at the Bases of Geometry*, Birkhäuser (2016)
- [5] [AB] Antonio Bernardo, *La geometria di Bernhard Riemann*, *Cultura e scuola*, 122, 252-269 (1992); online su matematicamente.it
- [6] [CF] Salvatore Capozziello e Maria Funaro, *Introduzione alla Relatività Generale*, Liguori (2006)
- [7] [CD] Salvatore Capozziello e Mariafelicia De Laurentis, *Extended Theories of Gravity*, *Physics Reports*, 509(4-5), 167-321 (2011)
- [8] [DT] David R. Topper, *How Einstein Created Relativity out of Physics and Astronomy*, Springer (2013)



Einstein, la Relatività Generale e la Cosmologia.

VINCENZO FANO, GIOVANNI MACCHIA

Dipartimento di scienze pure e applicate, Università di Urbino

Ripercorriamo brevemente il contributo dato da Einstein alla cosmologia nel suo famoso scritto del 1917, soffermandoci invece lungamente sullo statuto epistemologico di quello che, in questo campo, è stato forse il suo contributo più importante: il principio cosmologico, ossia l'ipotesi che l'universo sia omogeneo e isotropo. Analizziamo alcune delle riflessioni che scienziati di rilievo hanno riservato a questo principio lungo l'intero secolo di vita della cosmologia moderna, sottolineando come di fatto vi sia stata una consapevolezza metodologica piuttosto altalenante e deficitaria, che del resto è andata di pari passo con quella di un altro principio altrettanto cruciale, quello copernicano, in base al quale noi non occupiamo una posizione privilegiata nel cosmo. Discutiamo anche lo statuto epistemologico di questo principio, concludendo che l'alveo naturale al quale entrambi andrebbero ricondotti è quello del metodo ipotetico-deduttivo delle scienze empiriche.

Introduzione

L'8 febbraio 1917 l'Accademia Prussiana delle Scienze di Berlino pubblica un articolo di Albert Einstein intitolato *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie* (*Considerazioni cosmologiche sulla teoria generale della relatività*). È la prima applicazione della sua recente teoria – la Relatività Generale (RG), pubblicata il 25 novembre 1915 – all'universo nel suo complesso. Nasce l'era moderna della cosmologia, detta anche *cosmologia relativistica*. Lo studio del cosmo, fino ad allora piuttosto filosofico-speculativo, acquista in tal modo sia una solida struttura fisico-matematica (appunto quella della RG), e quindi una rinnovata dignità scientifica prima non goduta appieno, sia un basilare approccio metodologico che ha reso possibile considerare l'universo come un oggetto scientifico: è il cosiddetto *principio cosmologico* (PC), sul quale ci soffermeremo estesamente a partire dal par. 2.

Tale innovativo impulso dato da Einstein allo studio del cosmo non brilla, per così dire, di luce propria: a monte vi è proprio il portato rivoluzionario della RG, mentre quello cosmologico ne è solo una straordinaria propaggine, natu-

rale ma non scontata. Naturale, se si pensa sia che la RG è una teoria della gravitazione, cioè dell'interazione dominante fra gli oggetti celesti, sia che essa, possedendo caratteristiche della massima generalità, e stravolgendo il modo di concepire spazio, tempo, materia e causalità, ben si prestava a fornire prescrizioni riguardanti gli aspetti generali dell'universo. Non scontata, in quanto andava ammesso che la particolare branca della geometria utilizzata nella RG si potesse applicare alle proprietà strutturali dell'universo su larga scala.

Per cogliere il passaggio dalla “vecchia” cosmologia (pre-RG) a quella relativistica, basti pensare che mentre la prima, fondandosi sulla fisica classica, si riduceva essenzialmente allo studio di come la materia possa distribuirsi nel solo spazio piatto newtoniano, la seconda, incorporando la nozione di spazio curvo, negli anni ha fatto proliferare, in un numero potenzialmente infinito, le geometrie associabili alle varie distribuzioni di materia. In pratica, l'universo à la Einstein non è più soltanto dato dall'insieme delle regioni visibili del cielo, ma è “il tutto”: la totalità degli eventi nello spaziotempo dal quale dipendono e lo spaziotempo stesso da questi dipendente. Si parla così di *modello d'universo*, in senso stretto, per indicare ogni soluzione delle equazioni della RG (dunque ogni geometria, o metrica, compatibile con una certa distribuzione di materia-energia), e, in senso più ampio, per includere anche scenari che descrivono la storia e l'evoluzione del cosmo, e la formazione delle sue strutture (galassie, ecc.).

Prima di affrontare il PC, è utile ripercorrere brevemente le tappe significative dell'approccio einsteiniano allo studio del cosmo¹, ed è quello che faremo nel paragrafo 1. Nel 2 vedremo alcuni momenti del dibattito che si scatenò negli anni Trenta attorno al PC, mentre nel 3 proseguiremo la sua analisi, soffermandoci sulle posizioni più recenti di alcuni autorevoli studiosi, introducendo anche il principio copernicano, e sollevando dubbi sulle presunte ragioni a suo favore. Quest'ultimo sarà al centro del paragrafo 4, dove ribadiremo la sua natura ipotetica, e accenneremo a quali rivoluzioni l'immagine del cosmo andrebbe incontro nel caso tale ipotesi fosse smentita. Infine le nostre conclusioni nel paragrafo 5.

¹ Per una più ricca disamina si veda Smeenk (2014).

1. Einstein apre la strada verso il cosmo

Poco dopo la pubblicazione della RG nell'autunno del 1916, Einstein cominciò a discuterla con l'astronomo olandese Willem de Sitter, incaricato, dalla *Royal Astronomical Society*, di scrivere tre articoli in inglese per presentarla al mondo anglosassone. Questo scambio di idee spinsero Einstein a lavorare all'articolo del 1917, dunque a considerare una prospettiva cosmologica nell'ambito della RG.

Einstein credeva che la RG fosse una naturale conseguenza di quello che egli chiamò *principio di Mach* (in onore del fisico e filosofo austriaco Ernst Mach), in base al quale, per citare l'articolo del 1917, «non vi può essere inerzia a carattere spaziale, ma solo un'inerzia di masse le une rispetto alle altre». In altri termini, in ottemperanza alla filosofia machiana e al suo dar credito ai soli oggetti osservabili piuttosto che a entità puramente teoriche, l'inerzia di un corpo non va ascritta allo spazio assoluto, come voleva Newton, ma alla distribuzione della totalità dei corpi materiali presenti nell'universo e alla loro mutua interazione. Lo stesso Einstein, d'altronde, giudicava contraria al modo di pensare della scienza l'assolutezza dello spazio-tempo (il suo agire sui corpi senza però subirne influenze) che derivava dalla Relatività Speciale.

E dunque, in ciò credendo, quale dominio migliore di un sistema grande come l'universo egli aveva per verificare che le proprietà metriche non sono date a priori ma indotte dalle masse?

Date le scarsissime conoscenze astronomiche dell'epoca, si pensava che probabilmente la Via Lattea esaurisse l'universo intero. Ovviamente, Einstein, non poteva certo prendere in considerazione tutti i suoi corpi celesti, la cui distribuzione irregolare rendeva ulteriormente impossibile determinare la metrica. Da fisico geniale, adottò allora una fecondissima approssimazione: decise di trascurare le concentrazioni locali di materia, considerandola, su grandi scale, come un fluido omogeneo di densità costante. In altri termini, nonostante la Via Lattea avesse una struttura manifestamente non omogenea, fece l'audace ipotesi che la materia a grandi scale lo fosse, ossia che in ogni regione dell'universo il numero di stelle (oggi diremmo galassie e ammassi di galassie) è in media lo stesso. Questa rappresentazione della materia come distribuita in modo continuo diverrà un assunto standard nei seguenti sviluppi della cosmologia, e sarà qualche anno dopo codificato nel già menzionato *principio cosmologico*. Questo principio afferma che l'universo su vasta scala ha lo stesso aspetto da qualsiasi luogo lo si osservi e da qualsiasi direzione (si parla, rispettivamente, di omogeneità e isotropia spaziale). Ciò fissa una pro-

prietà *globale* dell'universo, dando accesso a una cosmologia propriamente detta, cioè a un "discorso" sul cosmo *come un tutto*, come un singolo oggetto.

Oltre al principio di Mach, Einstein assunse, dandola pressoché per scontata, come tutti all'epoca, la staticità dell'universo: l'idea dell'espansione, scrisse a de Sitter, lo irritava, poiché implicava un inizio dell'universo, fatto che gli appariva senza senso.

Staticità e principio di Mach, però, risultarono subito incompatibili con le equazioni della RG. Queste, infatti, ci dicono che l'universo collasserebbe per la reciproca forza attrattiva gravitazionale delle sue masse. Inoltre, queste equazioni hanno una soluzione in assenza di materia, cioè uno spaziotempo piatto, mentre il principio di Mach richiede che non si possa determinare la struttura di uno spaziotempo vuoto. Questo problema è evidente nel caso di un insieme di corpi, come una galassia, in uno spaziotempo altrimenti vuoto e infinito: per Einstein, solo un'imposizione gratuita, e contravveniente al principio di Mach, consentiva di affermare che lo spazio è piatto a distanze infinite dalla galassia.

Il suo *escamotage* fu di introdurre nelle equazioni della RG un termine, detto *costante cosmologica*, il cui valore non era fissato dalla teoria, ma lo si poteva scegliere in modo che tale costante rappresentasse una sorta di forza repulsiva in grado di opporsi all'attrazione fra le masse, ristabilendo la staticità. Inoltre, così facendo si metteva al bando quella soluzione "piatta" indesiderata: anzi, le nuove "equazioni cosmologiche" (quelle della RG con tale costante) davano come soluzione uno spazio sferico che, essendo spazialmente finito, eludeva i problemi all'infinito spaziale. Dunque, contrariamente alla comune credenza dell'epoca nell'infinità dello spazio, nel modello d'universo di Einstein lo spazio tridimensionale risultava essere una sfera (chiusa e illimitata, con raggio, volume e massa definiti) immersa in uno spazio euclideo quadridimensionale. In linea invece con tale credenza, il suo universo esisteva da sempre, statico e immutabile.

Einstein sapeva che il suo modello, fortemente idealizzato, dal punto di vista astronomico era solo un «gran castello in aria», come scrisse a de Sitter, ma credeva che fosse l'unica soluzione possibile delle "equazioni cosmologiche" della RG. Tuttavia, le sue pretese di unicità, staticità e principio di Mach avranno vita breve, come presto dimostreranno lo stesso de Sitter, e poi la scoperta dell'espansione dell'universo.

Tutto ciò non scalfì però il trionfo, negli anni sempre più evidente, della RG e dell'opportunità che essa aveva fornito alla scienza moderna di descrivere formalmente, per la prima volta, l'universo *nella sua totalità*, per mezzo

di relazioni funzionali tra la sua massa, raggio e costante cosmologica. Da allora la RG non solo diverrà il fondamento della cosmologia moderna, ma si arricchirà anche dei risultati di quest'ultima, usati dai relativisti per meglio comprendere il portato concettuale della teoria.

Proprio a partire da quell'originario articolo del 1917, la storia ormai centenaria della cosmologia si è sviluppata attorno a quell'idea einsteiniana del PC: i vari modelli d'universo elaborati nei decenni seguenti – ovviamente sottoposti a un continuo vaglio critico, teorico ed empirico, attuato sfruttando le conoscenze offerte anche dalle altre teorie fisiche e matematiche, nel tempo enormemente accresciutesi – hanno prevalentemente assunto la validità di tale principio. Noi crediamo, però, che, nonostante questo suo ruolo centrale, il suo statuto epistemologico sia stato trascurato, poco analizzato e frainteso, anche dagli stessi scienziati, per buona parte della sua storia.

2. Il dibattito negli anni Trenta

Nel suo scritto del 1932, Einstein, tornando sulla questione cosmologica, sarà più esplicito, meglio evidenziando le due “assunzioni” del suo articolo del '17: 1) «tutte le posizioni dell'universo hanno ugual valore»; 2) «la struttura dello spazio e la densità devono restare costanti nel tempo» (p. 235; trad. nostra). Egli manterrà la prima, ma naturalmente non potrà che respingere la seconda, sotto la spinta dei nuovi dati astronomici prodotti da Hubble a favore dell'espansione dell'universo.

Sarà comunque l'astrofisico e matematico inglese Edward A. Milne a introdurre formalmente, e chiamare, il «principio cosmologico di Einstein» (Milne 1935, pp. 24 e 68). Come già detto, 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. Va, però, sottolineato che la formulazione di Milne del principio differisce da quella di Einstein. Milne lo formula così: 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 è 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, poiché la scienza non è interessata a che cosa si osserva, ma a come stanno le cose, anche se, ovviamente, cerca di stabilire come stanno le cose sulla base delle osservazioni.

Negli anni Trenta il PC, 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 culminarono in un enfatico intervento su *Nature*, intitolato *Modern Aristotelianism*, da parte di Herbert Dingle (1937). L'articolo dell'autorevole scienziato e filosofo inglese 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 (1937a, p. 1011) appare la fonte del suo pensiero, cioè Newton, che dichiara di "dedurre dall'esperienza" e di "non fare ipotesi"².

È ben noto che né Newton³, né Galileo⁴ erano consapevoli del metodo che stavano inventando, adeguatamente espresso invece da Christian Huygens all'inizio del *Trattato sulla luce*:

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 ri-

² Sull'intero dibattito si veda Gale (2015).

³ Koyré (1965, pp. 27ss.) nota che Newton è stato interpretato come empirista più di quanto egli stesso lo fosse.

⁴ Si veda ad esempio Geymonat (1969, pp. 267ss).

salto; 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. (1690, p. X, trad. nostra)

Questo brano non è altro che una lucida e straordinariamente precorritrice descrizione di quello che verrà detto “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 sembrò avere le idee chiare fu l'astrofisico e matematico irlandese William McCrea:

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. (1937, p. 1002, 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 numero troviamo un bell'articolo di Einstein, “On the Method of Theoretical Physics”, dove si legge:

La struttura del sistema è compito della ragione; i dati dell'esperienza e le loro mutue relazioni devono corrispondere esattamente alle conseguenze della teoria. Soltanto nella possibilità di tale corrispondenza sta il valore e la giustificazione dell'intero sistema, e specialmente dei suoi concetti fondamentali e delle sue leggi di base. Se così non fosse, questi ultimi sarebbero semplicemente libere invenzioni della mente

⁵ A tutt'oggi, a nostra conoscenza, non esiste una storia del metodo ipotetico-deduttivo nel pensiero scientifico moderno. Vedi però Losee (1993, 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.

