

APhEx 12, 2015 (ed. Vera Tripodi)
Ricevuto il: 03/04/2015
Accettato il: 23/08/2015
Redattore: Vera Tripodi

APhEx
PORTALE ITALIANO DI FILOSOFIA ANALITICA
GIORNALE DI **FILOSOFIA**
NETWORK
N°12 GIUGNO 2015

T E M I

LE INTERPRETAZIONI FILOSOFICHE DELLA RELATIVITÀ GENERALE

di Andrea Castelli

ABSTRACT – Il presente contributo si propone di fornire una rassegna delle principali interpretazioni filosofiche della teoria della Relatività Generale che hanno maggiormente caratterizzato la riflessione epistemologica sui risultati e sui fondamenti di questa teoria. Particolare attenzione sarà riservata alla contrapposizione tra una prospettiva neo-kantiana, una di stampo empiristico e una di tipo idealistico-trascendentale che funge da sfondo ai primi tentativi di generalizzazione del capolavoro di Einstein. In conclusione, si introdurrà brevemente la riflessione filosofica sulla natura dello spaziotempo, accennando al secolare dibattito tra sostanzialisti e relazionalisti.

1. INTRODUZIONE
2. I CONCETTI CHIAVE DELLA RELATIVITÀ GENERALE
3. LE INTERPRETAZIONI FILOSOFICHE DELLA RELATIVITÀ GENERALE
 - 3.1 Cassirer e i neo-kantiani
 - 3.2 Schlick e Whitehead
 - 3.3 Reichenbach e l'empirismo logico

3.4 Weyl, Eddington e la *geometrizzazione* della fisica

3.5 Dalle critiche del primo gruppo a quelle del secondo, fino alla riflessione più recente

4. ACCENNI ALLA FILOSOFIA DELLO SPAZIOTEMPO

4.1 Il realismo strutturale

BIBLIOGRAFIA

1. INTRODUZIONE

Il 2015, proclamato dall'UNESCO *Anno internazionale della luce*, riveste una grande importanza per la storia della Fisica, poichè vi ricorre il centenario della scoperta della teoria della Relatività Generale ad opera di Albert Einstein. E' auspicabile aspettarsi che le celebrazioni di questo avvenimento contribuiscano a spingere il grande pubblico ad interessarsi alla teoria e all'impatto che quest'ultima ha avuto sulla cultura scientifica e non, dalla sua formulazione fino ai giorni nostri. A tal proposito, chi scrive ritiene che - al di là degli innegabili meriti scientifici che vanno senza ombra di dubbio riconosciuti alla teoria - una completa e profonda comprensione del "fenomeno Relatività Generale" sia possibile solo se si tengono in adeguata considerazione anche i radicali cambiamenti che la teoria einsteiniana ha operato in ambito epistemologico. Al giorno d'oggi, per quanto concerne la fisica, si ha infatti l'impressione che sia stata la meccanica quantistica, l'altro pilastro della nostra conoscenza fisica del mondo, ad aver maggiormente stimolato la riflessione filosofica. Se, da un lato, ciò è evidentemente innegabile e ha avuto il merito di contribuire a rafforzare la consapevolezza dei filosofi circa la rilevanza culturale di un vigoroso e costruttivo dibattito sui fondamenti della teoria quantistica, dall'altro lato sembra mancare un adeguato riconoscimento del fatto che un confronto filosofico degno di nota ha avuto

luogo anche negli anni immediatamente successivi all'avvento della maggiore creazione einsteiniana. E' dunque a partire da tale constatazione che prende le mosse il presente lavoro.

Capolavoro assoluto e fiore all'occhiello della produzione scientifica del grande scienziato, la Relatività Generale rappresenta una delle più alte conquiste del pensiero umano, in grado di dischiudere orizzonti del tutto nuovi alla nostra comprensione dell'Universo e dei suoi misteri. Se la teoria della Relatività Ristretta (1905) ha cambiato per sempre la nostra comprensione della natura dello spazio, del tempo e della materia, l'avvento della Relatività Generale nel Novembre del 1915 ha sconvolto in modo ancora più marcato le fondamenta del nostro edificio scientifico e filosofico. Come ogni grande rivoluzione concettuale che si rispetti, la nuova teoria della gravitazione di Einstein ha manifestato la sua forza dirompente in modo trasversale nei vari ambiti del sapere, rendendo inevitabile - sulla scia di quanto già accaduto per la Relatività Ristretta - un confronto con le varie posizioni filosofiche che, di volta in volta, si sono proposte di interpretare i suoi risultati. Una disamina di tali posizioni filosofiche sarà quindi l'oggetto del presente saggio.

In merito alle linee interpretative della nuova creazione einsteiniana, sembra opportuno precisare che - come sostiene Bertrand Russell [1926] - nel caso delle teorie relativistiche ha preso piede la tendenza, piuttosto abituale quando si è in presenza di nuove teorie scientifiche, di interpretare il pensiero di Einstein cercando di metterlo in relazione con il sistema filosofico elaborato dal tal filosofo piuttosto che dal tal altro, con l'obiettivo di evidenziare quanto la teoria della Relatività abbia confermato o meno le argomentazioni proprie di quel sistema. Questo, a detta di Russell, non dovrebbe mai avvenire: sarebbe

infatti deludente se cambiamenti così profondi come quelli introdotti dalle teorie relativistiche non conducessero a sostanziali novità concettuali. Se le perplessità di Russell sembrano essere quasi totalmente confermate dalla riflessione filosofica sulla Relatività Ristretta, le varie interpretazioni della teoria generale si sono invece evolute e modificate in seguito all'esame degli aspetti fondamentali, sia di natura tecnica che ontologica, caratteristici della nuova teoria, sebbene inizialmente un confronto diretto con i principali sistemi filosofici abbia comunque avuto luogo. Di conseguenza, il panorama delle posizioni filosofiche sui fondamenti della Relatività Generale risulta essere variegato e ancora in via di sviluppo, frutto molto spesso di una profonda sinergia tra fisica, matematica e filosofia.

Il paragrafo successivo è dedicato ad una sintetica esposizione degli aspetti fondamentali della teoria della gravitazione di Einstein, mentre nel seguito dell'elaborato, senza alcuna pretesa di essere esaustivi, si presenteranno le principali posizioni filosofiche che ne derivano.

2. I CONCETTI CHIAVE DELLA RELATIVITÀ GENERALE

La teoria della Relatività Ristretta (Giugno 1905), unificando le leggi della meccanica e quelle dell'elettromagnetismo, aveva portato in primo piano l'importanza del concetto di uguaglianza della forma delle leggi della fisica per tutti gli osservatori inerziali, osservatori questi collocati in sistemi di riferimento che si muovono di moto rettilineo uniforme tra di loro o che sono in quiete uno rispetto all'altro. E' evidente, però, che un gran numero di situazioni restano escluse da questo quadro teorico: quelle in cui il sistema di riferimento scelto è in moto accelerato. Inoltre, la nuova teoria non si accordava con quanto si sapeva

sulla gravità, l'altra interazione fondamentale - oltre a quella elettromagnetica - presente nel quadro teorico della fisica classica. Infatti, nella fisica newtoniana gli effetti gravitazionali venivano intesi come prodotti da un'"azione istantanea a distanza", ma questa concezione è in contraddizione con uno dei due postulati su cui è fondata la Relatività Ristretta, secondo il quale la luce si propaga nel vuoto a velocità costante, indipendentemente dallo stato di moto della sorgente o dell'osservatore, e costituisce un limite fisico invalicabile per la trasmissione dei segnali. Questa situazione turbò presto Einstein, che si immerse immediatamente nel problema per cercare di estendere la teoria ristretta ai moti accelerati. Quasi dieci anni di studi, errori e disperati tentativi tennero occupato il grande fisico fino alla fine del Novembre 1915, quando questo immane sforzo di generalizzazione e unificazione diede finalmente il suo frutto: la Relatività Generale, «la più bella delle teorie», come la definì il grande fisico russo Lev Landau. In sostanza, si trattava di una nuova teoria geometrica della gravitazione che, in presenza di campi gravitazionali deboli o trascurabili, doveva ridursi alla Relatività Ristretta. Dal momento che una trattazione completa e tecnicamente rigorosa della Relatività Generale esula dagli scopi di questo contributo, verranno qui presentate per sommi capi le sole caratteristiche fondamentali del capolavoro einsteiniano. Si invita il lettore interessato a consultare, tra i vari testi esistenti, Boniolo G., Dorato M. [1997] e Dorato [2005] per una dettagliata introduzione alla Relatività Generale e, per chi intendesse approfondire ulteriormente, Bergia S., Franco A. P. [2004], D'Inverno [1992] e Hartle [2003].

La prima caratteristica, nonché idea cardine di tutta la teoria, è la seguente. Newton, nella sua teoria della Gravitazione Universale, aveva ipotizzato l'esistenza di una forza che

attira tutti i corpi l'uno verso l'altro e le aveva dato il nome di forza di gravità. Come agisse questa forza, soprattutto tra corpi posti a grande distanza senza un mezzo che facesse da tramite, non era spiegato. Inoltre, un'altra fondamentale assunzione di Newton era che i corpi si muovessero nello spazio e che questo spazio fosse una sorta di "grande contenitore" vuoto, una "rigida scaffalatura" che costituisce l'involucro dell'intero Universo. L'analisi delle opere di Faraday e Maxwell portò presto Einstein a riflettere su un innovativo e rivoluzionario concetto introdotto appunto da Faraday e formalizzato poi da Maxwell per mezzo delle sue celebri equazioni: il concetto di *campo*. Einstein, pensando al campo come a un nuovo elemento in grado di esprimere una realtà fisico-geometrica indipendente dallo stato di moto di un osservatore, intuì che - così come il campo elettromagnetico, che permea lo spazio in ogni punto, veicola la forza elettrica - anche la gravità doveva essere l'espressione dell'esistenza di un campo: il *campo gravitazionale*. Diversamente dai campi elettrici e magnetici, il campo gravitazionale possiede però la peculiare caratteristica, nota già a Galileo, di non essere dipendente dalla massa e dalla natura dei corpi. Alla luce di questo dato di fatto, Einstein dimostrò l'uguaglianza tra massa inerziale e massa gravitazionale. Ma il guizzo assolutamente geniale del grande fisico di Ulm fa il suo ingresso in scena proprio ora: il campo gravitazionale non è un campo fisico che si propaga attraverso lo spaziotempo, bensì è ciò che genera la struttura geometrica stessa dello spaziotempo.

