

Spazio, corpo, relatività: Einstein e Cartesio

«Describing the physical laws without reference to geometry is similar to describing our thoughts without words. We need words in order to express ourselves. What should we look for to describe our problem? [...] I found that the foundations of geometry had deep physical meaning in this problem».

A Einstein, Speech. al Kyoto University, 14 dic. 1922

La formulazione nel 1905 della relatività ristretta e quella nel 1916 della relatività generale hanno profondamente mutato non solo i fondamenti teorici delle scienze fisiche, ma anche il quadro di riferimento storico in cui queste si sono sviluppate. Messa in discussione la secentesca impalcatura spazio-temporale della fisica moderna, si è nel contempo incrinato il ritratto trionfale e progressivo dell'opera dei suoi padri fondatori - Galileo, Cartesio, Keplero e Newton. Nessuno, nel Novecento, avrebbe più letto allo stesso modo i protagonisti di quello che fu battezzato come il "Secolo del genio"¹.

Einstein contribuì personalmente a ridelineare il quadro della rivoluzione scientifica del XVII secolo, non limitandosi a discutere il significato della cinematica di Galileo, della cosmologia di Keplero e della meccanica razionale di Newton, ma prendendo in esame anche le teorie di Cartesio su spazio, vuoto e materia. Una lettura, quest'ultima, che merita di essere qui approfondita non solo per ragioni erudite. Essa appare comandata da una viva esigenza concettuale, la determinazione univoca della nozione di unità, semplicità e invarianza delle leggi della natura, che ha costantemente guidato la riflessione di Einstein, e contrassegnato il suo rigetto delle opzioni teoriche della nascente meccanica quantistica: la negazione del rigido determinismo nei processi atomici elementari e la limitazione dell'indagine microfisica al riscontro di regolarità meramente statistiche. È infatti nel segno dell'ideale classico della rigorosa ed universale legalità matematica della natura, espresso nei termini più radicali da Cartesio, che trovano ultimo sviluppo i falliti tentativi, ripetutamente compiuti da Einstein tra il 1925 e il 1955, di fondazione di un terzo e più universale livello della teoria della relatività, la "teoria di campo totale", capace di unificare per via geometrico-causale la gravitazione e le altre forze della materia in un'immagine coerente e complessiva della natura fisica.

1. In un importante saggio del 1950, dedicato allo statuto della nozione di spazio nella teoria della relatività, Einstein dichiara perentoriamente:

Non esiste un qualcosa come uno spazio vuoto, ossia uno spazio senza campo. Lo spazio-tempo non pretende di avere un'esistenza per conto proprio, ma soltanto una qualità strutturale del campo. Cartesio non era dunque così lontano dal vero quando credeva di dover escludere l'esistenza di uno spazio vuoto. Tale nozione appare invero assurda, finché la realtà fisica viene vista esclusivamente nei corpi ponderabili. Solo l'idea del campo come rappresentante la realtà, in combinazione con il principio generale di relatività, riesce a rivelare il vero nocciolo dell'idea di Cartesio: non esiste spazio "vuoto di campo"².

¹ AN. Whitehead, *Science and the Modern World*, Cambridge University Press, Cambridge 1925, trad. e intr. di A. Banfi, *La scienza e il mondo moderno*, Boringhieri, Ibrino 1979³, pp. 55-71.

² A. Einstein, *Relativität und Raumproblem*, pubblicato come appendice V alla 15a edizione del volume *Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie (gemeinverständlich)*, Vieweg, Braunschweig 1950, trad. di V. Geymonat, *Relatività: esposizione divulgativa*, in Id., *Opere scelte*, a cura di E. Bellone, Bollati Boringhieri, Torino 1988, p. 503. Avverto qui che ho utilizzato corsivi nelle citazioni senza ogni volta specificarlo in nota, e modificato le traduzioni italiane disponibili quando necessario ad una migliore resa dell'originale. Là dove non compaiono indicazioni, la traduzione è mia.

La continuità che il maturo Einstein riscontrava tra gli sviluppi della relatività e gli assunti che erano a fondamento della fisica cartesiana, vale a dire la comune negazione del vuoto e il rigetto di ogni dualità tra spazio e materia, conferma un importante aspetto del suo pensiero. Benché il mutamento determinato dalla teoria della relatività nei concetti di spazio, tempo e materia sia stato ben presto celebrato come un'autentica rivoluzione, e sia divenuto il simbolo stesso dell'incredibile progresso delle scienze nel Novecento, Einstein riteneva che la propria teoria rappresentasse soltanto un'ulteriore tappa nell'evoluzione della fisica moderna verso una comprensione sempre più completa e unificata della legalità matematica dei fenomeni naturali. Spiazzando non di rado i propri interlocutori, Einstein rifiutava infatti l'etichetta di 'demolitore' dell'immagine classica dell'universo fisico, che aveva preso ad accompagnarlo ovunque soprattutto dopo che, nel novembre 1919, ebbe ampio risalto sulla stampa l'annuncio della conferma sperimentale della deflessione della luce ad opera dei campi gravitazionali, vale a dire della curvatura del continuo spazio-temporale, pilastro della teoria della relatività generale enunciata tre anni prima. Nell'intervista apparsa sul New York Times all'indomani dell'entusiastica accoglienza riservatagli al suo arrivo negli Stati Uniti nell'aprile 1921, Einstein lamenta che si sia ampiamente diffusa

la falsa opinione che la teoria della relatività si discosti radicalmente dai precedenti sviluppi della fisica da Galileo e Newton in poi, e che essa si opponga drasticamente alle loro deduzioni. È vero il contrario. Senza le scoperte di ciascuno dei giganti della fisica, ovvero coloro che in passato ne formularono le leggi, non sarebbe stato possibile concepire la relatività e tantomeno garantirle una base³.

Preso di posizione, questa, ribadita con forza nella lezione, tenuta nello stesso anno presso il King's College di Londra, sul significato e lo sviluppo della teoria relatività: «non si tratta di un atto rivoluzionario, ma dell'evoluzione naturale di una linea seguita da secoli»⁴.

La teoria einsteiniana ha in effetti sofferto di un'equivoco terminologico, che ha lungamente ostacolato la comprensione, da parte del vasto pubblico, delle sue profonde radici classiche. La definizione "teoria della relatività" fu posta nel 1906 da Planck e da Abraham ai primi lavori di Einstein in virtù dell'estensione all'elettrodinamica, da essi compiuta, del principio di relatività del movimento inerziale. Tuttavia Einstein mostrò talvolta di preferire, in luogo di "teoria della relatività"⁵, una diversa denominazione, quella di "teoria dell'invarianza", che meglio esprime la fondamentale esigenza concettuale e metodologica della teoria relativistica, l'attribuzione alle leggi della natura di un significato assoluto, indipendente dal punto di vista di particolari osservatori.