⁶ In particolare sulla rivista *Erkenntnis*, fondata nel 1930 da Carnap e Reichenbach.

umana che non possono essere giustificate *a priori*, né dalla natura di questa, né in qualsiasi altro modo. (Einstein 1934, p. 165; Trad. nostra)

Sulla stessa rivista McCrea torna a discutere, nel 1939, il problema della storia e dello statuto delle teorie cosmologiche, allorché egli difende l'approccio di Milne, attribuendogli una procedura ipotetico-deduttiva. Ovvero, assunzione a priori del PC 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 secondo cui lo stesso Milne ne sarebbe stato consapevole, è dubbia. Infatti quest'ultimo, nel suo celebre libro del '35, 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 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)

Milne, dunque, pone il PC come una sorta di uniformità valida *a priori*, essenziale per fare cosmologia.

3. Alcune posizioni più recenti e il Principio Copernicano

Gli anni Quaranta e Cinquanta di certo non sono stati molto vivaci sia per la RG⁷ che per la cosmologia⁸. Agli inizi degli anni Cinquanta, però, cominciò a diffondersi la teoria dello stato stazionario di Bondi, Gold e Hoyle, che negava l'evoluzione dell'universo, ipotizzandone l'infinità e l'eternità, e la creazione continua di nuova materia. La posizione di Bondi, così come è ricostruita da Gale e Urani (1999), sarebbe stata influenzata dal falsificazionismo di Popper e rispetterebbe in pieno il metodo ipotetico-deduttivo. Bondi assunse il PC *perfetto*, cioè la tesi secondo cui non solo l'universo è omogeneo e isotropo, ma uguale nel tempo, esattamente come Einstein aveva ipotizzato

⁷ Si veda Eisenstaedt (1989).

⁸ Si veda Macchia (2016).

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, che confermò, invece, la teoria del big bang e quello che diventerà il modello cosmologico standard.

Gli anni Sessanta e Settanta sono un momento di rinascita per la RG e per la cosmologia. In uno dei più importanti e classici trattati su queste due discipline, il fisico teorico Steven Weinberg si sofferma sul PC:

La ragione effettiva per la nostra adesione al Principio Cosmologico non è perché esso sia sicuramente corretto, ma piuttosto perché ci permette di fare uso dei dati estremamente limitati forniti alla cosmologia dall'astronomia osservativa. 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 insperabilmente inadeguati per determinare la metrica. D'altra parte, adottando la cornice matematica piuttosto restrittiva descritta in questo capitolo, abbiamo una effettiva possibilità di confrontare la teoria con le osservazioni. Se i dati non si adattano a questa cornice, potremo concludere o che il Principio Cosmologico, o che il Principio di Equivalenza, è sbagliato. Nulla potrebbe essere più interessante. (Weinberg 1973, p. 480, trad. nostra)

Qui Weinberg sottolinea l'utilità "pratica" del PC, ma in un approccio ipotetico-deduttivo ben chiaro, che consente all'ipotesi teorica, nel caso in cui essa non combaci con le osservazioni, non solo di essere accantonata senza drammi, ma di costituire, anche in tal modo, un ulteriore motivo di conoscenza e dunque di fecondo interesse.

Negli ultimi quaranta anni, a seguito della raccolta di dati sempre più ampia⁹ sulla radiazione cosmica di fondo (CBR), che hanno confermato la sua isotropia fino a una precisione di 1 parte su 10^5 , il punto di vista induttivista o radicalmente empirico, alla Dingle, che di fatto 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 abbia-

⁹ Si veda il recentissimo Saddeh et Al. (2016).

mo 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 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 (significativamente) altro luogo dell'universo.

Per passare dai nostri limitati dati osservativi, che ci suggeriscono l'isotropia e l'omogeneità, al PC 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.

In base al primo, Copernico, Bruno e Cusano hanno sgretolato l'immagine del cosmo tolemaico-aristotelica, in accordo alla 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 *quaternio 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.

Il secondo argomento afferma che non abbiamo ragioni per ritenere la nostra prospettiva diversa dalle altre. Anche questa è una fallacia. Non bisogna confondere il “non avere ragioni per credere che...” dall’“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-tempo¹⁰.

Non siamo riusciti a trovare buoni argomenti a favore del principio copernicano se non un aprioristico desiderio di simmetria, desiderio, tra l’altro, piuttosto improbabile da soddisfare, almeno dal punto di vista statistico. Infatti, se si considera l’insieme di tutti i possibili modelli cosmologici deducibili dalla RG, quelli così fortemente simmetrici occupano uno spazio pressoché di misura nulla in quell’insieme, in pratica avrebbero probabilità zero di realizzarsi.

Dunque la giustificazione semi-empirica proposta da Ellis e da molti altri non è convincente. Lo stesso Ellis 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 stia dietro alla CBR, cioè su che cosa sia accaduto prima del disaccoppiamento fra materia e radiazione avvenuto circa 380mila anni dopo il big bang¹¹. Infine, l’isotropia al momento del disaccoppiamento non implica l’isotropia in un qualsiasi altro momento della storia dell’universo.¹²

Bisogna comunque sottolineare che negli ultimi anni, almeno a nostra conoscenza, non si registrano atteggiamenti prettamente aprioristici, come quello, per intenderci, di uno dei più eminenti cosmologi e astrofisici italiani, Livio Gratton, che in uno scritto del 1975 per l’Accademia Nazionale dei Lincei affermava:

¹⁰ Questo è il famoso “principio di ragion insufficiente” o “principio di indifferenza”, discusso nel calcolo delle probabilità da Laplace e Keynes. Si veda Strevens (1998).

¹¹ Forse la recente rilevazione diretta delle onde gravitazionali renderà possibile in futuro un’astrofisica basata su di esse in grado di ottenere informazioni sullo stato dell’universo prima del disaccoppiamento.

¹² Alcuni modelli di Bianchi, per esempio, hanno una geometria omogenea e isotropa soltanto per definiti periodi di tempo (si vedano Ellis, Maartens & MacCallum 2012, cap. 18).

...la posizione del principio cosmologico (copernicano) nel pensiero scientifico moderno: come il principio della conservazione dell'energia esso è un principio epistemologico; perciò non possiamo metterlo in discussione a seguito di risultati sperimentali, come nessun risultato sperimentale può mettere in dubbio il principio della conservazione dell'energia. (Gratton 1975, p. 119)

Piuttosto, si trovano affermazioni di cosmologi che, muovendo da una prospettiva induttivista, alla fine sono sì costretti a cadere in un certo apriorismo, ma senza quelle connotazioni nette alla Gratton che appunto arrivano addirittura ad annullare il potere dirimente delle osservazioni. Paradigmatico è il caso di Wolfgang Rindler, che dopo pagine molto belle sulle basi empiriche della cosmologia e in particolare del PC, 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, 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. (Rindler, 2006, p. 358; traduz. nostra)

È evidente come il grande fisico teorico oscilli fra apriorismo ed empirismo, senza aver chiaro il carattere ipotetico-deduttivo del PC.

Molto più condivisibile per noi è la posizione di un altro grande cosmologo, Jim Peebles, che proprio ribattendo a Ellis, osserva nel suo classico testo del 1993:

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. (Peebles, 1993, p. 9; traduz. nostra)

La critica di Peebles all'empirismo è senza mezzi termini, così come il suo ribadire il metodo scientifico di fatto seguito dagli scienziati, appunto quello ipotetico-deduttivo.

4. *Presente e futuro*

Proviamo a fare, brevemente, il punto della situazione. I modelli cosmologici omogenei e isotropi, detti *modelli di Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker* (FLRW), date le loro simmetrie, non sono di fatto modelli realistici visto che non rappresentano le disomogeneità che osserviamo (la materia concentrata in sistemi planetari, stelle, galassie...). I modelli standard usati oggi in cosmologia sono modelli di FLRW perturbati, ossia modelli *quasi* isotropi in ogni punto, e dunque *quasi* spazialmente omogenei (disomogenei a piccole scale, omogenei a grandi scale). La ragione per assumere queste simmetrie è la notevole isotropia che misuriamo attorno a noi, dopo aver mediato su scale sufficientemente più grandi di quelle degli ammassi di galassie (e dopo aver tenuto anche conto della nostra velocità peculiare rispetto alla CMB). Poiché l'isotropia si applica a tutte le osservazioni, risulta che nella regione osservabile dell'universo sia la struttura dello spaziotempo che la distribuzione di materia sono altamente isotrope. Ma questo risultato osservativo può scaturire da due stati di cose opposti: 1) una reale isotropia dell'universo in ogni sua regione, il che comporta anche un'effettiva omogeneità spaziale, e rende il nostro punto di osservazione del tutto tipico; 2) un'isotropia "fittizia", nel senso che l'universo è in realtà spazialmente anisotropo e disomogeneo, ma noi non ce ne accorgiamo poiché non ci rendiamo conto di essere situati in un punto particolare che ci fa apparire l'universo sfericamente simmetrico. Come detto, solitamente si tende a preferire la prima opzione, sulla base, appunto, della presunta validità di un principio copernicano. Ma di fatto l'isotropia della

CMB, e delle altre sorgenti, noi la misuriamo soltanto da una linea d'universo, quella della nostra galassia, e tale isotropia non è compatibile soltanto con i modelli di FLRW, ma anche con modelli spazialmente disomogenei (sempre in espansione), sfericamente simmetrici riguardo a un centro (che nel nostro caso potrebbe coincidere con la Via Lattea), i più semplici dei quali sono detti *modelli di Lemaître-Tolman-Bondi* (LTB).

Uno degli aspetti forse meno noti ma non per questo meno significativi è che, in uno scenario del tipo delineato dai modelli di LTB, l'immagine che ora abbiamo dell'universo potrebbe cambiare drasticamente. Si pensi, infatti, che le osservazioni riguardanti le supernovae che nel 1998 hanno portato a concludere che l'espansione dell'universo sta accelerando a causa della cosiddetta energia oscura, in uno scenario LTB potrebbero essere anche compatibili con (nel senso di essere l'effetto di) un universo disomogeneo a vaste scale, nel quale noi saremmo situati al centro di una grande regione vuota. Si mostra che anche altri dati cosmologici risulterebbero compatibili con tali modelli, dunque cadrebbe l'accelerazione e la conseguente ipotesi dell'esistenza dell'energia oscura, ma il nuovo scenario resterebbe in un quadro di coerenza e sintonia il cui portato generale, però, non è ancora stato studiato¹³.

Insomma, il principio copernicano è un perno centrale dell'attuale visione del cosmo, e spesso ci si dimentica che le osservazioni, senza presupporne la validità, sarebbero molto più ambigue e "aperte" di quanto si pensa. La questione chiave è allora se tale principio veramente è affidabile all'interno della regione osservabile dell'universo. Negli ultimissimi anni sono stati approntati almeno 4 tipi di tests che i cosmologi sperano siano in grado di controllarlo. Non possiamo entrare qui nei dettagli¹⁴, ciò che però registriamo con piacere è appunto il fatto che la ricerca si sta ponendo il problema di come mettere in discussione il principio copernicano. Lo stesso Ellis, prendendone atto nel recente trattato sulla cosmologia relativistica del 2012, fa in un certo senso ammenda rispetto a quanto scritto nel succitato Handbook del 2006, dove riteneva non controllabile il principio copernicano. Ciò non significa che abbia assunto un approccio ipotetico-deduttivo, ma nell'estendere, per così dire, il suo empirismo anche al principio copernicano, lo rende pienamente ipotetico, schivando almeno la tipica fallacia probabilistica vista poc'anzi. Vediamo, infatti, cosa scrive, con gli altri due coautori, rispondendo a coloro i quali giudicano gli universi di LTB poco probabili:

¹³ Si vedano Ellis, Maartens & MacCallum (2012, cap. 15).

¹⁴ Si rimanda a Ellis, Maartens & MacCallum (2012, par. 15.6).

Qualunque sia la loro posizione filosofica, essi dovranno cedere il passo ai dati empirici. Se i succitati test mostreranno che l'universo è spazialmente disomogeneo, filosofi e cosmologi allo stesso modo dovranno accettarlo come un dato di fatto. Qualsiasi teoria sulla probabilità dovrebbe essere adattata a questo fatto empirico. [...] In cosmologia, ciò che è verificabile, e ciò che non lo è, è una questione chiave: pregiudizi teorici sulla geometria dell'universo, e sul posto che in esso occupiamo, devono sottomettersi a tali test osservativi. [...] In generale, la validità o meno del Principio Copernicano è una questione fondamentale che non sarà eliminata. Dovrebbe essere soggetta a continui esami e verifiche. (Ellis, Maartens & MacCallum 2012, p. 415)

5. Conclusioni

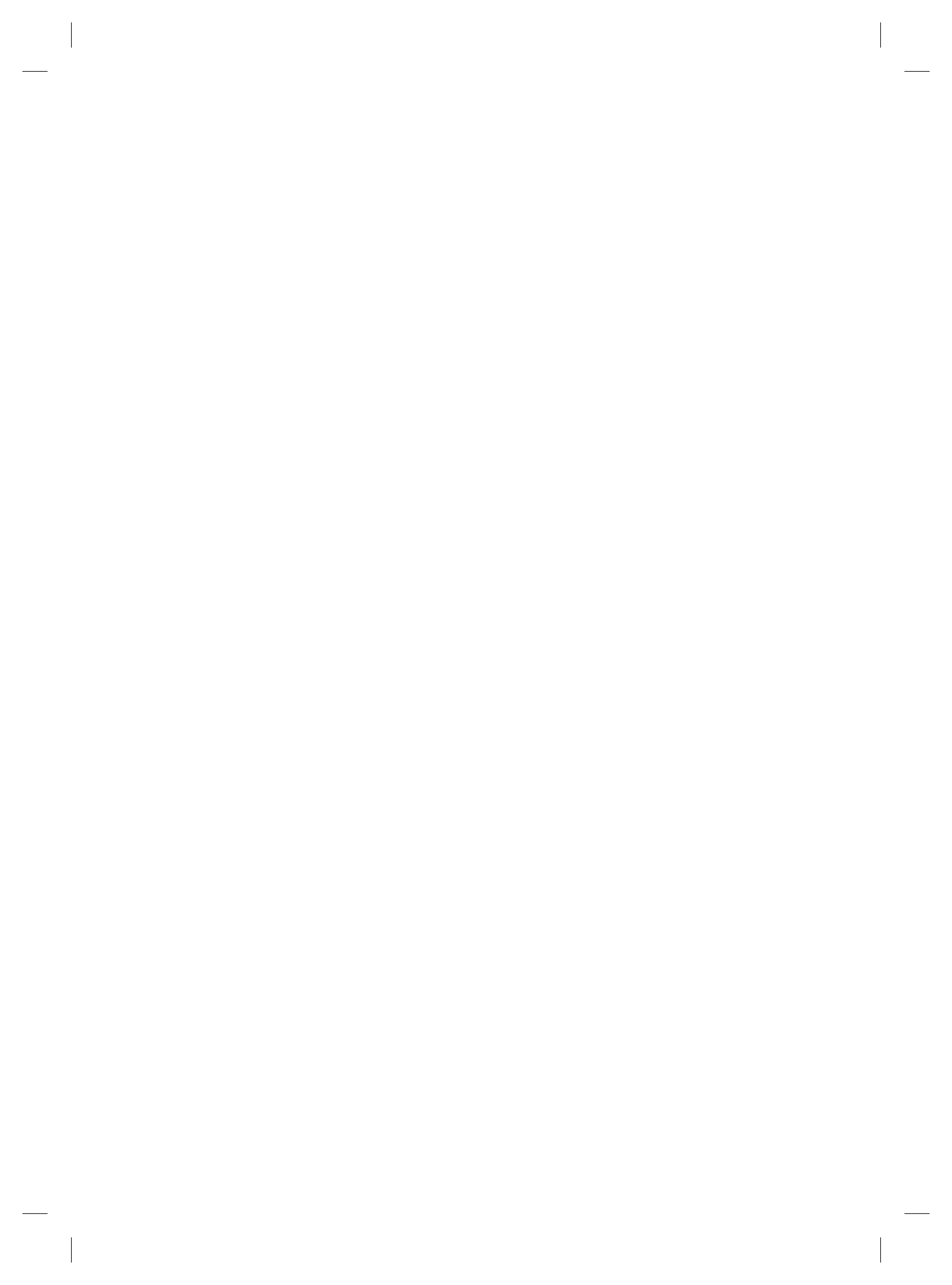
L'osservazione di Gale (2015) secondo cui oggi è ovvio che la fisica procede mediante un metodo ipotetico-deduttivo non è scontata. Tale metodo, nonostante sia stato formulato per la prima volta da Huygens addirittura nel '600, è spesso poco presente nella mentalità degli scienziati, perlopiù invece legati agli slogan di Newton "non faccio ipotesi" e "dedurre dall'esperienza". Va ribadito con forza che lo statuto epistemologico del PC è appunto quello di un'ipotesi molto audace che assieme all'applicazione della RG all'universo come sistema fisico produce conseguenze sperimentalmente controllabili, come la CBR e le quantità dei diversi tipi di atomi presenti nell'universo. D'altronde, la logica inferenziale che sovrintende alla cosmologia contemporanea è in realtà molto semplice, benché audace: dalla validità universale della RG assieme al PC si deduce il modello standard, che per ora, almeno in certi ambiti, è confermato. Ne segue che attualmente non dobbiamo abbandonare nessuna di queste due assunzioni. È chiaro che ulteriori scoperte sperimentali e teoriche potranno convincerci a respingere, per *modus tollens*¹⁵, questa deduzione, eliminando l'uno o l'altro dei due presupposti, o persino entrambi.