Tornando allora alla descrizione newtoniana della gravità, è possibile vedere come la rivoluzione concettuale operata da Einstein mostri che il moto dei corpi in presenza di gravità non sia da ricondurre all'azione a distanza di una vera e propria forza, ma sia in realtà

dovuto alla modifica della geometria dello spaziotempo, ovvero del campo gravitazionale. In altre parole, lo spaziotempo viene deformato e incurvato dalla presenza di grandi masse (ad esempio quella del Sole) e questa curvatura determina la traiettoria dei corpi. Per usare le parole di Rovelli [2014, pp. 17-18],

il Sole piega lo spazio intorno a sé e la Terra non gli gira intorno perché è tirata da una misteriosa forza, ma perché sta correndo dritta in uno spazio che si inclina. Come una pallina che rotoli in un imbuto: non ci sono forze misteriose generate dal centro dell'imbuto: è la natura curva delle pareti a fare ruotare la pallina. I pianeti ruotano intorno al Sole e le cose cadono perché lo spazio si incurva.

Per poter parlare di curvatura dello spaziotempo diviene necessario abbandonare un'altra fondamentale assunzione di Newton: quella che la geometria dello spazio fisico sia euclidea. Infatti, per descrivere l'incurvarsi dello spaziotempo non è più possibile servirsi della geometria euclidea, poiché essa presuppone che lo spaziotempo sia piatto, ovvero a curvatura nulla. Pertanto, si deve ricorrere a una matematica ben più sofisticata, in grado di esprimere le proprietà di uno spaziotempo curvo. Einstein si rese quindi conto, grazie anche al prezioso aiuto del suo caro amico Marcel Grossmann, che la matematica elaborata da Bernhard Riemann, allievo di Carl Friedrich Gauss, da Elwin Bruno Christoffel, Gregorio Ricci Curbastro e Tullio Levi-Civita faceva proprio al caso suo e poteva essere inserita nella struttura pseudoeuclidea dello spaziotempo di Minkowski. L'oggetto matematico principale della geometria riemanniana è il tensore che porta il nome del suo scopritore, il tensore di Riemann; per mezzo di questo oggetto è possibile catturare in modo del tutto generale le proprietà di curvatura di una varietà con un numero qualsiasi di dimensioni. Come si vedrà in seguito, Einstein introdusse nell'equazione che descrive il campo gravitazionale (eq. 1) degli oggetti matematici derivati direttamente dal tensore di

Riemann e li mise in relazione con la materia e l'energia che costituiscono le sorgenti del campo gravitazionale. Il risultato fu strabiliante: la curvatura dello spaziotempo risultava essere funzione della quantità di energia e materia presenti in una determinata regione di spaziotempo. Risulta essenziale far notare come ora lo spaziotempo non sia più dotato di una propria esistenza astratta e assoluta, come voleva Newton, ma sia invece un'entità interagentente con la materia; inoltre, per mezzo dell'implementazione del concetto di campo, è ora possibile descrivere, almeno in parte, la materia in termini geometrici.

Una volta messa a fuoco l'idea chiave, sebbene soltanto in forma qualitativa, che sta alla base dell'intero impianto formale della Relatività Generale, è opportuno far notare come il processo di generalizzazione della teoria ristretta del 1905 abbia avuto come obiettivo anche il raggiungimento del seguente requisito: tutti i sistemi di riferimento, inerziali o accelerati che siano, devono essere equivalenti per quanto riguarda la formulazione delle leggi della fisica. Allo scopo quindi di inglobare la trattazione dei sistemi di riferimento non inerziali nel nuovo quadro teorico che stava approntando, Einstein formulò, per mezzo del celebre esperimento mentale dell'ascensore, il cosiddetto *principio di equivalenza*: un osservatore che si trova all'interno di un ascensore in caduta libera in un campo gravitazionale uniforme sperimenta i medesimi effetti di un osservatore che si trova, invece, in un razzo posto nello spazio vuoto e sottoposto ad un'accelerazione costante di intensità pari a quella del campo gravitazionale in cui è immerso l'ascensore. Va subito puntualizzato che il principio di equivalenza di Einstein, oltre che alle leggi della meccanica, si applica anche all'elettromagnetismo: non solo la massa è dunque soggetta alla curvatura dello spaziotempo, ma lo è anche la luce, la cui traiettoria risulta essere deflessa ad opera

di un intenso campo gravitazionale. La prima conferma di quest'idea e seconda prova sperimentale della Relatività Generale (essendo la prima la corretta determinazione del valore della precessione del perielio dell'orbita di Mercurio), portata a compimento dalle due spedizioni di Eddington e Crommelin durante l'eclissi totale di Sole del 29 Maggio 1919, mostrò infatti che la traiettoria della luce proveniente da alcune stelle veniva incurvata dalla massa del Sole. La concezione newtoniana di uno spazio assoluto esistente indipendentemente dai fenomeni fisici perse così di significato e ne emerse un concetto di spazio del tutto nuovo: uno spazio che non è più separato dalla materia, ma che rappresenta una delle componenti materiali del mondo fisico.

In definitiva, si è mostrato come tutte le leggi fisiche, e in particolare l'equazione di Einstein (eq. 1) che presenteremo a breve, abbiano allora la stessa forma in ogni sistema di riferimento; questa affermazione prende il nome di *principio generale di relatività*. La sua implementazione a livello formale comporta l'introduzione del seguente vincolo che le equazioni del campo gravitazionale hanno l'obbligo di soddisfare: tutte le leggi di natura vanno espresse mediante equazioni che devono risultare valide per qualsiasi sistema di riferimento, ovvero devono essere covarianti rispetto ad un'arbitraria trasformazione di coordinate. Quest'altro principio, nonché terza caratteristica fondamentale della Relatività Generale, è noto con il nome di *covarianza generale* e sarà oggetto di un'indagine approfondita per quanto concerne le implicazioni filosofiche della teoria.

Per concludere questa sommaria esposizione dei nuclei fondanti della gravitazione einsteiniana, resta ancora un ultimo passo da compiere: mettere insieme tutte le caratteristiche che la teoria deve possedere e tradurle nel linguaggio matematico potente e sofisticato

della geometria di Riemann che, come illustrato poc'anzi, è perfetto per questo scopo. Non potendoci soffermare in questa sede sul travagliato e lungo percorso che condusse Einstein all'elaborazione definitiva del suo capolavoro, ci limitiamo a riportare qui di seguito il risultato finale degli immani sforzi di Einstein, ovvero l'equazione che descrive il campo gravitazionale:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = kT_{\mu\nu} \quad (1)$$

Evitando di addentrarci nel tecnicismo, elenchiamo solamente i termini che compongono questa espressione: $R_{\mu\nu}$ è il tensore di Ricci (derivato dal tensore di Riemann), $g_{\mu\nu}$ è il tensore metrico, R è lo scalare di curvatura (derivato dal tensore di Ricci), k è una costante da determinarsi in modo che la (1) si riduca alle equazioni newtoniane in situazioni di campo debole e $T_{\mu\nu}$ è il tensore energia-impulso. A sinistra del segno di uguaglianza compaiono i termini che descrivono le proprietà geometriche dello spaziotempo, mentre a destra si trova l'espressione delle sorgenti del campo gravitazionale. Precisiamo infine che l'espressione precedente non costituisce un'unica equazione, ma rappresenta in realtà una famiglia di dieci equazioni indipendenti in grado di fornire la forma del tensore metrico $g_{\mu\nu}$, ovvero la struttura dello spaziotempo, in funzione della distribuzione di materia-energia descritta da $T_{\mu\nu}$.

3. LE INTERPRETAZIONI FILOSOFICHE DELLA RELATIVITÀ GENERALE

Il 6 Novembre 1919 una seduta congiunta della *Royal Society* e della *Royal Astronomical Society* stabilì che le misure eseguite da Eddington e Crommelin durante le loro spedizioni del Maggio di quell'anno costituivano un'importante conferma sperimentale della

Relatività Generale. Da quel giorno il pubblico dei non addetti ai lavori, al quale appartenevano anche i filosofi, prese piena coscienza dell'enorme portata concettuale della teoria einsteiniana. Il primo impatto in ambito filosofico mise subito in luce le difficoltà di pervenire ad una chiara comprensione delle novità concettuali introdotte dalla gravitazione di Einstein; certamente il linguaggio particolarmente ostico del calcolo tensoriale e la necessità di conferire un significato preciso ai principi chiave su cui si fonda la teoria, i principi di equivalenza, di relatività generale e di covarianza generale, non furono d'aiuto a coloro i quali decisero di cimentarsi nello studio del capolavoro di Einstein. Di conseguenza, il dibattito sui fondamenti della teoria fu inevitabilmente alimentato, come già precisato, da posizioni filosofiche contrastanti e in continua evoluzione. Dal momento che le riflessioni filosofiche sulle teorie relativistiche sono numerose e complesse, torna utile raggrupparle in due periodi storici principali e confinare l'analisi alle questioni che riguardano prettamente la Relatività Generale, omettendo quindi la trattazione delle argomentazioni avanzate da autori quali Bergson, Vaihinger, Kraus, Petzold e altri ancora, poiché riguardanti quasi esclusivamente la Relatività Ristretta. Precisiamo infine che questo paragrafo introduttivo si propone di fornire una breve panoramica del pensiero dei principali autori, mentre viene demandato a specifiche sezioni l'approfondimento della riflessione dei pensatori più influenti.

Durante il primo periodo, che si estende grosso modo dal 1920 al 1930, si affacciarono sulla scena filosofica le critiche di matrice neo-kantiana, machiana ed empiristica, oltre alle fondamentali e personali posizioni di Alfred North Whitehead e Moritz Schlick, alle quali verrà qui riservata un'apposita sezione. I neo-kantiani assunsero atteggiamenti

diametralmente opposti in seguito alle prime evidenze sperimentali della teoria nel 1919: da un lato, alcuni tentarono di preservare *in toto* gli insegnamenti dell'Estetica Trascendentale kantiana, dichiarando che la posizione di Kant in merito a spazio e tempo non poteva essere messa in discussione dai risultati empirici della Relatività Generale, dal momento che riguardava solamente lo spazio intuitivo; dall'altro lato, la maggior parte dei neo-kantiani concentrò i propri sforzi per individuare gli aspetti della dottrina di Kant che dovevano essere necessariamente rivisti. Chiaramente a rischio era il presupposto che tutti gli oggetti dell'intuizione esterna, ovvero gli oggetti fisici, dovessero essere conformi alla struttura dello spazio così come emerge dalla geometria euclidea. Poiché la struttura della Relatività Generale, come mostrato nel paragrafo 2., prevede l'implementazione della geometria riemanniana, l'affermazione precedente risulta essere falsa.

