

2006 Istituto di Filosofia Arturo Massolo
Università di Urbino
Isonomia



L'Argomento del Buco di Einstein **Il recente dibattito sull'ontologia dello spaziotempo***

Giovanni Macchia

lucbian@hotmail.com

Abstract

This paper tries to set off the main features that the debate on the ontological nature of spacetime has produced since 1987, when John Earman and John Norton animated the discussion renewing and extending epistemologically the Albert Einstein's original *Hole Argument*. This matter – that, around 1913, raised deep conceptual problems for Einstein in his early development of General Relativity – from philosophical viewpoint deals with the manifold spacetime substantivalism that leads to a radical form of indeterminateness for theories with generally covariant field equations. But, while the traditional debate about the substantival or relational nature of spacetime tries to resolve the Hole Argument, new structural realist interpretations of spacetime theories are rising on the ontological horizon.

*Ringrazio il Prof. Vincenzo Fano per i commenti, e Antonello Bocchino e Giorgio Boccia per le peripezie informatiche.

[...] Because I know that time is always time
 And place is always and only place
 And what is actual is actual only for one time
 And only for one place [...]
 T. S. Eliot¹

Il 2 novembre del 1913 Albert Einstein scrive all'amico Ludwig Hopf:

Sono ora molto contento della teoria della gravitazione. Il fatto che le equazioni gravitazionali non siano generalmente covarianti, cosa che, ancora fino a poco tempo fa, mi disturbava così tanto, si dimostra inevitabile; si prova facilmente che una teoria con equazioni generalmente covarianti non può esistere se si richiede che il campo sia matematicamente completamente determinato dalla materia.²

La dimostrazione di cui egli parla è proprio *l'argomento del buco* (*Lochbetrachtung*), ed è a questo periodo, o in ogni caso a un periodo di poco precedente, che se ne può fare risalire la nascita³.

Come si evince da queste poche righe, Einstein era stato fino allora convinto della necessità di trovare una teoria relativistica della gravitazione – quella che diventerà poi nota, a partire dalla sua pubblicazione nel 1916, col nome di Relatività Generale (RG) – che fosse generalmente covariante, le cui equazioni, in altri termini, restassero invarianti sotto arbitrarie trasformazioni delle coordinate dello spaziotempo. La comparsa di ostacoli al momento insuperabili lo fece retrocedere, temporaneamente, da questa direzione, e l'argomento del buco fu una sorta di suggello al suo ripensamento, motivato dal fatto che una teoria generalmente covariante avrebbe violato quella che egli chiamava *legge di causalità*: se le equazioni di campo sono generalmente covarianti allora un dato tensore energia-impulso non può *unicamente* determinare, attraverso di esse, il campo gravitazionale. Scopo dell'argomento era, quindi, proprio questo: dimostrare che da una distribuzione di materia – contenente, però, una regione di spaziotempo, di arbitraria dimensione, completamente priva di materia che Einstein chiamò, appunto, «buco» – e con un campo gravitazionale specificato ovunque all'esterno di questo, le equazioni di campo generalmente covarianti non sarebbero state in grado di determinare univocamente il campo gravitazionale all'interno del buco⁴.

Prima di introdurre l'argomento con maggiore proprietà, sono utili alcuni accenni al quadro fisico-matematico di sua pertinenza (che cos'è una teoria dello spaziotempo e quali strutture sono, in essa, rappresentate) e alla cornice epistemologica (il dibattito sulla natura ontologica dello spaziotempo) in cui si è iscritto a partire dalla sua recente rinascita negli anni ottanta.

1. Modelli di una teoria dello spaziotempo

Una teoria dello spaziotempo è caratterizzata da un modello \mathbf{M} definito, nella sua forma generale, da una terna esprimibile con $\langle M, B^i, D^j \rangle$, i cui elementi sono cioè suddivisi in classi di entità, al cui livello fondamentale si ha la *varietà* matematica quadridimensionale differenziabile M – i cui costituenti (i punti matematici) rappresentano i punti-evento (fisici, idealmente inestesi) dello spaziotempo – e sulla quale i suddetti campi di oggetti geometrici assegnano loro determinate proprietà: i B^i sono i *campi di background*, caratterizzanti la struttura fissa (di base) dello spaziotempo (essa resta immutata nei vari modelli della teoria: il campo metrico in relatività speciale, ad esempio), mentre i D^j , i *campi dinamici*, denotano i suoi contenuti fisici (come il tensore energia-impulso in RG)⁵.

Lo spaziotempo è definibile come «l'insieme di tutti i luoghi-a-un-tempo o di tutti gli eventi reali e possibili»⁶. La distinzione fra i vari tipi di spaziotempo dipende essenzialmente da quali campi sono posti sulla varietà, quali simmetrie essi ammettono e se sono di *background* o dinamici.

Il modello \mathbf{M} , inoltre, per rappresentare uno spaziotempo di una particolare teoria \mathbf{T} , deve soddisfare alle sue equazioni di campo, cioè le *leggi* di \mathbf{T} . Le teorie dello spaziotempo postulano, quindi, sui punti della varietà, diversi tipi di strutture geometriche e “dipingono” l'universo materiale – l'insieme, cioè, di tutti gli eventi *reali* – come immerso in tali strutture. Queste teorie – che quindi contengono due tipi di elementi: lo spaziotempo (la sua struttura cronogeometrica), e i campi di materia (distribuzione di massa, carica, ecc.) che rappresentano i processi fisici che in esso accadono – cercano allora di spiegare e predire le proprietà dei processi materiali correlandoli alla struttura geometrica entro cui sono “contenuti”⁷.

La migliore teoria dello spaziotempo è la Relatività Generale, un modello della quale è esprimibile con una tripla della forma $\langle M, g, T \rangle$, dove M è la varietà vista poc'anzi, g e T i suoi campi tensoriali: il tensore metrico semi-riemanniano il primo, il tensore energia-impulso di un qualsiasi campo di materia il secondo. Lo spaziotempo è in questa teoria rappresentabile *matematicamente* con una varietà quadridimensionale differenziabile curva in ogni punto della quale è assegnato un insieme di spazi tangenti isomorfi allo spaziotempo affine di Minkowski (vale a dire che, in ogni punto, la metrica deve assumere, rispetto a un'opportuna base previamente individuata, la forma "piatta" che ha in relatività speciale); *fisicamente*, lo spaziotempo è un *continuum* quadridimensionale di eventi fisici.

Il fatto cruciale della RG è il suo essere una cosiddetta teoria *indipendente dal background*: i suoi modelli non contengono campi B^i , ma solo campi D^j , in altre parole – a differenza di quanto avviene, ad esempio, nei modelli newtoniani e relativistico-speciali – qui metrica e materia sono dinamicamente accoppiate, nel senso che g non è fissato indipendentemente dalla distribuzione di T (la metrica spaziale non è un rigido substrato che accoglie gli eventi materiali senza essere, da questi, influenzata), e il loro legame è "codificato" nelle equazioni di campo einsteiniane⁸ che ci informano, quindi, non solo, "canonicamente", su come g influisce su T , ma anche su come la materia modifica la metrica⁹. Questa profonda reciproca interdipendenza, incarnata dalla "doppia vita" che la metrica g viene ad avere nel determinare gli aspetti sia della geometria dello spaziotempo sia della struttura del campo gravitazionale, fa sì che non si abbia a che fare solo con un'unica costruzione spaziotemporale, in quanto le possibili differenti soluzioni delle equazioni di campo di Einstein variano, appunto, in base alle disposizioni della materia.

Accanto a queste diverse "opportunità" fisiche che lo spaziotempo nella RG può cogliere, vi è un ulteriore ma dissimile *spazio di possibilità* che riguarda la formalizzazione dell'entità spaziotemporale, laddove è introdotto il fondamentale concetto di *simmetria*.

Se definiamo, genericamente, una *struttura* S come una coppia ordinata della forma $\langle D, R \rangle$, dove D è un *dominio* di singole entità (l'insieme degli *oggetti* $\{x_i\} = D$ della struttura) e R un insieme di *relazioni* su D , allora, date due strutture $S = \langle D, R \rangle$ e

$S' = \langle D', R' \rangle$ e una funzione $\phi : D \rightarrow D'$ tale che $R(x_1, \dots, x_n) = R'(\phi(x_1), \dots, \phi(x_n)) \forall x_i \in D$, si dice che S e S' sono *isomorfe* sotto ϕ e correlate da una *simmetria*. Se $\phi : D \rightarrow D$, allora ϕ è detto *automorfismo* di S .

Abbiamo così due concetti separati: una simmetria *fra* strutture, in cui gli oggetti di un dominio, $(x_1, \dots, x_n) \in D$, sono mappati in un dominio differente, $(\phi(x_1), \dots, \phi(x_n)) \in D'$, in modo tale da preservarne la struttura (questo tipo di simmetrie le possiamo intendere, genericamente, come *permutazioni dei nomi* degli oggetti); e una simmetria *di* una struttura, dove invece gli $(x_1, \dots, x_n) \in D$ sono mappati nello stesso dominio, $(\phi(x_1), \dots, \phi(x_n)) \in D$ (quindi simmetrie come *permutazioni degli oggetti* stessi).

Nel contesto delle teorie dello spaziotempo – dove D è identificabile con il dominio dei punti della varietà M mentre R rappresenta le loro intercorrenti relazioni geometriche –, e in particolare nell'ambito dell'argomento del buco, saremo interessati a questo secondo tipo di simmetrie.

In uno spaziotempo, se $\phi : M \rightarrow M$ è un isomorfismo (ϕ e ϕ^{-1} devono essere differenziabili) allora la sua struttura di *background* è lasciata intatta, vale a dire $\phi^* B^i = B^i, \forall i$ (dove $\phi^* B^i$ è detto il campo “trasportato” di B^i tramite ϕ).

Se le leggi di una teoria (come codificate nelle equazioni di campo) non possono distinguere fra i modelli, correlati dalla simmetria ϕ , $\mathbf{M} = \langle M, B^i, D^j \rangle$ e $\mathbf{M}^* = \langle M, \phi^* B^i, \phi^* D^j \rangle$, allora la teoria è detta essere ϕ -invariante. Nella RG ciò si esprime dicendo che se $\langle M, g, T \rangle$ è un modello della teoria, cioè è soluzione delle equazioni di campo einsteiniane (per una data distribuzione di materia, ovviamente), allora anche $\langle M, \phi^* g, \phi^* T \rangle$ lo è¹⁰. Questa proprietà, se ϕ è un qualsiasi isomorfismo, è detta *covarianza generale*, e viene usualmente espressa tramite una concettualizzazione basata sul primo tipo di simmetria visto, quella che “cambia i nomi” degli oggetti (qui: le coordinate dei punti): la covarianza generale è l'indipendenza delle equazioni di campo da una particolare scelta del sistema di coordinate¹¹. Poiché la RG, però, possiede solo campi dinamici, la struttura del suo spaziotempo ben si presta anche al secondo tipo di simmetria (che a noi, qui, più interessa): quella che “sposta” non le etichette nominali (le coordinate), ma i punti stessi, operazione che matematicamente

prende il nome di *diffeomorfismo attivo* (proprio per distinguerlo dalla più comune trasformazione di coordinate denominata anche *diffeomorfismo passivo*).