¹⁵ Ricordiamo che il *modus tollens* ha in generale la forma "A e B e... implicano Z, non Z, quindi o non A oppure non B, oppure...".

Bibliografia

- Dingle H. (1937), "Modern Aristotelianism", *Nature*, pp. 784-786.
- Dingle H. (1937a), "Deductive and inductive methods in science: A reply", *Nature*, Supplement, pp. 1011-1012.
- Einstein A. (1916), "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie", *Annalen der Physik*, 354 (7), 769-822.
- Einstein A. (1917), "Kosmologische betrachtungen zur allgemeine Relativitätstheorie", *Sitzungsberichte der königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, pp. 142-152.
- Einstein A. (1918), "Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie", *Annalen der Physik*, 55, pp. 241-244.
- Einstein A. (1932), "Zum Kosmologischen Problem der allgemeinen Relativitätstheorie", Verlag der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften, Sitzung vom 16 April 1931, pp. 235-37.
- Einstein A. (1934), "On the Method of Theoretical Physics", *Philosophy of Science*, 1, pp. 163-169.
- Eisenstaedt Jean (1989), "The Low Water Mark of General Relativity, 1925-1955", in D. Howard and J. Stachel (eds.), *Einstein and the History of General Relativity*, Boston, Birkhäuser, pp. 277-292
- Ellis G. F. R. (2007), "Issues in the Philosophy of Cosmology", in: J. Butterfield, J. Earman (eds.), *Philosophy of Physics*, Amsterdam, Elsevier, pp. 1183-1285.
- Ellis, G.F.R, Maartens, R, and MacCallum, M.A.H (2012), *Relativistic Cosmology*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Gale, G. (2015), "Cosmology: Methodological Debates in the 1930s and 1940s", <http://plato.stanford.edu/entries/cosmology-30s/>.
- Gale G., 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, pp. 343-375.
- Geymonat L. (1969), *Galileo Galilei*, Einaudi, Torino.
- Gratton L. (1975), "Nicolò Copernico e la moderna cosmologia", in *Problemi attuali di scienza e di cultura*. Atti del Convegno Internazionale sul Tema: *Copernico e la cosmologia moderna*. Quaderno n. 216, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, pp. 115-123.
- Huygens C. (1690), *Traité de la lumière*, Gauthier-Villars, Paris 1920.

- Losee J. (1993), *A historical introduction to philosophy of science*, Oxford University Press, Oxford; trad. It. *Filosofia della scienza*, Il Saggiatore, Milano, 2001.
- Koyré a. (1965), *Studi newtoniani*, Einaudi, Torino 1972.
- Macchia G. (2016), “La cosmologia relativistica, 1917-1965”, *Giornale di astronomia*, 24, pp. 24-31.
- McCrea W. H. (1937), Supplement to *Nature*, pp. 1002-3.
- McCrea W. H. (1939), “The evolution of theories of space-time and mechanics”, *Philosophy of Science*, 6, 137-162.
- Merleau-Ponty M. (1965), *Cosmologie du XX^e siècle*, Gallinard, Paris; trad. it. *Cosmologie del secolo XX*, Il Saggiatore, Milano, 1974.
- Milne E. A. (1935), *Relativity, gravitation and world structure*, Clarendon Press, Oxford.
- Peebles, P. J. E. (1993), *Principles of Physical Cosmology*, Princeton, Princeton University Press.
- Penzias, A.A. (1965), “A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s”, *Astrophysical Journal*, vol. 142, pp.419-421.
- Rindler, W. (2006), *Relativity: Special, General, and Cosmological*, Oxford University Press, Oxford.
- Saddeh D., Feeney S. M., Pontzen A., Peiris H. V., McEwen J. D. (2016), “How isotropic is the universe?”, *Physical Review Letters*, 117, pubblicato on line.
- de Sitter W. (1917), “On Einstein’s theory of gravitation and its astronomical consequences”, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 76, pp. 699-728.
- Smeenk C. (2014), “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, Cambridge.
- Strevens M. (1998), “Inferring probabilities from symmetries”, *Nous*, 32, pp. 231-246.
- Weinberg, S. (1973), *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*, New York, Wiley & Sons.



La Relatività Generale: un nuovo paradigma per la Fisica

SALVATORE CAPOZZIELLO

Dipartimento di Fisica “Ettore Pancini”, Università di Napoli Federico II
Società Italiana di Relatività Generale e Fisica della Gravitazione

Introduzione

La Relatività Generale è una teoria della gravitazione, formulata da Albert Einstein tra il 1905 e il 1916, dove la geometria dello spazio-tempo è trattata come una grandezza dinamica. Il fondamento fisico di tale teoria è il *Principio di Equivalenza*.

Essa è da considerarsi uno dei maggiori eventi concettuali del XX secolo. Per la prima volta, grazie a questa teoria, lo spazio ed il tempo sono considerati come entità dinamiche alla stregua delle altre grandezze fisiche.

Già nella Relatività Ristretta, formulata da Einstein nel 1905, spazio e tempo erano considerati relativi all'osservatore e, la loro intima connessione, aveva portato Minkowski alla concezione del cosiddetto *cronotopo*, una struttura cinematica e geometrica in cui l'unico ente assoluto era la velocità della luce, cioè la velocità massima delle interazioni fisiche.

La Relatività Generale va ben oltre. Einstein si pone il problema della ricerca di equazioni di campo la cui soluzione sia lo spazio-tempo stesso, data una certa distribuzione di materia. La rivoluzione concettuale che ne deriva è enorme, se si pensa al senso comune di spazio e di tempo e a come questi concetti siano stati trattati in tutto il pensiero scientifico e filosofico precedente.

È bene ricordare alcuni punti salienti della storia dei concetti di spazio e di tempo per capire l'entità della *svolta relativistica* [1].

Durante il Rinascimento, si intuisce che la *percezione* e la *concezione* di spazio e tempo sono ben diverse e potrebbero essere disgiunte da ogni eventuale connotato metafisico. In particolare, Galileo, Cartesio e Giordano Bruno capiscono che spazio e tempo possono essere oggetti di indagine scientifica: essi acquistano un carattere operativo divenendo l'ambiente in cui formulare le teorie fisiche. Nelle rappresentazioni di Cartesio, spazio e tempo sono concetti astratti e matematici ma ancora con retaggi metafisici come l'*extensio*, definita come lo spazio della *substantia*.

Nei *Principia* di Newton, lo spazio ed il tempo sono degli assoluti, costituiscono il *sensorium Dei* attraverso il quale Dio trasmette il moto a tutta la materia che riempie l'Universo.

È interessante la posizione di Leibniz che nega la realtà assoluta dello spazio e del tempo definendoli solo relazioni tra gli oggetti ed i fenomeni. Per esempio, il tempo è l' *ordo mutationis generalis*, quindi l'ordine di fenomeni successivi, mentre lo spazio è l'ordine di oggetti e fenomeni coesistenti. In altre parole, c'è l'affermazione implicita che senza oggetti e fenomeni non abbiano né spazio e né tempo. Detto in termini moderni, lo spazio e il tempo sono definibili solo rispetto ad un osservatore e ad un sistema di riferimento. Questa posizione è in completo disaccordo con quella di Newton, per il quale spazio e tempo sono esistenti di per sé.

Come sappiamo, il punto di vista di Newton prevalse e la fisica classica ha considerato lo spazio ed il tempo come concetti assoluti. La situazione cambia radicalmente nel XX secolo, e, in qualche modo, le idee di Leibniz sono recuperate. Einstein evade tutte le congetture metafisiche di spazio e tempo partendo dalla seguente radicale affermazione:

Tutte le grandezze della fisica devono essere definite in modo univoco tramite un processo di misura.

Si giunge alle conclusioni che:

- Il tempo è ciò che misuriamo con un orologio.
- Lo spazio è ciò che misuriamo con un sistema di determinazione delle distanze (es. raggi di luce).
- Due eventi, contemporanei per un osservatore, possono non essere tali per un altro.
- Eventi che accadono nello stesso tempo, ma in luoghi diversi, possono essere giudicati accadere in tempi diversi da un osservatore esterno in moto.

A partire da queste posizioni, Einstein realizza prima che lo spazio e il tempo sono relativi ad un osservatore (la Relatività Ristretta) e poi che lo spazio-tempo stesso è dato da un'unica grandezza fisica (la metrica) che evolve, si deforma e può essere singolare, cioè non definibile quantitativamente, in certe situazioni (la Relatività Generale). Il risultato di queste considerazioni, sviluppate assumendo la gravitazione come l'interazione che esprime la strut-

tura dello spazio-tempo, porta a equazioni di campo le cui soluzioni sono le possibili metriche spazio-temporali.

Le conseguenze di questi ragionamenti sono molteplici. L'Universo stesso, con la sua distribuzione di massa, la sua estensione e la sua durata, può essere trattato come un sistema dinamico. La presenza di massa auto-gravitante è in grado di incurvare lo spazio-tempo e, in generale, la forma globale dello spazio-tempo è determinata dalla distribuzione degli oggetti celesti, come intuito da Riemann circa 60 anni prima [2]. Gli sviluppi di queste idee hanno condotto, come vedremo, alla scoperta delle onde gravitazionali e ad una formulazione scientifica del Problema Cosmologico.

Il ruolo della gravitazione

Molto spesso, anche da parte di persone di cultura elevata, la Relatività Generale viene semplicemente classificata come una mera estensione della Relatività Ristretta. Questo non è vero poiché la Relatività Generale implica, oltre a considerazioni sui sistemi di riferimento accelerati, anche la trattazione del campo gravitazionale come intimamente legato alla struttura dello spazio-tempo [3].

Proprio questa è la vera rivoluzione introdotta da Einstein in questa teoria: riconoscere che il campo gravitazionale, lo spazio-tempo e la distribuzione della materia-energia sono quantitativamente connessi e governati dalle stesse equazioni.

Per intuire la portata di questo concetto, consideriamo la meccanica newtoniana. Dato lo spazio e il tempo assoluti, cioè identici e immutabili per tutti gli osservatori, l'interazione gravitazionale è descritta dalla ben nota legge

$$F = \frac{GmM}{r^2}$$

che stabilisce che due masse m ed M , separate da una distanza r , sono soggette ad una mutua attrazione gravitazionale F . G è la costante di gravitazione universale, oggi misurata con estrema accuratezza [4]. A partire dalla precedente equazione, desunta dalle leggi di Keplero, le previsioni sui moti dei pianeti, sono di una precisione impressionante. In generale, tutta la Meccanica Celeste può essere consistentemente formulata a partire dalla teoria di Newton.

L'altro cardine di questa teoria è il fatto che, dato un corpo di massa m , la sua massa inerziale e la sua massa gravitazionale coincidono grazie al *Principio di Equivalenza* di Galileo.

Malgrado la generalità delle previsioni e l'accuratezza dei riscontri sperimentali, la teoria di Newton presenta delle inesattezze che possono essere messe in evidenza solo se essa viene sottoposta ad una critica serrata e scevra da pregiudizi come fece Einstein nei primi anni del XX secolo.

Per prima cosa, la gravitazione newtoniana è indipendente dal tempo e questo significa che l'interazione gravitazionale può propagarsi istantaneamente (cioè a velocità infinita) a tutte le distanze. Questo fatto è in palese contraddizione con la Relatività Ristretta, per la quale la massima velocità di propagazione delle interazioni è la velocità della luce. Solo assumendo questo limite finito, l'Elettromagnetismo (e, quindi, le equazioni di Maxwell) può essere trattato come una teoria consistente in accordo con i dati sperimentali.

Altro pregiudizio della teoria di Newton è il fatto che lo spazio ed il tempo sono strutture rigide, non influenzabili dalla distribuzione delle masse. In quest'ottica, il concetto di attrazione (ovvero di azione a distanza) da parte di una massa gravitazionale diviene difficilmente giustificabile.

Geometrizzando il campo gravitazionale, cioè legando intimamente la struttura dello spazio-tempo con le sorgenti gravitazionali e considerando anche la gravitazione come un'interazione che si propaga a velocità finita, Einstein scopre che curvatura e materia sono legate nella stessa struttura dinamica. In altre parole, il concetto fisico di *forza* può essere sostituito con quello di *curvatura*. Lo strumento matematico per questa realizzazione è il *calcolo differenziale assoluto*, sviluppato nei decenni precedenti da Gauss, Riemann, Bianchi, Ricci-Curbastro, Christoffel e Levi-Civita.

