

Marcella Palese¹, Raffaele Palese²

IL CONCETTO DI CAMPO COME ELEMENTO IRRIDUCIBILE DELLA DESCRIZIONE FISICA IN RELATIVITÀ GENERALE³

ABSTRACT

In this paper we will give a relational interpretation of the identification between geometrical and physical structures. The denial of an absolute space-time separate from physical objects, together with the causality principle, implies a relational outlook of motion.

Being a geometrical theory of gravitational field (which is the metric structure of space-time), unlike previous relational theories of motion, General Relativity is based on the concept of *field* as an irreducible element of physical description and as a propagator of causal connections with a finite velocity. The replacement of the concept of material object by such a concept of field is crucial moment in the overcoming of classical newtonian mechanics, for the success of a completely relational outlook of motion.

RIASSUNTO

In questo lavoro vogliamo dare un'interpretazione relazionale dell'identificazione tra strutture geometriche e strutture fisiche. La negazione di uno spazio-tempo assoluto e distinto dagli oggetti fisici, unitamente al principio di causalità, comporta una visione relazionale del moto.

La Relatività Generale, essendo una teoria geometrica del campo gravitazionale (che coincide con la struttura metrica dello spazio-tempo), a differenza di precedenti teorie di tipo relazionale, si basa sul concetto di *campo* come elemento irriducibile della descrizione fisica e come propagatore delle connessioni causali con velocità finita. La sostituzione del concetto di oggetto materiale con tale concetto di campo rappresenta un momento cruciale nel superamento della meccanica classica newtoniana e nell'affermazione di una visione completamente relazionale del moto.

1. Introduzione

La compenetrazione tra Geometria e Fisica è uno dei risultati più importanti nella storia recente della Scienza e, implicando una caratterizzazione del concetto di campo come elemento irriducibile della descrizione fisica, comporta una concezione del mondo fisico di tipo relazionale, sulla quale peraltro si basano le più recenti ricerche circa la gravità quantistica [25].

D'altra parte, l'idea di relazione spazio-temporale risulta intimamente legata con la concatenazione causale del mondo, in quanto ciò che avviene prima può influire su ciò che avviene dopo, ma non può accadere il contrario; in questo modo la nozione di prima e dopo può essere basata su una relazione causa-effetto.

Indicheremo con connessione causale, il rapporto tra causa ed effetto in generale; principio causale o di causalità, l'enunciazione della legge causale in generale, cioè una forma del tipo: "la stessa causa produce lo stesso effetto"; determinismo causale, o spesso solo causalità, la dottrina che afferma l'universalità del principio causale. Quindi, mentre il principio causale enuncia la forma della connessione causale, il determinismo causale sostiene che tutto accade in base alla legge causale. Il principio di causalità, pur essendo una forma

¹ Dipartimento di Matematica dell'Università Via C. Alberto 10 - 10123, Torino

² Dipartimento di Fisica dell'Università Via per Arnesano - 73100, Lecce

* Questo lavoro è stato parzialmente finanziato da GNFM del CNR e MURST, Università di Torino.

ristretta del principio del determinismo, essendo un presupposto della ricerca scientifica e non una semplice ipotesi metafisica, fa parte del motore filosofico della ricerca scientifica stessa (si veda ad esempio [2] e [19]).

2. Teorie relazionali pre-relativistiche

La prima e più sistematica codificazione del termine causale risale ad Aristotele [1], il quale elaborò le idee di Platone [21] relative alla causalità. Come è noto, la dottrina aristotelica delle cause durò fino al rinascimento, dopo il quale venne considerata degna d'indagine scientifica la sola causa efficiente. Tuttavia il concetto di causa inteso come nozione di agente attivo col quale un soggetto manifesta un potere, benché sia stato una parte vitale della fisica del seicento e settecento, ha visto declinare la sua importanza nell'ottocento ed è praticamente scomparso nel novecento.