Gli empiriocriticisti, i seguaci di Ernst Mach, individuarono invece il punto di forza della teoria di Einstein nel tentativo di applicare un principio di relatività dell'inerzia in fisica. Mach osservò che non è possibile dire se un corpo si stia muovendo di moto uniforme o se sia in quiete a meno che non vi sia un secondo corpo rispetto al quale misurare la velocità del primo. Calando tale osservazione nel contesto della gravitazione, si può affermare che questo vale anche per un corpo accelerato. Infatti, in assenza di un secondo corpo di riferimento, non siamo in grado di stabilire se un oggetto varia o meno la sua velocità. Ciò che comunemente viene definito *principio di Mach* afferma proprio che l'inerzia, cioè la proprietà di un corpo di conservare il proprio stato di moto rettilineo uniforme finché non interviene una forza esterna, non può essere una proprietà intrinseca al corpo, ma deve essere determinata dalla sua interazione con le altre masse dell'Universo. Se infatti

nell'Universo non vi fossero corpi, anche l'inerzia scomparirebbe, dal momento che non ci sarebbe più un riferimento rispetto al quale definire l'accelerazione del corpo in esame. Infine, gli esponenti dell'empirismo logico proposero un'interpretazione della teoria di Einstein che le riconosceva il merito di aver portato alla luce un profondo insegnamento di natura metodologica, dal momento che, a detta loro, era necessario prima stabilire delle convenzioni per poter esprimere poi il contenuto empirico di una teoria fisica. Come infatti sosteneva Moritz Schlick, è nelle definizioni coordinative che mettono in relazione le entità teoriche di una teoria con il mondo fisico che risiede l'aspetto convenzionale della fisica. Dal momento che le definizioni sono proposizioni analitiche, è possibile quindi distinguerle da quelle empiriche, di tipo sintetico; stabilite allora convenzionalmente tutte le definizioni coordinative, ad ogni proposizione sintetica verrà associato il suo contenuto empirico in modo tale che la verità di tutte le proposizioni empiriche potrà essere determinata univocamente sulla base dell'esperienza corrispondente.

Il secondo periodo, che va dal 1930 al 1950 circa, vide la nascita delle critiche operazioniste di Bridgman e dei tentativi di estendere l'opera di *geometrizzazione* delle varie interazioni fisiche, iniziata appunto con la Relatività Generale, alle interazioni non-gravitazionali (elettromagnetismo in particolare). Per inquadrare, in linea del tutto generale, la riflessione di Bridgman, occorre ricordare che egli sostenne che il significato di un termine deve essere rintracciato nelle operazioni che si compiono quando si utilizza quel termine: se il termine è tale da potersi applicare a situazioni fisiche, come nel caso di "lunghezza" o "simultaneità", allora il suo significato lo si deve cercare nelle operazioni con le quali si determina la lunghezza di un oggetto o si stabilisce se due eventi sono o

no simultanei. Bridgman osservò dunque che nelle teorie di Einstein (in particolar modo in quella ristretta) un concetto può non essere univocamente definito, dal momento che può dipendere, come nel caso della lunghezza e della durata in Relatività Ristretta, dal sistema di riferimento adottato. Per fare un altro esempio che riguarda invece la Relatività Generale, il concetto newtoniano di tempo assoluto è quindi privo di significato, non essendo possibile metterlo in relazione a una serie ben definita di operazioni non ambigue in grado di darne una definizione. In sostanza, secondo Bridgman, solo se ci si attiene a concetti definiti operativamente si evita di incappare in tali ambiguità. Sempre rimanendo nel contesto della Relatività Generale, la critica di Bridgman prese poi in considerazione gli aspetti formali della teoria, dal momento che il filosofo fece notare come la proprietà della covarianza generale contribuisca a far perdere importanza ai sistemi di riferimento: questo è dovuto al fatto che un fenomeno fisico descritto in un sistema di riferimento può a buon diritto essere descritto anche in un altro sistema al quale si può giungere per mezzo di una trasformazione di coordinate partendo dal primo. Si può notare come Bridgman qui insista sul fatto che esistono eventi identicamente osservabili prima di aver stabilito come e da chi vengano osservati; il medesimo evento può infatti essere descritto in modo diverso da vari osservatori e, in sostanza, non è possibile stabilire a priori l'identità dei due fenomeni. Bridgman in qualche modo sostenne l'idea che Einstein fosse convinto dell'esistenza di una realtà trascendente, già data al di là della nostra esperienza. Secondo il filosofo, la Relatività Generale - proprio per via della possibilità di liberarsi da ogni particolare sistema di coordinate e considerando l'evento come qualcosa di dato e primitivo - portò il suo stesso autore ad abbracciare una posizione di oggettività e universalità

della conoscenza che ricordava il punto di vista newtoniano. Percorrendo la via tracciata da Einstein, nell'ottica di Bridgman, non è possibile giungere a quel tipo di oggettività e nemmeno trovare leggi di carattere generale per descrivere la natura dei fenomeni che non siano quelle locali e contingenti che la fisica operativa è in grado di scoprire. Per concludere, è possibile sostenere come la critica di Bridgman sia da considerarsi una sorta di riassunto delle critiche convenzionaliste e operazioniste al pensiero di Einstein, nonché un modello di interpretazione non ontologica della Relatività Generale.

Per quanto concerne, invece, l'opera di geometrizzazione della fisica, le riflessioni sicuramente più degne di nota furono quelle sviluppate da Hermann Weyl e, poco dopo, da Arthur Stanley Eddington. A differenza di Einstein, che tentò invano di pervenire ad una teoria del campo unificato in grado di descrivere tutte le interazioni fondamentali, Weyl ed Eddington si proposero di raggiungere l'arduo obiettivo, come mostra Ryckman [2005], di ricostruire tutta la fisica dal punto di vista epistemologico di quella che potrebbe essere definita, se si considera l'importanza attribuita all'attività della mente nell'individuare la struttura geometrica del mondo, una rinnovata forma di idealismo trascendentale. Ci pare opportuno far notare come l'opera citata, *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics 1915-1925*, abbia il grande pregio di aver messo in luce come gli insegnamenti filosofici tratti dall'analisi della Relatività non furono opera esclusiva dei pensatori appartenenti al circolo di Vienna, ma che la presenza di tematiche di stampo kantiano nella riflessione sugli aspetti filosofici della Relatività - grazie a Cassirer, Weyl ed Eddington - fu assolutamente non marginale rispetto a quanto l'empirismo logico abbia invece voluto farci credere. Ciò che contribuisce a fare del pensiero di Cassirer, Weyl ed Eddington un'alter-

nativa kantiana all'empirismo logico è la questione di quali sono i principi a priori sulla base dei quali una teoria fisica costruisce la propria ontologia fondamentale (il problema della costituzione dell'oggetto fisico), in accordo con l'idea di fondo dell'idealismo trascendentale secondo cui la natura non è concepibile separatamente dal soggetto che la percepisce. Soffermiamoci brevemente ad analizzare le diverse connotazioni che l'idealismo trascendentale ha assunto nella riflessione dei tre pensatori.

Affermando che le coordinate sono diventate parametri arbitrari per la rappresentazione di eventi spazio-temporali, Cassirer sostenne che la Relatività Generale ha confermato l'assunto dell'idealità trascendentale di spazio e tempo; la concezione originale kantiana dell'a priori come categoria inviolabile e data una volta per tutte doveva però essere abbandonata. Di conseguenza, come fece Reichenbach, Cassirer affermò che gli elementi a priori in una teoria fisica sono dinamici e "relativizzati", poichè cambiano nel tempo e ogni cambiamento rappresenta una trasformazione del concetto di oggettività fisica.

Mentre la concezione kantiana poggiava sull'idea cardine dell'Estetica Trascendentale che spazio e tempo sono forme a priori dell'intuizione, condizioni necessarie di possibilità dell'esperienza, Weyl giunse invece alla conclusione che spazio e tempo sono sì forme dell'intuizione, ma che, al di fuori dello spazio fisico, esiste una sorta di spazio dell'intuizione con struttura metrica euclidea. Questa concezione non è in contrasto con la fisica, dal momento che la fisica si imbatte nella natura euclidea dello spazio in regioni infinitamente piccole (nell'intorno di un punto), dove è localizzato l'"io-centro" a un preciso istante di tempo. La rappresentazione matematica che diamo dello spazio dell'intuizione è quella di uno spazio tangente in un punto alla superficie curva, non euclidea, dello spa-

zio fisico. In corrispondenza del punto di tangenza i due spazi coincidono, ma appena ci si allontana questa corrispondenza diviene sempre meno precisa, poichè la curvatura dello spazio fisico varia al variare del tensore energia-impulso $T_{\mu\nu}$. L'"io-centro", cogliendo una parte dello spazio tangente euclideo dell'intuizione, è però in grado, grazie alla sua uniformità e omogeneità, di percepirlo nella sua globalità (la conoscenza di una sua parte equivale alla sua conoscenza globale), mentre "afferra" soltanto la piccola parte dello spazio fisico curvo che rimane in corrispondenza con lo spazio tangente. Accenniamo subito, lasciando poi spazio a qualche ulteriore considerazione nel paragrafo 3.4, al fatto che secondo Ryckman [2005] la visione di Weyl ha come fondamento la fenomenologia di Husserl, mentre Afriat [2006, 2009] ha invece mostrato come si possa fare a meno di Husserl per ricostruire la genesi della teoria elettrogravitazionale di Weyl.