Lungi dal comportare l'introduzione di un irriducibile relativismo nella conoscenza dei fenomeni fisici, la completa relativizzazione del movimento inerziale, operata dalla teoria della relatività ristretta mediante l'abbandono del presupposto che gli intervalli temporali e quelli spaziali siano indipendenti dallo stato di moto del corpo di riferimento, si rivela come condizione necessaria all'individuazione di autentiche invarianze della natura: l'indipendenza delle leggi fisiche dalla

³ "New York Times", 4 aprile 1921, cit. in G. Holton, *Einstein 's Search for the Weltbild*, "Proceedings of the American Philosophical Society", 1981, 125, p. 15, trad. in Id., *Einstein e la cultura scientifica del XX secolo*, Il Mulino, Bologna 1991, p. 165.

⁴ La lezione al King's College è riportata in "Nation and Athenaeum", XXIX, p. 431-432, trad. di R. Valori, *Caratteri della teoria della relatività*, in A. Einstein, *Come io vedo il mondo*, Giachini, Milano 1955, pp. 109-114

⁵ Ad esempio, nella lettera del 30 settembre 1921 a E. Zschimmer, il quale gli consigliava di adottare questa denominazione, Einstein commenta significativamente: «Veniamo ora al nome 'teoria della relatività'. Riconosco che si tratta di un'espressione infelice, che ha dato adito a fraintendimenti filosofici. Il termine 'teoria dell'invarianza' sarebbe adatto a descrivere il metodo di ricerca della teoria, ma non, purtroppo, il suo contenuto materiale (costanza della velocità della luce, equivalenza sostanziale di inerzia e gravità). Ciononostante, la definizione da Lei proposta sarebbe forse migliore; ma credo che cambiare, dopo tutto questo tempo, il nome generalmente accettato sarebbe motivo di confusione». Il passo della lettera è riportato in G. Holton, *Einstein e la cultura scientifica del XX secolo*, cit., p. 110, nota 21.

scelta del sistema di coordinate inerziali e la costanza della velocità della luce nel vuoto. La teoria della relatività del 1905 si configura infatti come una teoria dei principi⁶, volta a riaffermare, sviluppandone coerentemente i presupposti, quella stessa nozione di natura come incondizionata legalità matematica che aveva costituito il cardine della rivoluzione scientifica secentesca, e trovato espressione metafisica nella definizione kantiana di "Natura in generale" come «conformità a leggi dei fenomeni nello spazio e nel tempo»⁷: Einstein rifiutava come incompatibile con l'universale dominio della legalità naturale l'asimmetria consistente nell'attribuzione ad un etere stazionario, identificato con lo spazio assoluto di Newton, del ruolo di sistema di riferimento privilegiato nella formulazione delle leggi dell'elettrodinamica⁸. L'affermazione dell'incondizionata legalità matematica della natura richiede da un lato l'eliminazione di tale asimmetria (tutti i sistemi di riferimento inerziali devono risultare equivalenti, compresi quelli assunti nello studio dei fenomeni elettromagnetici), dall'altro la formulazione di un principio formale d'invarianza (le leggi della fisica

⁶ Einstein distingue due tipologie di teorie fisiche, le *teorie costruttive* e le *teorie dei principi*. La maggior parte delle teorie fisiche, di tipo costruttivo, «tentano di formare un quadro dei fenomeni complessi partendo da certi principi relativamente semplici. La teoria cinetica dei gas, per esempio, tenta di ricondurre al movimento molecolare le proprietà meccaniche, termiche e di diffusione dei gas. Quando affermiamo di comprendere un certo gruppo di fenomeni naturali, intendiamo dire che abbiamo trovato una teoria costruttiva che li abbraccia. In aggiunta a questo gruppo molto vasto di teorie, ve ne è un altro costituito da quelle che io chiamo teorie dei principi. Esse fanno uso del metodo analitico, invece di quello sintetico. Il loro punto di partenza e il loro fondamento non consistono di elementi ipotetici, ma di proprietà generali dei fenomeni osservate empiricamente, principi dai quali vengono dedotte formule matematiche di tipo tale da valere in ogni caso particolare che si presenti. La termodinamica, per esempio, partendo dal fatto che il moto perpetuo non si verifica mai nell'esperienza ordinaria, tenta di dedurre, mediante processi analitici, una teoria valida in ogni caso particolare. Il merito delle teorie costruttive sta nella generalità, flessibilità e nella chiarezza, il merito delle teorie dei principi nella perfezione logica e nella saldezza delle basi. La teoria della relatività appartiene alla categoria delle teorie dei principi. Per comprenderla, bisogna afferrare il principio su cui si fonda» (A. Einstein, *My Theory*, in "Times", 28 novembre 1919, trad. *Tempo, spazio, gravitazione*, in Id., *Opere scelte*, cit., p. 580).

⁷ I. Kant, *Kritik der reinen Vernunft*, seconda edizione, 1787, in *Kants gesammelte Schriften*, Berlin 1902 ss., vol. III, p. 165, trad. *Critica della ragion pura*, a cura di P. Chiodi, Utet, Torino 1967, p. 183. Sulle radici metafisiche, teologiche e giuridiche - ancora in gran parte da ricostruire - del concetto moderno di legge naturale cfr. in part. A. Funkenstein, *Theology and Scientific Imagination from the Middle Ages to the Seventeenth Century*, Princeton University Press, Princeton 1986, trad. di A. Serafini, *Teologia e immaginazione scientifica dal Medioevo al Seicento*, Einaudi, Torino 1996.

⁸ La teoria condivisa all'inizio del XX secolo dei principi dell'elettrodinamica, quella formulata da Lorentz, era fondata sulla postulazione dell'esistenza di una specifica sostanza materiale in quiete assoluta, l'etere, che fungeva da supporto fisico dei fenomeni elettromagnetici senza esserne influenzato, e costituiva il sistema di riferimento privilegiato rispetto a cui la velocità della luce risultava costante. L'ipotesi dell'esistenza di un etere stazionario era all'origine delle asimmetrie, che il saggio einsteiniano sulla relatività del 1905 si proponeva di eliminare, pregiudicanti il rapporto tra teoria ed esperienza nella spiegazione dei fenomeni di induzione osservati nel moto relativo tra conduttori e magneti. L'esperienza mostra che quando un conduttore e un magnete sono in moto relativo reciproco, viene indotta una corrente elettrica. L'interpretazione standard forniva del fenomeno due spiegazioni distinte, a seconda di quale corpo, tra il magnete e il conduttore, fosse considerato in quiete rispetto all'etere. La legalità della natura impone, secondo Einstein, che per un solo fenomeno esista una sola spiegazione, che non ricorra a nozioni superflue e prive di solida base sperimentale, come quella di etere stazionario. Infatti «i tentativi falliti di individuare un qualche movimento della Terra relativamente al "mezzo luminifero" suggeriscono che i fenomeni elettrodinamici, al pari di quelli meccanici, non possiedono proprietà corrispondenti all'idea di quiete assoluta. Essi suggeriscono piuttosto che, come è stato già mostrato in un'approssimazione al primo ordine, per tutti i sistemi di coordinate per i quali valgono le equazioni della meccanica varranno anche le stesse leggi elettrodinamiche e ottiche» (A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, "Annalen der Physik", ser. 4, XVIII, 1905, trad. *L'elettrodinamica dei corpi in movimento*, in Id., *Opere scelte*, cit., p. 148). Sulle moderne concezioni dell'etere e sul suo fondamentale ruolo nell'elettrodinamica cfr. C.N. Cantor - M.J.S. Hodge (a cura di), *Conceptions of Ether. Studies in the History of Ether Theories, 1740-1900*, Cambridge University Press, Cambridge 1981. Per le origini della relatività ristretta cfr. Al. Miller, *Albert Einstein's Special Theory of Relativity*, Addison-Wesley, Reading 1981.

sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Lorentz)⁹.