Nella scienza contemporanea, la struttura della spiegazione fisica ha assunto una notevole somiglianza con quella che Aristotele aveva sviluppato nella sua analisi delle cause formali (che costituivano l'idea o le qualità della cosa considerata), deducendo certi effetti da un certo numero di proprietà specifiche con le quali la spiegazione ha a che fare. Passando dai modelli meccanici ai modelli matematici o di *campo*, la causa in fisica ha assunto il significato più generale di spiegazione di un evento.

La Fisica di Aristotele non propone una teoria dello spazio, ma solo una teoria del luogo inteso come topos, concepito come quella parte di spazio i cui limiti coincidono con i limiti del corpo che lo occupa. In Aristotele, l'introduzione del concetto di luogo è necessaria per spiegare il movimento; infatti, se esiste il moto, ciò significa che c'è una variazione di luogo, per questo l'esistenza del luogo risulta chiara dall'esistenza dello spostamento reciproco dei corpi. Per Aristotele, il luogo ha una forte connotazione qualitativa, esso non è solo un contenitore passivo, ma "segna" lo spazio secondo la sua specifica affinità e ricettività, di modo che ogni categoria di corpi tende al proprio luogo. La Fisica aristotelica può essere dunque pensata come una teoria della posizione reciproca dei luoghi nello spazio.

Da quanto detto si evince che lo spazio della Filosofia e della Scienza classica greca era concepito come non omogeneo a causa della sua variabilità geometrica locale, e come anisotropo per l'esistenza in esso di direzioni differenziate (si veda ad esempio [14]). In Aristotele il concetto di tempo è strettamente legato a quello di movimento o di cambiamento. Il tempo determina il movimento, essendo il numero di esso, ma il movimento determina a sua volta il tempo, poiché il tempo è dovuto alla percezione di una relazione d'ordine relativa al movimento (si veda [19]).

Elaborando la concezione aristotelica dello spazio come *accidens* della materia, Descartes costruisce la sua teoria dello spazio identificando questo con la materia [4], la cui natura consiste nel suo essere *res extensa in longum, latum et profundum* [5]. Lo spazio è dunque estensione, e la quiete od il moto, che rende conto di tutte le diversità di forma della materia, sono un attributo di questa. Geometria e Fisica, allora, si distinguono solo per il fatto che, mentre la Geometria studia le proprietà della materia in quiete, la Fisica è la scienza che studia lo spazio in movimento, cioè le relazioni tra i corpi (concepiti come corpi estesi) al variare del tempo [14]. La struttura metrica dello spazio, in questo modo, diviene la struttura stessa della realtà. L'estensione è la proprietà intrinseca della materia e la determinazione spaziale è alla base della conoscenza, poiché lo spazio è entità matematica, fisica e gnoseologica [15].

Questa identificazione tra materia ed estensione permea lo sviluppo di tutta la Fisica cartesiana, facendone, per quanto appena detto, una teoria del moto di tipo relazionale [11]. Il moto, infatti, essendo uno stato della materia (o, se si vuole, dello spazio), secondo la filosofia meccanica cartesiana (*Meditationes*

de Prima Philosophia (1641), Principia (1644)) è concepito come *locale e relativo* e consiste semplicemente nel trasferimento di materia dalle vicinanze di un corpo pensato in quiete nelle vicinanze di un altro corpo: "translationem unius partis materiae, sive unius corporis, ex vicinia eorum corporum, quae illud immediate contingunt et tanquam quiescentia spectantur, in viciniam aliorum" [6]. Per Descartes il moto dipende essenzialmente dalle caratteristiche locali dello spazio, ovvero dalla distribuzione locale della materia, che meccanicamente trasmette il moto. Il moto di un corpo è concepito sempre come moto di una porzione di spazio e non come moto in uno spazio; la posizione di un corpo si può determinare solo in *relazione* ad altri corpi e dire che un corpo si muove significa dire che le relazioni con altri corpi cambiano nel tempo. La causa del moto della materia è il *conatus* pensato come una generale tendenza al movimento (di origine metafisica) determinata o influenzata dalla distribuzione locale della materia (quantità di materia). Non è possibile considerare il moto di un corpo se non in vicinanza di altra materia che ne influenza il moto.