Infine, Eddington sostenne che la Relatività ha trasformato il concetto stesso di conoscenza fisica, riducendola a conoscenza solamente della struttura del mondo esterno. La filosofia di Eddington spiega il passaggio dalla conoscenza sensibile alla formazione del mondo scientifico per mezzo di una capacità "selettiva" della mente che crea una sorta di cornice di leggi di natura permanenti attraverso cui è possibile descrivere il mondo. L'attribuzione di un ruolo predominante alla mente nella determinazione delle leggi fondamentali della natura è giustificato, nell'ottica di Eddington, se si considera la funzione trascendentale della coscienza nell'esercitare un potere "costituente" verso gli oggetti delle teorie fisiche fondamentali.

Concludiamo questo paragrafo introduttivo facendo notare come nell'ultima parte di questo secondo periodo, a partire dai primi anni '60, gli studi filosofici sulla Relatività Ge-

nerale trattarono quasi esclusivamente il tema, tra i più rilevanti in assoluto, dei rapporti tra fisica e geometria. All'approfondimento di quanto finora esposto sono dedicate le prossime sezioni.

3.1 Cassirer e i neo-kantiani

Prima di presentare il pensiero di Cassirer, è doveroso fare una premessa. Quando si parla di interpretazione kantiana delle teorie relativistiche si è soliti analizzare le due principali obiezioni che la fisica di Einstein ha avanzato alla filosofia di Kant: la prima ha a che fare con il cosiddetto problema dell'a-priori, mentre la seconda con la natura dei concetti di spazio e tempo e con il ruolo delle geometrie non euclidee. In merito alla questione dell'a-priori, va ricordato che a fondamento della Relatività è posto un insieme di giudizi riguardanti il comportamento dei corpi e degli strumenti di misura. Se tali giudizi fossero a-priori e non empirici, la Relatività sarebbe allora identificabile con una sorta di categoria della conoscenza. Per poter sostenere questa posizione, si dovrebbe quindi mostrare come questi giudizi non sono in contraddizione con le concezioni classiche della materia. Il problema delle forme trascendentali della conoscenza, spazio e tempo, è invece strettamente connesso alla scoperta delle geometrie non euclidee. Alcuni ritennero queste geometrie nulla di più che variazioni dei concetti fondamentali già individuati da Kant e, di conseguenza, non videro l'impianto filosofico kantiano minacciato dalla loro esistenza. Altri, al contrario, spiegarono come la concezione kantiana non potesse essere conciliabile con tipi di geometrie diverse da quella euclidea. Per concludere questa breve premessa, facciamo notare come anche il concetto di oggetto fisico, che secondo Kant era fondato

sulle forme trascendentali della conoscenza, venne duramente colpito dalla visione relativistica, unitamente all'idea dell'a-priori. Nelle riflessioni che andremo a presentare, saranno affrontate entrambe le questioni.

La più influente delle interpretazioni neo-kantiane della Relatività Generale fu quella elaborata da Ernst Cassirer. In Cassirer [1921], il filosofo della scuola di Marburgo intuì che il carattere epistemologico distintivo della Relatività Generale risiede nel principio di covarianza generale e si chiese poi se la dottrina dell'Estetica Trascendentale kantiana fosse sufficientemente robusta e ben fondata per dar conto della nuova fisica. E' interessante ricordare, prima di proseguire, che Cassirer, nella *Filosofia delle forme simboliche*, attribuì ai concetti scientifici il compito fondamentale di stabilire una regola di determinazione che deve trovare conferma nell'intuizione. A differenza però delle forme della sensibilità, tale regola di determinazione non solo consente di elaborare la realtà per mezzo di uno schema formale, ma diviene una funzione universale del pensiero stesso. Al livello dei concetti scientifici, la conoscenza abbandona i legami con la realtà concreta e individualmente determinata delle cose per poter rappresentare gli oggetti fisici come tali nell'universalità della loro forma, ovvero nel loro carattere di relazione. Seguendo questa linea di pensiero, Cassirer fece acutamente notare che nella teoria di Einstein le coordinate spazio-temporali non hanno alcun significato fisico, essendo paragonabili ad "etichette" utili ad individuare i punti dello spaziotempo, ma nulla di più. Alla Relatività va dunque riconosciuto il merito di aver liberato le leggi fisiche da ogni dipendenza dai sistemi di coordinate, riducendo il rapporto tra oggetti fisici a relazioni puramente matematiche. Cassirer chiarì poi come il requisito della covarianza generale avesse il valore di una

sorta di prova della validità della natura trascendentale di spazio e tempo, non tanto come forme dell'intuizione, quanto piuttosto come "condizioni di oggettività" per una coerente definizione della nozione di oggetto fisico. Seguendo questa linea di progressiva de-antropomorfizzazione della fisica, il filosofo affermò che la covarianza generale contribuì a far emergere chiaramente il ruolo prettamente metodologico di queste condizioni nell'ambito della conoscenza empirica, ruolo che invece Kant attribuì erroneamente all'intuizione pura. Spazio e tempo non hanno la natura di sostanze, ma sono piuttosto principi ideali di ordinamento da applicare agli oggetti del mondo fisico come condizione necessaria per poterne fare esperienza. Alla luce di queste considerazioni, la covarianza generale è allora la miglior rappresentazione del principio metodologico dell'"unicità della determinazione", principio che - secondo Cassirer - sta alla base della costituzione degli oggetti della conoscenza fisica. L'oggettività delle leggi di natura dipende quindi dal loro comportamento *invariante* rispetto al sistema di riferimento adottato e non risulta connessa al contenuto sensibile delle esperienze.

Un'altra novità concettuale della teoria della gravitazione di Einstein, secondo il filosofo di Marburgo, era contenuta nel concetto di campo, poiché solo grazie alla sua implementazione è possibile superare la vecchia impostazione meccanicistica della fisica settecentesca e ottocentesca.

In conclusione, sulla base di quanto fin qui illustrato, è evidente come per Cassirer la Relatività fosse un completamento del pensiero kantiano per almeno due ragioni: la prima, perché i concetti relativistici di spazio e tempo in un continuo non euclideo conferiscono una connotazione di tipo strutturale alla conoscenza del mondo fisico, aumentandone il

valore, e la seconda perché la Relatività conferma la validità della teoria kantiana dell'oggetto fisico, reso tale proprio perché costituito da leggi di natura e non direttamente dato, spogliato quindi dei contenuti derivati dalla sfera sensoriale.

Le riflessioni di Karl Bollert ricalcarono la medesima linea interpretativa di quelle di Cassirer. La sua analisi, condotta in Bollert [1921], di entrambe le teorie relativistiche mostrò come, a suo giudizio, l'opera di Einstein contribuì a chiarire la posizione kantiana. Per quanto concerne la Relatività Generale, Bollert affermò che l'utilizzo della geometria riemanniana a curvatura variabile contribuì ad aumentare il livello di oggettivazione a fondamento della fisica; come per Cassirer, ciò si ottiene per Bollert attraverso la progressiva eliminazione di elementi soggettivi dalla descrizione dell'oggetto fisico.

Infine, è bene menzionare anche la posizione degli altri neo-kantiani, ovvero di coloro i quali tentarono invece di difendere la concezione della fisica di Kant. Tale difesa, peraltro poco convincente già in partenza, risulta sensata solo tentando di mostrare come Einstein abbia in qualche modo raggiunto certi ideali tipici del criticismo e non già sforzandosi di cercare una corrispondenza puntuale dei risultati della Relatività all'interno del sistema filosofico kantiano. La figura di Ewald Sellien può essere annoverata nel gruppo dei neo-kantiani di stretta osservanza per via della sua convinzione che la visione kantiana di spazio e tempo riguardi solamente lo spazio dell'intuizione e, pertanto, non possa essere inficiata dai risultati ottenuti dalla fisica di Einstein. Una posizione sostanzialmente analoga fu quella adottata della filosofa tedesca Ilse Schneider.

3.2 Schlick e Whitehead

Moritz Schlick era considerato un'autorità indiscussa per quanto riguarda la Relatività, sia Ristretta che Generale, ed era in buoni rapporti con Einstein, tant'è che i due ebbero per un certo periodo di tempo un intenso sodalizio professionale che diede vita ad uno scambio intellettuale particolarmente produttivo. Come anticipato nel paragrafo 3., la posizione di Schlick va a rigore collocata a metà strada tra quella neo-kantiana e quella neo-positivistica. Infatti, il filosofo da un lato non fece propria la convinzione diffusa all'epoca che le teorie di Einstein costituirono una sorta di proseguimento dell'opera di Kant, poiché i concetti di spazio e tempo hanno un mutevole fondamento empirico, mentre dall'altro lato affermò che le teorie relativistiche per certi versi confermarono il pensiero kantiano riguardo a spazio e tempo, poiché misero in risalto la contrapposizione tra la loro natura percettiva e quella concettuale, contrariamente a quanto invece accade nella fisica classica. Inoltre, se inizialmente Schlick adottò una posizione di stampo convenzionalista per quanto riguarda l'interpretazione della metrica dello spaziotempo, dopo la lettura di alcuni testi di Helmholtz e Einstein il suo pensiero mutò in favore di una nuova posizione filosofica che influenzò poi giovani pensatori come Carnap, Neurath e Reichenbach, ovvero i fondatori dell'empirismo logico vero e proprio. Anticipando un po' quanto segue, sarà dunque possibile comprendere come l'affermazione tipica dei neo-empiristi, cioè che l'avvento della Relatività Generale ha decretato la fine di ogni posizione kantiana, sia valida solamente se non si tengono in considerazione - come fece Schlick stesso - importanti contributi filosofici neo-kantiani, primo fra tutti quello di Cassirer (per un'analisi approfondita di questo tema, si veda Ryckman [2005]).

Infatti, a differenza di Cassirer, Schlick non intese i giudizi sintetici a-priori come principi regolatori che fungono da sostrato alla genesi e alla successiva evoluzione della nozione di oggettività fisica, bensì come principi universalmente e necessariamente validi, ritenendo quindi fondamentale l'aspetto dell'apoditticità. Nuovamente contro Cassirer, Schlick ritenne che la dottrina kantiana dell'intuizione pura non potesse mai essere un efficace "metodo di oggettivazione", dal momento che non è possibile depurarla dalle sue contaminazioni di natura psicologica. In sostanza, il nuovo empirismo di Schlick consistette nel trovare un modo per interpretare la metrica dello spazio-tempo per mezzo di osservazioni sui corpi rigidi e sui raggi di luce, una volta fissate in modo convenzionale le regole del loro comportamento.