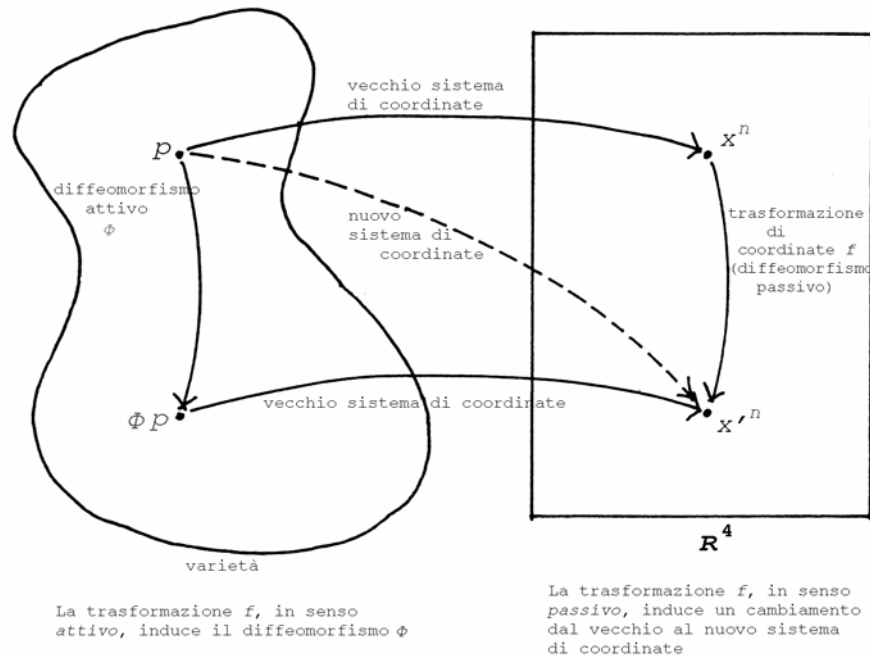


Figura 1: diffeomorfismi attivi e passivi.

Un diffeomorfismo attivo è, allora, una funzione differenziabile ϕ (come dev'esserlo anche la sua inversa ϕ^{-1}) che mappa punti della varietà M in M , cioè $\phi: p \rightarrow p' = \phi \cdot p$ (preservando la struttura topologica e differenziale); applicato a un tensore T , si ha $T \rightarrow T' = \phi * T$, quindi $T(p) \rightarrow T'(p)$ e, in generale, $T(p) \neq T'(p)$, mentre $T(p) = T'(p')$ ¹².

Il diffeomorfismo passivo è, come detto, l'usuale trasformazione di coordinate che assegna a un punto p un nuovo valore del nuovo sistema di coordinate x' : $T_\phi: x(p) \rightarrow x'(p) = [T_\phi x](p)$, tale che $[T_\phi x](\phi \cdot p) = x(p)$, cioè $x'(p') = x(p)$.

La dualità tra queste due operazioni – la corrispondenza uno-a-uno, in ogni regione di spaziotempo, fra un diffeomorfismo attivo e una specifica trasformazione di coordinate – la possiamo visualizzare con la precedente figura¹³ che mostra come al punto p di coordinate x^n (vecchio sistema) sono assegnabili nuove coordinate x'^n o

tramite la trasformazione passiva f , oppure tramite lo stesso vecchio sistema di coordinate, ma applicato al punto p “trasportato” dal diffeomorfismo ϕ , cioè $\phi \cdot p$.

Questi “movimenti” matematici, come sapremo presto, acquisteranno valenza fisica e, soprattutto, filosofica, nell’argomento del buco, ma prima la preannunciata breve panoramica sul suo campo epistemologico d’appartenenza.

2. I due contendenti: sostanzialismo *versus* relazionalismo

Storicamente, partendo almeno dagli albori della fisica, il dibattito sulla natura ontologica di spazio e tempo ha visto contrapporsi la posizione *assolutista* a quella *relazionalista*: la prima, sostenitrice, à la Newton, di uno spazio immutabile e dato, omogeneo e indifferenziato, esistente di per sé a prescindere dalla presenza, in esso, di oggetti (corpi, eventi), in una parola: assoluto; la seconda, à la Leibniz¹⁴, favorevole a uno spazio inteso solo come rete di relazioni fra cose coesistenti, ma privo di esistenza ontologica¹⁵.

Oggi le scuole di pensiero a fronteggiarsi non sono mutate nei loro tratti salienti e possono ancora aggregarsi – certo con inclinazioni rinnovate da oltre tre secoli di sviluppo del pensiero filosofico e scientifico, *in primis* dalla rivoluzione einsteiniana – attorno a quei due nuclei fondamentali: a contendersi la “verità”, da una parte una posizione realista – denominata *sostanzialismo* – che, riecheggiando l’assolutismo newtoniano, vede lo spaziotempo, inteso essere a mo’ di “sostanza”, come una sorta di “contenitore” che esiste indipendentemente da qualunque forma di materia, e consistente di punti che stanno direttamente in relazione geometrica fra loro, mentre le relazioni spaziali fra gli oggetti materiali derivano dalle relazioni ottenute dalle parti di spazio che essi occupano¹⁶; dall’altra, una concezione *relazionalista* che invece “riduce” l’entità spaziotemporale a derivato della relativa disposizione delle forme di materia che sono tutto ciò che, in verità, esiste (solo il “contenuto” è *reale*), e quindi lo spaziotempo sorge solo come funzionale astrazione di proprietà e relazioni primitive (non riducibili a quelle intercorrenti fra i punti di un substrato) degli oggetti del mondo.

Il corso di questo dibattito, però, ha incontrato e dovuto far proprie due poderose fonti concettuali che se in un senso lo hanno rinvigorito, nei termini (sperabili) di un

avvicinamento alla conoscenza di *ciò che è*, in un altro ne hanno accidentato il cammino: l'entità fisico-matematica del *campo*, e la natura della metrica nella RG.

La rivoluzionaria introduzione ottocentesca del concetto di campo per opera di Faraday e Maxwell¹⁷ ha, infatti, prodotto incertezza nella determinazione del significato di occupazione di un punto: se si guarda, tradizionalmente, alla materia come il “pieno” (porzioni di spazio occupate, ad esempio, da qualche particella, dove quindi la densità di massa è non nulla), e al “semplice” spazio come il “vuoto” (parti di spazio dove, invece, la densità di massa è zero), come intendere, allora, l'occupazione dei punti dello spazio(tempo) quando un'entità matematicamente continua ed estesa come il campo assegna valori di certe grandezze fisiche a *ogni* punto dello spazio a *ogni* istante di tempo¹⁸?

Le categorie ontologiche di sostanzialismo e relazionalismo divengono, così, meno nette: se per i sostanzialisti lo spaziotempo, esistendo come tale, avrà una parte dei suoi punti-evento occupata da eventi reali e il resto da eventi possibili, mentre per i relazionalisti solo i punti-evento effettivamente occupati (il loro complementare, appunto quelli possibili, servono solo a dare una struttura astratta formalmente più “maneggevole”) possono “pretendere” un qualche tipo di realtà (comunque “materialmente derivata”), allora l'ontologia relazionalista rischia di diventare tanto ricca quanto quella sostanzialista.

L'altro, e ancor più importante, motivo di “destabilizzazione” del tradizionale dibattito risiede nel campo metrico g che in RG – essendo espressione, come visto, non solo di proprietà cronogeometriche, ma anche di proprietà gravitazionali – viene a contenere energia, rendendo ambigua la suddivisione fra le classiche categorie di materia e di spazio (spazio che ora, per il principio d'equivalenza fra massa ed energia, viene a possedere, tramite g , un tipo particolare di materialità). Per un dato evento nello spaziotempo, infatti, c'è da tener conto non solo della densità d'energia e momento delle varie forme di materia – come fluidi, solidi e campo elettromagnetico, rappresentati dal tensore energia-impulso T –, ma anche dell'energia-impulso t del campo gravitazionale stesso: l'energia e il momento propri del campo gravitazionale generano un campo gravitazionale (è la non linearità della teoria)¹⁹. Tale questione, oltre a intaccare quella testé vista sul significato di occupazione di un punto²⁰, inficia anche l'esistenza di un chiaro discrimine – che almeno ai tempi di Newton si aveva! –

fra cos'è materia e cos'è spazio, che ora vengono in qualche maniera a “coesistere”, anche se non esclusivamente, nell'unica entità g .

La domanda, allora, sorge spontanea... Come rappresentare lo spazio(tempo), con la sola varietà matematica o con la stessa, ma dotata di campo metrico? Vale a dire, rispettivamente: dove collocare la metrica, dalla parte del “contenuto” materiale o del “contenitore” spaziotemporale?

3. Metrica di “tipo-spazio” o di “tipo-materia”?

Un punto fermo dal quale partire è riassunto nelle parole di Einstein: «Non può esserci nessuno spazio né alcuna sua parte senza i potenziali gravitazionali [$g_{\mu\nu}$]; poiché questi conferiscono allo spazio le sue qualità metriche, senza le quali non può essere immaginato affatto. L'esistenza del campo gravitazionale è inseparabilmente legata all'esistenza dello spazio»²¹.

Ora, data l'imprescindibilità del campo metrico g da ogni tipo di spaziotempo che discende dalle equazioni einsteiniane, ci chiediamo per quale motivo si possa optare per una prevalenza ontologica delle sue proprietà energetico-gravitazionali su quelle cronogeometriche, o, in altre parole, perché preferire un campo metrico come campo materiale *nello* spaziotempo (spaziotempo che sarebbe allora rappresentato attraverso la semplice varietà)?