L'esistenza di uno spazio vuoto in cui non ci sia assolutamente nulla viene negata, poiché dovunque ci sia estensione ci deve anche essere materia e movimento. In questo modo Descartes concepisce la *continuità come principio fisico per la propagazione del moto attraverso lo spazio*, un'idea che avrebbe permeato la scienza contemporanea, trasformandosi nel nuovo concetto di campo fisico.

Con Newton [18] si afferma una concezione completamente differente del moto: lo spazio geometrico viene *separato* dallo spazio fisico, formulando una teoria dello spazio assoluto e del moto assoluto (cioè del moto riferito allo spazio assoluto). Questo significa che, per Newton, i corpi di riferimento di cui parlava Descartes nei Principia non devono solo essere pensati come se fossero in quiete, ma devono essere realmente in quiete. Una tale teoria necessita, per giustificare il moto, dei nuovi concetti di *massa* e di *forza*, a cui Newton attribuisce significati profondamente differenti dai concetti cartesiani di quantità di materia e di conatus. La proprietà caratteristica della materia non è infatti l'estensione, ma la massa; le proprietà del moto non si riferiscono alle proprietà dello spazio né alla distribuzione di materia nello spazio, ma alla presenza di forze, dotate di un carattere ontologico [15]. A questo proposito lo stesso Einstein osservava che in Newton "non solo lo spazio è introdotto come una cosa indipendente dagli oggetti materiali, ma gli viene anche assegnato un ruolo assoluto nell'intera struttura causale della teoria. Questo ruolo è assoluto nel senso che lo spazio (in quanto sistema inerziale) agisce su tutti gli oggetti materiali, mentre questi, a loro volta, non esercitano alcuna reazione sullo spazio" [7].

Tuttavia, critiche che si rifacevano alla concezione cartesiana del moto come locale e relativo (si veda, ad esempio, [14], [12]), furono mosse tra gli altri da Huygens e Leibniz ai concetti newtoniani di spazio e moto assoluto. In particolare, in Leibniz si trova un'importante anticipazione riguardante la natura causale dell'ordinamento spazio-temporale della relatività einsteiniana: la nozione di tempo precede, nella costruzione di un sistema filosofico, quella di spazio; la direzione del flusso del tempo viene determinata dalla interconnessione causale dei fenomeni [19]. Lo stesso Einstein riconobbe che "il successivo [ndr: alla meccanica classica] sviluppo dei problemi, procedendo in un modo obliquo che nessuno allora aveva la possibilità di prevedere, ha mostrato che la resistenza di Leibniz e Huygens, intuitivamente corretta, ma sostenuta da argomenti inadeguati, era realmente giustificata" [7].

Nello spirito di Leibniz, ogni concetto ed ogni struttura in una teoria fisica devono essere definiti in termini di relazioni tra elementi fisici. Nessuna struttura può essere data indipendentemente dalle relazioni fisiche. Appare dunque evidente che una concezione relazionale dello spazio-tempo implica che la struttura geometrica fondamentale debba essere la metrica [15].

3. Il concetto di campo

In questa sezione, e nella successiva, vogliamo far vedere come il concetto di campo quale elemento irriducibile della descrizione fisica sia la conseguenza dell'assunzione di due principi fisici fondamentali, che vengono formulati nel tentativo di descrivere con in maniera unitaria la gravitazione e l'elettromagnetismo: il *Principio di Relatività* ed il *Principio di Equivalenza* o di *Covarianza Generale*.