Una menzione a parte merita il pensiero di A. N. Whitehead. A differenza degli altri pensatori, egli propose nel 1922 addirittura una teoria gravitazionale alternativa a quella di Einstein, annoverabile tra le sue più accreditate rivali. Dotata del medesimo potere esplicativo della Relatività Generale, la teoria di Whitehead, sebbene accettasse i risultati della Relatività Ristretta, non si basò però sull'idea di una curvatura variabile dello spazio-tempo: la gravità tornò infatti ad essere descritta come una forza basata sull'azione a distanza e non, come voleva Einstein, sotto forma di un effetto di curvatura dello spazio-tempo generato dalla presenza di masse. Questa idea rappresentò indubbiamente un passo indietro rispetto alla rivoluzione concettuale einsteiniana, ma il grande fascino dell'opera di Whitehead si manifestò nel tentativo di mostrare come fosse possibile derivare la teoria direttamente da una serie di considerazioni puramente metafisiche fondate sui concetti di *presione* e di *evento*, nozioni centrali dell'intera metafisica whiteheadiana.

In quanto oggetto metafisico, l'evento venne considerato da Whitehead come il punto di partenza per costruire una teoria formale che avesse il compito di interpretare i fenomeni del mondo, ma la novità di questa posizione filosofica risiede nel fatto che l'evento non viene eliminato durante il processo di "traduzione" della descrizione dei fenomeni in linguaggio matematico, azione necessaria per poter portare i concetti metafisici all'interno dell'impianto formale di una teoria. La gravitazione di Whitehead risultò essere il prodotto di questo tentativo di costruire una complessa e rigorosa formalizzazione del processo di astrazione che l'uomo mette in atto per distillare i concetti scientifici dai fenomeni (metodo dell'*astrazione estensiva*): scopo di tale processo, come osserva Bramè [2005], è quello di individuare un'unità minima sulla base della quale iniziare poi a costruire tutta la struttura teorica della geometria, della matematica e della fisica. L'idea di Whitehead, in sostanza, fu quella di provare a ridurre completamente la scienza alla sfera fenomenologica con l'intento di colmare il divario esistente tra soggetto conoscente e oggetto scientifico conosciuto.

Tornando alla gravitazione, al fine di introdurre una metrica e conferire così senso al processo di misurazione, Whitehead cercò un elemento che potesse fungere da sostrato uniforme. Mentre nella Relatività Ristretta tale funzione può essere assolta dallo spazio-tempo minkowskiano, nella Relatività Generale, come mostrato nel paragrafo 2., lo spazio-tempo è caratterizzato invece da una curvatura variabile che risulta essere proporzionale alla quantità di materia-energia e, pertanto, non possiede più «quei valori di stabilità che ne facevano il sostrato ideale sul quale costruire quella teoria della congruenza che sta alla base di ogni disciplina che preveda una misurazione (come la fisica, ap-

punto)» (Bramè [2006]). Whitehead procedette allora assumendo come punto di partenza la Relatività Ristretta e la struttura dello spazio-tempo minkowskiano e da lì formulò una teoria gravitazionale che non prevedeva la variabilità contingente della curvatura dello spazio-tempo. Non essendo possibile in questa sede fornire un'esposizione completa della teoria della Relatività di Whitehead (per approfondimenti si rimanda a Bramè [2005]), qui si vuole solamente sottolineare che, se si fa mente locale alla struttura della metafisica delle *prensioni*, è possibile notare come questo aspetto possa costituire un prodotto diretto della concezione metafisica di Whitehead, dal momento che mette in risalto il grande legame tra fisica e metafisica: questo aspetto della teoria delle *prensioni* viene rappresentato, appunto, all'interno di un'equazione matematica.

3.3 Reichenbach e l'empirismo logico

La filosofia della scienza che sta alla base dell'empirismo logico venne influenzata quasi completamente dall'avvento delle teorie relativistiche. Analizzando tali teorie, l'empirismo logico si propose come obiettivo primario quello di trarne insegnamenti generali in ambito metodologico, sulla scia dell'impostazione convenzionalista di Poincaré. A detta degli empiristi logici, le teorie relativistiche hanno mostrato come la filosofia del sintetico a-priori sia insostenibile.

Come Moritz Schlick, anche Hans Reichenbach adottò una visione pratica della geometria, fondata - come voleva Einstein - sul comportamento di regoli rigidi e orologi ideali. E' necessario premettere come l'analisi dell'intera opera di Einstein abbia condotto in gioventù Reichenbach alla conclusione che non esistono concetti a-priori. E' opportuno

precisare che, a parere del filosofo, tale negazione costituisce il fondamento logico del lavoro einsteiniano.

Secondo Reichenbach, ogni teoria fisica presuppone la validità di sistemi di principi del tutto generali che possono variare con il progredire della conoscenza fisica. Tali *principi di coordinazione* sono indispensabili allo scopo di ordinare i dati raccolti dai sensi, contribuendo a definire gli oggetti della conoscenza all'interno della teoria stessa. In dettaglio, Reichenbach affermò che, se il ruolo della ragione consiste nell'adeguare i principi del comprendere all'esperienza, tale processo di adeguamento risulta essere possibile solo attraverso un percorso di "approssimazioni successive" (si veda Reichenbach [1920]). Egli sostenne che gli stessi principi costitutivi possono anche venir sostituiti e, di conseguenza, all'a-priori viene a mancare il carattere apodittico, ma non quello più fondamentale di essere "costitutivo dell'oggetto". In definitiva, il principale risultato epistemologico delle teorie relativistiche consiste, secondo l'opinione del filosofo, nell'aver "relativizzato" il concetto kantiano di giudizio sintetico a-priori. Nel contesto della Relatività Generale, è chiaro quindi come il principio di covarianza generale possa essere annoverato tra i principi di coordinazione, dal momento che ha il significato di un principio generale di relatività.

Seguendo questa linea di ragionamento, Reichenbach decise di costruire un'assiomatizzazione della Relatività (Reichenbach [1924]) fondata su un insieme di definizioni contenenti regole di coordinazione empirica di certi fenomeni con i concetti matematici adatti a descriverli. Per quanto concerne la Relatività Generale, questo tentativo di assiomatizzazione prese forma nella costruzione di una geometria adatta allo scopo. Reichenbach

focalizzò la sua attenzione sulla dipendenza della geometria dalla nozione di congruenza, a fondamento della quale viene abitualmente postulata l'esistenza di un regolo campione la cui lunghezza si mantiene invariata, per definizione, in ogni punto dello spazio. A giudizio di Reichenbach, la definizione *standard* di congruenza deve essere sostituita da un concetto di congruenza relativa alle "forze universali" presenti in un determinato punto. In altre parole, secondo Reichenbach, la lunghezza di un regolo varia in base a dove risulta posizionato, a com'è orientato nello spazio e a quali forze agiscono in quel punto. Questa posizione viene spesso identificata con l'espressione di *convenzionalismo della metrica* (Reichenbach [1928]); ciò significa che le proprietà metriche dello spaziotempo sono ritenute meno fondamentali rispetto a quelle topologiche, dal momento che queste ultime sono derivate da un concetto di ordine temporale. A sua volta, l'ordinamento temporale è ridotto a quello di ordine causale e, di conseguenza, l'intera struttura spaziotemporale è da considerarsi anch'essa non fondamentale, essendo basata su fatti empirici riguardanti l'ordine causale e la negazione della possibilità di un'azione a distanza.

Nonostante la grande influenza esercitata da questa posizione sulla successiva generazione di filosofi della scienza, l'analisi di Reichenbach è da considerarsi errata, dal momento che si basa sulla fuorviante convinzione che lo spaziotempo curvo della Relatività Generale sia costituito da un insieme di infinitesime porzioni piatte dello spaziotempo di Minkowski. Oltre ad essere matematicamente incoerente (si tenga presente quanto esposto nel paragrafo 2.), questa procedura non consente di attribuire un reale significato fisico al tensore metrico $g_{\mu\nu}$, oggetto matematico centrale in Relatività Generale, né agli altri tipi di tensori da esso derivabili.

3.4 Weyl, Eddington e la *geometrizzazione* della fisica

Un altro importante tema dibattuto da fisici, filosofi e matematici nei decenni seguenti l'avvento della Relatività Generale fu quello della riduzione della fisica alla geometria. L'opera di *geometrizzazione* della gravità compiuta da Einstein diede vita all'idea di costruire una rappresentazione di tutta la fisica nota per mezzo di un'unica teoria geometrica del continuo spazio-temporale. A parte il tentativo di Hilbert di raggiungere lo scopo per mezzo di un metodo di assiomatizzazione dell'intera fisica, la maggior parte dei fisici intraprese la via della riduzione della fisica alla geometria attraverso la generalizzazione della geometria riemanniana della Relatività Generale. In tal senso, i tentativi sicuramente più efficaci furono quelli compiuti da Hermann Weyl e poi da Arthur Stanley Eddington. Alla base di tali tentativi c'era l'intento di comprendere la natura di una teoria fisica da un punto di vista epistemologico che non era né quello tipico del positivismo né del realismo. Come sostiene infatti Ryckman [2005], l'alternativa al neo-empirismo nell'interpretazione filosofica della Relatività Generale venne offerta, come abbiamo già avuto modo di evidenziare in precedenza, proprio dai lavori di questi due grandi scienziati.

Veniamo allora al cuore del problema. Richiamando quanto esposto nel paragrafo 2., ricordiamo che il tensore metrico ha un duplice ruolo in Relatività Generale: è la quantità geometrica per mezzo della quale risulta possibile definire i rapporti di lunghezza e durata, ma è anche assimilabile al potenziale del campo gravitazionale, il cui valore in ogni punto dipende dalla presenza di materia ed energia. Un modo semplice di caratterizzare il duplice ruolo del tensore metrico consiste nell'affermare che la gravitazione è diventata "geometrizzata", ovvero incorporata nella geometria stessa dello spazio-tempo.

Detto questo, è bene sottolineare che, nella formulazione classica della Relatività Generale, emerge una fondamentale asimmetria tra campi gravitazionali e non-gravitazionali. Facendo riferimento all'equazione (1), l'espressione che compare nel secondo membro, ovvero a destra del segno di uguaglianza, rappresenta le sorgenti non gravitazionali del campo definite per mezzo del tensore energia-impulso. Poiché, però, la descrizione geometrica dello spazio-tempo è essenzialmente contenuta nel primo membro, questa situazione risulta essere insoddisfacente. Nella sua forma classica, la gravitazione einsteiniana attribuisce dunque solo al campo gravitazionale un significato geometrico diretto; gli altri campi fisici, "risiedendo" nello spazio-tempo, non sono quindi costituiti *dallo* spazio-tempo.