Il motivo fondamentale è che la metrica, come gli altri campi fisici, possiede quegli attributi che storicamente hanno caratterizzato la materia: essa porta energia e momento *in primis*²², inoltre è dinamica, soddisfa a equazioni differenziali, ha proprietà radiative simili a quelle del campo elettromagnetico, può agire e subire azioni esterne (obbedisce, quindi, a una sorta di principio d'azione-reazione), insomma g dovrebbe fare parte del “contenuto”, laddove il “contenitore”, lo spaziotempo *tout court*, verrebbe a “rispecchiarsi” matematicamente nella nuda varietà differenziabile (assecondando, da un certo punto di vista, quel ruolo tradizionale, anteriore alla RG, di uno spazio e di un tempo visti come “insiemi” di luoghi e di istanti “da riempire dall'esterno”, cioè dagli eventi materiali).

Come si può, invece, motivare la posizione speculare, quella che assegna priorità ontologica alla cronogeometria di g , che quindi viene a essere, oltre alla basilare varietà, necessaria struttura *dello* spaziotempo?

Ebbene, secondo i sostenitori di tale posizione la metrica si presta a rappresentare lo spaziotempo semplicemente perché questo, senza le “informazioni” in essa racchiuse, perderebbe, per così dire, persino di buonsenso: se da un lato la varietà si limita solo a rappresentare la continuità e la topologia globale dello spaziotempo, dall’altro la metrica determina le distanze fra i punti-evento, codifica le relazioni causali (in ogni punto dello spaziotempo è possibile definire una struttura di coni di luce e stabilire una distinzione fra direzioni spaziali e temporali), genera le strutture di campo gravitazionale (connessione affine e tensore di Riemann) che integrano i fenomeni fisici (tramite il potenziale del campo gravitazionale, sappiamo come le particelle si muovono: caduta libera, accelerazione, propagazione della luce)²³; insomma, non parrebbe avere molto senso uno spaziotempo le cui “istituzionali” relazioni spaziali e temporali sarebbero fornite da un campo materiale *esterno* allo spaziotempo stesso²⁴.

Sottolineiamo come questa importantissima controversia sulle entità che debbano concorrere a costituire lo spaziotempo²⁵ s’inserisce trasversalmente nell’usuale dibattito sostanzialismo/relazionalismo²⁶, in quanto se la posizione predominante fra gli studiosi guarda al campo metrico decisivo a definire una valida nozione di spaziotempo (e quindi a una metrica primariamente di “tipo-spazio”), ciò lo si può derivare da (può condurre a) un pensiero sia relazionalista (come Stachel (1993)) che sostanzialista (Hofer (1996; 1998), Maudlin (1989; 1990), Rickles (2004), Pooley (2002)), così come la posizione opposta, disponibile a uno spaziotempo di pura varietà (e quindi a una metrica di “tipo-materia”), può discendere da (può portare a) questi stessi due filoni interpretativi (Rovelli, per il primo; Earman-Norton, per il secondo)²⁷.

Quest’ultima assunzione favorita da Earman-Norton – che fa vessillo di uno spaziotempo rappresentato dalla sola varietà di punti indipendentemente da ogni altro campo, e detta *sostanzialismo della varietà* (spaziotemporale) – è il cardine, nient’affatto irremovibile, proprio dell’argomento del buco.

4. L'argomento del buco di Earman e Norton

Nel 1987, nell'ormai noto articolo *What Price Space-Time Substantivalism? The Hole Story*, John Earman e John Norton mettono in rilievo che il sostanzialismo della varietà spaziotemporale conduce – in una classe di teorie che include anche la RG – a una radicale forma d'indeterminismo. Il loro, oltre a essere stato un lavoro di riscoperta/rilettura epistemologica del problema fisico-matematico che Einstein sollevò agli inizi del secolo scorso²⁸, ha assunto anche un compito, per così dire, di “ripulitura” dell'originaria esposizione einsteiniana da alcune “incrostazioni” interpretative che avevano indotto qualche studioso a banalizzare l'argomento stesso²⁹.

Matematicamente il loro ragionamento è esprimibile tramite il cosiddetto *problema di Cauchy* (o problema ai valori iniziali) che in RG consiste genericamente nello studiare se dallo stato di un sistema su una superficie di Cauchy di tipo-spazio (sezione a tempo costante dello spaziotempo) sia possibile determinare unicamente i suoi stati su superfici a qualunque altro tempo³⁰, cioè se da una tripla iniziale di dati ammissibili (S, h, k) – dove S è la superficie di Cauchy tridimensionale, h la metrica riemanniana (restrizione di g a S), e k un tensore esprime la curvatura della superficie – sia possibile trovare una soluzione $\langle M, g \rangle$ (detta *sviluppo di Cauchy*) delle equazioni di Einstein.

In sostanza, pensando alle equazioni di campo della RG che governano l'evoluzione nel tempo della geometria dello spaziotempo, considerate quindi come capaci di rappresentare la storia di una metrica su una superficie, si tratta di determinare, fissati i dati iniziali, la metrica dello spaziotempo per tutti gli istanti di tempo successivi. Ebbene, l'unicità della soluzione è garantita fino a un diffeomorfismo, cioè date due qualsiasi soluzioni $\langle M, g' \rangle$ e $\langle M, g'' \rangle$, esiste una funzione $d: M \rightarrow M$ fissante (S, h, k) punto per punto che è un'isometria fra i due modelli.

La particolarità dell'argomento del buco risiede proprio nella scelta di questo diffeomorfismo: presi certi dati iniziali (S_t, h, k) a $t = 0$, nel futuro di S_t (cioè per $t > 0$), definiamo un buco $H \subset (M - \{S_t : t \leq 0\})$ in cui solo il campo $g \neq 0$, e definiamo il *diffeomorfismo del buco* d_H in modo tale che lavori come la funzione identità all'esterno del buco (quindi assegnando a ogni punto di M lo stesso punto), ma

che venga regolarmente a differire dall'identità sul contorno e all'interno del buco (operando, così, una permutazione dei punti):

$$\begin{aligned}d_H &= Id. \quad \forall x \in (M - H), \\d_H &\neq Id. \quad \forall x \in H, \quad \forall x \in \partial H.\end{aligned}$$

Allora, per la metrica h si ha:

$$\begin{aligned}h(x) &= d_H * h(x) \quad \forall x \in (M - H), \\h(x) &\neq d_H * h(x) \quad \forall x \in H,\end{aligned}$$

quindi la metrica alla quale è stato applicato il diffeomorfismo, detta *trasportata* e che possiamo denotare con $h'(x) = d_H * h(x)$, non coincide più con la metrica originaria $h(x)$.

Ora, la covarianza generale delle equazioni di Einstein ci dice che una metrica $h(x)$ e la sua trasportata $h'(x)$ sono entrambe soluzioni (isomorfe) e che, inoltre, queste due metriche sono equivalenti solo quando la metrica trasportata è calcolata sul punto trasportato (quindi $h'(x')$, dove $x' = d_H x$), nel qual caso si ha $h'(x') = h(x)$, ma il fatto rilevante è che le due metriche calcolate nello *stesso* punto non sono equivalenti: $h'(x) \neq h(x)$ (o anche $h'(x') \neq h(x')$).

Per intenderci con un semplice esempio: immaginiamo una galassia, in un universo in espansione, lungo una certa linea d'universo passante attraverso qualche punto-evento p nel buco (si veda la seguente figura 2³¹, dove alcune galassie sono visualizzate su una certa superficie di Cauchy iniziale); dopo la trasformazione del buco, dopo cioè avere “distribuito” la metrica diversamente sulla varietà, sono ovviamente assegnate ai punti proprietà metriche in modi diversi: il diffeomorfismo “trasporta” le linee d'universo e la nostra galassia, così, potrebbe non attraversare più p , a patto però che il punto p del secondo riquadro in figura sia inteso – come sostengono Earman-Norton – sempre come lo *stesso* p del primo riquadro.

Lo spartiacque è proprio questa identità di p : è posseduta *a priori* come vogliono i sostanzialisti della varietà *à la* Earman-Norton, oppure essa deriva esclusivamente da un'individuazione metrica?

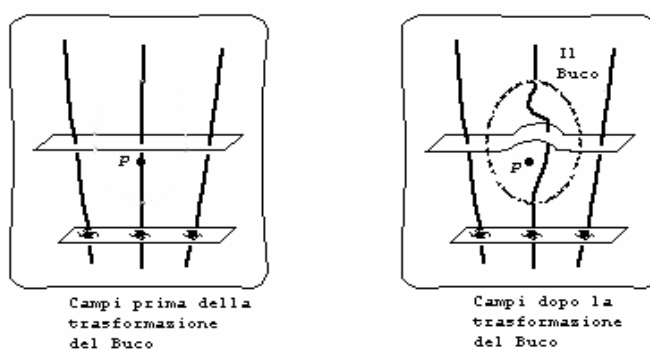


Figura 2: la variazione della traiettoria della galassia all'interno del buco.

Se si accetta la prima opzione, è evidente che p continua a esistere anche nel secondo riquadro, “soggiacendo”, però, a un diverso valore del campo metrico trasportato, e quindi, assumendo una concezione di determinismo secondo la quale l'accordo riguardo ai dati iniziali su qualche superficie iniziale deve essere sufficiente a ricavare *unicamente* un singolo insieme di dati su qualche superficie futura, tale concezione è violata, perché la covarianza generale permette, all'interno del buco, evoluzioni divergenti della metrica compatibili con i dati iniziali e con le equazioni di campo. Così, nonostante possediamo tutte le informazioni disponibili sullo spaziotempo prima e dopo il buco, non siamo in grado di stabilire quale traiettoria spaziotemporale la galassia seguirà nel buco, perché qui le due metriche hanno sì proprietà fisiche identiche, ma collegano tra loro punti diversi; ed è questa la particolarità dell'indeterminismo in gioco – spesso, infatti, aggettivato con *metafisico* – che, riguardando solo quali punti individuali sottostanno a quali processi “materiali” (metrica ed, eventualmente, materia), non si configura in termini di accadimenti nello spazio e nel tempo (niente di fisico è reso indeterminato), e non intacca, quindi, il potere predittivo della teoria³².

L'altra risposta, disponibile alla domanda di poc'anzi sul punto p del nostro esempio, è che si possa parlare, dopo la trasformazione, ancora dello *stesso* punto p solo in termini trasformati dal diffeomorfismo, vale a dire $d_H p = p'$, permettendo, quindi, al campo metrico mutato di adagiarsi, per così dire, su punti anch'essi permutati della varietà, consentendo alle due distribuzioni o , che dir si voglia, ai due modelli di spaziotempo ($\langle M, g \rangle$ e $\langle M, d_H * g \rangle$) di rappresentare la medesima situazione fisica e rendere così innocua (non fisica) la sottodeterminazione della descrizione matematica³³. Ma quest'ultima condizione – denominata *equivalenza di Leibniz* da

Earman-Norton³⁴ – ai sostanzialisti della varietà è preclusa: sia la metrica del primo modello che quella difforme del secondo, si distribuiscono su due varietà identiche (i singoli punti della seconda varietà conservano le identità originarie della prima), quindi il secondo modello, seppur originatosi dalle stesse condizioni iniziali, viene necessariamente a rappresentare una *nuova* situazione fisica. Perciò, il dilemma dei sostanzialisti diviene: accettare l'indeterminismo (in verità, essendo fisicamente immotivato, preferiamo l'espressione meno forte "indeterminatezza") nelle teorie dello spaziotempo o negare il proprio sostanzialismo³⁵?