Il pregio fondamentale di questo approccio matematico è che tutte le nozioni del calcolo differenziale possono essere definite su varietà qualsiasi (cioè su spazi-tempi comunque curvi) e per tutte le trasformazioni di coordinate (purché non singolari). Il vantaggio è notevole poiché lo spazio-tempo non deve essere necessariamente piatto, le traiettorie estremali dei corpi possono essere geodetiche qualsiasi (non solo rette) e la curvatura delle traiettorie dei corpi è relativa alle sorgenti gravitazionali che incurvano lo spazio-tempo. Una misura della curvatura diventa una misura del campo gravitazionale. A sua volta, la curvatura fornisce equazioni differenziali le cui soluzioni sono le metriche spazio-temporali. In questo senso, gravitazione e struttura dello spazio-tempo sono intimamente connesse.

Il Principio di Equivalenza come fondamento della teoria

Il *Principio di Equivalenza* è alla base di ogni teoria metrica della gravitazione. La prima formulazione del principio nasce dalla teoria della gravitazione di Galileo e Newton; tale formulazione, detta Principio di Equivalenza in forma debole, asserisce che la *massa inerziale* m_i e la *massa gravitazionale* m_g di un qualsiasi oggetto massiccio sono equivalenti. Nella fisica newtoniana, la massa inerziale m_i è il coefficiente che appare nella seconda legge di Newton: $\mathbf{F} = m_i \mathbf{a}$ dove \mathbf{F} è la forza esercitata su una massa m_i avente accelerazione \mathbf{a} ; nella Relatività Ristretta (senza gravitazione) la massa inerziale di un corpo appare essere proporzionale all'energia a riposo del corpo: $E = m_i c^2$. Tenendo conto dell'attrazione gravitazionale newtoniana, si introduce la massa gravitazionale m_g : la forza di attrazione gravitazionale tra due corpi con massa gravitazionale m_g e M è, come visto, $\mathbf{F} = \mathbf{G} m_g M / r^2$ dove \mathbf{G} è la costante gravitazionale newtoniana e r la distanza tra i due corpi. Diversi esperimenti dimostrano che $m_i = m_g$. L'attuale accuratezza di questa relazione è dell'ordine di 10^{-14} [4]. Si noti che M è considerata la massa che "genera" il campo gravitazionale mentre m_g è la massa della particella di prova.

Il Principio di Equivalenza in forma debole implica che è impossibile distinguere gli effetti di un campo gravitazionale da quelli del moto in un sistema uniformemente accelerato usando la semplice osservazione del comportamento di una particella in caduta libera. Il Principio di Equivalenza in forma debole può essere allora formulato come segue:

Se un corpo di prova non carico è posto in corrispondenza di un evento iniziale nello spazio-tempo con velocità assegnata, allora la sua conseguente traiettoria sarà indipendente dalla sua struttura interna e dalla sua composizione.

Una generalizzazione del Principio di Equivalenza in forma debole asserisce che la Relatività Ristretta è sempre localmente valida. Il concetto di massa perde parte del suo carattere di unicità: la massa è semplicemente una manifestazione dell'energia e della quantità di moto.

Secondo Einstein, è impossibile distinguere localmente gli effetti di un'accelerazione uniforme e di un campo gravitazionale esterno, non solo per particelle in caduta libera, ma per qualsiasi esperimento. Questo principio è chiamato *Principio di Equivalenza di Einstein* e può essere formulato come segue:

- Il Principio di Equivalenza in forma debole è valido;
- il risultato di un qualsiasi esperimento localmente non gravitazionale è indipendente dalla velocità dell'apparato in caduta libera;
- il risultato di un qualsiasi esperimento localmente non gravitazionale è indipendente da dove e quando viene effettuato.

Con il termine “esperimento localmente non gravitazionale” si intende un esperimento effettuato in un “piccolo” laboratorio in caduta libera, così da evitare le possibili non omogeneità spazio-temporali. Dal Principio di Equivalenza di Einstein, segue che l'interazione gravitazionale dipende dalla curvatura dello spazio-tempo, cioè i postulati di qualsiasi teoria metrica della gravità devono essere soddisfatti, cioè:

- lo spazio-tempo è caratterizzato da una metrica;
- le linee di mondo seguite dai corpi di prova sono le geodetiche della metrica;
- nei sistemi localmente in caduta libera, detti sistemi locali di Lorentz, le leggi non gravitazionali della Fisica sono quelle della Relatività Ristretta.

Una delle predizioni di questo principio è il cosiddetto *red-shift* gravitazionale, verificato sperimentalmente da Pound e Rebka nel 1960 [5].

È bene sottolineare che le interazioni gravitazionali sono escluse dal Principio di Equivalenza in forma debole e da quello di Einstein. Per classificare teorie della gravitazione alternative alla Relatività Generale, sono stati introdotti i *Principi di Equivalenza in forma gravitazionale debole e in forma forte*. Quest'ultimo estende il Principio di Equivalenza di Einstein includendo tutte le leggi fisiche nella sua formulazione:

- Il Principio di Equivalenza in forma debole è valido per i corpi auto-gravitanti così come per i corpi di prova (Principio di Equivalenza in forma gravitazionale debole);
- il risultato di un qualsiasi esperimento locale è indipendente dalla velocità dell'apparato in caduta libera;
- il risultato di un qualsiasi esperimento locale è indipendente da dove e da quando viene effettuato.

Pertanto, il Principio di Equivalenza in forma forte contiene quello di Einstein quando si ignorano le forze gravitazionali. Molti autori affermano che

l'unica teoria coerente con il Principio di Equivalenza in forma forte è la Relatività Generale, ma questa affermazione deve essere ancora completamente dimostrata [6].

Riassumendo, possiamo dire che la Meccanica Classica è fondata sull'uguaglianza della massa inerziale e di quella gravitazionale; questo concetto, accettato assiomaticamente da Galileo e Newton, fu provato sperimentalmente da Eötvös all'inizio del secolo scorso, con una precisione di una parte su 10^9 e, più recentemente, da Dicke e dai suoi collaboratori, intorno al 1960, con una precisione di una parte su 10^{11} . Oggi siamo arrivati a precisioni di una parte su 10^{14} [4]. Einstein fu molto colpito da queste misure ed osservò che, da questa uguaglianza, discende direttamente il fatto che gli effetti di un campo gravitazionale sono annullati all'interno di un ascensore in caduta libera che si comporta proprio come un sistema di riferimento inerziale. Infatti, il moto di caduta libera della particella di prova è un moto uniforme nel sistema dell'ascensore.

Dunque, dato un campo gravitazionale qualunque, è possibile annullarne localmente gli effetti ponendosi in un sistema di coordinate opportuno: viceversa, in assenza di campo gravitazionale, è possibile simularne gli effetti istituendo un sistema di coordinate non inerziali, cioè mettendosi in moto accelerato rispetto al sistema di riferimento inerziale. Assumendo la validità del Principio di Equivalenza, segue che, dato un campo gravitazionale qualunque, è sempre possibile trovare un sistema di coordinate che è localmente inerziale.

Il Principio di Mach

A questo punto, sono necessarie alcune considerazioni di carattere epistemologico per evidenziare come i risultati della Relatività Generale contrastino con le nozioni di spazio e tempo assoluti proprie della Meccanica Classica. Come detto, la Meccanica Classica assume l'esistenza di uno spazio assoluto asserendo che le leggi della dinamica sono valide, nella loro forma elementare, solo in particolari sistemi di riferimento, detti inerziali. Alla richiesta di una definizione di tali riferimenti privilegiati, la Meccanica Classica risponde in modo tautologico dicendo che essi sono, appunto, quelli in cui valgono le leggi della dinamica. È ben noto, tuttavia, che il problema non sorge sul piano pratico, dal momento che sappiamo bene come costruire riferimenti inerziali: secondo il grado di accuratezza del nostro esperimento, il riferimento inerziale sarà definito dal laboratorio stesso, oppure sarà solidale con il Sole, avendo gli assi orientati verso le stelle fisse e così via.

L'esistenza di riferimenti privilegiati, coincidenti con lo spazio assoluto, non era un concetto gradito a tutti. A cominciare, come detto, da Leibniz, alcuni studiosi non potevano accettare che lo spazio vuoto, sede dei fenomeni fisici, fosse dotato di proprietà così concrete da influenzare i fenomeni meccanici generando le forze inerziali; sembrava più ragionevole che queste ultime fossero generate dal moto accelerato rispetto alla materia vicina piuttosto che dal moto accelerato rispetto allo spazio assoluto vuoto. L'esperienza del secchio di Newton pose fine, per qualche tempo, a queste speculazioni finché Berkeley prima e Mach poi la reinterpretarono osservando che, nella realtà, lo spazio assoluto della meccanica newtoniana non è vuoto, ma riempito da quantità enormi di materia, rispetto alla quale, stati di moto uniforme o accelerato sono ben distinguibili: precisamente, secondo un ragionamento che oggi viene accreditato a Mach ed è noto con il nome di principio omonimo, è durante il moto accelerato rispetto a questa materia distante che si generano, in modo peraltro indefinito, le forze inerziali. Questa visione *machiana* delle forze inerziali, storicamente, influenzò molto Einstein nella formulazione della Relatività Generale; l'equivalenza tra la massa inerziale e quella gravitazionale, infatti, non è in disaccordo con l'accettazione dell'idea che le forze inerziali siano generate da una sorta di azione gravitazionale delle masse lontane dell'Universo quando siano presenti stati di moto accelerato, come già intuito da Riemann.

Immaginiamo, per essere concreti, di schematizzare l'intero Universo con un guscio sferico di materia ed immaginiamo il nostro laboratorio al centro e in rotazione rispetto al guscio. In queste condizioni, l'esperienza ci dice che sorgono le forze inerziali. Poiché la situazione descritta non è distinguibile, operativamente, dall'altra in cui si immagina che il laboratorio sia fisso ed il guscio sferico sia in rotazione attorno ad esso (almeno fino a quando non sono implicate velocità maggiori della velocità della luce), se la teoria della Relatività Generale è in accordo con il principio di Mach, essa deve contenere formalmente il risultato che masse in rotazione generano campi di forze inerziali: questo è qualitativamente vero anche se, quantitativamente, l'effetto tende ad essere piccolissimo. Quest'ultimo fatto potrebbe essere la spiegazione del risultato nullo di un esperimento, condotto dallo stesso Mach, che, in accordo con la sua visione delle forze inerziali, voleva rivelare il campo delle forze centrifughe e di Coriolis generate all'interno di un volano in rotazione. La discussione di come e quanto l'interazione gravitazionale sia in accordo con il Principio di Mach è tuttora aperta. Basti pensare che molte teorie alternative del campo gravitazionale sono state formulate per cercare una maggiore consistenza con tale principio. Di particolare rilievo sono le teorie scalar-ten-

soriali, tra cui la teoria di Brans Dicke, in cui si suppone che l'accoppiamento gravitazionale sia variabile e dipendente dalla distanza di interazione [6].

Le Equazioni di Einstein

La massima sintesi delle riflessioni precedenti è realizzata da Einstein nella scrittura delle equazioni di campo, dove l'interazione gravitazionale è identificata con la curvatura dello spazio-tempo:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi G T_{\mu\nu}$$

Queste sono dieci equazioni tensoriali, non lineari, alle derivate parziali dove, a sinistra, compare un tensore (detto tensore di Einstein) derivato da un'opportuna contrazione del tensore di curvatura di Riemann e a destra il tensore energia-impulso, che rappresenta la sorgente materiale dello spazio-tempo in esame. Il numero di tali equazioni è il risultato di considerazioni di simmetria sulla struttura dei tensori di curvatura e di energia-impulso (si veda anche il contributo del Prof. Giambò in questo volume). Si dimostra che, considerando nel sistema anche le leggi di conservazione della materia-energia, le equazioni di Einstein indipendenti si riducono a sei. Le equazioni precedenti sono scritte in regime relativistico e in unità "naturali", quindi si assume che la velocità della luce sia $c=1$, altrimenti il secondo membro deve essere diviso per c^4 . A causa di questo fattore, la gravitazione risulta la più debole tra tutte le interazioni.

Tali equazioni furono pubblicate negli *Annalen der Physik* nel 1916 [7]. Furono desunte da Einstein partendo dalle identità di Bianchi del tensore di Riemann. Quasi contemporaneamente, furono ricavate da Hilbert a partire da un principio variazionale contenente lo scalare di Ricci R , cioè la contrazione del tensore di Riemann, nell'azione [8].

La generalità di queste equazioni è davvero stupefacente. Esse si applicano ad oggetti astrofisici compatti come le stelle di neutroni o i buchi neri fino all'intero Universo, se assumiamo che il Cosmo sia un sistema dinamico in grado di evolvere. È interessante notare che, nel limite delle basse energie e delle basse velocità ($v \ll c$) si recuperano tutti i risultati della meccanica newtoniana e, addirittura, si spiegano alcune sue anomalie come la precessione al perielio di Mercurio e la deflessione dei raggi luminosi. Come sostenuto da vari autori, tali equazioni possono ben definirsi tra le più alte realizzazioni dello Spirito Umano.

Le prove sperimentali

Subito dopo la pubblicazione della teoria, partì un'intensa attività per confermarne la validità come estensione della meccanica newtoniana. Malgrado questo, la Relatività Generale venne considerata per anni una teoria "difficile" che trovava la sua collocazione naturale in corsi di studio avanzati di Matematica e Fisica Teorica. È interessante notare che il primo corso di Relatività, come appendice di un corso di Calcolo Differenziale Assoluto, fu tenuto presso la Regia Università di Napoli nell'anno accademico 1919-1920 da Roberto Marcolongo [9], cioè non appena le tre prove "classiche" della teoria (precessione al perielio di Mercurio, spostamento verso il rosso delle linee spettrali e deflessione gravitazionale della luce) avevano trovato un riscontro osservativo. Il corso fu tenuto a Matematica, non a Fisica, poiché la Relatività, soprattutto quella Generale, era ritenuta qualcosa di molto lontano dalla Fisica Sperimentale standard.

In questa sede, accenneremo brevemente ai cosiddetti *test classici* della teoria, rimandando alla abbondante letteratura specialistica per una trattazione dettagliata di essi (si veda ad esempio [10]).

La prima prova della validità della Relatività Generale, come estensione diretta della meccanica newtoniana, fu la spiegazione della precessione al perielio di Mercurio. Questo punto dell'orbita del pianeta avanza di 574 secondi di arco al secolo. Di questi, ben 531 sono spiegati tramite la teoria delle perturbazioni gravitazionali dovute principalmente a Venere, Terra e Giove. La differenza di 43 secondi d'arco al secolo è spiegata dalla teoria delle orbite planetarie, ottenuta tramite la Relatività Generale. È interessante riportare un passo della lettera che Einstein scrisse a Sommerfeld subito dopo il conseguimento del risultato:

“L'ultimo mese è stato uno dei più intensi della mia vita. Quello che mi rende così felice non è solo il fatto che la teoria di Newton si ottiene come prima approssimazione, ma che la precessione del perielio di Mercurio si ottiene come seconda approssimazione”

In altre parole, Einstein intuì subito che la sua descrizione geometrica del campo gravitazionale è fisicamente fondata.

La seconda verifica avviene nel 1919. Durante un'eclissi totale di Sole, l'equipe guidata da Arthur Eddington osservò che la luce delle stelle nei pressi del disco solare era leggermente deviata, dato che le stelle apparivano in posizioni spostate rispetto a quelle in cui erano osservate usualmente.