Il superamento del punto di vista newtoniano si ebbe con uno sviluppo che, apparentemente, era estraneo al problema dello spazio-tempo: il concetto di campo che ha la definitiva pretesa di sostituire il concetto di particella come punto materiale e con esso quello di forza agente a distanza. Nella fisica classica il campo era un concetto ausiliario per trattare la materia come un continuo: il campo era pensato come stato suscettibile di interpretazione meccanica, che presupponeva la presenza di materia. L'emancipazione del concetto di campo dalla sua associazione ad un veicolo materiale costituisce una delle svolte fondamentali nello sviluppo del pensiero scientifico. La tesi che qui sosteniamo è che il concetto di campo, come noi oggi lo intendiamo, è il "collasso" di due concetti fondamentali: quello di spazio-tempo e quello di materia, collasso che si esplica nella identificazione tra strutture geometriche e strutture fisiche.

Il concetto di etere classico, come necessità teorica relativa alla descrizione di un campo, riflette l'impossibilità di considerare il campo come proprietà intrinseca dello spazio: il campo è ancora uno stato dinamico dell'etere e non un mezzo attivo, che trasmetta le azioni causali. Il superamento di questo concetto si realizza pienamente solo nella teoria della Relatività Generale. L'emancipazione del concetto di campo da questi presupposti prende le mosse dalle esperienze di Faraday sull'elettricità ed il magnetismo [10]. Faraday concepisce le particelle cariche come singolarità di un continuum dove tutte le interazioni si propagano senza che tra i punti esista qualcosa di inerte rispetto alla propagazione. Si ha dunque un passaggio da azione a distanza in uno spazio vuoto inteso come costruito geometrico ad azione per contatto che si propaga con velocità finita in un mezzo dotato di proprietà fisiche. Il continuum è un mezzo attivo con singolarità puntiformi, è la "fusione" di materia e spazio. Le linee di forza sono espressione fisica di un plenum di potenze che riempie tutto lo spazio. In particolare, il tempo che deve essere riferito alla propagazione della luce, non può essere distinto dalle interazioni.

Nella stessa prospettiva, Maxwell [16] utilizza un modello idrodinamico (quindi continuo) per le interazioni elettriche e magnetiche: il campo deve essere posto in relazione con lo spazio, con la materia, con l'etere; non c'è una materia in movimento, ma il movimento nella materia: [...] "come non c'è niente che consenta di distinguere una parte di tempo da un'altra eccetto i diversi eventi che accadono in essa, così non c'è niente che consenta di distinguere una parte dello spazio da un'altra eccetto la loro relazione al luogo dei corpi materiali. Non possiamo descrivere il tempo di un evento altro che in riferimento a qualche altro evento, o luogo di un corpo altro che in riferimento a qualche altro corpo. Tutta la nostra conoscenza è assolutamente relativa". Hertz [13], che formalizza i risultati di Maxwell, riconosce per primo la specificità del carattere rivoluzionario di una concezione dei fenomeni elettromagnetici basata sul concetto di campo. Alla base della sua teoria elettrodinamica vi è una concezione macroscopica della completa unità tra etere e materia, concepiti come modificazioni di un'unica sostanza: il campo. Le equazioni di Maxwell implicano un tempo finito di propagazione delle perturbazioni e quindi un tempo finito per la propagazione di azione e reazione, che non si possono comunicare simultaneamente. Questo implica che la causalità (in Newton determinata dall'interazione tra forze, consentendo la definizione assoluta della simultaneità tra eventi distanti) ora è determinata dal campo, che la propaga con velocità finita. Poincaré [22] affronta in maniera chiara il problema del principio di azione e reazione in relazione al problema della

simultaneità. Egli definisce il tempo locale in modo operativo, dandogli un preciso significato fisico, cioè collegandolo ad una effettiva procedura di sincronizzazione. Il suo merito fondamentale è stato quello di avere per primo enunciato il *principio di relatività*, ovvero l'invarianza di tutte le leggi fisiche rispetto ad un riferimento inerziale.