5. Una "tassonomia" di risposte all'argomento del buco

Se il sostanzialismo della varietà pare così incontrare sulla sua strada quel bivio individuato da Earman-Norton, in verità il loro argomento – oltreché rivelarsi un vero "toccasana" per il generale dibattito sulla natura dello spaziotempo – non ne ha turbato troppo il cammino, generando, anzi, un profluvio di nuove interpretazioni tanto da trasformare quel «campestre bivio iniziale in un trafficato incrocio metropolitano!».

Cercheremo, allora, di orientarci al meglio, tenendo conto della concisione qui richiesta³⁶, suddividendo le principali risposte all'argomento del buco, che si sono sinora succedute, in tre principali categorie³⁷; prima, però, alcuni chiarimenti s'impongono.

La questione cruciale nel nostro *affaire* è la natura della cosiddetta *relazione di rappresentazione*, vale a dire come si esplica l'associazione fra i modelli (gli elementi matematico-formali) e i mondi fisicamente possibili (la situazione fisica, la... *realtà*?): se la rappresentazione tramite modelli dei mondi è un'associazione uno-a-uno, uno-a-molti (alcuni modelli rappresentano più di un mondo), multi-a-uno (qualche mondo è rappresentato da più di un modello), multi-a-molti (sono presenti entrambi i casi precedenti), o altri modi ancora (incluso il non esplicarsi affatto); e, quindi, come interagiscono, relazionalmente, gli elementi componenti il dominio, in questo caso i punti dello spaziotempo, fra modelli e modelli, fra mondi e mondi: se i punti di un

modello denotano la stessa “cosa” dei punti di un altro modello: in altre parole, si può dire che domini di distinti modelli contengano gli *identici* punti, e per quale virtù³⁸?

Mentre il relazionalismo può guardare positivamente – visto che le permutazioni dei punti non generano possibilità distinte – anche a una relazione molti-a-uno, quella a cui i sostanzialisti, secondo Earman-Norton, sono destinati – essendo i punti della varietà reali e con identità fissate indipendentemente dalle relazioni (g e T) – è necessariamente quella uno-a-uno, e l'*identità attraverso mondi*, cioè la possibilità/modalità di esistenza di un insieme di proprietà di un “oggetto” che consentono di identificarlo in differenti mondi possibili, riguarda i punti della varietà che apparirebbero nei domini di differenti modelli. In tal caso deve, appunto, esserci un insieme di proprietà appartenenti ai punti che consente di identificarli, e che deve restare inalterato nel “passaggio” fra modelli. Considerando, però, che per i sostanzialisti i punti hanno identità indipendenti dai campi, e quindi g e T non sono necessari a individuarli, e che inoltre i punti non hanno caratteristiche qualitative autonome da g e T , ne discenderebbe l'esistenza di proprietà non-qualitative necessarie a “preservarne” l'identità: è l'*ecceitismo*³⁹, la posizione che sostiene possibilità distinte, fra mondi possibili, differenti metafisicamente solo per quali oggetti giocano quali ruoli; concretamente, due modelli diversi solo per una permutazione dei punti dei loro domini rappresentano due mondi possibili che differiscono ecceitisticamente.

La forza dell'argomento del buco risiede proprio nella supposta facoltà di potere identificare i punti dello spaziotempo, etichettarli e quindi distinguerli sia entro uno stesso modello che fra modelli diffeomorfi, ognuno dei quali allora, pur rappresentando un mondo qualitativamente identico all'originario, vede attribuire ai suoi punti – come avviene all'interno del buco – valori diversi del campo metrico (trasportato dal diffeomorfismo): quindi uno *stesso* punto, che permane in ogni modello diffeomorfo, viene a giocare “ruoli metrici” diversi nonostante si parta dalle stesse condizioni iniziali; questa indeterminatezza si sostanzierebbe *a priori*, in quell'identificazione intrinseca (non derivabile da qualità “esterne”) a cui ogni singolo punto si presterebbe in quanto “contenitore” di particolari proprietà non-qualitative (le ecceità) agenti come designatori rigidi della loro individualità.

Ma quanta importanza rivestono – ammesso che esistano – le eccezioni nella possibilità di attribuire a un sistema fisico un concetto, tra l'altro assai delicato e non univocamente definibile, qual è quello di indeterminismo?

5.1 Risposte deterministiche

Brighouse (1994; 1997) non considera rilevanti le differenze eccezionistiche, in quanto riguardano caratteristiche *non* fisiche del futuro (non esplicitano differenze nel modo in cui gli oggetti si comportano), e non dobbiamo, quindi, aspettarci una loro determinazione da parte degli stati fisici del mondo; in pratica, i tipi di diversità causate dall'applicazione dei diffeomorfismi dovrebbero essere viste come irrilevanti per l'analisi del determinismo fisico: ciò che conta, per ottenere realmente rappresentazioni di mondi distinti, sono allora le differenze qualitative fra i modelli, qui assenti grazie alla loro isomorficità.

Su questa stessa linea si muove anche Butterfield, ma con un passo diverso che si sofferma maggiormente su una rielaborazione della definizione stessa di determinismo per ovviare ai problemi dell'argomento del buco. Quella sottintesa da Earman-Norton, in termini di mondi è: «Sia W la collezione di tutti i mondi fisicamente possibili. Il mondo $W \in W$ è laplaciano-deterministico se per qualsiasi $W' \in W$, se W e W' s'accordano a qualche tempo, allora s'accordano per tutti i tempi»⁴⁰; come già accennato, in termini di modelli possiamo, allora, dire che una teoria dello spaziotempo è deterministica se due qualsiasi dei suoi modelli che s'accordano sullo stato fisico su qualche superficie dello spaziotempo, s'accordano anche sullo stato fisico su qualsiasi altra superficie⁴¹. La strategia di Butterfield è quella di indebolire tale definizione proponendone una che non guarda all'accordo fra intere superfici, ma “lavora” su sue regioni in modo tale da evitare le “trappole” del diffeomorfismo del buco. Al di là delle peculiarità della sua impostazione⁴², ciò comunque non basta a evitare la proliferazione di modelli basata su quella “unicità” della soluzione (al problema ai valori iniziali nella RG) solo “fino a un diffeomorfismo” (difatti, Butterfield selezionerà solo un modello con considerazioni filosofiche che poco oltre vedremo).

Sul concetto di determinismo si sofferma anche Belot (1995; 1996), ma, a differenza di Butterfield, e concordemente con Earman-Norton, valuta le differenze eccettistiche sufficienti all'indeterminismo⁴³.

Infine, una posizione intermedia a queste la occupa Melia (1999), non "parteggiando" totalmente né a favore della rilevanza delle eccezioni per l'indeterminismo, né contro: credere nelle eccezioni non lo implica necessariamente, quindi futuri qualitativamente simili ma distinti *possono* – e non: *devono* (come per Earman-Norton e Belot), o *non devono* (come per Brighouse e Butterfield) – minacciare il determinismo (posizione che chiama "D-ecceitismo", dove "D" sta, appunto, per "determinismo"). L'argomento del buco, comunque, è innocuo se adottiamo – prosegue Melia – una nozione di determinismo in termini di *mondi possibili che si diramano*; in tale impostazione, gli oggetti possono evolversi in futuri alternativi⁴⁴, e più mondi possono letteralmente condividere una storia comune, mentre l'identità attraverso mondi diventa un' *identità attraverso rami*, nella quale lo *stesso* oggetto esistente in un ramo esiste anche in quei rami che condividono il suo passato. Una teoria è, allora, indeterministica se i mondi si diramano, ossia se alcune entità *già esistenti* "si biforcano" a giocare ruoli diversi (in diversi futuri). Nell'argomento del buco, però, i punti – per i quali la RG fallisce nell'indicare, a un certo tempo, quale ruolo sarà da loro assunto – non sono ancora esistenti, così non si hanno diramazioni e il determinismo non è perso.

Come già per Brighouse e Butterfield, benché con intonazioni differenti, l'aria è la solita: non è il sostanzialismo il responsabile dell'argomento, ma la concezione di determinismo assunta dai loro "padri". Però, ci chiediamo adesso, come deve allora comportarsi il sostanzialista che – senza snaturarsi, né troppo arrampicarsi sui dirupi concettuali dell'indeterminismo – non vuole proprio "accordar ragione" all'argomento del buco: come valutare la "forma" delle *eventuali* eccezioni?

5.2 Risposte modali

Le seguenti risposte⁴⁵ partono essenzialmente dal seguente assunto: il sostanzialismo può sottrarsi all'argomento negando la possibilità d'identificare uno *stesso* punto in

diversi modelli e, quindi, concludere: solo un modello rappresenta una possibilità fisica, oppure tutti i modelli rappresentano la stessa possibilità.

- *Primo caso*: solo un modello rappresenta una possibilità fisica.

Questa è la strada percorsa dal cosiddetto *essenzialismo metrico* di Maudlin (1990), il cui esordio è in un “semplice” quesito: quali sono le proprietà essenziali – ossia insostituibili senza una perdita d’identità – per i punti dello spaziotempo?

Mentre Earman-Norton si fermano alle relazioni topologico-differenziali fra i punti, egli giudica essenziali anche le proprietà metriche; così, mentre per i primi tutto quanto viene “posto sopra” alla varietà è *accidentale*, cioè non contribuisce all’intrinseca identità dei punti, per il secondo l’essenzialità è da estendersi anche alla “sovrastante” struttura metrica che, sebbene si presti legittimamente, in termini di operazioni matematiche, a essere “trasportata” su una varietà, non altrettanto concede quando rappresenta regioni fisiche dello spaziotempo, la cui esistenza senza *quelle* relazioni cronogeometriche sarebbe un nonsenso. Per Earman-Norton, due punti dello spaziotempo rappresentati, ad esempio, come distanti tre metri nel modello originario, vengono a essere rappresentati – *proprio quei* punti – come distanti otto metri nel modello generato diffeomorficamente (risultato: indeterminismo); per Maudlin, invece, stante il fatto che i punti possiedono le loro proprietà spaziotemporali *essenzialmente*, un qualsiasi diffeomorfismo non banale (come quello del buco) le altererebbe, arrivando così a “creare” *altri* punti, altre relazioni spaziotemporali, costituenti – di conseguenza – modelli distinti, e in generale non rappresentanti stati di cose fisicamente possibili (almeno per gli oggetti del dominio iniziale). Per Maudlin, insomma, solo un modello, da una classe di equivalenza di buco-diffeomorfi, rappresenta un mondo fisicamente possibile, in un’ottica ancora sostanzialista che considera i punti dello spaziotempo come entità esistenti⁴⁶.