2. Nata come teoria dell'invarianza e della simmetria, la teoria della relatività del 1905 apparve ben presto agli occhi di Einstein costitutivamente incompleta: limitando l'invarianza delle leggi fisiche ai sistemi di coordinate in moto di traslazione uniforme reciproco, essa mantiene comunque un'asimmetria, quella tra moto inerziale e moto accelerato, che deroga all'unità legale della natura, lasciando irrisolto il grande problema della gravitazione ed inspiegata l'equivalenza numerica della massa inerziale e di quella gravitazionale. L'esigenza di fondazione di un principio generale di relatività - l'applicazione covariante delle leggi della fisica a sistemi di riferimento comunque in moto, le quali devono cioè mantenere il medesimo formalismo matematico anche se sottoposte a un arbitrario cambiamento di coordinate - è dunque implicato nella stessa macchina teorica in opera nella relatività ristretta. L'estensione del principio di relatività ai sistemi in moto accelerato, compiuta dalla teoria della relatività generale, non interviene tuttavia semplicemente a colmare questa lacuna, ma comporta la trasformazione di un concetto, quello di spazio, che nella relatività ristretta era rimasto per molti aspetti inalterato rispetto alla fisica newtoniana.

La teoria del 1905 aveva in effetti sottoposto a profonda revisione essenzialmente il concetto classico di tempo. Mediante una definizione puramente procedurale della simultaneità, che mostrava l'inscindibile rapporto fra tempo e velocità dei segnali elettromagnetici con cui era effettuabile la sincronizzazione di orologi fra loro distanti, Einstein eliminò il contrasto tra il principio della meccanica della somma delle velocità e la costanza della velocità della luce indipendentemente dallo stato di moto della sorgente. Ciò aveva consentito una coerente strutturazione dei principi dell'elettrodinamica dei corpi in movimento senza alcun riferimento ad un tempo unico, assoluto, per tutti gli eventi fisici. Se il tempo, in questo modo, era stato ridotto a puro concetto metrico, privo di esistenza autonoma dallo stato di moto dei corpi di riferimento, altrettanto non poteva dirsi dello spazio. Come nella meccanica newtoniana, lo spazio della relatività ristretta è uno spazio vuoto, che ha un'esistenza indipendente sia dalla materia ponderabile che dai campi elettromagnetici. A differenza del tempo, lo spazio resta infatti una componente *autonoma* della realtà, giacché, riconosce Einstein, nel citato saggio *La relatività e il problema dello spazio*,

se immaginiamo di rimuovere la materia e il campo, rimane ancora lo spazio inerziale, o più precisamente, questo spazio assieme con il tempo ad esso corrispondente [...]. Questo spazio rigido a quattro dimensioni della teoria della relatività ristretta è in certa misura un analogo quadrimensionale dell'etere rigido tridimensionale di H.A. Lorentz. Anche per questa teoria è valido il seguente enunciato: la descrizione degli stati fisici postula lo spazio come inizialmente dato e come fornito di esistenza autonoma. Neppure questa teoria riesce dunque a dissipare il disagio di Cartesioriguardante l'esistenza autonoma, anzi a priori, dello spazio vuoto¹⁰.

La via che conduce alla generalizzazione della teoria relativistica del 1905 al moto accelerato e alla gravitazione passa attraverso la risoluzione dello spazio in un continuo tetradimensionale, che incorpora strutturalmente il tempo nella sua metrica pseudoriemanniana¹¹, la cui geometria è

⁹ I tentativi ottocenteschi di applicare il principio di relatività della meccanica all'elettrodinamica, cioè di convertire le equazioni fondamentali di quest'ultima secondo le cosiddette "regole di trasformazione di Galilei", si erano rivelati fallimentari perché le equazioni elettrodinamiche fondamentali, al contrario delle equazioni meccaniche del moto, mutavano forma. Nella teoria della relatività ristretta, viceversa, le equazioni della trasformazione di Galileo derivano in maniera univoca e immediata dalla trasformazione di Lorentz, quando si prendono in esame velocità di molto inferiori a quella della luce. L'invarianza di Lorentz assume pertanto nella relatività ristretta lo statuto di condizione generale di ogni teoria fisica.

¹⁰ A. Einstein, "*Relativität und Raumproblem*", trad. cit., p. 498.

¹¹ Risale al 1912, grazie alla collaborazione di Marcel Grossmann, il primo tentativo di Einstein di estendere il principio di relatività alla gravitazione mediante il ricorso ad una cornice matematica non-euclidea, la geometria differenziale di

definita dalla distribuzione della materia. La teoria della relatività generale segna insieme l'emancipazione della fisica dalle nozioni metriche intuitive della geometria euclidea e il definitivo abbandono della concezione newtoniana dello spazio e del tempo come cornici autonome dell'accadere fisico: descritta non più come una forza a distanza istantanea, ma identificata con la curvatura locale dello spazio-tempo, la gravitazione diviene una proprietà universale della geometria dell'universo¹². Come sottolinea Einstein nella memoria del 1916,

in base alla teoria della relatività generale, la gravitazione occupa così una posizione eccezionale nei confronti delle rimanenti forze, e soprattutto delle forze elettromagnetiche, in quanto le 10 funzioni $g_{\mu\nu}$ che rappresentano il campo gravitazionale determinano contemporaneamente le proprietà metriche dello spazio quadrimensionale¹³.

Non ha più dunque senso parlare di spazio, materia e forza gravitazionale come realtà fisiche distinte, in quanto «non vi è nessuno spazio, e anzi nessuna parte di spazio, senza potenziali gravitazionali, perché sono questi appunto a conferirgli le sue proprietà metriche, senza le quali esso non sarebbe neppure concepibile: l'esistenza del campo gravitazionale è intimamente legata all'esistenza dello spazio»¹⁴.