Come per primo nota Einstein nel famoso lavoro del 1905 [8], l'assunzione lorentziana di un etere come supporto sostanziale del campo implicava una asimmetria tra forza elettromotrice e campo elettrico nell'interpretazione dell'effetto di induzione magnetica. Mettendo insieme il principio di relatività ed il postulato di invarianza della velocità della luce, Einstein fonda l'elettrodinamica dei corpi in movimento sulla teoria elettromagnetica di Maxwell-Hertz. La formalizzazione di Minkowski [17] con la rappresentazione del cono luce (espressione della struttura conforme della teoria) evidenzia il carattere relativo della simultaneità, il carattere limite della velocità della luce ed i rapporti con il concetto di causalità. Due eventi possono essere legati da una relazione causa-effetto solo se il loro intervallo è di tipo tempo, conseguenza, questa, della impossibilità per le interazioni di propagarsi con velocità maggiore di quella della luce.

La definizione einsteiniana di simultaneità (relativa) tra eventi distanti si basa sulla concezione maxwelliana di campo, che implica il carattere limite della velocità di propagazione dell'azione causale. In altre parole, viene meno il carattere assoluto della simultaneità, basato sulla presupposizione che tra due eventi, situati in luoghi diversi, fosse possibile stabilire una assoluta relazione di connessione temporale e che si appoggiava sull'esistenza di una connessione causale istantanea tra eventi. Il campo come elemento irriducibile della teoria diventa lo strumento atto a giustificare la validità del *principio di relatività* per tutte le leggi fisiche: al concetto di etere in quiete assoluta, secondo Einstein, non corrisponde nessuna proprietà dei fenomeni, né in meccanica, né in elettrodinamica.

I postulati di base della relatività ristretta implicano una definizione di intervallo (metrico) invariante. Questa struttura conforme della teoria si ritroverà in Relatività Generale nella forma di struttura localmente conforme. Nel suo articolo del 1916 [9] Einstein afferma che non esiste, in presenza di un campo gravitazionale, un riferimento inerziale (lorentziano) globale. Il *principio di equivalenza* che vi viene formulato significa in poche parole che lo spazio-tempo è una varietà di Minkowski con metrica iperbolica solo localmente.

Il principio di equivalenza implica che in un certo sistema di riferimento (locale), una variazione cinematica (l'accelerazione) modifica o annulla la gravità che è una proprietà dinamica. Questo equivale a dire in termini matematici che è possibile trovare un sistema di coordinate in cui la curvatura dello spazio-tempo si annulla e la connessione metrica è integrabile. *La cinematica è dunque interpretabile come una geometria quadridimensionale e la gravitazione come una geometria intrinseca* (le dinamiche sono moti geodetici) dello spazio-tempo considerato.

Secondo Einstein la soluzione del problema riguardante l'inerzia e la distribuzione delle masse, doveva essere sviluppata nella teoria dell'azione in termini di campo (e non come interazione a distanza tra masse), considerando quelle proprietà del continuo spazio-temporale che determinano l'inerzia come proprietà di campo dello spazio. Lo spazio cioè si doveva concepire capace di interazioni dinamiche con il sistema della distribuzione della materia, considerato più propriamente fisico. *Il principio di relatività veniva così generalizzato all'interno di una teoria di campo.*

4. La Geometria di Riemann ed il suo rapporto con la Relatività Generale

Un ruolo determinante nello sviluppo della geometria intrinseca delle varietà fu svolto da Riemann, il quale, generalizzando la teoria gaussiana delle superfici, nella sua nota prolusione "Sulle ipotesi che giacciono alla base della geometria" (1854), fu indotto ad introdurre il concetto di curvatura di una varietà multidimensionale, gettando così le basi della geometria differenziale moderna.

Riemann afferma: "if this independence of bodies from position does not exist, we cannot draw conclusion from metric relation of the great to those of the infinitely small; in that case the curvature at each point may have an arbitrary value in three directions, provided that the total curvature of every measurable portion of space does not differ sensibly from zero" [24]. Come lo stesso Pauli ha osservato [20], questa intuizione di Riemann avrebbe permesso, nel secolo successivo, disponendo del corretto concetto di spazio-tempo, di geometrizzare i fenomeni fisici.