Anche per Butterfield⁴⁷ solo *un* modello è candidato a rappresentare una possibilità fisica grazie a una prospettiva metafisica che – in linea con Lewis (1986) – nega l’identità attraverso mondi: non si può dire che lo *stesso* punto possiede proprietà metriche differenti in mondi differenti: qualsiasi punto è, allora, parte di un solo mondo possibile, e al massimo solo una sua *controparte* – nozione ovviamente più debole che riduce le identità (attraverso mondi) a *similarità*⁴⁸ – è immaginabile in un altro mondo

possibile. Quindi i modelli diffeomorfi del nostro argomento non contengono la stessa varietà di punti, ma solo controparti, ed è il modello originario a rappresentare l'unica genuina possibilità fisica⁴⁹.

- *Secondo caso*: tutti i modelli rappresentano la stessa possibilità fisica (*alias*: un sostanzialista può accettare l'equivalenza di Leibniz).

Partiamo da un semplice esempio nel quale Hofer (1996), presi due dadi *A* e *B*, si chiede se ha senso interrogarsi se il dado *A* possa essere posto dov'è il dado *B* con tutte le proprietà di *B*, e viceversa essere il dado *B* posto nel luogo di *A* con tutte le proprietà di *A*. Per Hofer questo senso non c'è: i nomi "A" e "B" non individuano qualcosa di più (e di indipendente) – una cosiddetta *identità primitiva*, in qualche modo posseduta da ogni singolo dado – delle proprietà che i due dadi hanno, quindi il dado *A* in *B* "diventerebbe" *B*, la scena iniziale non cambierebbe, e la domanda non avrebbe senso⁵⁰. Le identità primitive, nel loro ruolo di proprietà non-qualitative utili a individuare un oggetto, sono considerate da Hofer più fondamentali delle eccezioni: accettare l'eccezione comporta accettare le identità primitive (altrimenti l'eccezione non avrebbe nulla su cui basarsi).

Il parallelo con i punti dello spaziotempo è, allora, immediato: se possiedono identità primitive, lo scambiare tutte le loro proprietà produce un mondo possibile distinto; negare, invece, tali identità – quindi negare, con Hofer, la possibilità di parlare di *questo* punto come diverso da *quel* punto, o di *questo* punto dotato in questo mondo di certe proprietà che non ha in un altro – permette di evitare l'argomento del buco mostrando come, in verità, sia questa componente extra, e non necessaria, che attribuiamo alle condizioni di identità dei punti a causare l'indeterminismo, e non il sostanzialismo della varietà di per sé⁵¹. Egli considera ancora i punti entità sostanziali – «il sostanzialista che nega l'identità primitiva non necessariamente nega l'esistenza dei punti, o anche la loro esistenza come individui»⁵² –, ma, essendo privi d'identità, l'operazione che i diffeomorfismi attuano nel buco si può dire sia "nulla": i modelli diffeomorfi rappresentano nuovamente lo stato fisico originale, a tutela, così, dell'equivalenza di Leibniz⁵³.

Altri autori sostengono che è l'eccezione *in toto* (e non qualche sua "manifestazione") a dover essere rifiutato – se si vuole perseguire la strada di un

sostanzialismo pro-equivalenza di Leibniz –, in quanto non credono che negare le identità primitive conduca di necessità a un azzeramento dell'ecceitismo, visto che si potrebbero adottare, riguardo alle individualità dei punti, descrizioni alternative, ordinandole sull'idea – ad esempio – che un'individualità la si possa ereditare dalle proprietà metriche strutturali dello spaziotempo (French (2001)), che bandirebbero, così, l'ecceitismo stesso in quanto le sue mansioni sarebbero – per così dire – “assorbite” dalle strutture pertinenti al campo metrico⁵⁴.

Sostanzialismi che – continuando a esiliare dalla propria metafisica qualsiasi ricorso a ecceità da attribuire ai punti – ancora accettano l'equivalenza di Leibniz sono pure quelli della Brighouse (1994) e di Pooley (2002): sostanzialista della varietà, la prima (che considera la metrica di “tipo-materia”), fautore di un cosiddetto *sostanzialismo* (del campo metrico) *sofisticato*⁵⁵, il secondo, che ritiene “sostanza” anche ciò che non ha alcuna individualità indipendente dalla sua posizione in qualche struttura relazionale: un conto è l'indipendenza dello spaziotempo dagli oggetti che contiene (che è l'impegno “costituzionale” d'ogni sostanzialismo), altro è l'ascrivere individualità ai suoi punti⁵⁶.

La rinuncia – comune alle prospettive finora velocemente sorvolate – di una qualunque *designazione rigida* conferibile ai punti dello spaziotempo che in qualche modo li “nomini” con “assolutezza”, allevia il sostanzialismo dai gravami dell'argomento del buco permettendone l'adesione all'equivalenza di Leibniz, proprio come accade, ma con ben altra naturalezza, all'ultima classe di risposte.

5.3 Risposte relazionaliste

La prima impronta relazionalista la lasciò lo stesso Einstein che, dopo le formulazioni di cui abbiamo accennato all'inizio di questo articolo, non si pronunciò sull'argomento del buco per più di due anni – periodo, questo, di lotte e tentativi infruttuosi per ottenere una teoria dalla covarianza limitata (la *Entwurf Theorie*) – fino al suo definitivo ritorno, nel novembre del 1915, al punto dal quale era sostanzialmente partito nella sua ricerca: la necessità, appunto, della covarianza generale. Prima, però, doveva “sbarazzarsi” dell'argomento del buco, e lo fece – sommessamente: senza riferimenti ufficiali, ma

solo nella corrispondenza privata – con quello che Stachel ha poi chiamato “argomento del punto-coincidenza”.

Ascoltiamo lo stesso Einstein in un brano riportato nella sua classica esposizione della RG – *The Foundations of the General Theory of Relativity*, degli inizi del 1916 – dove l'argomento del punto-coincidenza è addotto proprio a fondamento della covarianza generale⁵⁷:

[...] Che questo bisogno di covarianza generale, che porta via dallo spazio e dal tempo l'ultimo residuo di obiettività fisica, sia una necessità naturale, si vedrà dalla seguente riflessione. Tutte le nostre verifiche spaziotemporali si riducono invariabilmente a una determinazione di coincidenze spaziotemporali. Se, ad esempio, i fenomeni naturali consistono esclusivamente nel moto di punti materiali, allora in definitiva nulla si potrà osservare tranne l'incontro di due o più di questi punti. Inoltre i risultati delle nostre misurazioni non sono nient'altro che verifiche di certi incontri di punti materiali di nostri strumenti di misura con altri punti materiali, o coincidenze tra le lancette di un orologio e punti sul quadrante dell'orologio, o punti-evento osservati che cadono nello stesso posto e nel medesimo istante.⁵⁸

Quindi, due eventi coincidono se a essi corrispondono valori uguali delle coordinate; una trasformazione di coordinate (e, ovviamente, un diffeomorfismo attivo) varierà, allora, tali valori, ma *non* la loro uguaglianza, ed è proprio in questa che s'annida la sola espressione del reale, e che la covarianza generale preserva⁵⁹. Così, oltre alla famosa frase sulla perdita dell'«ultimo residuo di obiettività fisica», Einstein sta sostenendo che i punti dello spaziotempo vanno intesi come punti d'intersezione di un sistema (oggetti, particelle, apparati di misura, e quant'altro)⁶⁰, in una concezione un po' idealizzata dove qualsiasi possibile osservazione, riducendosi alle quantità definite in questi punti, è allora deterministica⁶¹.

L'altra importante soluzione relazionale la propone Stachel, secondo il quale il cuore dell'argomento del buco risiede nell'errata assunzione che i punti della varietà posseggano un'identità indipendente dall'assegnazione di un campo metrico (che considera di “tipo-materia”). Le due soluzioni che, infatti, si ottengono nel buco in un dato punto x , $g(x)$ e $d^*g(x)$, rappresentano distinte possibilità solo perché si pensa di potersi riferire ancora allo stesso punto x indipendentemente dal campo metrico. Ma un conto è l'individuazione matematica dei punti della varietà (per esempio, tramite le loro

coordinate in qualche carta), altro conto è il loro contenuto fisico. Stachel propone, così, di guardare ai punti solo dopo che, risolte le equazioni di campo, il tensore metrico è stato specificato, ottenendo allora l'uguaglianza fra le due metriche $g(x) = d^* g(x')$, in cui, ora, è il punto $x' = d(x)$ a corrispondere *fisicamente* al punto x di g^{62} ; i due campi metrici, cioè, non possono essere in alcun modo fisicamente distinti se devono rappresentare lo stesso campo gravitazionale, quindi, l'azione del diffeomorfismo, non può lasciare indietro nulla di fisicamente significativo che potrebbe identificare un punto della varietà come lo stesso punto per le due metriche. Insomma, i punti della varietà non sono individuati *a priori*, ma «ereditano tutte le loro proprietà fisiche, includendo la loro individuazione spaziotemporale, dal campo tensoriale metrico»⁶³ (una struttura che adempie a questi compiti, egli la chiama *campo individuante*). Così, laddove nella relatività speciale l'identità fisica dei punti è stabilita prima di qualsiasi considerazione dinamica (essendo la metrica di *background*), nella RG solo una primaria individuazione della struttura metrica dinamica (soluzione delle equazioni di campo) consente ai punti di guadagnare proprietà fisiche.