Si comprende qui quanto la *rivoluzione* teorica determinata dalla relatività generale rappresenti nel contempo la *ripetizione* e lo *sviluppo* di una tradizione di pensiero costitutiva della moderna scienza. È nella teoria relativistica della gravitazione, che rimuove ogni frontiera tra il fisico e il geometrico inserendo il campo metrico quadrimensionale tra le quantità *fisiche* agenti sulla materia ponderabile, e su cui questa a sua volta reagisce, che sembra realizzarsi l'ideale carte siano dell'universale legalità matematica della natura, fondato sulla riduzione a pure relazioni metriche e quantitative delle nozioni di spazio, corpo e movimento. L'impianto teorico della relatività generale sembra infatti sposare appieno il programma di geometrizzazione dell'intera realtà naturale, proclamato da Cartesio nei *Principia Philosophiae*:

Ammetto senza riserve di non conoscere nessun'altra materia di cose corporee se non quella che si può totalmente dividere, che può assumere figure e che è mobile, quella che i Geometri chiamano quantità e assumono come oggetto delle loro dimostrazioni: in essa non considero assolutamente nulla se non tali divisioni, figure e

Riemann. La teoria della relatività del 1916 si fonda sugli sviluppi ad essa apportati da Elwin Christoffel, Gregorio Ricci-Curbastro e Tullio Levi-Civita.

¹² In virtù della sua indistinguibilità locale da un moto rettilineo uniforme, nella relatività generale la traiettoria di caduta libera descritta da una curva di minima lunghezza tra due punti, la geodetica, corrispondente alla retta della geometria del piano, assolve alle funzioni concettuali del moto inerziale nella meccanica classica. In un articolo del 1918 (*Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie*, "Annalen der Physik", ser. 4, LV, pp. 241-244) Einstein elenca tre assunti della teoria relativistica della gravitazione: il principio di covarianza generale, il principio di equivalenza di massa inerziale e massa gravitazionale, e quello definito come principio di Mach, ovvero che l'inerzia ha origine nella gravitazione. Nel celebre studio *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt* (Brockhaus, Leipzig 1883, trad. *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, Einaudi, Ibrino 1977) Mach aveva sottoposto a severa critica l'inerzia newtoniana e il concetto di spazio assoluto, sostenendo che gli effetti inerziali sono dovuti esclusivamente alla distribuzione della totalità delle masse dell'universo e ai loro stati di moto, e che dunque non può darsi alcun sistema di riferimento privilegiato di coordinate. L'universo machiano è però un universo chiuso e statico, come inizialmente quello della relatività generale. Sul principio di Mach e la relatività generale, e le conseguenze teoriche della pubblicazione negli anni Venti dei lavori di A.A. Friedmann sulle soluzioni di equazioni relativistiche che descrivono universi in espansione, cfr. G. Boniolo - M. Dorato, *Dalla relatività galileiana alla relatività generale*, in G. Boniolo (a cura di), *Filosofia della fisica*, Bruno Mondadori, Milano 1997, pp. 129-137.

¹³ A. Einstein, *Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie*, Barth, Leipzig 1916, trad. *I fondamenti della teoria della relatività generale*, in Id., Opere, cit., p. 293.

¹⁴ A. Einstein, *Äther und Relativitätstheorie*, Springer, Berlin 1920, trad. *Etere e teoria della relatività*, in Id., Opere, cit., p. 515.

movimenti, ed intorno ad essi non ammetto come vero nulla che non si tragga con tanta evidenza da quelle nozioni comuni, della cui verità non possiamo dubitare, da essere considerato come una dimostrazione Matematica. Poiché così possono spiegarsi tutti. i Fenomeni della Natura, come apparirà nelle pagine seguenti, stimo che non debbano essere ammessi e neppure desiderati altri principi di Fisica¹⁵.

L'eredità cartesiana della relatività generale era stata d'altronde sottolineata già all'indomani della pubblicazione della memoria del 1916. Nel volume che raccoglieva le lezioni sulle teorie di Einstein tenute nel semestre estivo del 1917 all'Università Tecnica di Zurigo, il matematico Hermann Weyl aveva riconosciuto nel successo della riduzione della forza gravitazionale alla geometria dell'universo spazio-temporale la piena realizzazione moderna del programma fisico di Cartesio. La relatività generale, sostiene Weyl, identificando spazio e campo gravitazionale fa della fisica «una vera geometria, una dottrina dello spazio stesso, e non soltanto, come la geometria di Euclide, e come quasi tutto ciò che è solito chiamarsi geometria, una dottrina delle forme possibili nello spazio»¹⁶. Ne segue che per la relatività generale

il mondo è una varietà metrica a (3+ 1) dimensioni; tutti i fenomeni fisici sono espressioni della metrica cosmica [...]. Il sogno cartesiano di una fisica puramente geometrica sembra realizzarsi in un modo stupendo che lo stesso Cartesio non avrebbe saputo assolutamente prevedere¹⁷.

Giudizio, questo, ribadito da Ernst Cassirer nell'importante studio da lui dedicato nel 1920 alla teoria einsteiniana¹⁸. Eliminando l'antitesi tra pieno e vuoto, materia ed estensione, Cartesio aveva postulato "una nuova unità della natura", nella quale «*l'essere fisico del corpo e l'essere geometrico dell'estensione costituiscono un solo e medesimo oggetto: la sostanza del corpo si risolve nelle sue determinazioni spaziali-geometriche. Con ciò si dava alla fisica una nuova impostazione, profonda e feconda sul piano metodico, ma alla quale l'attuazione concreta della fisica cartesiana rimase dovunque inferiore. Cosicché nel combattere le premesse ipotetiche e speculative della fisica cartesiana Newton venne a scartare, con esse, anche questa impostazione*»¹⁹. Con la teoria relatività generale, osserva Cassirer, la fisica moderna sembra però sorprendentemente

ritornare sulla via che conduce a Cartesio, sia pure non nel contenuto - ovviamente - ma nel riguardo metodico. Anch'essa tende da diversi lati ad una visione complessiva in cui si annulla il dualismo di "spazio" e "materia" - in cui essi non compaiono più come classi diverse di concetti fisici oggettivi²⁰.

Ma è in particolare **Henri Bergson** che in *Durée et simultanéité*, il saggio con cui nel 1922 aveva voluto prender parte all'arguto dibattito filosofico-scientifico allora in corso sulle teorie di Einstein, individua nello sviluppo coerente dei fondamenti della fisica cartesiana l'autentico significato della teoria relativistica. Cartesio, sostiene Bergson, stabilendo alla base della sua fisica geometrica la radicale relatività del movimento, «*indicava con precisione definitiva il punto di vista della scienza, spingendosi inoltre ben al di là della meccanica newtoniana, al di là della nostra, col*

¹⁵ R. Descartes, *Principia Philosophiae*, apud L. Elzevirum, Amstelodami 1664, II, art. 74, trad. in Id., *Opere filosofiche*, a cura di E. Lojacono, 2 voll., Utet, Ibrino 1994, vol. II, pp. 143-144.