Non fu però Einstein, ma Hermann Weyl il primo a mettere in luce l'asimmetria nel 1918 nel corso del tentativo di ricostruire la teoria di Einstein sulla base epistemologica di una "geometria puramente infinitesimale". Ritenendo che un confronto diretto di lunghezze o durate potesse essere fatto in punti adiacenti dello spazio-tempo, ma non, come la geometria riemanniana invece permette, a distanza, Weyl scoprì dei termini aggiuntivi nella sua geometria che identificò formalmente con i potenziali del campo elettromagnetico. A partire da questi, l'intensità di tale campo è immediatamente derivabile. Grazie alla sua teoria elettrogravitazionale, Weyl riuscì allora ad esprimere l'elettromagnetismo e la gravitazione esclusivamente entro i confini della geometria dello spazio-tempo, spingendosi con orgoglio a dichiarare che i concetti della geometria e della fisica sono allora gli stessi. In definitiva, tutto nel mondo fisico è una manifestazione della geometria dello spazio-tempo. Nel 1920 Weyl si convinse che anche la materia, con la sua struttura

corpuscolare, fosse desumibile all'interno della geometria dello spazio-tempo. Secondo Ryckman [2005], la personale simpatia di Weyl per la fenomenologia husserliana lo condusse alla difesa della concezione che la sua geometria e il suo principio centrale, il principio epistemologico della "relatività di grandezza", formavano un quadro concettuale epistemologicamente sofisticato per la Relatività Generale. Recentemente è stato fatto notare da Afriat [2009] come l'interpretazione data da Ryckman della genesi della teoria elettrogravitazionale di Weyl non debba essere ricondotta ad un programma infinitesimale con basi filosofiche di matrice husserliana, bensì a un pregiudizio a-prioristico sulla parità di direzione e lunghezza di un vettore. Secondo Afriat, la teoria elettrogravitazionale di Weyl è nata direttamente da un "senso di giustizia matematica" del suo autore, che lo ha condotto a porre su un piano di parità le nozioni di direzione e lunghezza di un vettore. Come Levi-Civita aveva scoperto, il trasporto parallelo di un vettore in una varietà riemanniana cambia la direzione ma non la lunghezza del vettore stesso, ovvero la lunghezza è integrabile, mentre la direzione dipende dal percorso seguito. Questa disparità di trattamento contrastava con il profondo amore di Weyl per le simmetrie e urtava il suo «delicato senso di giustizia matematica» (Afriat [2006, p. 1]): dal momento che un vettore è composto da direzione e lunghezza, entrambe devono godere delle stesse libertà e ciò che vale per una deve valere anche per l'altra (si veda Afriat [2009] per maggiori dettagli).

Il postulato di Weyl di una metrica non riemanniana "puramente infinitesimale", in base alla quale deve essere possibile scegliere indipendentemente un fattore di scala di lunghezza o durata (*gauge*) in ogni punto dello spazio-tempo, venne fortemente criticato.

Nessuna osservazione l'aveva mai confermato e nessuno, tranne Eddington, lo prese seriamente in considerazione.

Nonostante tutto, l'esempio guida verso l'unificazione portato avanti da Weyl diede vita ai programmi geometrici delle teorie di campo unificate, contribuendo all'avvio di una serie di iniziative tutte finalizzate a trovare una generalizzazione adeguata della geometria riemanniana per dar conto, oltre alla gravitazione, anche del resto della fisica conosciuta. Nel Febbraio del 1921 comparve sulla scena la generalizzazione della geometria a quattro dimensioni di Weyl ad opera di Arthur Stanley Eddington. L'idea di partenza dell'astrofisico inglese era simile a quella di Whitehead, consistendo nella necessità di preservare lo stretto legame tra geometria e fisica che la gravitazione einsteiniana aveva messo in risalto, ma il passo avanti compiuto da Eddington fu quello di identificare con date quantità tensoriali tutte le costanti fisiche fondamentali. L'unico modo possibile per dare forma oggettiva alla descrizione dei fenomeni fisici era, a detta di Eddington, l'utilizzo del calcolo tensoriale, alla luce della sua capacità di formulare le equazioni fisiche in forma indipendente dalla scelta del sistema di coordinate. Inoltre, questo strumento di calcolo rappresentò un importante superamento del meccanicismo del XIX secolo, fondato sul calcolo differenziale.

Entrando un po' più nel dettaglio, in riferimento all'asimmetria mostrata in precedenza, il celebre astrofisico si propose di dimostrare che le equazioni di campo della teoria di Einstein contengono automaticamente le equazioni del moto della materia per via di un'identità che egli ritiene necessaria tra il primo e il secondo membro dell'equazione (1). Eddington sostenne allora che le equazioni della Relatività Generale costituiscono una

sorta di *definizione* delle proprietà del continuo spazio-temporale in termini di grandezze dinamiche dei processi fisici. Per spiegare di che natura sia l'identità da lui presupposta, Eddington affermò che non aveva senso chiedersi come la massa agisse sullo spazio-tempo producendone la curvatura, poiché è la curvatura stessa ad essere la massa. Come osserva Giannetto [1994],

tale identificazione della struttura spazio-temporale con i processi fisici stessi non è che la "riduzione" di una struttura altrimenti idealisticamente e dualisticamente concepita come reale in sé, autonomamente definita per via puramente matematica e solo poi messa in relazione di dipendenza dai processi fisici in una maniera che almeno concettualmente risulta peraltro circolare. [...] Le equazioni di campo come definizioni sono non arbitrarie, ma truismi, tautologie che riflettono la definizione operativa dei concetti geometrici dello spazio-tempo in termini fisici, appunto delle nostre operazioni metrico-sperimentali.

In sostanza, per Eddington la geometria non si decide in modo empirico, poiché risulta un tutt'uno con la fisica e tale profonda identificazione la spoglia della sua natura: la geometria in quanto tale è solo un termine al di là del quale si manifesta la complessa realtà dei processi fisici che non può venire schematizzata considerando la geometria come una «coordinata configurazione globale dell'universo» (Giannetto [1994]). Seguendo Eddington, una geometria effettiva si dà solo localmente e una definizione della legge che governa la gravità si deve formulare solo in termini di vuoto e di materia per come vengono rappresentati geometricamente: i concetti di regolo campione e di orologio ideale non possono più essere ritenuti fondamentali, come invece sosteneva Einstein. Secondo Giannetto [1994], la presunta natura di oggetti fisici ontologicamente primitivi che appartiene ai regoli e agli orologi comporterebbe la separazione della metrica dello spazio-tempo dalle proprietà fisiche dei fenomeni.

In conclusione, Eddington era convinto che la geometria dovesse essere un modello ma-

tematico avente la finalità di descrivere un mondo esterno ideale indipendente dall'osservatore, dove hanno valore solo le relazioni. Secondo Eddington, una "geometria del mondo" è allora una geometria puramente matematica e gli oggetti derivati da essa possiedono solo le proprietà strutturali necessarie al fine di raggiungere l'ideale di un mondo completamente impersonale, non descritto da una qualsivoglia prospettiva privilegiata. Da un punto di vista gnoseologico, la ricerca dell'uomo di una continuità delle strutture conduce alla creazione dell'intero universo della fisica e consente di incorporare le leggi della meccanica all'interno di un unico schema logico che riflette la libera creatività dell'uomo stesso.

Una visione come quella di Eddington, peraltro ripresa per certi aspetti da John Archibald Wheeler negli anni '60 con la sua *geometrodinamica* - programma che si propose di ridurre la comprensione dei fenomeni elettromagnetici e gravitazionali solamente alle proprietà geometriche dello spaziotempo e abbandonato agli inizi degli anni '70 - fu spesso catalogata con l'appellativo di "spiritualistica". Come fece notare Giacomini [1975], la debolezza di un approccio di questo tipo risiede evidentemente nella duplicità dell'atteggiamento nei confronti della Relatività Generale, considerata sia una libera creazione dello spirito in grado di "matematizzare" la realtà fisica senza preoccuparsi dell'importanza della componente sperimentale della conoscenza, sia una struttura reale data una volta per tutte e vera a priori.

3.5 Dalle critiche del primo gruppo a quelle del secondo, fino alla riflessione più recente

Come già anticipato nell'Introduzione al presente saggio, il primo gruppo di critiche è caratterizzato dal tentativo di porre in relazione il pensiero di Einstein, sia per quanto riguarda la Relatività Ristretta che quella Generale, con il nucleo centrale di una particolare prospettiva filosofica, cercando poi di evidenziare come le teorie relativistiche abbiano confermato o meno le argomentazioni derivanti dall'assunzione di tale prospettiva. Per riassumere brevemente quanto fin qui esposto, possiamo introdurre un'ulteriore suddivisione e affermare che le critiche alla Relatività Generale appartenenti al primo gruppo si dividono a loro volta in due macro-categorie: la prima ritiene che la Relatività sia una sorta di convenzione matematica prodotta della libertà creativa della mente umana, mentre la seconda considera la teoria come un'ontologia o della sostanza spazio-temporale (Whitehead) oppure delle strutture della mente umana (Cassirer). Dopo il 1930, l'aspetto che maggiormente differenziò le critiche del secondo gruppo da quelle del primo fu la quasi totale assenza di tentativi di imporre determinate categorie filosofiche per dar conto del significato della Relatività; infatti prese piuttosto piede una critica metodologica che ebbe come obiettivo quello di valutare la portata conoscitiva della Relatività, divenendo spesso un approfondimento di certi temi specifici, anche di natura tecnica, e non più una spiegazione del significato globale della teoria. Ciò che, a nostro parere, si verificò nel passaggio dal primo al secondo gruppo di critiche fu una progressiva compenetrazione tra fisica e filosofia: se negli anni '20 si assistette ad una riflessione filosofica *sulla* scienza, dove le due discipline erano ben distinte una dall'altra, negli anni a venire mutò profondamente l'approccio filosofico ai problemi concettuali sollevati dalla fisica, Relatività in

particolare, e la filosofia divenne *della* scienza. Si iniziò infatti a guardare filosoficamente le teorie "dall'interno", senza per forza doverle inquadrare per mezzo di una determinata prospettiva filosofica, cercando di cogliere gli aspetti di maggiore interesse epistemologico e fondazionale anche attraverso l'analisi del loro apparato matematico. Probabilmente non è un caso che la comunità scientifica dell'epoca fosse popolata da un'intera generazione di scienziati che si potrebbe definire la generazione dei fisici-filosofi, tra i quali il principale fu proprio Einstein.