6. Localizzazione relazionale

L'argomento del punto-coincidenza ci ha mostrato un fatto importante: se i punti-evento dello spaziotempo sono intesi in termini di intersezioni di linee d'universo, e solo le quantità definite in questi punti sono determinabili (e, quindi, reali perché comuni a ogni sistema di riferimento), risulta che la RG predice ciò che accade solo a queste localizzazioni determinate dai suoi elementi dinamici (campi e particelle). In altre parole, l'*indipendenza dal background* si mostra ora nel suo "lato operativo": essendo le varie soluzioni delle equazioni di campo generate da diffeomorfismi sulla varietà ne discende che le osservabili⁶⁴ nella RG devono essere quantità invarianti per diffeomorfismi, vale a dire quantità che conservano lo stesso valore in ogni soluzione diffeomorfa (ciò non significa, comunque, che misuriamo solo tali quantità)⁶⁵. Viene, insomma, a mancare la possibilità di avere osservabili *locali*, cioè localizzabili in un punto particolare della varietà: proprio a causa dell'azione non locale su tutti i campi dei

diffeomorfismi, una certa quantità dipendente da un qualche punto fissato non potrebbe essere invariante, perché sarebbe “trasportata via” da *quel* punto, e dal suo valore.

È forse questa la distinzione più rilevante che separa la RG dalle altre teorie: la localizzazione di un evento rispetto a uno spaziotempo di *background*, o rispetto a un sistema di riferimento esterno fissato, non ha più significato: uno stato fisico non è più posto da qualche parte sulla varietà. Si usa dire che la localizzazione spaziotemporale è *relazionale*, in quanto localizzazioni spaziali e temporali sono definite solo in termini di relazioni di contiguità fra gli oggetti dinamici, contiguità che diviene la «fondazione della struttura dello spaziotempo»⁶⁶, mentre i punti della varietà – ridotti a strumento matematico atto a descrivere le coincidenze spaziotemporali – sono privati di qualsiasi significato ontologico fondamentale⁶⁷.

L'argomento del buco, allora, che fonda la sua sottodeterminazione proprio su quelle posizioni “assolute” dei campi dinamici relative allo spaziotempo, fallisce i suoi intendimenti “a monte”, in quanto la RG non è adatta a predire i valori né di queste né di qualsiasi grandezza localizzata in punti della nuda varietà.

A nostro parere, così – se si vuole “lavorare” con ontologie “stimolate” dalla fisica –, non è tanto l'argomento del buco, tramite la sua (indiretta: in quanto disponibile solo dopo una scelta metafisica) minaccia al determinismo, a indicare una pesante compromissione del sostanzialismo, quanto l'invarianza per diffeomorfismi, sulla quale l'argomento stesso comunque si basa, a dettare (in modo forse fisicamente più diretto, non richiedendo premesse ontologiche: la localizzazione relazionale è un *fatto* della teoria) una posizione che deve necessariamente iscrivere, oltreché la natura “ibrida” del campo metrico, l'impossibilità di una identificazione intrinseca dei punti della varietà⁶⁸.

Tenendo conto che nella RG il modo più realistico per localizzare un punto o una regione dello spaziotempo è quello di fare uso dei gradi di libertà della teoria, quali materia (particelle) (come professa l'argomento del punto-coincidenza), o campi (che è quanto propone, ad esempio, Stachel⁶⁹), ne discende che tale localizzazione relazionale non declina necessariamente, come suggerirebbe la sua etimologia, in un relazionalismo classico (si può fare, appunto, anche a meno della materia a favore della metrica), ma da essa traspare un'intelaiatura spaziotemporale che, sebbene ancora conservi quell'evidenza relazionale d'insieme della localizzazione dinamica, è diversamente disposta verso l'ontologia dei suoi punti.

Il perno della questione è naturalmente il campo metrico che, nel suo essere “reinterpretazione” fisico-matematica dello spazio e del tempo newtoniani (e minkowskiani), dovrebbe indurre le nostre riflessioni sulla realtà dello spaziotempo come attributo di un campo⁷⁰, ossia di una grandezza fisica spazialmente estesa, che – oltre a esistere in una dimensione ontologica “totalizzante” rispetto agli altri campi (tutti necessitano delle sue informazioni spaziotemporali) – ha la proprietà di corrispondere a *un* unico campo gravitazionale, mentre l’opposto non accade: *quel* campo gravitazionale corrisponde, invece, a una classe di equivalenza di campi metrici (diffeomorfi)⁷¹. Qual è, allora, questo contenuto *comune* alle varie metriche di una certa classe, e che rappresenta *un* campo gravitazionale?

L’invito è, insomma, a un adeguamento dell’“entrante” prospettiva ontologica a tutto questo – *in primis* all’indisponibilità, per i punti, di proprietà intrinseche –, prospettiva che, sebbene solo recentemente sia stata applicata al realismo in filosofia della scienza e alle controversie sullo spaziotempo in particolare, ha, rispetto a questo secondo aspetto, la lontana ma illustre fisionomia newtoniana.

7. La “terza via”: lo strutturalismo spaziotemporale

Una scoperta postuma del 1962, dal *De Gravitatione et equipondio fluidorum*, dimostra che Newton aveva una comprensione della natura di spazio e tempo molto più profonda e sensibilmente non in linea con quella che le storiche tradizionali presentazioni del suo assolutismo usualmente gli attribuiscono, una comprensione che, prima Torretti⁷², poi – ma con molta più “veemenza” – Dorato-Lusanna-Pauri suggellano come “proto-strutturalista”. Ma sentiamo Newton:

Forse ci si attende ora che io definisca l’estensione come sostanza o accidente o altrimenti come niente di tutto questo. Ma proprio per nulla, poiché essa ha il suo proprio modo d’esistere che non si adatta né alla sostanza, né agli accidenti [...]. Inoltre, l’immobilità dello spazio sarà meglio esemplificata dalla durata. Poiché, proprio come le parti del tempo derivano la loro individualità dal loro ordine, cosicché (per esempio) se ieri dovesse scambiarsi di posto con oggi e diventare il successivo tra i due, perderebbe la sua individualità e non sarebbe più ieri, ma oggi; così le parti dello spazio derivano la loro natura dalla loro posizione, cosicché se due qualsiasi potessero cambiare le loro posizioni,

cambiarebbero al tempo stesso la loro natura e ciascuna sarebbe convertita numericamente nell'altra. Le parti della durata e dello spazio sono comprese essere identiche a ciò che realmente sono grazie al loro mutuo ordine e alla loro mutua posizione [propter solum ordinem et positiones inter se]; né hanno un qualunque tipo di individualità a parte quella dell'ordine e della posizione, che dunque non possono essere alterate.⁷³

Newton, quindi, mal adattava lo spazio, l'«estensione», e «il suo proprio modo d'essere», sia al concetto di sostanza che a quello opposto di accidente, finendo comunque con l'approssimarsi più alla natura del primo, in un'ottica, però, in cui le parti dello spazio (e del tempo) acquistano individualità non “autonomamente”, ma una rispetto all'altra perché inserite in un ordine relazionale complessivo⁷⁴: in una *struttura*. Però, prima di ascoltare la risonanza odierna della voce newtoniana, torniamo brevemente all'inizio di questo articolo.

Avevamo definito genericamente una *struttura* come un insieme di elementi costituenti (i cosiddetti *relata*, ossia *entità strutturate*) dotati di certe proprietà, relazioni e operazioni⁷⁵, e, al suo interno, una *simmetria* come un *automorfismo*, cioè una permutazione che, mescolando gli elementi del dominio, mescola le loro proprietà e relazioni senza, però, alterare la struttura di partenza. Questa *invarianza* della struttura si ha se – per così dire – assecondiamo la fisica guardando solo alle proprietà e alle relazioni qualitative, appunto preservate dalla permutazione grazie alla indistinguibilità qualitativa degli elementi, ossia all'indifferenza della stessa struttura al particolare ruolo che, al suo interno, ognuno di essi gioca; se, al contrario, subentra *qualche* metafisica – ad esempio, dotando gli elementi del dominio di eccellenza – l'invarianza, propriamente *metafisica*, può perire, venendo ad aggiungersi un ulteriore grado d'individuazione (non relazionale) degli elementi che ne riconosce le diverse assegnazioni di proprietà post-permutazione.

È chiaro che il primo caso (fisico) non riesce ad “affacciarsi” compiutamente sul secondo (metafisico), non riesce, cioè, a pronunciarsi sul modo in cui la struttura è posta in essere dagli elementi del dominio, quindi sulle loro individualità; sottodeterminazione della metafisica che “si alleggerisce”, però, se scegliamo di porre “enfasi” ontologica sulla semplice struttura in sé, privando di significato l'indagine sul *come* essa si radica nei suoi costituenti, se, insomma, invertiamo la marcia su questa sorta di “territorio liminale” fra fisica e metafisica, considerando che non è tanto una questione di (“colpevole”) sottodeterminazione della metafisica da parte della fisica,

quanto di una (“trascurabile”) ridondanza della prima rispetto alla seconda. Ciò che così si profila come fondamentale, *reale*, è la struttura stessa, intesa, ripetiamo, come ciò che è invariante sotto certe simmetrie.

La traduzione di questo discorso generale nel nostro originario ragionamento sullo spaziotempo è facilmente intuibile: poiché i problemi metafisici si hanno con i punti intesi come entità fornite di una qualche nozione d’identità – lo si è visto: le osservabili nella RG sono indifferenti alla distribuzione dei punti della varietà –, la proposta è di liberare (anche parzialmente) le relazioni spaziotemporal proprio da quella dipendenza che le vincola a essere determinate, per l’appunto, da un insieme di punti – primitivo, nel caso sostanzialista; derivato dalla materia, nel caso relazionalista – spostando, allora, il baricentro ontologico sull’entità strutturale spaziotemporale che diviene ora *cosa in sé*⁷⁶.

Fare questo – a nostro modo di vedere – significa interpretare in maniera più consona la natura “ibrida” del campo metrico: il fatto che esso non riesca ad aderire pienamente a una modalità esistenziale né puramente spaziotemporale, né materiale, ci suggerisce di selezionare, da questa entità, un *quid* che coniughi tali due imprescindibili (e incommensurabili) aspetti, e questa *sintesi* può configurarsi come la struttura dinamica intrinseca al campo⁷⁷, fornendo, così, all’ontologia spaziotemporale sia l’ordine cronogeometrico relazionale “olistico” della metrica⁷⁸, sia, nel contempo – essendo questa un campo fisico dotato di particolare materialità (irriducibile alla distribuzione dei campi di materia ordinari) –, un’esistenza indipendente “sostanziale” (anche puramente energetica, quali le soluzioni einsteiniane “vuote”, di sole perturbazioni gravitazionali, richiedono).