¹⁶ H. Weyl, *Raum, Zeit, Materie*, Springer, Berlin 1918, p. 88.

¹⁷ Ivi, p. 244.

¹⁸ E. Cassirer, *Zur Einstein'schen Relativitätstheorie*, Bruno Cassirer, Berlin 1920, trad. G. A. De Toni, *Sostanza e funzione - Sulla teoria della relatività di Einstein*, La Nuova Italia, Firenze 1973, pp. 455-613.

¹⁹ Ivi, p. 526.

²⁰ Ivi, p. 527.

*formulare un principio che sarebbe toccato ad Einstein di dimostrare»²¹. La verità sul piano scientifico della fisica cartesiana e di quella einsteiniana - così come la loro simmetrica incapacità di cogliere sul piano metafisico la specifica natura del tempo - risiede per Bergson nella funzionalità operativa che il concetto di spazio assume con l'identificazione di materia ed estensione nella nozione di *misura*. Mentre infatti tempo e durata appartengono «all'ordine della qualità», e per questo «nessuno sforzo analitico potrà risolverli in quantità pura», quanto allo spazio, scrive Bergson,*

le cose stanno in maniera del tutto diversa. La sua misura esaurisce la sua essenza. In questo caso le particolarità scoperte e definite dalla fisica appartengono alla cosa e non più a un punto di vista mentale sulla cosa. Sono, per meglio dire, la realtà stessa; la cosa è in questo caso relazione. Cartesio riconduceva la materia - considerata nell'istante - all'estensione: la fisica, ai suoi occhi, coglieva il reale nella misura in cui era geometrica. Uno studio della Relatività generale, parallela a quella che abbiamo condotto della Relatività ristretta, mostrerebbe che la riduzione della gravitazione all'inerzia è stata l'eliminazione di quei concetti che, frapponendosi tra il fisico e il suo oggetto, tra lo spirito e le relazioni costitutive della cosa, impediva sin qui alla fisica di essere geometria. Da questo punto di vista, Einstein è il continuatore di Cartesio²².

3. A partire dagli straordinari successi ottenuti dalla teoria del 1916, la riflessione di Einstein appare sempre più decisamente orientata all'attuazione di un programma di unificazione geometrico-causale dell'intera realtà fisica. La chiave di volta di questa operazione di riduzione si dimostra fondata sul concetto di campo, elevato a nozione elementare della descrizione fisica, che governa in particolare l'indagine su spazio, vuoto e materia condotta da Einstein tra gli anni Venti e Cinquanta²³.

Come aveva acutamente sottolineato Cassirer, nella prospettiva cartesiana in cui procede la relatività generale

²¹ H. Bergson, *Durée et simultanéité. A propos de la théorie d'Einstein*, Puf, Paris 1922, trad. di F. Polidori, *Durata e simultaneità (a proposito della teoria di Einstein) e altri testi sulla teoria della Relatività*, Cortina, Milano 2004, p. 35.

²² Ivi, p. 160.

²³ «lo cerco di dimostrare come i concetti di oggetto corporeo e di tempo soggettivo e oggettivo siano connessi l'uno con l'altro e con la natura dell'esperienza. Nella meccanica classica i concetti di spazio e di tempo divengono indipendenti. Il concetto di corpo materiale viene sostituito, nei fondamenti, da quello di punto materiale, e in tal modo la meccanica diventa essenzialmente atomistica. La luce e l'elettricità creano difficoltà insormontabili quando si cerca di fare della meccanica la base di tutta la fisica. Siamo così condotti alla teoria di campo dell'elettricità e in seguito al tentativo di fondare tutta la fisica sul concetto di campo (dopo aver cercato un compromesso con la meccanica classica). Questo tentativo sfocia nella teoria della relatività (passaggio dai concetti di spazio e di tempo a quello di un continuo con struttura metrica)» (A Einstein, "Physik und Realität", Franklin Institute Journal, CCXXI, 1936, trad. *Fisica e realtà*, in Id., *Opere scelte*, cit., p. 563; «La vittoria sul concetto di spazio assoluto o su quello di sistema inerziale divenne possibile solo in quanto il concetto di oggetto materiale fu gradualmente sostituito, nel suo ruolo di concetto fondamentale della fisica, da quello di campo. Sotto l'influenza delle idee di Faraday e di Maxwell si sviluppò la nozione che l'intera realtà fisica avrebbe potuto, forse, essere rappresentata come un campo le cui componenti dipendono dai quattro parametri spazio-temporali. Se le leggi di questo campo sono generalmente covarianti, non dipendono, cioè, da una particolare scelta di un sistema di coordinate, allora l'introduzione di uno spazio indipendente (assoluto) non è ulteriormente necessaria. Ciò che, pertanto, costituisce il carattere spaziale della realtà, è semplicemente la tetradimensionalità del campo. Allora non esiste alcuno spazio "vuoto", cioè non esiste nessuno spazio senza un campo» (A Einstein, *Foreword*, in M. Jammer, *Concepts of Space: the History of Theories of Space in Physics*, Harvard University Press, Cambridge 1954, trad. di A. Pala, *Storia del concetto di spazio*, Feltrinelli, Milano 1963, p. 11-12. Sulla storia del concetto di campo, come spazio continuo definito da proprietà fisiche il cui valore è misurabile punto per punto, cfr. M.B. Resse, *Forces and Fields. The Concept of Action at a Distance in the History of Physics*, Th. Nelson & Sons, Edimburgh 1961, trad. di L. Sosio, *Forze e campi. Il concetto di azione a distanza nella storia della fisica*, Feltrinelli, Milano 1974.

tra la "materia" e lo "spazio vuoto" interviene una nuova mediazione concettuale nel concetto di "campo": ed è questo, in quanto esso risulta l'espressione pienamente valida delle leggi dinamiche, ad apparire da qui innanzi sempre più chiaramente e nettamente la vera espressione della realtà fisica²⁴.

Del pari, afferma Weyl, se si tenta la risoluzione in un unico concetto metrico di materia e spazio-tempo, se cioè «*si porta fino in fondo in modo coerente l'idea fondamentale di Cartesio, si ottiene una teoria del campo*»²⁵. Tesi, lo si è visto nel saggio *La relatività e il problema dello spazio*, ribadita dallo stesso Einstein: «Solo l'idea del campo come rappresentante la realtà, in combinazione con il principio generale di relatività, riesce a rivelare il vero nocciolo dell'idea di Cartesio: non esiste spazio "vuoto di campo"»²⁶.