L'idea fondamentale di Riemann era la non omogeneità dello spazio (una idea aristotelica, come lo stesso Einstein ha osservato in [7]), cioè il fatto che la struttura metrica dello spazio si può pensare determinata dalla distribuzione della materia: "The question of the validity of the hypotheses of geometry in the infinitely small is bound up with the question of the ground of the metric relations of space. In this last question, which we may still regard as belonging to the doctrine of space, is found the application of remark made above; that in a discrete manifoldness, the ground of its metrics relation is given in the notion of it, while in a continuous manifoldness, this ground must come from outside. Either therefore the reality which underlies space must form a discrete manifold, or we must seek the ground of its metric relations outside it, in binding forces which act upon it" [24]. In un certo senso, Riemann afferma la necessità per una varietà continua di una "geometria dinamica", in cui l'assegnazione di una metrica su una varietà comporta l'introduzione di informazioni di tipo dinamico, precorrendo in tal modo l'idea einsteiniana che la presenza di materia nell'Universo ne deve necessariamente influenzare la curvatura. Già Clifford, rendendosi interprete delle idee riemanniane, identificava la variazione della curvatura nel tempo con ciò che chiamiamo moto della materia: "Questo variare della curvatura col tempo può produrre effetti che noi solitamente attribuiamo a cause fisiche indipendenti dalla geometria del nostro spazio" [3].

Come anche sottolineato da Lanczos, per capire il ruolo del calcolo differenziale assoluto e della geometria riemanniana nella Relatività Generale il principio di equivalenza è di fondamentale importanza. Poiché esso riconosce la gravitazione come un fenomeno puramente geometrico, se ne evince la natura relazionale della teoria, essendo questa una conseguenza della dinamicizzazione delle strutture geometriche.

La Geometria Riemanniana, essendo una geometria del continuo, traduce l'idea leibniziana (che lo stesso Descartes aveva mediato dalla scolastica) del principio di continuità, secondo cui le leggi fisiche devono essere formulate come leggi di campo e non come azioni a distanza. "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. [...] non esiste alcuno spazio vuoto, cioè non esiste nessuno spazio senza un campo" [7]. La metrica è fisicamente, come pure geometricamente, la più importante struttura che caratterizza lo spazio-tempo e la nozione di causalità è interamente dipendente da questa struttura.

Prima della Relatività Generale, la descrizione fisica usava lo spazio-tempo come una struttura puntuale nel senso che la descrizione delle leggi fisiche consisteva nell'assegnazione dei valori delle variabili di campo a tutti gli eventi dello spazio-tempo e nella descrizione del loro comportamento. Tale comportamento non aveva alcuna interazione con lo spazio-tempo che gli era di supporto. Conseguentemente, la struttura locale dello spazio-tempo non giocava un ruolo importante nella descrizione della fisica: i campi non emergevano dalla

struttura dello spazio-tempo, piuttosto erano imposti come strutture addizionali per descrivere le leggi della natura.

In Relatività Generale, invece, la struttura locale dello spazio-tempo genera il campo gravitazionale. Esso non è più imposto come una struttura tensoriale assegnata agli eventi dello spazio-tempo dal di fuori, ma deriva invece dalla sua struttura metrica locale.

5. Conclusioni

Nella teoria della Relatività Ristretta di Einstein, l'equivalenza fisica di tutti i sistemi inerziali comporta l'insostenibilità dell'ipotesi di un etere in quiete; diviene pertanto necessario abbandonare l'idea che il campo elettromagnetico sia considerato come stato di un veicolo materiale: il campo diventa così un elemento irriducibile della descrizione fisica. Il risultato essenziale della teoria della Relatività Generale consiste, in aggiunta, nell'aver liberato la Fisica dalla necessità di introdurre i sistemi inerziali.