Ecco allora che si può conservare del relazionalismo il suo specifico privilegiare le relazioni e la più naturale apertura all’invarianza per diffeomorfismi, e del sostanzialismo il suo impegno a un’esistenza, ovviamente ancora dinamica, del “contenitore” spaziotemporale; oppure – specularmente detto – si possono accantonare, del relazionalismo, il nesso con gli oggetti materiali e l’adozione di uno stretto anti-realismo verso lo spaziotempo, e del sostanzialismo l’aderenza a un’intrinseca individualità dei punti. Alcuni autori – quali Dorato-Pauri-Lusanna – parlano, così, esplicitamente di un *tertium quid* fra i classici relazionalismo e sostanzialismo, vale a

dire di una nuova posizione filosofica sulla natura dello spaziotempo – lo *strutturalismo spaziotemporale* – che affronta, assimila e, quindi, supera la “moderna” dualità materia/spazio del campo metrico (a mo’ della “vecchia” onda/corpuscolo delle particelle), distillando una tesi realista in base alla quale «il mondo fisico *esemplifica* o *approssima* la struttura spaziotemporale specificata dal modello in cui la teoria consiste»⁷⁹, dove quindi l’indipendenza-dalla-mente del mondo, che trapela stavolta nei ripieghi strutturali della teoria, è ancora garantita.

Laddove le due classiche contendenti nell’arena spaziotemporale implicano, come detto, una tesi di dipendenza – assegnando un primato ontologico a un insieme primitivo di oggetti (punti: il sostanzialismo; “cose” materiali: il relazionalismo) a “nutrimento” del corpo relazionale dello spaziotempo –, la “terza via” strutturalista può capovolgere questo legame, “dissolvendone” gli oggetti in *nodi*, o *intersezioni*, nella struttura (a essa, così, non più ontologicamente superiori), consegnando un attestato di realtà (ossia di corrispondenza *diretta* e *biunivoca* col mondo fisico) alla stessa struttura spaziotemporale e non alla maniera in cui formulazioni metafisiche (matematiche) alternative la descrivono⁸⁰.

In parallelo col più generale *realismo strutturale* nella filosofia della scienza⁸¹, lo strutturalismo dello spaziotempo guarda matematicamente alle strutture che i modelli delle teorie geometriche spaziotemporali hanno in comune, senza soffermarsi su punti, linee, piani, ma sulle relazioni che questi istanziano. Se, però, relazionalismo e sostanzialismo (*non* della varietà) possono incontrarsi “nei” campi metrici *dove* la struttura matematica è collocata, meno facile è accordarsi sul *come*, ontologicamente, essa si sostiene. Del resto, se per un verso sappiamo che “ci serve” un’idea di “permutazione delle parti” di una struttura che in qualche modo manchi di senso compiuto – proprio perché l’individualità di una “parte” è determinata dinamicamente dal ruolo che essa gioca nel complesso, e quindi una “parte” ridislocata non sarebbe più *quella* “parte” (si pensi alle precedenti considerazioni di Newton) –, dall’altro verso non è immediato visualizzarci una struttura priva di costituenti-cardine che la sostengano, o che “funzionino” al suo interno comunque senza possedere *qualche* proprietà intrinseca (non relazionale).

Su tale dicotomia si fondano le due più importanti sottodistinzioni del realismo strutturale: *epistemica* e *ontica*. Mentre la prima sostiene che ci sono oggetti reali

esterni alla nostra mente (e dotati di proprietà intrinseche), però accessibili solo nella forma di relazioni fra loro (esplicitando, così, una sorta d'incolmabile *gap* fra ontologia ed epistemologia) – relazioni che esprimono, allora, qualcosa di vero su un mondo che noi possiamo comunque conoscere soltanto parzialmente attraverso la sua struttura e non negli elementi fondamentali⁸² –, la seconda, invece, sostiene che non c'è alcun oggetto e che le vere relazioni a cui abbiamo accesso esauriscono l'ontologia che diviene, appunto, di pura struttura: è possibile conoscere quest'ultima attraverso le relazioni, ma non è possibile ridurla a (non è dipendente da) un insieme di oggetti noumenici⁸³. Gli strutturalisti epistemici ritengono, quindi, che «le strutture matematiche delle nostre migliori teorie scientifiche possono soltanto fornire informazioni epistemiche, e non informazioni sull'ontologia che sta alla base delle relazioni strutturali osservate, mentre i realisti strutturali ontici sostengono che le strutture rivelano fatti o verità riguardo alla sottostante ontologia e possono, in effetti, *essere* la sottostante ontologia»⁸⁴.

Lo strutturalismo epistemico applicato allo spaziotempo implica, così, che i suoi punti siano costituiti da proprietà intrinseche che prescindono dalla struttura (cioè dal campo metrico) d'appartenenza. Solo quest'ultima, intesa come relazioni istanziate dai suoi punti (oggetti sui quali la metrica è “posta”), può essere conosciuta, mentre l'individuazione intrinseca dei punti non è permessa. Lo strutturalismo ontico, invece, può superare questa indeterminatezza dell'identità dei punti (con ovvio dissolvimento dell'argomento del buco) proprio perché li mette al bando, conservando solo la struttura spaziotemporale. Ma come “si sostiene”, allora, lo spaziotempo? Ha, cioè, senso una *pura* struttura, o il senso gli è *dato* solo perché non si riesce ad andare *oltre*?

Un interessante approccio è quello di Stachel, secondo il quale due sono le più importanti sottoclassi rappresentative del realismo strutturalista in ambito ontologico: la classe delle *relazioni fra cose* (già individuate) – vale a dire: «Ci sono relazioni, in cui le cose sono primarie e la loro relazione secondaria»⁸⁵ –, e la classe delle *cose fra relazioni* (che individuano entità precedentemente non identificate): «Ci sono relazioni, in cui la relazione è primaria mentre le cose sono secondarie»⁸⁶. In termini di distinzione fra *proprietà essenziali* e *non essenziali* di una cosa⁸⁷, le due precedenti categorie possono essere espresse, rispettivamente, con: «Nessuna proprietà essenziale

dei relata può dipendere dalla particolare relazione in considerazione», e «almeno una proprietà essenziale di ognuno dei relata deve dipendere dalla relazione»⁸⁸. Ora, se definiamo con *quiddità* la «natura essenziale di un'entità, il suo tipo naturale» (caratterizzato, cioè, dalla stessa essenza), e con *ecceità* quell'unica sua individualità che la distingue da altre con la medesima quiddità, allora – continua Stachel – i punti dello spaziotempo come tali possiedono quiddità, ma l'ecceità la guadagnano solo dalle proprietà ereditate dalle relazioni metriche, o comunque da altre relazioni imposte loro, e sono quindi esempi – essendo, appunto, le loro ecceità dipendenti da strutture relazionali che le individuano – di “cose fra relazioni”. L'analogia è con un insieme di particelle elementari in meccanica quantistica, insieme invariante per una permutazione di queste (*simmetria di permutazione*): l'idea generale è, quindi, che gli oggetti indistinguibili di un insieme (punti di una varietà o membri di un insieme quantistico) possiedono solo proprietà estrinseche, relazionalmente contingenti, che li individuano in *quell'*insieme⁸⁹. L'altra semplice analogia, usuale nella filosofia strutturalista matematica, è col ruolo che i singoli numeri naturali hanno nel loro insieme: scambiare, per dire, il “5” col “9” non crea una nuova struttura, ma fornisce la stessa (quella, appunto, dei numeri naturali) con una nuova “etichettatura” (dove, ora, il “9” gioca il ruolo del “5”, e viceversa). Il numero, così, esiste come “posto” (o in virtù di occuparlo), e non come entità indipendente trascendente (come recita il platonismo). Mentre, però, i numeri così intesi sono semplici *place-holders*, le particelle hanno un grado di realtà ben diverso, occupando non solo un posto in una struttura, ma anche un posto nel mondo fisico.

La prossimità ontologica dei punti dello spaziotempo con le particelle quantistiche pare, in verità, agevolare una posizione “intermedia” fra quella ontica e quella epistemica, quindi sempre nell'area strutturalista. Vediamo come.

L'entità strutturale, asse centrale di questa metafisica, sembra porsi come limite idealmente più chiaro fra ciò che *deriva* dalla fisica, e ciò che è metafisica. Poiché, infatti, la RG non riesce a pronunciarsi sulle identità ontologiche individuali dei punti dello spaziotempo a causa dell'invarianza per diffeomorfismi attiva, siamo vincolati a ravvisare la realtà (*l'oggettività fisica*) costitutiva dello spaziotempo nella classe di equivalenza delle metriche, laddove è contenuta la parte invariante delle possibili diverse formulazioni metriche di una data soluzione alle equazioni di campo

einsteiniane: appunto, le relazioni strutturali fra i valori metrici. Fin qui il lascito fisico-matematico. Ora, penetrare *nella* struttura significa già interrogarsi sui relata – semplici *place-holders* o entità eccitistiche? –, significa, cioè, domandarsi fino a quale punto un'entità possa esistere senza proprietà intrinseche⁹⁰, insomma, ci “si espone” su un terreno squisitamente metafisico, sul quale, sebbene strutturalismo epistemico e ontico si dividono – “accontentandosi” dell'esistenza di certi relata (dalle ignote intrinseche proprietà) e del loro tessuto di relazioni, il primo; facendo piazza pulita di tutto tranne delle relazioni, il secondo –, al contempo anche si uniscono nella pretesa assegnazione di priorità ontologiche, rispettivamente, ai relata e alle relazioni. Ma questo “sbilanciamento” è proprio necessario? In parole povere: chi dice all'”ontico” che c'è *solo* la struttura senza oggetti in relazione e all'”epistemico” che i relata esistono necessariamente *in sé*? Non si propone, invece, forse con più facilità, ma anche con più “onestà”, la possibilità di una dispensa paritaria di ontologia fra relazioni e relata, per rendere *entrambi* attori protagonisti sullo scenario spaziotemporale?

Ovviamente, nemmeno questo approccio è “provato” dalla fisica: se essa ci indica – ad esempio, con l'invarianza per diffeomorfismi – un'emersione di uno spaziotempo *einsteiniano* come “qualità strutturale di un campo”, quindi di una certa *struttura* (fisica) dello spaziotempo, dall'altra non può dirci logicamente granché sulla sua *natura* (metafisica). Non ci convince, però, né dire che questi ultimi due attributi coincidano, come uno strutturalista ontico ritiene, né che il primo sia *il* limite umano del secondo, come professa lo strutturalista epistemico. Forse è più naturale – proprio perché l'immagine di una tessitura più fine dello spaziotempo, oltre a quella in rilievo strutturale, non ci è, al momento, concessa – fermarsi, almeno a tale livello d'indagine – dove la struttura diviene, comunque, un buon viatico per perseguire la natura dello spaziotempo, e dove, del resto, risiede il nostro argomento del buco iniziale –, a un'ontologia “neutra” di relazioni *e* relata, neutra in quanto non vi sono basi indiscutibili per eliminare i secondi, né per retrocedere le prime a uno *status* secondario: le relazioni esistono grazie ai relata, i relata esistono grazie alle relazioni, cioè i relata non possiedono più ipotetiche proprietà intrinseche extra-relazionali (“zona d'ombra” degli epistemici), ma *esistono* (non come i “vuoti” ruoli strutturali degli ontici) in virtù delle relazioni che allacciano gli uni con gli altri; e anche se tutto ciò che “hanno” i

relata è conferito loro dalle relazioni, questo non significa solo che i primi dipendano dalle seconde, poiché queste, a loro volta, semplicemente *non sarebbero* senza i relata.