Nei ripetuti tentativi di elaborazione di una "teoria di campo unificato" come terzo e definitivo stadio della teoria della relatività, Einstein tentò di fondare esclusivamente su funzioni continue nel continuo tetradimensionale l'analisi delle strutture dello spazio fisico che nella relatività generale restavano indipendenti, quella gravitazionale e quella elettromagnetica, convinto che «*queste due specie di campo debbano corrispondere a una struttura unitaria dello spazio*»²⁷. Nella lezione di ringraziamento per il conferimento del Nobel dell'anno 1921 per la fisica²⁸, in cui trae un bilancio della propria indagine scientifica e ne prospetta gli sviluppi, Einstein sottolineò la necessità di procedere oltre i risultati della relatività generale, verso l'unificazione geometrica dei due campi, quello gravitazionale e quello elettromagnetico, che nella teoria del 1916 definivano i concetti di spazio e di materia ma restavano irriducibili. Le equazioni differenziali che stabilivano con successo la metrica del campo gravitazionale non erano infatti in grado di render conto dell'effetto gravitazionale del campo elettromagnetico, ovvero di fondare una teoria relativistica delle particelle elementari che generano il campo²⁹, e ciò mostrava, secondo Einstein, l'incompletezza e la provvisorietà della teoria della relatività generale:

Una mente che aneli all'unificazione della teoria non può essere paga del fatto che debbano esistere due campi i quali, per loro natura, siano indipendenti tra loro. Si cerca una teoria del campo, unificata sotto il profilo matematico, in cui il campo gravitazionale e il campo elettromagnetico siano interpretati solo come componenti o manifestazioni diverse di uno stesso campo uniforme e in cui, se possibile, le equazioni del campo non consistano più in addendi tra loro logicamente indipendenti. La teoria gravitazionale, considerata nei termini del formalismo matematico, e cioè della geometria riemanniana, dovrebbe essere generalizzata in modo da comprendere le leggi del campo elettromagnetico. Purtroppo qui non possiamo basarci su fatti empirici, come quando si ricava la teoria della gravitazione (leggi: uguaglianza di massa inerziale e gravitazionale), ma dobbiamo limitarci al criterio della semplicità

²⁴ E. Cassirer, *Zur Einstein'schen Relativitätstheorie ...*, trad. cit., p. 527.

²⁵ H. Weyl, *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Princeton University Press, Princeton 1949, trad. *Filosofia della matematica e delle scienze naturali*, Boringhieri, Torino 1967, p. 220.

²⁶ A Einstein, *Relativität und Raumproblem*, trad. cit., p. 503.

²⁷ A Einstein, *Das Raum-, Äther- und Feld-Problem der Physik*, trad. cit., p. 140.

²⁸ La lezione, tenuta nel luglio 1923, è pubblicata nello stesso anno a Stoccolma con il titolo *Grundgedanken und Probleme der Relativitätstheorie* (trad. *Idee e problemi fondamentali della teoria della relatività*, in A. Einstein, *Opere Scelte*, cit., pp. 517-527).

²⁹ «*Queste equazioni di campo non hanno fornito una teoria della materia, e quindi, per poter considerare l'effetto che hanno le masse ponderabili nella generazione del campo, si è dovuto, come nella fisica classica, dare alla materia una rappresentazione approssimata e fenomenologica*» (ivi, p. 525). Cfr. Einstein a M. Besso, 10 sett. 1952: «*Una teoria veramente razionale dovrebbe dedurre le strutture elementari (elettrone, ecc.), non porle a priori*» (Albert Einstein, *Michele Besso. Correspondance 1903-1955*, a cura di P. Speziali, Hermann, Paris 1972, ed. it. a cura di G. Gembillo, A. Einstein, *Corrispondenza con Michele Besso (1903-1955)*, Guida, Napoli 1995, p. 423).

*matematica, che non è esente da arbitrarietà*³⁰.

Questo testo illustra perfettamente l'intento teorico dell'Einstein maturo, nonché le sue disperanti difficoltà: elaborare una teoria di campo unificato grazie al medesimo procedimento di generalizzazione che ha condotto dalla relatività particolare a quella generale, senza tuttavia poter questa volta contare su principi fisici guida, radicati nei dati sperimentali, analoghi al principio di equivalenza e quello di covarianza generale. Avvalendosi essenzialmente delle ricerche sulla teoria unitaria di campo sviluppate nella prima metà degli anni venti dai matematici Weyl, Kaluza e Klein, Einstein investigò le geometrie post-riemanniane, alla ricerca di quella struttura del continuo che gli consentisse di derivare l'elettrone dalle equazioni relativistiche del campo gravitazionale. Come si è visto, ogni autentico avanzamento della fisica moderna, secondo Einstein, si è sempre prodotto grazie all'elaborazione di una nuova geometria dello spazio. Anzi, la nascita stessa della fisica moderna è intrinsecamente legata alla formulazione del concetto generale di spazio come continuo geometrico, elaborato per la prima volta da Cartesio:

*La matematica di Euclide non conosceva questa idea [scil. l'idea di spazio] come tale e vi sopperiva servendosi esclusivamente delle idee di cosa, di relazioni fra le cose, solo come idee ausiliarie. Tutte le relazioni di posizione sono riportate a relazioni di contatto (:intersezioni di rette, di piani, posizioni di punti su rette, ecc.). In questo concetto, lo spazio come continuo non appare. È Cartesio che ha :introdotto per primo questo concetto descrivendo il punto-spazio per mezzo delle sue coordinate: solo allora vediamo apparire le forme geometriche, come porzioni di spazio infinito, concepito come continuo a tre dimensioni. [...] La fisica di Newton aveva necessariamente bisogno dello spazio come insieme nel senso di Cartesio. Poiché i concetti di punto materiale, di distanza fra punti materiali (variabili col tempo) non bastavano alla dinamica*³¹.

Nel suo avanzare in direzione della relatività generale Einstein aveva trovato già pronta una nuova metrica dello spazio, quella formulata nella metà del diciannovesimo secolo da Riemann, di cui comprese le profonde implicazioni fisiche. Dimostratosi però lo spazio riemanniano insufficiente ad istituire un modello unitario dei fenomeni gravitazionali e di quelli elettromagnetici, perché le proprietà della materia sono descritte solo in uno spazio di Minkowski, cioè assoluto e "piatto", privo di curvatura spaziale e temporale, Einstein si addentrò via via nello studio di diverse tipologie di spazi e iperspazi post-riemanniani (continuo quadrimensionale non riemanniano a connessione simmetrica, proposto da Weyl; continuo riemanniano pentadimensionale, proposto da Kaluza e Klein; continuo quadrimensionale non riemanniano a connessione antisimmetrica; continuo riemanniano quadrimensionale con teleparallelismo ecc.), abbandonando una strada dopo l'altra³², Nessuno di questi spazi si rivelò infatti adatto allo scopo: privo di un principio-guida fisico di simmetria, Einstein non riuscì a derivare la materia dalla geometria dello spazio-tempo, e finì,

³⁰ Ivi, p. 526.