Con l'introduzione del principio di equivalenza e del principio di covarianza generale, infatti, il concetto di sistema inerziale perde il suo significato oggettivo: le leggi naturali devono risultare *covarianti* rispetto a trasformazioni continue arbitrarie delle coordinate. In questo modo all'assoluto costituito dal continuo spazio-temporale si sostituisce uno spazio-tempo variabile da punto a punto e da istante ad istante, determinato dalla distribuzione della materia; all'assolutezza delle misure a riposo di lunghezza e di tempo della Relatività Ristretta si sostituisce la variabilità locale delle misure, in condizioni di quiete determinata dalla variabilità del campo gravitazionale, condizione dell'equivalenza di tutti i possibili sistemi di riferimento. All'azione istantanea della teoria della gravitazione newtoniana viene sostituito in Relatività Generale un campo gravitazionale con velocità di propagazione delle interazioni finita. Assumendo il campo come concetto autonomo e fondamentale delle interazioni, si cerca in tal modo di superare il *dualismo tra materia e gravitazione*, riducendo ad un'unica causa le leggi del moto.

Emerge dunque un nucleo profondamente relazionale della Relatività Generale. La localizzazione spaziale e temporale è definita in termini di contiguità tra oggetti dinamici interagenti. Il moto non è altro che un cambiamento di contiguità. Da questo punto di vista la Relatività Generale porta alle estreme conseguenze il programma tardo cartesiano e leibniziano di una definizione completamente relazionale del moto, che elimina la nozione stessa di spazio (perché non necessaria alla descrizione dei fenomeni). Non ha più senso infatti parlare di *tempo durante il quale le dinamiche si svolgono*, né di *spazio in cui le dinamiche hanno luogo*. La Relatività Generale afferma l'identificazione tra spazio-tempo, che è una varietà metrica e dunque un'entità non dinamica, e la materia, che soggiace ed equazioni differenziali ed è dunque un'entità dinamica, stabilendo in tal modo la *non separabilità tra spazio-tempo e materia*. Le conseguenze di questo punto di vista sono la perdita del significato fisico delle coordinate spazio-temporali e la necessità di scrivere le equazioni di campo in termini di oggetti geometrici (tensori) le cui leggi di trasformazione per cambiamenti di coordinate ne garantiscano la covarianza e di cui sia possibile dare una definizione intrinseca (ovvero indipendente dal sistema di coordinate scelto) [25]. Questa perdita di significato fisico delle coordinate attribuisce un ruolo fondamentale al concetto di campo: *non c'è più né spazio né materia, ma solo campi*. In un certo senso il concetto di *campo fisico* è la soluzione moderna della dualità presente ed irrisolta nella cartesiana *res extensa*, espressione particolarmente felice, poiché racchiude in sé un termine fisico e materiale (*res*) ed un termine geometrico o, se si vuole, metrico (*extensa*).

Dal punto di vista della Storia della Filosofia della Scienza, in definitiva, la Relatività Generale rappresenta l'abbandono dei concetti di spazio, tempo e causalità come conoscenze sintetiche a priori. In Relatività Ristretta le misure

spaziali sono riducibili a misure temporali, di modo che il tempo risulti logicamente prioritario rispetto allo spazio. Inoltre la geometria naturale dei raggi luminosi costituisce al tempo stesso la geometria degli orologi e dei regoli rigidi, al punto che il principio del carattere limite della velocità della luce porta a considerare l'onda elettromagnetica come archetipo della propagazione causale. La catena causale è l'elemento topologico fondamentale dell'ordinamento temporale, e di conseguenza dell'ordinamento spaziale, poiché dire che un punto dello spazio è più lontano equivale a dire che la propagazione causale impiega più tempo per raggiungerlo. Il fatto poi che, in Relatività Generale il tensore metrico definisca una struttura conforme solo localmente, in virtù del principio di equivalenza, comporta la possibilità di dare un senso solo al concetto di *causalità locale*, poiché in ogni punto della varietà metrica con segnatura lorentziana, descrivente il campo gravitazionale, lo spazio tangente contiene una distribuzione di coni di luce che definiscono la connessione causale. Come anche Reichenbach [23] ha osservato, l'ordinamento delle catene causali rappresenta le proprietà topologiche dello spazio-tempo. Dalle considerazioni che abbiamo fatto sulla natura relazionale della teoria relativistica della gravitazione, tali proprietà topologiche sono modificate dalle *relazioni tra campi in interazione* ed, in un certo senso, ci richiamano il significato dinamico del *topos* aristotelico.