Proseguendo con l'evoluzione storica del pensiero filosofico sulla Relatività, è possibile notare come la contrapposizione delle due tesi diametralmente opposte del "totale ontologismo" e del "totale convenzionalismo" caratterizzò la diversità di approccio delle linee di ricerca dei due gruppi di critiche fino alla fine degli anni '50, quando ci si rese conto che entrambe le posizioni non erano adeguate alla comprensione della portata rivoluzionaria delle teorie di Einstein. Questo è dovuto probabilmente al fatto che né le critiche del primo gruppo né quelle del secondo furono in grado di cogliere l'origine storica delle idee di Einstein, le quali presero forma, come sostiene Giacomini [1975], all'interno di una tradizione di "geometrizzazione" della fisica che si può ricondurre al pensiero di Riemann e Helmholtz. Questa tradizione non si pose il problema della differenza fra ontologismo e convenzionalismo, poiché identificò la massima obiettività possibile che la fisica è in grado di fornire con la più chiara ed euristicamente perfetta forma geometrica. Ecco perché, dagli anni '60, la riflessione più recente non si preoccupò più di trovare una spiegazione filosofica della Relatività né fu più interessata a mostrarne i limiti di applicabilità, ma mutò prospettiva e si concentrò sull'indagine dello sfondo teorico e concettuale nel quale

Einstein si calò per formulare le sue teorie, Relatività Generale in particolare.

Tema centrale fu, come già anticipato, il rapporto tra fisica e geometria che, in origine, ruotava attorno al presupposto di poter trovare una risposta alla domanda di quale fosse la "vera" geometria dello spazio fisico. In tempi recenti l'interesse nei confronti di una possibile geometria da considerarsi fisicamente "vera" venne meno, poichè si cercò piuttosto di comprendere quale teoria fisico-matematica fosse meglio confermata dalla geometria. Di notevole importanza appare allora la discussione in merito al fatto se la Relatività Generale sia riuscita o meno ad eliminare il concetto di spazio assoluto formulato da Newton, dal momento che ci consente di comprendere quale fosse il significato che Einstein attribuiva al termine "geometria". Sicuramente traspare un'accezione notevolmente diversa da quella tradizionale di tipo convenzionalista, poichè - secondo il grande fisico - la geometria era una teoria sia della meccanica che dei rapporti spaziali e quindi non poteva ridursi ad un gruppo di teoremi. Proseguendo su questa linea di ragionamento e andando al cuore della questione, è necessario sottolineare anche come la geometria e le proprietà inerziali dello spazio non hanno senso, a giudizio di Einstein, in uno spazio vuoto. Detto altrimenti, l'idea chiave della Relatività Generale secondo cui le proprietà fisiche dello spazio hanno origine nella materia in esso presente non trovò un'espressione completa nella Relatività Generale: Einstein non riuscì quindi ad eliminare del tutto il concetto di spazio assoluto newtoniano. Come fece notare il filosofo della scienza tedesco Adolf Grünbaum, il rapporto tra spazio e materia nella gravitazione einsteiniana trova solo un'espressione parziale perché, anche se la curvatura spaziale è funzione della distribuzione di materia, la geometria che ne deriva non è unicamente determinata da questa

distribuzione.

4. ACCENNI ALLA FILOSOFIA DELLO SPAZIOTEMPO

Negli ultimi decenni la riflessione filosofica sulla Relatività Generale è stata quasi totalmente caratterizzata dall'indagine sulla natura dello spaziotempo, alla luce delle notevoli novità concettuali introdotte dalla teoria di Einstein. In conclusione, ci pare opportuno dedicare qualche considerazione, sebbene solamente superficiale, a questa complessa, articolata e fondamentale tematica.

Come abbiamo mostrato, spazio e tempo nella teoria di Einstein sono "fusi" in una singola entità, lo spaziotempo appunto, ma non risulta immediato riconoscere quale sia lo statuto ontologico di questa nuova entità, ovvero se essa abbia il carattere di una sostanza (qualcosa che esiste indipendentemente dagli oggetti e dai processi che hanno luogo al suo "interno") o se essa, al contrario, abbia una natura squisitamente relazionale (un "sistema di relazioni" consistente solo grazie all'esistenza dei suoi singoli costituenti). Tra i vari risvolti di tale controversia è rintracciabile l'eco di un secolare dibattito tra sostanzialisti e relazionalisti, le cui origini risalgono ai tempi di Newton e Leibniz.

Per cercare di dare risposta a questo fondamentale interrogativo, è necessario chiedersi che cosa, all'interno del formalismo della teoria, rappresenta lo spaziotempo. I due principali candidati a svolgere questo ruolo sono il campo tensoriale metrico $g_{\mu\nu}$ e la varietà quadridimensionale, dotata di proprietà topologiche e differenziali, dei punti-evento. Esiste una vasta letteratura sull'argomento che prende in esame entrambe le alternative, ma qui vogliamo far notare come questa incertezza costituisca un serio problema interpretativo della struttura matematica della Relatività Generale e risulti strettamente connesso con

la duplice funzione che il tensore metrico riveste nella teoria (si veda quanto illustrato nel paragrafo 2. a proposito dell'asimmetria contenuta nell'equazione (1)). Ancora prima di analizzare le due posizioni, la prima considerazione che possiamo fare è che, se prima dell'avvento delle teorie di campo la separazione tra materia e spazio era ben marcata, con l'entrata in scena della Relatività Generale tale divisione è divenuta senz'altro più problematica.

Tornando alle due alternative, autori come Tim Maudlin [1988] e Carl Hoefer [1996], sostenendo una posizione che va sotto il nome di *sostanzialismo della metrica*, sono a favore del riconoscimento del campo metrico come migliore candidato a rappresentare lo spaziotempo (posizione questa differente da quella di chi sostiene invece un sostanzialismo della varietà), mentre altri autori privilegiano una posizione di tipo relazionalista, ritenendo più opportuno identificare lo spaziotempo con la varietà. Questa identificazione conduce poi ad un'altra spinosa questione, ampiamente dibattuta nella letteratura filosofico-scientifica, che ha a che fare con l'attribuzione o meno di un'esistenza indipendente ai punti dello spaziotempo rappresentati dalla varietà. Per tentare di salvaguardare la propria posizione, i relazionalisti, non credendo all'esistenza indipendente dei punti dello spaziotempo, si appoggiano a un celebre argomento formulato da Einstein nel 1913, noto con il nome di *hole argument* (argomento del buco), e riportato alla luce da John Stachel [1980]. Per mezzo di tale argomento, come osservano Earman e Norton [1987], è possibile mostrare come la Relatività Generale conduca inevitabilmente a una forma di indeterminatezza se si assume una posizione sostanzialista. Infine, autori come Robert Rynasiewicz [1996] ritengono che la disputa tra sostanzialisti e relazionalisti non abbia

senso nel contesto della Relatività Generale.

Non potendo approfondire in questa sede le varie posizioni (a tal fine si rimanda il lettore ai testi citati in bibliografia), ci limitiamo qui a far presente che la difficoltà interpretativa di fondo di cui abbiamo parlato resta e che non tutti concordano sul fatto che la Relatività Generale sia in grado di porre definitivamente fine all'annosa controversia. In realtà, è possibile intraprendere un altro cammino per cercare di dirimere la questione, ovvero proporre una terza posizione filosofica che sia in grado di conservare i pregi di entrambe le posizioni rivali: il *realismo spaziotemporale di tipo strutturale*. Il primo ad elaborare un'argomentazione a favore di tale nuova posizione, proponendo una risposta all'"Argomento del buco" così come l'avevano formulato Earman e Norton, fu John Stachel [1993].

4.1 Il realismo strutturale

Più che una posizione filosofica in senso stretto, sarebbe opportuno considerare il realismo strutturale una vasta categoria interpretativa attraverso la quale guardare all'intera scienza moderna. Nato come posizione intermedia, "temperata", dalla disputa tra realisti e anti-realisti nei confronti del sapere scientifico, il *realismo strutturale*, elaborato da John Worrall nel 1989, è la forma di realismo scientifico forse più diffusa e apparentemente più facilmente difendibile, dal momento che conserva al suo interno il meglio di entrambe le posizioni rivali. In sostanza, i sostenitori del realismo affermano che il progresso della scienza sarebbe stato frutto di un miracolo se, pur avendo fornito accurate previsioni, le nostre migliori teorie scientifiche fossero state false. Opponendosi a tale visione, gli

anti-realisti sostengono invece che, alla luce delle continue rivoluzioni scientifiche, non possono essere vere le descrizioni del mondo proposte da teorie rivali, proprio per il fatto che ogni cambio di paradigma comporta una drastica revisione dei concetti impiegati e, conseguentemente, dell'immagine del mondo che di volta in volta ne deriva. La proposta di Worrall consiste quindi nel sostenere che, poiché la matematica è un linguaggio basato sull'utilizzo di strutture e la fisica è la scienza che investiga il mondo esterno tramite l'applicazione di tali strutture, risulta allora fondamentale distinguere tra immagini del mondo e strutture matematiche impiegate dalle teorie fisiche. Quando ha luogo una rivoluzione scientifica, osserva Worrall, le immagini del mondo spesso vengono modificate in modo discontinuo, ma - nel passaggio da una vecchia teoria a una nuova - si mantiene però una continuità a livello strutturale che si annida nell'impianto formale delle teorie (in un certo senso, ciò equivale a dire che continuano semplicemente a valere le equazioni che si sanno risolvere). Anche Einstein, che fino alla formulazione della Relatività Generale abbracciò prevalentemente una posizione di realismo ingenuo, si convinse della notevole capacità della matematica di cogliere la struttura fondamentale del mondo esterno. Il carattere geometrico della sua nuova teoria della gravitazione sembra quindi essere indissolubilmente connesso a una forma di realismo strutturale. Anche le riflessioni di Whitehead, Weyl ed Eddington, come illustrato in precedenza, puntano tutte in questa direzione.