³¹ A Einstein, *Das Raum-, Ather- und Feld-Problem der Physik*, in Id., *Mein Weltbild*, Querido, Amsterdam, trad. di R. Valori, *Lo spazio, l'etere e il campo*, in A. Einstein, *Come io vedo il mondo*, cit. pp. 128-130. Sul concetto cartesiano di spazio cfr. anche A Einstein, *Foreword*, in M. Jammer, *Concepts of Space...*, trad. cit., p. 10. Alla nozione premoderna di spazio corrisponde secondo Einstein il «concetto psicologicamente più semplice di luogo» (ivi, p. 9). Sulla mancanza di senso, in età premoderna, di una nozione generale di spazio e sul problema-chiave dell'ubicazione nell'idea aristotelico-scolastica di cosmo, concepito come un complesso differenziato e strutturato di topoi, cfr. G. Stabile, *La categoria dell'ubi e le sue implicazioni per il concetto di spazio nell'Antichità*, in E. Canone (a cura di), *Metafisica, logica, filosofia della natura. I termini delle categorie aristoteliche dal Mondo Antico all'Età Moderna*, Seminari di terminologia filosofica dell'Istituto per il Lessico Intellettuale Europeo e Storia delle Idee, Cnr (Roma, gennaio-maggio 2003), Agorà, Sarzana 2004, pp. 1-11.

³² Sui tentativi einsteiniani di fondazione geometrica della teoria di campo unificato cfr. L. Kostro, *Einstein and the Ether, Apeiron*, Montreal 2000, trad. di N. Russo, *Einstein e l'etere*, Dedalo, Bari 2001, pp. 157-211.

forse proprio come secondo Leibniz accadde a Cartesio, con lo smarrirsi nel labirinto del continuo³³, senza però mai rinnegare, nonostante gli insuccessi, il programma della teoria di campo totale. Nell'angosciosa esplorazione di modelli di mondi fisici con spazi ritorti, antisimmetrici o con un numero di dimensioni maggiore delle quattro familiari, Einstein mantenne comunque ferma la convinzione che una teoria gravitazionale ed elettromagnetica unificata non poteva ammettere le particelle elementari come singolarità del campo totale, vale a dire come porzioni dello spazio in cui le leggi del campo non sono valide, perché questo avrebbe significato che le particelle della materia devono essere considerate, in ultima analisi, al di fuori dello spazio-tempo.

Nel testo inviato, due settimane prima della scomparsa, a prefazione del volume a lui dedicato da studiosi italiani in occasione dei cinquant'anni dalla prima formulazione della teoria della relatività, Einstein ribadisce significativamente questo punto essenziale:

Se si introduce in generale il concetto di campo come concetto elementare, cioè come elemento della descrizione fisica non ulteriormente riducibile, pare a me impossibile introdurrevi accanto anche la particella come concetto elementare, poiché quest'ultima dovrebbe venir trattata come singolarità del campo, ciò che equivale alla posizione di condizioni-limiti logicamente arbitrarie per il campo. Perciò pare a me necessario di esigere l'assenza di singolarità del campo, così che le sole leggi del campo siano considerate come leggi elementari. L'antico contrasto tra continuità contro discontinuità appare, dal punto di vista relativistico generale, particolarmente aspro, perché proprio qui lo spazio si presenta, non come indipendente, ma solo come campo continuo a quattro dimensioni. Una teoria discontinua della materia significa dunque nello stesso tempo rinuncia alòlo spazio³⁴.

Nella convinzione di Einstein della possibilità di descrivere in modo completo e deterministico la realtà fisica sulla base del continuo spazio-temporale, e nel suo simmetrico rigetto delle metodologie di pura analisi algebrica³⁵ e statistica nell'indagine microfisica, si misura la portata ed insieme l'intransigenza teorica della sua fisica³⁶, progressivamente isolatasi in una comunità

³³ Tratta da L. Froidmont, *Labyrinthus, sive de compositione continui, liber unus*, Antverpie 1631, la celebre immagine leibniziana è contenuta nella *Préface agli Essais de Théodicée sur la bonté de Dieu, la liberté de l'homme et l'origine du mal*, Amsterdam 1710. Per la critica a Cartesio cfr. *Essais de Théodicée, "Discours de la conformité de la foi avec la raison"*, § 70.

³⁴ A Einstein, *Prefazione*, in M. Pantaleo (a cura di), *Cinquant'anni di relatività*, Giunti Barbera, Firenze 1955, p. XIX.

³⁵ «È stato fatto notare come l'introduzione di un continuo spazio-temporale possa venir considerata come contraria alla natura, tenuto conto della struttura corpuscolare di fenomeni su scala ridotta. Si sostiene che forse il successo del metodo di Heisenberg indica una via puramente algebrica di descrizione della natura, per eliminare le funzioni continue dalla fisica. In questo caso, tuttavia, dobbiamo anche rinunciare, per principio, al continuo spazio-temporale» (A Einstein, *Physik und Realivtät*, trad. cit., p. 559).

³⁶ «Nelle considerazioni generali or ora svolte, la questione di precisare la legge particolare del campo riveste un'importanza secondaria. Al momento attuale, la questione principale consiste nello stabilire se una teoria del campo del tipo qui contemplato possa o no condurre in generale alla meta. Intendiamo una teoria che descriva esaurientemente, mediante un campo, la realtà fisica (ivi compreso lo spazio quadrimensionale). L'odierna generazione dei fisici è incline a dare una risposta negativa a tale questione. Tenuto conto della forma attuale della teoria quantistica, essi ritengono che lo stato di un sistema non possa venir caratterizzato in via diretta ma soltanto in via indiretta, col determinare la statistica dei risultati della misurazione raggiungibili nel sistema. Prevale la convinzione che la dualità della natura (struttura corpuscolare e ondulatoria), garantita dagli esperimenti, possa venir ottenuta soltanto da un simile indebolimento del concetto di realtà. Io penso che una rinuncia teorica di così vasta portata non sia al momento giustificata dalla nostra effettiva conoscenza, e che non si debba desistere dal proseguire fino alla fine il cammino della teoria relativistica del campo» (A Einstein, *Relativität und Raumproblem*, trad. cit., p. 504). Cfr. anche la celebre lettera del 7 sett. 1944 a M. Born: «Le nostre prospettive sono ormai agli antipodi. Tu ritieni che Dio giochi a dadi col mondo; io credo invece che tutto ubbidisca a una legge, in un mondo di realtà obiettive che cerco di cogliere per via furiosamente speculativa. Io credo fermamente, ma spero che qualcuno scopra una strada più realistica - o meglio un fondamento più tangibile - di quanto non abbia saputo fare io. Nemmeno il grande successo iniziale della teoria dei quanti riesce a convincermi che alla base di tutto vi sia la casualità, anche se so bene che i colleghi più

scientifico dominata dagli spettacolari successi messi a segno dalla meccanica quantistica, con la scoperta di nuove particelle subatomiche e di altre forze fondamentali della natura.