Newton e Laplace avevano già previsto un effetto simile, ma il calcolo basato sulla Relatività Generale era quello in accordo preciso con le osservazioni. Era la nascita di quella branca dell'Astronomia detta *lensing gravitazionale*, che è l'insieme di tutti quei fenomeni caratterizzati dalla deflessione della radiazione emessa da una sorgente luminosa a causa della presenza di un corpo massiccio posto tra la sorgente e l'osservatore. In altre parole, il campo gravitazionale si comporta come un mezzo otticamente attivo.

Un'ulteriore prova della teoria, verificata sperimentalmente più di recente, è lo spostamento verso il rosso delle righe spettrali di un sistema atomico. Tale effetto era stato previsto da Einstein già nel 1907, partendo da considerazioni sul Principio di Equivalenza. L'effetto consiste in uno spostamento relativo in frequenza di un'onda elettromagnetica dovuto al campo gravitazionale. La verifica sperimentale, già citata sopra, fu ottenuta nel 1960 da Pound e Rebka che misurarono lo spostamento relativo verso il rosso di due sorgenti situate sulla cima e alla base della Torre Jefferson all'Università di Harvard. Fu utilizzato l'effetto Mössbauer su atomi di ferro [5].

Altre prove sperimentali possono essere ricondotte al limite di campo debole ma, in ogni caso, la *Prova Regina* della Relatività Generale è stata trovata esattamente cento anni dopo la sua formulazione.

Il 14 Settembre del 2015, sono state osservate, per la prima volta, onde gravitazionali provenienti dal collasso di due buchi neri tramite misure effettuate con gli interferometri LIGO situati negli Stati Uniti. Questa può considerarsi la prima prova *full glory* della Relatività Generale, poiché il concetto di onda gravitazionale è totalmente assente nella meccanica newtoniana e perché un buco nero è un oggetto genuinamente relativistico in cui nessuna approssimazione di campo debole deve essere fatta. La discussione di come si è arrivati alla scoperta delle onde gravitazionali è riportata, in questo volume, nel contributo della Dr. La Rana.

La Cosmologia

Dal punto di vista concettuale, l'applicazione più eclatante della Relatività Generale è la Cosmologia. Per la prima volta, nella storia del pensiero umano, tale teoria permette di trattare il Cosmo in sé da un punto di vista genuinamente scientifico, evitando qualsiasi legame con la Filosofia o la Religione. Le asserzioni fondamentali di questo approccio sono: *i)* il Cosmo è un sistema dinamico "misurabile", *ii)* le equazioni del campo gravitazionale danno luogo

a modelli cosmologici confrontabili con le osservazioni astronomiche a larga scala. Nel contributo del Prof. Fano, sono illustrati i dettagli e la genesi del primo modello cosmologico einsteiniano. Qui ci preme solo inquadrare brevemente la Cosmologia nello schema della Relatività Generale.

A questo scopo, è bene fare un passo indietro per stabilire cosa si intendesse per *Problema Cosmologico* prima di Einstein.

In tutte le epoche, ogni cultura si è posta domande fondamentali come quali siano la natura, la struttura ed il fine dell'Universo. In particolare, uno degli obiettivi più alti di molti sistemi filosofici è stato quello di cercare le relazioni tra Uomo ed Universo.

Queste relazioni possono essere di tipo oggettivo (ad esempio l'Uomo è una componente "cosciente" dell'Universo) o di tipo soggettivo (come l'Uomo percepisce e concepisce l'Universo, in altre parole cosa l'Uomo, soggetto, intende per "Universo"). È chiaro, da queste premesse, che scindere il Problema Cosmologico dalla Filosofia e dalle domande "ultime" dell'Uomo rischia di rendere questa ricerca un mero esercizio intellettuale, non collocabile nel quadro più esteso di una più generale antropologia culturale [11]. In altre parole, l'indagine cosmologica diventa paradigmatica per qualsiasi sistema di conoscenze che si pone il problema "Uomo" e viene affrontata con gli strumenti culturali specifici di una data epoca. Sorge allora il dubbio se si possa parlare di "Cosmologia come Scienza", nel senso galileiano del termine, o se si debba collocare la Cosmologia nell'alveo delle dottrine filosofiche, non immediatamente correlate alle discipline scientifiche.

Quest'ultimo punto di vista risale alla fine del Settecento, quando la Cosmologia era considerata una disciplina "metafisica" con i connotati negativi attribuiti a questo termine dal pensiero positivista. Infatti, con l'estendersi del metodo scientifico e con la mentalità scienziata di tipo ottocentesco, le domande "ultime" dell'indagine cosmologica sembravano prive di senso poiché irrisolvibili (si pensi alle antinomie di Kant): la Cosmologia veniva confusa con la filosofia della Natura e, quindi, di scarso valore epistemologico.

La situazione inizia a mutare nella seconda metà dell'Ottocento e nel primo Novecento, quando le ricerche astronomiche progrediscono, si estendono alla nostra Galassia e ci si pone il problema se le "nebulose" siano interne od esterne al nostro sistema stellare (il problema dei cosiddetti "universi isola").

Per definire un inizio della Cosmologia moderna e considerare quest'ultima come "la scienza che studia la forma, le leggi fisiche e l'origine dell'universo", dobbiamo giungere al 1917. In questa data, Einstein presenta una memoria all'Accademia delle Scienze di Berlino in cui sviluppa le sue con-

siderazioni cosmologiche servendosi della Relatività Generale. L'Universo è trattato come un sistema dinamico, descritto da equazioni del moto, le cui soluzioni definiscono la geometria, l'evoluzione e il contenuto di materia. Potremmo parlare di rivoluzione culturale e di una certa estremizzazione del metodo scientifico. Il Problema Cosmologico viene affrontato non a partire da un sistema filosofico più o meno generale, ma è considerato *applicazione* di una teoria scientifica che può avere un riscontro osservativo. In altre parole, un modello di Universo non proviene da una particolare visione del mondo, ma è, invece, la *soluzione* di un sistema di equazioni differenziali che prescindono da una qualsiasi visione filosofica. A partire da questo esordio einsteiniano, i modelli cosmologici proposti sono stati molteplici e spesso contraddittori, ma il metodo è sempre lo stesso: data una teoria della gravitazione (e delle altre interazioni fondamentali), da essa si deduce un sistema di equazioni "cosmologiche", cioè un sistema dinamico descrivente un Universo. Se tale modello è confrontabile con le osservazioni, se ne ricava un modello fisico.

Nello specifico, tra il 1917 ed il 1930, grazie ai lavori di Einstein, Hubble, de Sitter, Friedmann, Lemaître e molti altri, si capisce chiaramente che occuparsi dell'Universo *in toto* è possibile tramite modelli fisico-matematici da confrontare con le osservazioni.

In particolare, Edwin Hubble dimostra che le galassie sono sistemi esterni alla Via Lattea ed in recessione da noi. Friedmann, Lemaître, Robertson e Walker trovano una soluzione delle equazioni di Einstein compatibile, da un lato, con il Principio Cosmologico, cioè col fatto che l'Universo appare omogeneo e isotropo a larga scala, e in espansione, dall'altro, quindi in accordo con lo spostamento verso il rosso delle righe spettrali delle galassie come rivelato da Hubble.

Il resto è storia recente. La scoperta della radiazione di fondo cosmico da parte di Penzias e Wilson nel 1965, il calcolo ed il riscontro osservativo delle abbondanze degli elementi primordiali (*H*, *He*, *Li*) tra gli anni Sessanta e Settanta, lo spettro delle perturbazioni cosmologiche come possibili sorgenti della struttura a larga scala, negli anni Ottanta e Novanta, la scoperta di una componente oscura del fluido cosmologico (costante cosmologica o energia oscura), con cui si è aperto il Ventunesimo secolo, sono tutti tasselli che stanno contribuendo via via ad una sempre più precisa e coerente visione scientifica del Cosmo. In altre parole, il riscontro con le osservazioni dei modelli fisico-matematici scaturiti dalla Relatività Generale ha reso alla Cosmologia il suo giusto valore epistemologico, facendola assurgere definitivamente al ruolo di scienza adatta a descrivere globalmente l'Universo come sistema fisico.

Attualmente, la Cosmologia è un campo di ricerca attivissimo che può essere collocato all'intersezione di varie discipline come la Fisica Teorica, la Matematica, l'Astronomia Extragalattica e addirittura la Chimica e la Biologia. In più, il fatto che i metodi di misura e di analisi sono diventati sempre più accurati, ci porta oggi a parlare di *Precision Cosmology*.

Conclusioni

Queste brevi considerazioni sulla nascita e lo sviluppo della Relatività Generale portano alla conclusione che, effettivamente, questa teoria possa considerarsi un punto di svolta, un paradigma con cui confrontarsi per formulare una visione coerente della realtà fisica. È indubbio che il discorso iniziato da Einstein più di cento anni fa sta divenendo sempre più strutturato e denso di risultati. In qualche modo, la Relatività Generale ha cambiato la concezione del Mondo ed il modo di rapportarsi con realtà che, prima di Einstein, erano alquanto scontati e non suscettibili di cambiamento. Ragionare su spazio e tempo in termini scientifici, geometrizzare le interazioni fisiche, aspirare ad una Teoria del Tutto che spieghi, con le stesse equazioni, tutta la realtà fisica sono concetti divenuti "patrimonio comune" dopo Einstein. Oggi, ad esempio, i metodi di indagine, teorici e sperimentali, sviluppati per le particelle elementari sono applicabili all'Astrofisica o alla Cosmologia: tale approccio era impensabile prima di Einstein. Parlare di confini dell'Universo, origine del tempo, viaggi nel tempo, multiversi e altri concetti altamente speculativi fino a qualche tempo fa, sono divenuti addirittura popolari. Dopo la scoperta delle onde gravitazionali, si parla di "Astronomia Gravitazionale", i buchi neri sono diventati oggetti "osservati" e ci sono evidenze "sperimentali" per il Big Bang iniziale.

Questo però non significa che abbiamo trovato la chiave per spiegare tutto. Qualcuno ha detto: *"le teorie scientifiche sono come gli imperi; prima o poi crollano"*. Io direi invece che, se sono vere, si perfezionano, come è accaduto per la meccanica newtoniana che è ancora validissima malgrado la critica einsteiniana.

Venendo al caso della Relatività Generale, pur con i suoi successi recenti e passati, appare sempre più chiaro che dovrà essere rivisitata ed estesa per trattare la gravitazione alla stregua delle altre interazioni fondamentali. Infatti, la formulazione di Einstein presenta problemi alle scale infrarosse (astrofisiche e cosmologiche) e ultraviolette (scale quantistiche). Il fatto che il 95% del con-

tenuto dell'Universo sia dovuto a non ben precisate forme di materia oscura ed energia oscura è forse solo l'indizio del fatto che la Relatività Generale presenta problemi alle grandissime scale pur ben rappresentando l'evoluzione *coarse grained* dell'Universo. D'altro canto, la difficoltà di formulare una teoria consistente della Gravità Quantistica, a partire dalla Relatività Generale, indica che la gravitazione non può essere semplicemente trattata come le altre interazioni quantistiche. Comunque, tutto questo indica che il paradigma relativistico funziona pur se non abbiamo ancora risposte ultime e definitive.

Voglio chiudere queste riflessioni citando Roger Cotes, un allievo di Newton, che, nel 1713, scrisse una prefazione alla seconda edizione dei *Principia*. Egli dice:

“Ci sono quelli che inventano fluidi occulti per capire le leggi della natura. Giungono a conclusioni che non sono altro che sogni e chimere, trascurando la vera costituzione delle cose Ma ci sono quelli che, dalla semplice osservazione della natura, sono in grado di dedurre nuove leggi”

Chi scriveva si riferiva alla teoria del flogisto, usata per spiegare il passaggio di calore tra i corpi ma non condivisa da Newton. Il fluido occulto si rivelò essere niente altro che l'energia che viene scambiata termodinamicamente tra i corpi, ma si dovette aspettare molto tempo prima che Ludwig Boltzmann capisse la vera natura del calore. Per tornare alla Relatività Generale, Einstein ha aperto una strada che ora deve essere percorsa fino in fondo formulando una teoria della gravitazione coerente a tutte le scale e consistente con tutte le altre interazioni fondamentali.

Bibliografia

- [1] L. Geymonat, *Storia del pensiero Filosofico e scientifico*, Garzanti Editore, Milano (1988).
- [2] B. Riemann, *Sulle ipotesi che stanno alla base della geometria*, Bollati Boringhieri, Torino (1994).
- [3] E. Schrödinger, *Space-Time structure*, Cambridge Univ. Press., Cambridge (1960).
- [4] C.W.F. Everitt et al., *Physical Review Letters*, 106, 221101 (2011).
- [5] R.V. Pound, G.A. Rebka, *Physical Review Letters*, 4, 337 (1960).
- [6] S. Capozziello, M. De Laurentis, *Physics Reports*, 509, 167 (2011).
- [7] A. Einstein, *Annalen der Physik*, 49(4) 769 (1916).
- [8] D. Hilbert, Die Grundlagen der Physik, *Nachr. Königl. Gesellsch. Wiss. Göttingen*, 395 (1915).
- [9] M. Merola, *Calcolo Differenziale Assoluto e Teoria della Relatività*, Bibliopolis, Napoli 2006
- [10] C.M. Will, *Theory and experiment in gravitational physics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge (1981).
- [11] E. Cassirer, *Saggio sull'Uomo*, Armando Editore, Roma (1968).

L'inarrestabile propagazione della gravità: le onde gravitazionali, dall'ipotesi alla misura

ADELE LA RANA

Fondazione TERA & Università di Roma "Sapienza"

«Considerate una distanza pari a 100 miliardi di volte la circonferenza terrestre (un totale di circa 4 milioni di miliardi di chilometri o un milione di volte la distanza da Nettuno). Immaginate due punti separati da questa distanza totale. Ebbene, il passaggio di un'onda gravitazionale *forte* provocherà in tale distanza una rapida variazione, grande meno dello spessore di un capello. Per misurare questo cambiamento non avremo più di pochi decimi di secondo. E non sappiamo se questo evento infinitesimale capiterà il mese prossimo, l'anno venturo o nei prossimi trent'anni.»

Il 13 Marzo 1991, il fisico dei Bell Laboratories J. Anthony Tyson pronunciava queste parole davanti ai membri della Camera dei rappresentanti degli Stati Uniti d'America¹, per dissuaderli dall'investire 200 milioni di dollari nella costruzione di due nuovi grandi apparati per la rivelazione di onde gravitazionali: una coppia di interferometri gemelli chiamati LIGO (Laser Interferometer Gravitational Observatory), dai bracci lunghi ben 4 km.

Ventiquattro anni dopo, il 14 Settembre 2015, i due LIGO – portati a termine nonostante i loro iniziali detrattori – hanno captato per la prima volta nella storia un segnale gravitazionale: una flebile vibrazione durata meno di due decimi di secondo e con un'ampiezza dell'ordine di 10^{-18} m, grande cioè la millesima parte del diametro di un protone!