In sostanza, il realismo strutturale afferma che le nostre teorie fisiche sono in grado di dirci qualcosa solo in merito alla struttura del "mondo non osservabile", ovvero il mondo popolato dalle nuove entità postulate dalle teorie scientifiche moderne (campi e particelle in modo particolare), ma nulla circa la sua natura. Questa posizione lascia aperto il proble-

ma se sia possibile o meno conoscere la natura ultima delle cose o se si debba piuttosto abbandonare l'idea di oggetto fisico in senso lato. A tal proposito, Ladyman [1998] si chiese se il realismo strutturale di Worrall dovesse essere inteso come un'alternativa metafisica o epistemologica al realismo scientifico tradizionale e, a tal fine, introdusse una fondamentale distinzione: il realismo strutturale può essere inteso in un'accezione *epistemica* oppure *ontica*. La prima asserisce che noi possiamo conoscere solo le relazioni, mentre la conoscenza delle sostanze, comunque esistenti, resta a noi preclusa. La seconda afferma invece che le teorie fisiche garantiscono che le caratteristiche strutturali del mondo sono esse stesse ontologicamente fondamentali. Sebbene si ritenga che il lavoro di Worrall presenti una certa ambiguità rispetto a questa distinzione, è possibile farlo rientrare nella categoria del realismo strutturale epistemico. A questo punto, se la continuità del progresso scientifico riguarda le strutture, sembrerebbe allora sensato non assumere alcun impegno di natura ontologica in merito a oggetti fisici e loro proprietà e spingersi ad affermare che non esistono oggetti fisici ma solo relazioni. Quest'ultima affermazione, come mostrato poco fa, costituisce il cuore della posizione ontica circa il realismo strutturale. E' interessante notare come questa forma di realismo strutturale abbia riscosso parecchio successo soprattutto tra fisici e filosofi della fisica per via del fatto che venne introdotta proprio per tentare di spiegare almeno altre due questioni fondamentali che la fisica moderna aveva messo in luce: se le particelle elementari e i punti dello spaziotempo abbiano o no identità e individualità e quale sia il ruolo dei modelli matematici in fisica. Il realismo strutturale ontico ci consente di comprendere come, alla luce delle moderne teorie fisiche, la natura di spazio, tempo e materia non risulta più compatibile con i tradi-

zionali concetti fondati sul rapporto tra oggetti, proprietà intrinseche e relazioni. In senso lato, il nucleo fondante del realismo strutturale ontico consiste nell'appoggiare una forma di realismo che conferisce priorità ontologica a strutture e relazioni, ma non agli oggetti. Tornando alla Relatività Generale e tenendo presente quanto detto, sembra allora che i problemi legati al realismo dello spaziotempo si presentino quando lo si considera composto da punti dotati di una propria identità e aventi proprietà intrinseche, indipendenti dunque dalla struttura che contribuiscono a generare. In definitiva, come si è accennato in chiusura al paragrafo precedente, il realismo strutturale, calato nel contesto della Relatività Generale, offre una posizione alternativa a quella dei sostanzialisti e dei relazionalisti perchè, da un lato, consente di essere sostanzialisti del campo metrico, dal momento che questa entità permette di identificare i punti della varietà, ma, dall'altro lato, negando al tempo stesso un'identità intrinseca dei punti, non vieta di essere relazionalisti nei confronti della varietà.

BIBLIOGRAFIA

- Afriat, A. (2006). "Einstein e la teoria elettrogravitazionale di Weyl." In V. Fano, F. Minazzi, I. Tassani (Eds.), *Albert Einstein, filosofo e metodologo* (Vol. 4). Protagora.
- Afriat, A. (2009). "How Weyl stumbled across electricity while pursuing mathematical justice." *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 40, 20-25.
- Ainsworth, P. (2010). "What is ontic structural realism?" *Studies in History and*

Philosophy of Modern Physics, 41, 50-57.

- Bergia, S., Franco, A. (2004). *Le strutture dello spaziotempo* (Vol. II). Bologna: Clueb.
- Bollert, K. (1921). *Einstein's Relativitätstheorie und ihre Stellung im System der Gesamterfahrung*. Leipzig: Theodor Steinkopff.
- Boniolo, G., Dorato, M. (1997). "Dalla relatività galileiana alla relatività generale." In G. Boniolo (Ed.), *Filosofia della fisica* (p. 7-157). Milano: Mondadori.
- Bramè, M. (2005). "Dalla metafisica alla fisica: la relatività di Whitehead." *Isonomia*, Urbino.
- Bramè, M. (2006). *L'altra relatività: la fisica di Whitehead*. Retrieved 15/01/2015, from <http://www.secretum-online.it/default.php?idnodo=87>
- Cassirer, E. (1921). *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie*. Berlin: Bruno Cassirer.
- Cassirer, E. (1923-1929). *Filosofia delle forme simboliche*. Firenze: La Nuova Italia.
- D'Inverno, R. (1992). *Introducing Einstein's Relativity*. Oxford: Oxford University Press.
- DiSalle, R. (2006). *Understanding Space-Time. The Philosophical Development of Physics from Newton to Einstein*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dorato, M. (2005). "La filosofia dello spazio e del tempo." In V. Allori, M. Dorato, F. Laudisa, N. Zanghì (Eds.), *La natura delle cose* (p. 109-131). Roma: Carocci.
- Earman, J. (1989). *World enough and Space-Time: Absolute versus Relational Theories of Space and Time*. Cambridge (MA): The MIT Press.
- Earman, J., Norton, J. (1987). "What price spacetime substantivalism? The Hole Story." *British J. of Philosophy of Science*, 38, 515-525.

- Einstein, A. (1922). *The Meaning of Relativity*. Princeton: Princeton University Press.
- Giacomini, U. (1975). “Esame delle discussioni filosofico-scientifiche sulla teoria della relatività.” In L. Geymonat (Ed.), *Storia del pensiero filosofico e scientifico* (Vol. VI). Milano: Garzanti.
- Giannetto, E. (1994). “Note sull’interpretazione della Relatività Generale di Arthur Stanley Eddington.” In F. Bevilacqua (Ed.), *Atti del XII Congresso Nazionale di Storia della Fisica* (p. 121-135). Pavia: Goliardica Pavese.
- Hartle, J. (2003). *Gravity. An introduction to Einstein’s General Relativity*. San Francisco: Addison Wesley.
- Hoefer, C. (1996). “The Metaphysics of Space-Time Substantivalism.” *Journal of Philosophy*, 93, 5-27.
- Ladyman, J. (1998). “What is structural realism?” *Studies in the History and Philosophy of Science*, 29(3), 409-424.
- Macchia, G. (2006). “L’Argomento del buco di Einstein. Il recente dibattito sull’ontologia dello spaziotempo.” *Isonomia, Urbino*.
- Maudlin, T. (1988). “The Essence of Space-Time.” In A. Fine J. Leplin (Eds.), *Philosophy of Science Association 1988* (Vol. II, p. 82-91). Michigan: East Lansing.
- Oliveri, R. (2008). *La teoria della relatività e le sue interpretazioni filosofiche*. Imperia: Ennepilibri.
- Pauri, M. (1996). “Realtà e oggettività.” In F. Angeli (Ed.), *L’oggettività nella conoscenza scientifica* (p. 79-112). Milano.
- Polizzi, G. (2009). *Einstein e i filosofi*. Milano: Medusa.

- Reichenbach, H. (1920). *Relatività e conoscenza a priori*. Bari: Universale Laterza.
- Reichenbach, H. (1924). *Axiomatik der relativistischen Raum-Zeit-Lehre*. Vieweg:
Braunschweig.
- Reichenbach, H. (1928). *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*. Berlin: Walter de Gruyter.
- Rovelli, C. (2014). *Sette brevi lezioni di fisica*. Milano: Adelphi.
- Russell, B. (1926). “Relativity: Philosophical Consequences.” In *Encyclopedia britannica* (Vol. 31, p. 331-332). London and New York.
- Ryckman, T. (2005). *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics 1915-1925*. New York: Oxford University Press.
- Ryckman, T. (2014). “Early Philosophical Interpretations of General Relativity.” In E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*.
- Rynasiewicz, R. (1996). “Absolute versus Relational Space-Time: an outmoded debate?” *Journal of Philosophy*, 93, 279-306.
- Stachel, J. (1980). “Einstein’s Search for General Covariance, 1912- 1915.” In *Ninth International Conference on General Relativity and Gravitation*. Jena.
- Stachel, J. (1993). “The Meaning of General Covariance.” In J. Earman, A. Janis, G. Massey, N. Rescher (Eds.), *Philosophical Problems of the Internal and the External World* (p. 129-160). Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.

APhEx.it è un periodico elettronico, registrazione n° ISSN 2036-9972. Il copyright degli articoli è libero. Chiunque può riprodurli. Unica condizione: mettere in evidenza che il testo riprodotto è tratto da www.aphex.it

Condizioni per riprodurre i materiali → Tutti i materiali, i dati e le informazioni pubblicati all'interno di questo sito web sono "no copyright", nel senso che possono essere riprodotti, modificati, distribuiti, trasmessi, ripubblicati o in altro modo utilizzati, in tutto o in parte, senza il preventivo consenso di APhEx.it, a condizione che tali utilizzazioni avvengano per finalità di uso personale, studio, ricerca o comunque non commerciali e che sia citata la fonte attraverso la seguente dicitura, impressa in caratteri ben visibili: "www.aphex.it". Ove i materiali, dati o informazioni siano utilizzati in forma digitale, la citazione della fonte dovrà essere effettuata in modo da consentire un collegamento ipertestuale (link) alla home page www.aphex.it o alla pagina dalla quale i materiali, dati o informazioni sono tratti. In ogni caso, dell'avvenuta riproduzione, in forma analogica o digitale, dei materiali tratti da www.aphex.it dovrà essere data tempestiva comunicazione al seguente indirizzo (redazione@aphex.it), allegando, laddove possibile, copia elettronica dell'articolo in cui i materiali sono stati riprodotti.

In caso di citazione su materiale cartaceo è possibile citare il materiale pubblicato su APhEx.it come una rivista cartacea, indicando il numero in cui è stato pubblicato l'articolo e l'anno di pubblicazione riportato anche nell'intestazione del pdf. Esempio: Autore, *Titolo*, «www.aphex.it», 1 (2010).