6. Ringraziamenti

Gli autori esprimono un ringraziamento ai Professori M. Ferraris, M. Francaviglia ed A. Rossi per le interessanti discussioni e gli utili suggerimenti.

7. Bibliografia

- [1] Aristotele, Opere, Laterza, 1987
- [2] F. Bevilacqua, P. Tucci, Aspetti dello sviluppo dei concetti di spazio e di tempo dalla fisica prerelativistica alla Relatività Generale, Quaderni di Storia e Critica della Scienza n. 4, Domus Galileiana, 1974, 247-454
- [3] W.K. Clifford, The common sense of the exact sciences (1870)
- [4] Per lo studio dei fondamenti epistemologici della fisica di Descartes ed in particolare sull'identità di spazio ed estensione si veda E. Cassirer, in Storia della filosofia moderna, Il Saggiatore, Milano (1968)
- [5] R. Descartes, Principia, A.T., VIII, p. 42
- [6] R. Descartes, Principia, A.T., VIII, p.53
- [7] A. Einstein, Prefazione a: M. Jammer, Concepts of Space. The History of Theories of Space in Physics, Harvard University Press, Cambridge, Mass. (1954)
- [8] A. Einstein, On the electrodynamics of moving bodies, in The collected papers of A. Einstein, John Stache Editor (1989) pp.276-295
- [9] A. Einstein, Ann. der Physik 49, 769, 1916; vedi anche in: The collected papers of A. Einstein, John Stache Editor (1989)
- [10] Faraday, in E. Bellone, Spazio e tempo nella nuova scienza, La Nuova Italia Scientifica p. 53 (1994)
- [11] M. Francaviglia, M. Palese, Geometria e Fisica da Descartes ad Einstein, Quaderni del Dipartimento di Matematica, Università di Torino, n. 22, maggio 1998
- [12] E. Giannetto, Descartes, Huygens, Leibniz e le alternative alla fisica newtoniana, apparirà in Atti del Convegno Int. Descartes and the Scientific Thought (Perugia 1996)
- [13] H. Hertz, Electric waves, Dover Publications Inc. (1962)
- [14] M. Jammer, Concepts of Space. The History of Theories of Space in Physics, Harvard University Press, Cambridge, Mass. (1954)
- [15] M. Mamiani, Teorie dello spazio da Descartes a Newton, Pubbl. dell'Ist. di Filosofia, Univ. di Parma, Franco Angeli ed. (1979)
- [16] J. C. Maxwell, Trattato di elettricità e magnetismo, UTET (1973)

- [17] H. Minkowski, Space and time, in *The principle of relativity* A. Einstein, H.A. Lorentz, H. Minkowski, H. Weyl, Dover Publications Inc. (1952)
- [18] I. Newton, *Principi matematici*, UTET, 1975
- [19] R. Palese, *Spazio, Tempo e Causalità nella Storia della Fisica*, Tesi di Laurea, Lecce, 1996
- [20] W. Pauli, *Theory of Relativity*, Pergamon Press (1967), p. 149
- [21] Platone, *Timeo*, in: *Platone, opere complete*, Laterza, 1988
- [22] J.H. Poincaré, *Scritti di Fisica Matematica*, UTET, 1995, 435-437
- [23] H. Reichenbach, *Filosofia dello spazio e del tempo*, Feltrinelli (1977)
- [24] G.F.B. Riemann, *On the Hypotheses which lie at the Bases of Geometry* (1866), traduzione inglese da *Nature*, Vol.VIII, n. 183, 184
- [25] C. Rovelli, *Half way through the woods*, in *The Cosmos of Science*, J. Earman and J.D. Norton eds., University of Pittsburgh Press: Universitaets Verlag Konstanz (1997)