A generare l'onda è stato un evento astrofisico sorprendente, previsto dai modelli teorici ma mai osservato prima: la fusione di due giganteschi buchi neri, con masse pari a trenta volte quella del nostro Sole. La catastrofica collisione ha generato una perturbazione gravitazionale che ha viaggiato ben 1.3 miliardi di anni, prima di giungere sulla Terra.

A differenza di quanto prospettato nel discorso di Tyson, fenomeni di questo tipo non si stanno dimostrando tanto rari. A distanza di pochi mesi dalla prima rivelazione, un secondo evento ha investito i due LIGO, il 26 Dicembre 2015, provocando una nuova ondata di entusiasmo nella comunità scientifica

¹ H. Collins, *Gravity's Shadow. The Search for Gravitational Waves*, University of Chicago Press, Chicago & Londra; 2004, p.2.

internazionale. Meno intenso del primo, questo secondo segnale – soprannominato il «regalo di Natale di Einstein» – ha costituito un'ulteriore significativa conferma di un fenomeno sfuggito molto a lungo all'osservazione diretta.

La caccia alle onde gravitazionali è durata, infatti, più di mezzo secolo, da quando all'inizio degli anni '60 il fisico americano Joseph Weber ideò e realizzò all'Università del Maryland le prime *barre risonanti*, gli antenati di tutti gli attuali rivelatori.

Nel corso della sua storia, la ricerca delle onde gravitazionali si è scontrata con l'acceso scetticismo – e spesso l'aperta ostilità – di una buona fetta della comunità scientifica internazionale. Non sono state solo le speranze a lungo disattese a provocare le dispute. Quando Weber propose per la prima volta l'idea di un apparato in grado di vibrare al passaggio di radiazione gravitazionale e di misurare l'entità della vibrazione, l'esistenza stessa di tale radiazione era una questione teorica ancora dibattuta. Non solo gli effetti del passaggio di un'onda gravitazionale erano tanto piccoli da far sembrare impossibile una loro misura: era addirittura in dubbio che tali effetti esistessero davvero. Weber ebbe il grande merito di portare la discussione sulle onde gravitazionali dal piano strettamente teorico a quello empirico.

La prime previsioni delle onde di gravità

Poco dopo aver completato la sua teoria della gravitazione – la Relatività Generale – Albert Einstein si dedicò a cercare di risolvere, in casi particolari, le sue equazioni di campo². Ipotizzando di trovarsi in presenza di un campo gravitazionale debole (per esempio, a grande distanza da una sorgente di gravità), egli trovò che le equazioni ammettevano soluzioni approssimate sotto forma di onde, in grado di propagarsi alla velocità della luce³. La natura di queste onde appariva, però, sfuggente: erano effettive vibrazioni dello spazio-tempo, che mettevano in oscillazione i suoi punti, o si poteva farle scomparire cambiando i sistemi di coordinate? In altre parole: si trattava di enti puramente matematici – un artefatto legato alla scelta delle coordinate di riferimento

² Le equazioni di campo della Relatività Generale descrivono la mutua influenza tra la massa-energia e la struttura dello spazio-tempo. Parafrasando il fisico teorico John Wheeler: la massa e l'energia dei corpi determina la struttura dello spazio-tempo, mentre la struttura dello spazio-tempo determina il moto dei corpi.

³ A. Einstein, *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation* (Soluzione approssimata delle equazioni del campo gravitazionale), in *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, Berlin; 1916, p. 688–696.

nelle equazioni di campo – o possedevano una realtà fisica e, in quanto tale, misurabile?

Se reali, queste onde rispondevano a una questione lasciata irrisolta dalla teoria della gravitazione universale di Newton: il problema di come l'azione gravitazionale si propaghi da un punto a un altro dello spazio.

Una delle ipotesi alla base della teoria di Newton, infatti, è che la forza di attrazione gravitazionale si trasmette istantaneamente tra i corpi. Newton stesso era ben consapevole delle criticità sollevate dall'azione *a distanza*, come scrisse in una lettera al filologo e teologo Richard Bentley, nel 1692:

Che un corpo possa agire a distanza su di un altro attraverso il vuoto, senza la mediazione di qualcosa che convogli l'azione e la forza dell'uno sull'altro, è per me un'assurdità tanto grande che credo nessun uomo in grado di ragionare di filosofia possa pensare di sostenerla.

I tempi erano ancora molto acerbi per intravedere, però, una soluzione. Prima di Einstein, almeno due precursori illustri avevano preso in considerazione l'ipotesi della propagazione non istantanea del fenomeno della gravità. Il primo era stato il matematico e astronomo francese Pierre Simon Laplace (1749-1827). Nel suo trattato *Sur le Principe de la Gravitation Universelle*, pubblicato nel 1776, egli affrontò tra le diverse questioni astronomiche il problema della graduale diminuzione del periodo orbitale della Luna, osservato nel corso del tempo prendendo in considerazione i dati relativi a ben documentate eclissi⁴. Laplace osservava che la lenta accelerazione del moto lunare non sembrava spiegabile dal solo principio di gravitazione universale. Egli allora ipotizzò per assurdo che la gravità fosse dovuta a un fluido, emanato dal centro di gravità a una certa velocità finita: l'attrito tra il fluido e la Luna avrebbe dovuto causare una graduale riduzione dell'orbita del satellite (e quindi del suo periodo). Laplace calcolò, però, che la riduzione del raggio orbitale sarebbe avvenuta molto rapidamente e, poiché ciò non corrispondeva alle osservazioni, argomentò che la velocità di propagazione della gravità avrebbe dovuto essere molto grande, ben superiore alla massima velocità mai misurata, la velocità della luce. Nel limite di velocità infinita, infatti, si ritornava all'ipotesi di Newton, che non prevede riduzioni dell'orbita e del periodo orbitale. Come ha sottolineato il fisico americano Bernard Schutz, uno dei maggiori esperti nell'ambito della rivelazione di onde gravitazionali,

⁴ P. S. Laplace (1776); *Sur le Principe de la Gravitation Universelle*, in *Oeuvres complètes de Laplace VIII*, Gauthiers-Villars et fils, Parigi; 1891, p. 201-275.

Laplace aveva precorso i tempi, mettendo in relazione la velocità finita di propagazione della gravità con il decadimento del periodo orbitale, un legame che la Relatività Generale avrebbe sviluppato con successo solo a partire da un secolo e mezzo dopo.

Francese era anche il secondo matematico precursore di Einstein, Henri Poincaré, che riprese l'argomento di Laplace nell'ambito di quella che diventerà la teoria della Relatività Ristretta e sostenne l'esistenza di quelle che chiamò 'ondes gravifiques'. In un articolo del 1905 Poincaré scrisse che per Laplace "l'introduzione di una velocità finita di propagazione era la sola modifica alla legge di Newton da lui presa in considerazione"; ciò lo aveva portato a concludere erroneamente che tale velocità dovesse essere, se non infinita, almeno molto superiore a quella della luce⁵. Secondo Poincaré, la teoria della gravitazione classica necessitava di una revisione ben più radicale, alla luce degli studi di Lorentz e delle sue leggi di trasformazione (1904), che generalizzavano il principio di relatività galileiana e lo estendevano ai fenomeni elettromagnetici. Affinché la forza gravitazionale si trasformi secondo le trasformazioni di Lorentz nella stessa maniera delle forze elettromagnetiche (*invarianza sotto trasformazioni di Lorentz*) – osservava Poincaré – era necessario introdurre nella legge di gravitazione universale delle modifiche, assumendo per la gravità una velocità di propagazione finita e inferiore alla velocità della luce nel vuoto. Quest'ultima era infatti postulata nelle trasformazioni di Lorentz come la massima raggiungibile da un ente fisico.

Poincaré ipotizzò che, in analogia all'elettrodinamica – dove particelle elettricamente cariche accelerate emettono onde elettromagnetiche – i corpi dotati di massa generano, al variare della loro distribuzione di materia nello spazio, onde gravitazionali. Egli suggerì che l'emissione delle onde avvenga a scapito dell'energia della sorgente: in un sistema a due corpi celesti, per esempio, l'orbita planetaria e il suo periodo si riducono, man mano che la coppia vortica emettendo radiazione gravitazionale⁶. Si trattava dunque di un processo dissipativo, in cui il sistema perde energia per irraggiamento gravitazionale.

⁵ H. Poincaré, *Sur la dynamique de l'électron*, Academie des Sciences, Séance du 5 Juin 1905, Parigi; 1905, p. 1504-1508.

⁶ H. Poincaré (1908), *La dynamique de l'électron*, in *Oeuvres de Henri Poincaré vol. IX*, Gauthiers-Villars et fils, Parigi; 1916, p. 551-586.

La trascurabile interazione delle onde gravitazionali con la materia

Meno di dieci anni dopo, nel novembre del 1915, Einstein presentò alla Reale Accademia Prussiana delle Scienze la Teoria Generale della Relatività – la nuova teoria della gravitazione – e pochi mesi dopo, nella primavera del 1916⁷, la prima previsione delle onde. Nel suo secondo articolo sulla radiazione gravitazionale, pubblicato nel 1918, Einstein corresse alcuni errori commessi nel primo lavoro e ricavò la cosiddetta *formula quadrupolare*. Egli mostrò che, per grandi distanze dalla sorgente emittente, la radiazione gravitazionale dipende al primo ordine dalle variazioni del *momento di quadrupolo* della sorgente, a differenza della radiazione elettromagnetica, che dipende dalle variazioni del *momento di dipolo*⁸. Si tratta di una conseguenza della conservazione della massa totale e del momento angolare del sistema. Nella pratica, questo implica che un corpo a simmetria sferica che si muova o che si contragga mantenendo la propria simmetria, non emette onde gravitazionali, poiché il suo momento di quadrupolo è costante; al contrario, una sfera carica accelerata produce onde elettromagnetiche. Questa profonda differenza tra la radiazione gravitazionale e quella elettromagnetica implica che per emettere onde gravitazionali sono necessari sistemi dinamici che si discostano dalla simmetria sferica, come nel caso di una coppia di stelle che si muovono l'una intorno all'altra.

La formula quadrupolare esprime l'ampiezza della radiazione gravitazionale in funzione delle grandezze che caratterizzano la sorgente; in particolare, si evince che l'ampiezza della radiazione è tanto maggiore quanto maggiori sono la massa-energia e la velocità del sistema radiante. L'ampiezza è, inoltre, inversamente proporzionale alla distanza dalla sorgente.

In sintesi, le sorgenti di onde gravitazionali di maggiore intensità vanno cercate tra i sistemi astrofisici aventi velocità relativistiche, alte densità di massa-energia e un alto grado di asfericità.

Fin dai primi anni della loro previsione nell'ambito della Relatività Generale era chiaro che nessun manufatto umano avrebbe mai potuto generare

⁷ Il matematico padovano Tullio Levi Civita (1873-1941) identificò in questo primo articolo alcuni errori, che discusse con l'autore attraverso un intenso scambio epistolare e che Einstein corresse nel lavoro successivo pubblicato nel 1918.

⁸ L'ampiezza dell'onda gravitazionale è proporzionale, per l'esattezza, alla derivata seconda rispetto al tempo del momento di quadrupolo Q : $h \sim \frac{G}{c^3} \frac{1}{r} \frac{\partial^2 Q}{\partial t^2}$. G è la costante di gravitazione universale, c la velocità della luce, r la distanza dalla sorgente emittente. Il momento di quadrupolo dipende a sua volta dalla geometria e dalla distribuzione della massa del sistema.

onde gravitazionali di entità apprezzabile e che persino il passaggio di un'onda gravitazionale proveniente da una sorgente astrofisica relativistica avrebbe provocato nella materia effetti del tutto trascurabili. Misurare tali effetti fu a lungo ritenuto impossibile.

A fattore del termine di quadrupolo, infatti, compare la quantità (G/c^4) , che ha un valore estremamente modesto, dato che la costante di gravitazione universale G è molto piccola e la velocità della luce c è molto grande. Questo numero tanto esiguo implica che la radiazione gravitazionale è estremamente debole e determina la sua scarsissima interazione con la materia. Non solo con la materia presente nello spazio, ma anche con quella appositamente studiata per rivelarle, come le barre risonanti di Weber. Le onde gravitazionali cedono al rivelatore una minima parte della propria energia, attraversandolo praticamente indisturbate e provocandovi un effetto tanto piccolo da risultare immisurabile per più di mezzo secolo.

I ripensamenti di Einstein

L'esistenza e la misurabilità delle onde gravitazionali furono per diverse decadi oggetto di discussione teorica. Einstein stesso mise in dubbio la realtà fisica delle onde, in un articolo scritto nel 1936 con il suo collega Nathan Rosen. Il lavoro originario aveva un titolo emblematico, "Do gravitational waves exist?", e arrivava a rispondere negativamente alla domanda. Einstein e Rosen avevano cercato, infatti, di trovare soluzioni esatte nella forma di onde piane alle equazioni di campo, ma si erano scontrati con l'impossibilità di procedere senza introdurre delle *singolarità* nell'ampiezza della radiazione, cioè punti in cui l'ampiezza non è definita. Questo risultato li aveva portati a dedurre che le equazioni di campo non ammettevano soluzioni periodiche e regolari nella forma di onde.

Il risultato, in contrasto con i primi lavori di Einstein sull'argomento, può sorprendere, ma era attribuito dallo scienziato alla non-linearità delle equazioni di campo. Come spiegava in una lettera coeva al fisico Max Born, le equazioni non-lineari della Relatività Generale possono riservare sorprese quando si calcolino soluzioni usando ordini di approssimazione diversi⁹.

⁹ Per tutta la vicenda relativa alla pubblicazione del citato articolo di Einstein e Rosen, vedere: D. Kennefick, *Controversies in the History of the Radiation Reaction problem in General Relativity*, Humanities Working Paper, N° 164; Pasadena, CA: California Institute of Technology; 1996.

L'articolo fu inviato per la pubblicazione alla rivista scientifica americana *Physical Review* e l'editore, secondo il sistema della *peer review* (revisione dei pari), ne inviò copia a un referee segreto (un esperto del campo in grado di valutare la correttezza del contenuto scientifico). Questi trovò un errore che ne inficiava il risultato e lo segnalò all'editore, che rispedì il lavoro all'illustre mittente con la preghiera di tener conto delle osservazioni dell'anonimo referee. Einstein reagì negativamente, tanto da scrivere nella sua lettera di risposta: «Gentile Signore, il Sig. Rosen e io vi abbiamo inviato il nostro manoscritto per la pubblicazione e non vi abbiamo autorizzato a mostrarlo agli specialisti prima che fosse stampato. Non vedo nessuna ragione per rispondere ai commenti – per altro sbagliati – del vostro anonimo esperto. Sulla base di questo incidente preferisco pubblicare l'articolo altrove». In seguito, Einstein tornò sul suo lavoro in collaborazione con Leopold Infeld e corresse i calcoli, cambiando le conclusioni dell'articolo e pubblicando la nuova versione sul *Journal of the Franklin Institute* di Philadelphia. Nonostante avesse riconosciuto l'errore, Einstein non si rivolse mai più a *Physical Review* per la pubblicazione dei suoi lavori. Il referee anonimo, come si venne a sapere in seguito, era il noto cosmologo e relativista statunitense Howard Percy Robertson.