Figura drammatica, dunque, quella di Einstein, protagonista di una rivoluzione teorica ben presto paragonata per importanza a quella copernicana³⁷, ma anche strenuo difensore, contro la complementarità e l'indeterminazione quantistica, di una concezione del mondo unificata nei principi classici di oggettività, causalità e continuità. Va tuttavia sottolineato che il ritratto storico di un Einstein dalle due anime, quella rivoluzionaria e quella conservatrice, esprime soprattutto l'immagine della sua attività scientifica condivisa tra i pionieri della fisica quantistica³⁸. Per riprendere - *mutatis mutandis* - un felice giudizio che Alexandre Koyré espresse sulla fisica cartesiana e sull'attuazione del suo programma di géométrisation à outrance della natura, oggi siamo in grado di comprendere meglio che «*gli errori di un Einstein sono altrettanto interessanti e istruttivi delle sue scoperte*»³⁹. Tanto le "scoperte" quanto gli "errori" di Einstein sembrano rispondere infatti alle medesime esigenze teoriche, e benché la teoria di campo unificato si sia dimostrata fallimentare, il sogno dell'unificazione geometrica dei fenomeni naturali, nato con Cartesio agli albori della rivoluzione scientifica seicentesca, non cessa di incarnare un ineliminabile ideale-guida della moderna ricerca fisica. Lo sta a testimoniare l'elaborazione, ad opera delle teorie di stringa e superstringa, di nuovi modelli di geometrie fisiche utili ad unificare le interazioni fondamentali della natura e a superare l'irrisolto antagonismo tra fisica relativistica e fisica quantistica.

Ad un prezzo, però, di cui sono ancora da valutare appieno le conseguenze. Le ipotesi su cui si fondano le nuove teorie prevedono il ricorso a modelli di spazio con dimensioni addizionali alle scale ultramicroscopiche⁴⁰. Nella voragine di dimensioni extra, invisibili alle nostre scale e non

giovani considerano questo atteggiamento come un effetto di sclerosi. Un giorno si saprà quale di questi due atteggiamenti istintivi sarà stato quello giusto» (trad. in A. Einstein, *Opere scelte*, cit., p. 715).

³⁷ Cfr. il seguente giudizio di M. Planck sulla relatività ristretta, riportato da E. Lecher (*Physikalische Weltbilder*, Theodor Thomas Verlag, Leipzig 1912, p. 84): «*Questo nuovo modo di concepire il tempo esige prove eccezionali dalla capacità di astrazione del fisico e dalla sua facoltà d'immaginazione, e in audacia supera di gran lunga qualsiasi risultato conseguito nell'ambito della ricerca scientifica pura e anche dalla stessa teoria della conoscenza [...]. Quanto a portata e profondità, la rivoluzione della concezione del mondo fisico provocata dal principio di relatività è paragonabile soltanto a quella determinata dall'introduzione del sistema copernicano del mondo*».

³⁸ Assai indicativo a questo riguardo è il ritratto abbozzato nel 1955 da Heisenberg all'indomani della morte di Einstein: «*Nel campo della fisica i lavori di Einstein furono rivoluzionari al massimo grado e le loro conseguenze oltrepassarono di gran lunga i confini della scienza alla quale appartenevano. Però, per quanto possa sembrare paradossale, Einstein fu per certi aspetti importanti un conservatore. [...] Einstein ha sostituito la concezione dello spazio-tempo della fisica classica con una rappresentazione nuova e più corretta; con ciò ha dimostrato che i fondamenti della vecchia fisica non erano così fissi e immutabili come erano stati considerati. Einstein aveva creduto inoltre, collegando la geometria al campo della materia, di aver creato nuovi e più fermi fondamenti che permettessero, non meno dei precedenti, una descrizione oggettiva della natura, indipendente dall'uomo. In questo modo, Einstein sopravvalutò le possibilità del suo tempo. Una volta che i fondamenti della descrizione della natura erano stati messi in movimento, neppure l'autorità di un Einstein era più sufficiente a mantenerli immobili. Alla fine degli anni venti nella formulazione definitiva della teoria dei quanti, alla quale Einstein stesso tanto contribuì, apparve evidente che materia, spazio e tempo non sono realtà fisse, indipendenti dall'uomo, come nel diciannovesimo secolo si era creduto e come Einstein stesso volle presumere. Einstein non fu più disposto ad ammettere un tale mutamento nei fondamenti*» (W. Heisenberg, *Schritte über Grenzen*, R. Piper & Co., München 1971, trad. di S. Buzzoni, *Oltre le frontiere della scienza*, Editori Riuniti, Roma 1984, pp. 22-24).

³⁹ Cfr. A. Koyré, *Études galiléennes*, Hemann, Paris 1966, trad. di M. Torrini, *Studi galileiani*, Torino, Einaudi 1979, p. 344: «*Le regole concrete della trasmissione dei movimenti, date da Cartesio, sono, come ben si sa, quasi tutte false; ma, lo abbiamo detto assai spesso, gli errori di un Cartesio sono altrettanto interessanti e istruttivi delle sue scoperte. Perciò dovremo ritorarci sopra, e chiederei il perché dell'errore cartesiano, errore che fu, a nostro avviso, più spesso confutato che spiegato, seppure lo fu mai interamente*».

⁴⁰ Le prime "teorie di stringa", denominate bosoniche, ipotizzavano volumi fino a 26 dimensioni, mentre la "teoria delle superstringhe", nel tentativo di rendere le ipotesi fisicamente accettabili, prevede invece un numero di dimensioni non superiore a 10. Cfr. M. Lachièze-Rey, *Au-delà de l'espace et du temps. La nouvelle physique*, Le Pommier, Paris 2003, trad. di F. Ligabue, *Oltre lo spazio e il tempo. La nuova fisica*, Bollati Boringhieri, Torino 2004. Le teorie di stringa e superstringa, nonostante la loro coerenza formale e la capacità di risolvere alcuni aspetti teorici dell'unificazione delle interazioni fondamentali, non hanno prodotto, né potranno farlo in un prossimo futuro,

rappresentabili sensibilmente, apertasi nelle geometrie degli iperspazi tra loro concorrenti di recente proliferate, sembra andare perduta quella nozione generale di spazio, secondo Einstein per la prima volta introdotta da Cartesio, che si era rivelata il solido terreno su cui aveva poggiato il credo epistemico della moderna scienza fisica: la semplicità e l'unità delle leggi della natura, nel cui solco la teoria relativistica aveva inteso programmaticamente mantenersi.

revisioni sperimentalmente verificabili, dato che le dimensioni supplementari sono dell'ordine della lunghezza di Planck, ovvero 10^{-35} m, inaccessibile agli acceleratori di particelle esistenti e a quelli attualmente in progetto. Da questo punto di vista è interessante notare che proprio al fine di limitare il numero di "ipotesi arbitrarie" Einstein scartò, dopo averlo a lungo preso in considerazione, il continuo reimanniano pentadimensionale proposto da Kaluza e Klein (cfr. A Einstein, *Physik und Realität*, trad. cit., p. 551).