L'inizio della ricerca sperimentale delle onde gravitazionali

Il dibattito sull'esistenza delle onde gravitazionali, sul calcolo dell'energia che trasportano e sugli effetti del loro passaggio attraverso la materia divenne particolarmente intenso a cavallo tra gli anni '50 e gli anni '60, nell'ambito della cosiddetta *Rinascita* della Relatività Generale. Gli storici della fisica chiamano così quel rigoglioso periodo di fermento scientifico, in cui la teoria di Einstein divenne, da materia di ricerca prettamente teorico-matematica, una teoria fisica a tutti gli effetti. Essa si rivelò fondamentale per descrivere e predire i nuovi straordinari fenomeni astrofisici che si andavano via via scoprendo negli anni '60: le quasars, la radiazione cosmica di fondo, le pulsar. Nasceva, di fatto, l'astrofisica relativistica. È in questo contesto vivace e dinamico che si sviluppò l'interesse per le onde gravitazionali, grazie ai contributi di teorici come Herman Bondi, Felix Pirani, Richard Feynman, Subrahmanyan Chandrasekar, John Wheeler¹⁰. Tuttavia, a dare il maggiore impulso alla

¹⁰ D. Kennefick, *Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves*, Princeton University Press, Princeton & Oxford; 2007.

ricerca sulla radiazione gravitazionale fu sicuramente il lavoro sperimentale di Joseph Weber.

Una barra risonante alla Weber è un cilindro metallico opportunamente sospeso in modo da ridurre al minimo il rumore sismico cui è sottoposto. Al cilindro è connesso un trasduttore che trasforma le sue vibrazioni meccaniche in segnali elettrici amplificati e misurabili. L'idea di base di un rivelatore a barre ricorda un fenomeno comune relativo alle onde sonore: quando un suono di opportuna frequenza investe un tamburello, la sua membrana comincia a vibrare. Se l'onda gravitazionale che investe il rivelatore ha frequenze vicine a quella di risonanza del cilindro, ne provoca la vibrazione. Isolando sufficientemente il cilindro dalle sollecitazioni esterne e spurie, in linea di principio è possibile distinguere la vibrazione indotta dall'onda gravitazionale da quelle dovute ad altre cause. In realtà, per quanto siano ottimizzati i sistemi di isolamento della barra risonante, l'effetto cercato è molto inferiore ai disturbi esterni e sono necessarie sofisticate tecniche di analisi dei dati per estrarre il segnale utile dal rumore. Per identificare il segnale gravitazionale nel rumore in cui è immerso, è necessario formulare modelli quanto più accurati possibile sia dei diversi disturbi agenti sul rivelatore sia della forma d'onda cercata. Al tempo dell'ambiziosa proposta di Weber, la modellizzazione della radiazione gravitazionale emessa da sorgenti astrofisiche era a uno stadio ancora del tutto embrionale.

1969: il prematuro annuncio di una scoperta

Il 16 Giugno del 1969 la rivista scientifica *Physical Review Letters* pubblicò un articolo dal titolo trionfale "Evidence for discovery of gravitational radiation", firmato da Joseph Weber. Questo riportava l'analisi dei segnali registrati in coincidenza da sei rivelatori a barra a temperatura ambiente, uno posizionato nell'Argonne National Laboratory (vicino Chicago) e cinque nel dipartimento di fisica dell'Università del Maryland, dove Weber era professore. Gli apparati, uno dei quali posto a circa 1000 km di distanza dagli altri, mostravano nei dati raccolti durante i primi mesi dell'anno alcuni picchi in coincidenza, che superavano il valore di soglia stabilito per la rivelazione. L'articolo cominciava con le seguenti parole:

The probability that all of these coincidences were accidental is incredibly small. Experiments imply that electromagnetic and seismic effects can be ruled out with a high level of confidence. These data are consistent with the conclusion that the detectors are being excited by gravitational radiation¹¹.

Avere più rivelatori posti a una certa distanza l'uno dall'altro e funzionanti in coincidenza è un'esigenza fondamentale nella ricerca delle onde gravitazionali. Se due o più rivelatori sono lontani l'uno dall'altro, i rumori agenti sulle barre saranno in buona parte scorrelati. Un'onda gravitazionale proveniente da una sorgente astrofisica investirà i rivelatori quasi contemporaneamente, inducendovi una vibrazione caratteristica. La probabilità che si abbiano coincidenze casuali si riduce al crescere del numero di rivelatori utilizzati e l'analisi in coincidenza dei dati permette, in linea di principio, di identificare per confronto i rumori locali spuri e non controllabili cui sono soggetti i singoli apparati.

Diversi esperimenti analoghi a quello di Weber furono rapidamente allestiti in vari laboratori del mondo, ma nessuno confermò i risultati ottenuti dal padre dei rivelatori a barre: anche esperimenti realizzati con apparati più sensibili e con analisi più sofisticate non furono in grado di evidenziare coincidenze significative, che indicassero la rivelazione di un'onda gravitazionale.

Nonostante le mancate conferme da parte di tutti gli esperimenti delle decadi successive, Weber rimase fermo nella convinzione di aver rivelato il primo segnale gravitazionale e continuò a sostenere le sue ragioni scientifiche fino alla morte, nel 2000.

La marcia verso la prima rivelazione diretta delle onde gravitazionali è stata lunga, ardua e tempestata di insuccessi, falsi allarmi, illusioni, scontri in seno alla comunità scientifica internazionale¹². Come Weber, altri pionieri del campo hanno rischiato o addirittura intaccato lungo il cammino la propria credibilità scientifica, sostenendo in buona fede di aver rivelato un segnale, che però non ha mai trovato conferma nei risultati di esperimenti successivi, com-

¹¹ «La probabilità che tutte queste coincidenze siano accidentali è incredibilmente bassa. Gli esperimenti effettuati implicano che i rumori elettromagnetici e sismici possano essere esclusi con un alto livello di confidenza. I dati sono consistenti con la conclusione che i rivelatori siano stati eccitati da radiazione gravitazionale.»

¹² Questo percorso accidentato ed emblematico è stato seguito per diverse decadi dal sociologo della scienza inglese Harry Collins, che ha raccolto numerose testimonianze dei ricercatori coinvolti in una delle più ambiziose imprese scientifiche di tutti i tempi. Il testo di riferimento è: H. Collins; *Gravity's shadow. The Search for Gravitational Waves*, University of Chicago Press, Chicago & Londra; 2004.

presi quelli ottenuti dai rivelatori di seconda generazione, le barre risonanti a temperature *criogeniche*, cioè a pochi gradi sopra lo zero assoluto.

La nascita della ricerca sulle onde gravitazionali in Italia

È significativo che la prima collaborazione internazionale per la rivelazione di onde gravitazionali sia nata in Italia, nel 1971, all'Università di Roma.

Tra il 1970 e il 1971 Edoardo Amaldi¹³ e il suo giovane collaboratore Guido Pizzella stabilirono accordi con due gruppi negli Stati Uniti: il team dell'Università di Stanford, diretto da William Fairbank e quello di William Hamilton alla Louisiana State University. La collaborazione prevedeva la costruzione di tre antenne gravitazionali criogeniche, da far funzionare in coincidenza nei tre diversi laboratori.

Durante gli anni '60 Edoardo Amaldi aveva più volte progettato di fondare un gruppo di ricerca sulle onde gravitazionali a Roma. Il suo interesse per gli esperimenti sulla gravità era incominciato alla fine degli anni '50, sull'onda della Rinascita della Relatività Generale, ed era cresciuto con il fiorire dell'astrofisica relativistica negli anni successivi¹⁴. Il suo programma poté concretizzarsi soltanto grazie al rientro dagli Stati Uniti del giovane Pizzella, che divenne a tutti gli effetti il leader della nuova attività di ricerca.

Lo sviluppo delle tecnologie necessarie a portare una barra di alluminio di diverse tonnellate a temperature vicine allo zero assoluto richiese diverso tempo. La costruzione dell'antenna romana fu completata durante gli anni '80 al CERN, dopo un periodo di sviluppo iniziale ai laboratori della SNAM-Progetti a Monterotondo¹⁵. Explorer, come venne chiamato il rivelatore, fu la

¹³ All'epoca Edoardo Amaldi aveva poco più di sessant'anni e rappresentava la massima personalità scientifica nel panorama italiano. Allievo e collaboratore di Enrico Fermi, aveva fatto parte del glorioso gruppo dei ragazzi di via Panisperna, contribuendo alla scoperta della radioattività indotta da neutroni lenti. Unico dei ragazzi a rimanere in Italia durante i difficili anni della guerra, divenne uno dei più attivi promotori della ricostruzione della fisica in Italia e in Europa nel Dopoguerra. Tra i padri fondatori del Cern, ne fu il primo Segretario Generale. Ad Amaldi è intitolato uno degli appuntamenti internazionali più importanti nel campo delle onde gravitazionali: la Edoardo Amaldi Conference On Gravitational Waves, che si tiene ogni due anni in una diversa città del mondo.

¹⁴ L. Bonolis, A. La Rana, *The beginning of Edoardo Amaldi's interest in gravitation experiments and in gravitational wave detection*, in *Proceedings of the Fourteenth Marcel Grossman Meeting on General Relativity. Rome 12-18 July 2015*, ed. Massimo Bianchi, Robert T. Jantzen, Remo Ruffini; World Scientific Singapore; 2016.

¹⁵ I laboratori della SNAM-Progetti di Monterotondo facevano parte del Gruppo ENI

prima antenna criogenica a raggiungere la sensibilità di progetto e la stabilità necessaria a funzionare per lunghi periodi. Erano gli anni '90, l'epoca d'oro dei rivelatori a barre a basse temperature. Il cilindro d'alluminio di Explorer pesava 2300 kg, era lungo 3 m, con un diametro di 60 cm, ed era raffreddato con elio liquido fino alla temperatura di 2.6 K. Come per tutti i rivelatori a barre, la sua frequenza di risonanza si aggirava attorno a 1kHz.

Secondo i modelli teorici, i segnali gravitazionali attesi per le esplosioni di supernova hanno frequenze di picco dell'ordine del kHz; le supernovae erano le sorgenti gravitazionali cui si puntava con le barre criogeniche.

Successivamente, le esplosioni di supernova hanno ceduto il posto a sorgenti più promettenti: coppie di stelle di neutroni o di buchi neri (entrambi tipi di oggetti molto densi e compatti), che spiraleggiano attorno al comune centro di massa, fino a fondersi insieme in un corpo unico. Durante gli ultimi istanti precedenti la collisione (fase di *coalescenza del sistema binario*) e durante la collisione stessa (fase di *merger*), il sistema irraggia un'enorme quantità di energia sotto forma di onde gravitazionali. Le frequenze della radiazione emessa variano a seconda del valore delle masse coinvolte, e possono andare dai mHz alle decine di Hz. Poiché un rivelatore a barre è sensibile in una banda di frequenze molto ristretta, centrata attorno alla sua frequenza di risonanza, esso non è adatto a rivelare e a *seguire* i segnali emessi da sistemi binari coalescenti, la cui ampiezza e frequenza crescono nel tempo. È qui che entrano in gioco i rivelatori interferometrici, le antenne gravitazionali di terza generazione, che possono raggiungere sensibilità elevata su un ampio intervallo di frequenze.

Le onde gravitazionali esistono: lo dicono le stelle

A dare nuovo impulso alla ricerca delle onde gravitazionali, dopo le molte speranze disattese degli anni '70, fu un'inaspettata scoperta in campo astrofisico.

Nel 1974 i fisici statunitensi Russell Hulse e Joseph Taylor scoprirono il primo sistema binario composto da una stella di neutroni e una radio-pulsar (chiamato PSR B1913+16). Il segnale radio emesso dalla pulsar e visualizzato a intervalli regolari dalla Terra permetteva di calcolare con precisione il periodo orbitale del sistema e seguire le sue variazioni nel corso degli anni.

ed erano espressamente dedicati alla ricerca. Ne era direttore Giorgio Careri, fisico delle basse temperature all'Università di Roma.

Una binaria del genere costituiva, come si espresse Hulse¹⁶, uno straordinario laboratorio astrofisico per testare la teoria della Relatività Generale. Nel 1982, dopo alcuni anni di osservazioni, Taylor e il collega più giovane Joel Weisberg furono in grado di verificare che il periodo orbitale diminuiva progressivamente nel tempo, seguendo con altissima precisione la curva prevista nell'ambito della Relatività Generale dal modello di emissione di onde gravitazionali. Il problema affrontato prematuramente da Laplace e Poincaré aveva trovato finalmente una spiegazione coerente suffragata da accurate osservazioni astrofisiche: man mano che le due stelle ruotano attorno al centro di massa, il sistema perde energia per emissione di onde gravitazionali aventi la velocità della luce e le orbite dei due corpi celesti si restringono sempre più, mentre il loro periodo orbitale diminuisce¹⁷ (FIG. 1).

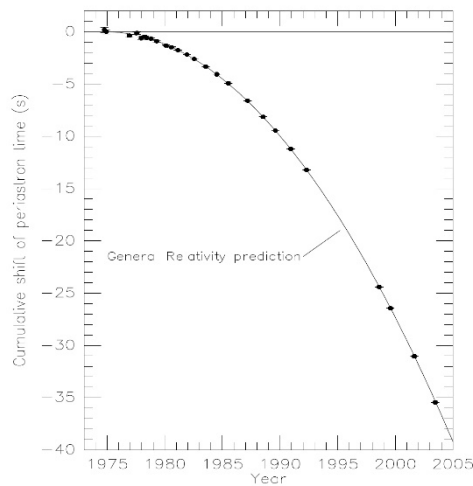


FIG. 1. Diminuzione del periodo orbitale del sistema binario PSR B1913+16 nel corso di 30 anni di osservazioni, a partire dalla scoperta del sistema nel 1974. I punti rappresentano il risultato delle misure effettuate, mentre la linea continua indica la curva di decadimento orbitale teorica predetta dalla Relatività Generale per emissione di onde gravitazionali da parte di un sistema binario (J. Weisberg, J. Taylor, *Relativistic Binary Pulsar B1913+16: Thirty Years of Observations and Analysis*, in *Binary Radio Pulsars*, eds. F.A. Rasio & I.H. Stairs, ASP Conference Series, San Francisco; 2005, p. 25.)

Nel ricevere il premio Nobel assieme a Hulse nel 1993, Taylor spiegò¹⁸:

¹⁶ R. Hulse, Nobel Lecture, 1993.

¹⁷ Per la conservazione del momento angolare.

¹⁸ Taylor, Nobel Lecture, 1993.

«L'esperimento di confronto temporale per il sistema PSR1913+16 fornisce una verifica sperimentale diretta del fatto che le variazioni della gravità si propagano alla velocità della luce, creando di conseguenza un meccanismo dissipativo in un sistema orbitante. Ne segue necessariamente che la radiazione gravitazionale esiste e ha una natura quadrupolare.»

Il cerchio non si era, però, ancora chiuso. Si trattava pur sempre di una conferma indiretta dell'esistenza delle onde, fatta osservando il moto orbitale delle stelle, e non di una misura diretta dei loro effetti, realizzata attraverso un apparato di rivelazione.

I risultati di Hulse, Taylor e Weisberg contribuirono fortemente a convincere gli enti di ricerca competenti a finanziare i costosi progetti dei grandi rivelatori di terza generazione, negli anni '90: gli interferometri statunitensi LIGO (uno a Hanford, Washington e l'altro a Livingston, Louisiana), sostenuti dalla National Science Foundation, e l'italo-francese Virgo (a Cascina, vicino Pisa), appoggiati dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e dal Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

I rivelatori di terza generazione: gli interferometri

Tutti i rivelatori di onde gravitazionali si fondano su un ben determinato effetto fisico. Un'onda gravitazionale che investa due piccole biglie (*masse test*) sospese nello spazio e soggette alla sola gravità – cioè in *caduta libera* – produce un periodico contrarsi e dilatarsi della loro distanza (Fig. 2).

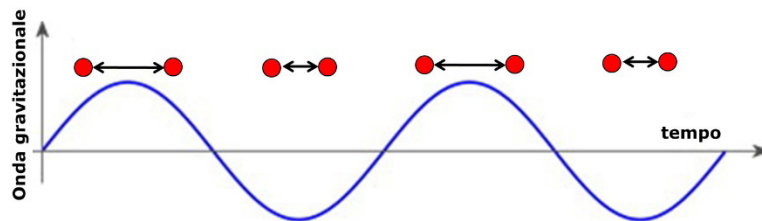


Fig. 2. Effetto del passaggio di un'onda gravitazionale su due masse test in caduta libera. L'effetto è estremamente esagerato nel disegno.

Più in generale, se consideriamo un anello di masse test in caduta libera e immaginiamo un'onda gravitazionale che si propaghi ortogonalmente al piano del disegno, l'effetto sarebbe quello illustrato in Fig. 3, dove è enormemente magnificato. Per osservare un'onda gravitazionale è necessario, in definitiva, misurare una minuscola variazione di distanza che evolve periodicamente nel tempo.

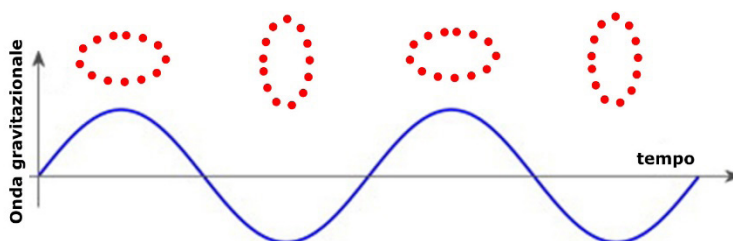


Fig. 3. Cerchio di masse test in caduta libera, investite da un'onda gravitazionale che si propaga ortogonalmente al piano del disegno.

In un rivelatore interferometrico terrestre la distanza tra le masse test è di alcuni chilometri e la variazione di distanza da misurare è dell'ordine di un decimillesimo del diametro di un protone (10^{-19} m). È come se sulla distanza Terra-Sole volessimo misurare una variazione di lunghezza pari allo spessore di un capello. Questa è la sorprendente impresa dei rivelatori LIGO e del loro fratello italo-francese Virgo!

Le masse test sono costituite da specchi sospesi nel vuoto a sofisticatissimi sistemi di attenuazione dei rumori, in grado di isolarli dalle sollecitazioni esterne e realizzare meglio possibile la condizione di caduta libera lungo due direzioni ortogonali (Fig. 4). In Virgo, gli specchi – posti alle estremità dei due bracci dell'interferometro – distano 3 km, nei due LIGO 4 km.

Un fascio laser viene diviso in due da un *beam-splitter* (divisore di fascio); i due fasci ottenuti sono inviati sugli specchi lungo i due bracci ortogonali. Riflessi molteplici volte lungo i cammini tra gli specchi sospesi, si ricombinano in uscita in un unico fascio, rivelato da un sensore. Le variazioni di distanza tra gli specchi provocano uno sfasamento tra i due fasci che interferiscono ed è questo sfasamento ad essere misurato attraverso il sensore. Dallo sfasamento si risale alla variazione di distanza.

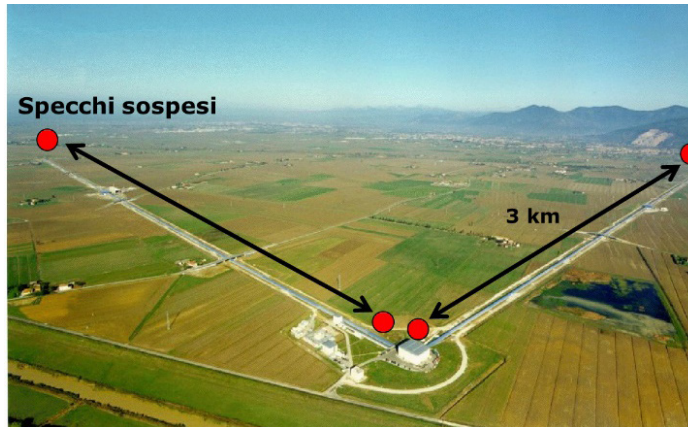


Fig. 4. L'interferometro italo-francese Virgo, situato a Cascina, in provincia di Pisa.
(Courtesy of the Virgo Collaboration)

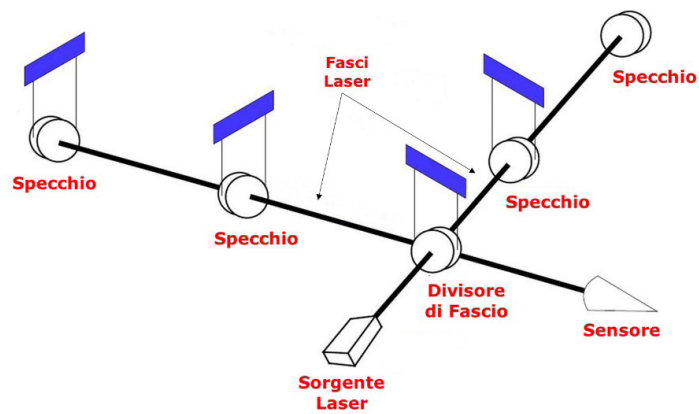


Fig. 5. Schema semplificato di un rivelatore interferometrico per le onde gravitazionali.

Il primo segnale rivelato

L'11 Febbraio 2016, ben cento anni dopo la prima previsione fatta da Einstein, i fisici della collaborazione internazionale LIGO-Virgo hanno annunciato al mondo la prima rivelazione diretta di un'onda gravitazionale. Dei tre grandi rivelatori

di terza generazione esistenti al mondo (i due rivelatori interferometrici LIGO e l'italo-francese Virgo), soltanto i due statunitensi erano in funzione il 14 settembre del 2015. In quella data un segnale gravitazionale particolarmente intenso ha investito la Terra, provocando negli interferometri LIGO una vibrazione finalmente misurabile. Per analizzare i dati raccolti e identificare con sicurezza la natura del segnale, sono occorsi diversi mesi di febbrile lavoro da parte dei circa 1000 ricercatori della collaborazione LIGO-Virgo.

Il segnale misurato ha un andamento caratteristico, come si nota da FIG. 6.

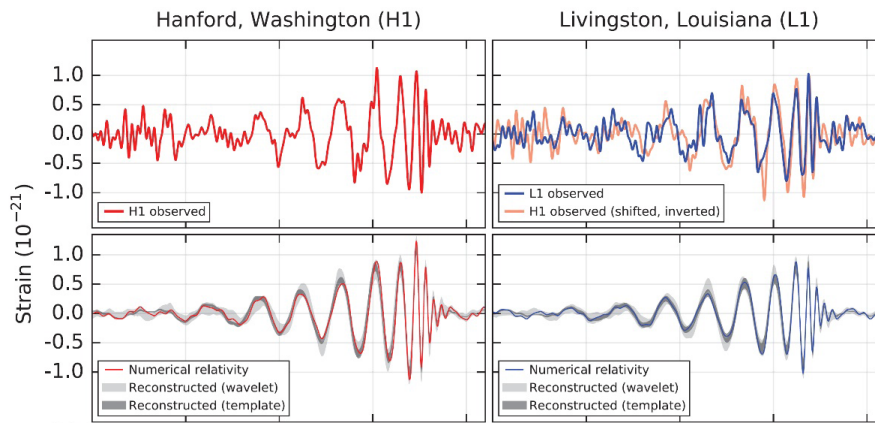


FIG. 6. I segnali captati dai due LIGO e analizzati dalla collaborazione LIGO-Virgo. Sulle ordinate è riportato il rapporto tra la variazione di distanza tra gli specchi dell'interferometro indotta dall'onda gravitazionale e la lunghezza di un braccio dell'interferometro, pari in entrambi i casi a 4 km. Si vede che l'ordine di grandezza delle variazioni di distanza misurate è: $10^{-21} \times 10^3 \text{ m} = 10^{-18} \text{ m}$. Per confrontare le due ampiezze, il segnale di Hanford è stato traslato nel tempo di 6,9 ms, corrispondente all'intervallo temporale intercorso tra la rivelazione del segnale a Hanford e la rivelazione a Livingston (dovuto alla finitezza della velocità di propagazione dell'onda); al segnale è stato anche invertito il segno, a causa dell'orientamento opposto dei bracci dell'interferometro di Hanford rispetto a quello di Livingston. (Courtesy of the LIGO-Virgo Collaboration)

Nelle primissime frazioni di secondo la frequenza e l'ampiezza crescono rapidamente nel tempo. L'equivalente sonoro di questo segnale assomiglierebbe al verso di alcuni uccelli e per questo è chiamato dai fisici *chirp*.

Questo tipo di andamento – a frequenza e ampiezza rapidamente crescenti nel tempo – caratterizza le onde gravitazionali emesse nella fase finale della vita di coppia di un sistema binario. I corpi celesti spiraleggiano uno intorno all'altro sempre più rapidamente, emettendo un'onda gravitazionale che ha una frequenza

istantanea pari a due volte la frequenza istantanea orbitale. Nel segnale osservato, la frequenza della radiazione cresce dai 35 Hz ai 250 Hz¹⁹.

Il segnale captato da LIGO è stato emesso ben 1.3 miliardi di anni fa da un sistema di due buchi neri, in rapidissima rotazione l'uno intorno all'altro, nelle fasi di coalescenza e di fusione, durate appena due decimi di secondo. Una volta formatosi il buco nero finale, a simmetria sferica, il segnale rapidamente si azzera; l'emissione gravitazionale cessa. In base alla forma del segnale ricevuto e ai modelli teorici calcolati a partire dalla Relatività Generale, si è riusciti a stabilire che i due buchi neri originari avevano masse pari a 29 e 36 masse solari, concentrate in due sfere di diametro inferiore ai 200 km. Muovendosi a una velocità sorprendente – la metà della velocità della luce – si sono uniti a formare un buco nero finale di 62 masse solari. La massa mancante, ben 3 masse solari, è stata emessa sotto forma di energia di radiazione gravitazionale.

L'era dell'astronomia gravitazionale

Le onde gravitazionali possono attraversare enormi ammassi di materia quasi indisturbate, cedendo lungo il cammino una parte infinitesimale della propria energia, come se viaggiassero attraverso spazi vuoti. Questa caratteristica che le ha nascoste all'osservazione per più di cinquant'anni, costituisce anche il motivo del loro enorme interesse in campo astrofisico e cosmologico. Interagendo così fievolmente con la materia, esse possono percorrere distanze enormi senza perdere informazioni sulle sorgenti che le hanno generate. Sono, in definitiva, preziosissime messaggere di oggetti astrofisici molto remoti nel tempo e nello spazio.

Fino ad ora, l'immagine del cosmo che la scienza ha ricostruito si è basata prevalentemente sulle informazioni trasportate dalle onde elettromagnetiche. Man mano che nuove porzioni di spettro sono state esplorate, si sono dischiuse nuove frontiere scientifiche. Le onde gravitazionali sono in grado di fornire una descrizione del tutto inedita e complementare a quella elettromagnetica,

¹⁹ Notiamo che le onde sonore percepibili dal nostro orecchio hanno frequenze comprese nell'intervallo 20 Hz- 20 kHz. Le onde gravitazionali rivelabili hanno frequenze dai 10 kHz in giù: c'è quindi una sovrapposizione di intervalli di frequenza, che fa sì che le simulazioni sonore della radiazione gravitazionale forniscano un modo naturale per i fisici di "percepire" le onde gravitazionali (in modo analogo, una foto in falsi colori evidenzia la radiazione X emessa da una sorgente astrofisica).

in particolare di quei fenomeni che non hanno un corrispettivo elettromagnetico, come, per esempio, i sistemi binari di buchi neri. Lo dimostra il fatto che il primo segnale gravitazionale osservato costituisce anche la prima prova diretta dell'esistenza dei buchi neri e in assoluto la prima osservazione di un sistema binario costituito da questi mostri del cosmo.

È l'alba dell'astronomia gravitazionale!

Note Biografiche

Adele La Rana ha lavorato per il progetto di interferometria spaziale LISA, per la rivelazione delle onde gravitazionali. Come storica della fisica nell'ambito della ricerca delle onde gravitazionali, collabora con il gruppo Virgo dell'Università Sapienza di Roma e il Max Planck Institute for the History of Science a Berlino. Lavora con Ugo Amaldi presso la Fondazione TERA ed è autrice di numerosi testi a carattere storico, divulgativo e didattico.

INDICE

SALUTO <i>Domenico Conte, Fulvio Tessitore</i>	3
PRESENTAZIONE DEL CONVEGNO <i>Salvatore Capozziello, Leonardo Merola</i>	5
INSEGUENDO LA VERITÀ. IL LUNGO VIAGGIO DI ALBERT EINSTEIN ALLA RICERCA DELLE EQUAZIONI DELLA RELATIVITÀ GENERALE <i>Roberto Giambò, Giulio Magli</i>	7
EINSTEIN, LA RELATIVITÀ GENERALE E LA COSMOLOGIA <i>Vincenzo Fano, Giovanni Macchia</i>	21
LA RELATIVITÀ GENERALE: UN NUOVO PARADIGMA PER LA FISICA <i>Salvatore Capozziello</i>	39
L'INARRESTABILE PROPAGAZIONE DELLA GRAVITÀ: LE ONDE GRAVITAZIONALI, DALL'IPOTESI ALLA MISURA <i>Adele La Rana</i>	55



Finito di stampare
nel mese di marzo 2018
presso le Officine Grafiche Francesco Giannini & Figli S.p.A.