Queste considerazioni sfociano sia in quello che Rickles (2004) – chiamando a testimonianza addirittura Eddington⁹¹ – definisce *strutturalismo ontologico minimale*, sia nel più recente *realismo strutturale moderato* di Esfeld-Lam (2006), successivo al cosiddetto *strutturalismo del punto* di Lusanna-Pauri (2005), controparte più fisico-matematica delle due precedenti posizioni, la quale, lavorando nella formulazione dell'hamiltoniana vincolata della RG, assegna ai punti-evento dello spaziotempo «un tipo peculiare di *proprietà* che sono conferite loro *olisticamente* dall'intera struttura metrica simultanea»⁹² (ossia l'individuazione di un certo punto viene a dipendere dai valori della metrica e delle sue derivate su tutta una serie di superfici di Cauchy), e quindi i punti risultano «ontologicamente equivalenti all'esistenza del campo gravitazionale come entità estesa»⁹³. La struttura dello spaziotempo, rappresentata dal campo metrico, è radicata, così, su genuine entità fisiche di tipo-punto che *esistono intessendo* relazioni.

Per concludere, sebbene sosteniamo la causa di un possibile dissolvimento del tradizionale dibattito sostanzialismo/relazionalismo nelle soluzioni metafisiche dello strutturalismo spaziotemporale, è forse prematuro dire se questo si risolverà indiscutibilmente in una panacea per sanare l'*impasse* sulla dualità del campo metrico e sulla generale natura dello spaziotempo. Del resto lo *status* stesso dello strutturalismo pare ancora *in divenire*⁹⁴ in quella significativa impresa di dirimere e sintetizzare due così imponenti tradizioni filosofiche, quali sostanzialismo e relazionalismo⁹⁵, in un *unicum* concettuale che l'attuale grado di sviluppo della fisica forse non è nemmeno pronto a saldare⁹⁶.

Al di là delle difficoltà, sembra, tuttavia, che il modo più appropriato per tener conto dell'argomento del buco e, in genere, degli argomenti di permutazione offerti dalle simmetrie *fisiche*, è quello di elevare la loro costitutiva parte *matematica* invariante a struttura che fonda una *metafisica* di relazioni e oggetti, dall'identità inesorabilmente estrinseca, in un equilibrato connubio ontologico sul quale si sostengono, oltre alle leggi della teoria, i fenomeni naturali del mondo.

Bibliografia

- Bartels, A., (1996): «Modern Essentialism and the Problem of Individuation of Spacetime Points», *Erkenntnis* 45, pp. 25-43.
- Belot, G. (1995a): «New Work for Counterpart Theorists: Determinism», *The British Journal for the Philosophy of Science* 46, pp. 185-95.
- , (1995b): «Determinism and Ontology», *International Studies in the Philosophy of Science* 9, No. 1, pp. 85-101.
- , (1996): *Whatever is Never and Nowhere is Not: Space, Time and Ontology in Classical and Quantum Gravity*. Ph.D Thesis in Philosophy: University of Pittsburgh.
- Belot, G., Earman, J., (2001): «Pre-Socratic Quantum Gravity», <http://www.pitt.edu/~gbelot/Papers/presocratic.pdf>
- Brighouse, C., (1994): «Spacetime and Holes», in Hull, D., Forbes, M., Burian, R.M. eds., *Proceedings of the 1994 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol. 1. East Lansing, Michigan: Philosophy of Science Association, pp. 117-25.
- , (1997): «Determinism and modality», *The British Journal for the Philosophy of Science* 48, pp. 465-81.
- Butterfield, J., (1987): «Substantivalism and Determinism», *International Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 2, num. 1, pp. 10-32.
- , (1989a): «The Hole Truth», *The British Journal for the Philosophy of Science* 40, pp. 1-28.
- , (1989b): «Albert Einstein Meets David Lewis», in Fine, A., Leplin, J. eds., *Proceedings of the 1988 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol. 2, East Lansing, Michigan: Philosophy of Science Association, pp. 65-81.

- , (1998): «Determinism and Indeterminism», in Craig, E. ed., *Routledge Encyclopedia of Philosophy*. London: Routledge, pp. 33-9.
- Cassirer, E., (1921): *La Teoria della Relatività di Einstein*. Ed. it. 1997, Roma: Newton Compton.
- Dorato, M., (2000): «Substantivalism, Relationism, and Structural Spacetime Realism», *Foundations of Physics* 30, pp. 1605-28.
- , (2005): «La filosofia dello spazio e del tempo», in AA.VV., *La natura delle cose*, Roma: Carocci, pp. 15-137.
- Dorato, M., Pauri, M., (2004): «Holism and Structuralism in Classical and Quantum GR», <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00001606>
- Earman, J., (1986): *A Primer on Determinism*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company.
- , (1989): *World Enough and Space-Time: Absolute Versus Relational Theories of Space and Time*. Cambridge: MIT Press.
- Earman, J., Norton, J. D., (1987): «What Price Space-Time Substantivalism? The Hole Story», *The British Journal for the Philosophy of Science* 38, pp. 515-25.
- Einstein, A. (1916): «I fondamenti della teoria della Relatività Generale», in Bellone, E., *Albert Einstein: Opere scelte*, 1988, Torino: Bollati Boringhieri, pp. 282-343.
- , (1917): *Relatività: esposizione divulgativa*. Ed. it. 1967, Torino: Boringhieri.
- , (1920): «L'etere e la teoria della relatività», in Bellone, E., *Albert Einstein: Opere scelte*, 1988, Torino: Bollati Boringhieri, pp. 507-16.
- , (1936): «Fisica e realtà», in Bellone, E., *Albert Einstein: Opere scelte*, 1988, Torino: Bollati Boringhieri, pp. 528-63.
- Eliot, T. S., (1974): *Poesie*. Verona: Mondadori.

- Esfeld, M., Lam, V., (2006): «Moderate Structural Realism about Space-Time», di pross. pubblic. in *Synthese*, <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00002778/01/SR-ME-VL08.06.06.pdf>
- French, S., (2001): «Getting Out of a Hole: Identity, Individuality and Structuralism in Space-Time Physics», *Philosophica* 67, pp. 11-29.
- French, S., Ladyman, J., (2003): «Remodelling Structural Realism: Quantum Physics and the Metaphysics of Structure», *Synthese* 136, 31-56.
- Friedman, M.. (1983): *Foundations of Space-Time Theories*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Hawking, S. W., e Ellis, G. F. R., (1973): *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hofer, C., (1996): «The Metaphysics of Space-Time Substantivalism», *The Journal of Philosophy*, Vol. XCIII, num. 1, pp. 5-27.
- , (1998): «Absolute Versus Relational Spacetime: for Better or Worse, the Debate Goes on», *The British Journal for the Philosophy of Science* 49, pp. 451-67.
- Isham, C. J., (1994): «Prima Facie Questions in Quantum Gravity», in J. Ehlers e H. Friedrich, eds., *Canonical Gravity: from Classical to Quantum*. Germany: Springer-Verlag, pp. 1-21.
- Jammer, M., (1953): *Concepts of Space. The History of Theories of Space in Physics*. Cambridge: Harvard University Press. Ed. it.: *Storia del concetto di spazio*, 1979, Milano: Feltrinelli.
- Kostro, L., (2001): *Einstein e l'etere: relatività e teoria del campo unificato*. Bari: Edizioni Dedalo.
- Ladyman, J., (1998): «What is Structural Realism?», *Studies in History and Philosophy of Science* 29, pp. 409-424.
- Laudisa, F., (2005): «La causalità in fisica», in AA.VV., *La natura delle cose*, Roma: Carocci, pp. 395-428.

- Leeds, S., (1995): «Holes and Determinism: Another Look», *Philosophy of Science* 62, pp. 425-37.
- Leibniz, G. W., (1717): *Epistolario Leibniz-Clarke, 1715-1716*, in Id., *Saggi filosofici e lettere*, 1963, Roma-Bari: Laterza, pp. 387-467.
- Lewis, D., (1983): «New Work for a Theory of Universals», *The Australasian Journal of Philosophy* 61, pp. 343-77.
- , (1986): *On the Plurality of Worlds*. Oxford: Basil Blackwell.
- Liu, C., (1996): «Realism and Spacetime: of Arguments Against Metaphysical Realism and Manifold Realism», *Philosophia Naturalis* 33, pp. 243-63.
- Lusanna, L., Pauri M., (2005): «General Covariance and the Objectivity of Space-Time Point-Events», *arXiv:gr-qc/0503069*
- Macchia, G., (2006): *Determinismo e realtà dello spaziotempo. Una rassegna critica delle risposte all'Argomento del buco di Einstein*. Tesi di laurea in astronomia: Università di Bologna.
- Maudlin, T., (1989): «The Essence of Space-Time», in A. Fine e J. Leplin, eds., *Proceedings of the 1988 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol. 2, East Lansing, Michigan: Philosophy of Science Association, pp. 82-91.
- Maudlin, T., (1990): «Substances and Space-Time: What Aristotle Would Have Said to Einstein», *Studies in History and Philosophy of Science* 21, pp. 531-61.
- McCabe, G., (2006): «Structural realism and the mind», <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00002751/01/Mind.pdf>
- Melia, J.,(1999): «Holes, Haecceitism and Two Conceptions of Determinism», *The British Journal of the Philosophy of Science* 50, pp. 639-64.
- Misner, C., Thorne, K., Wheeler, J.,(1973): *Gravitation*. New York: W. H. Freeman.
- Mundy, B.,(1992): «Space-Time and Isomorphism», in D. Hull, M. Forbes e K. Okruhlik, eds., *Proceedings of the 1992 Biennial Meeting of the Philosophy of*

- Science Association*, Vol. 1, East Lansing, Michigan: Philosophy of Science Association, pp. 515-27.
- Norton, J. D.,(1984): «How Einstein Found His Field Equations, 1912-1915». Ristamp. in Howard, D., Stachel, J. eds., *Einstein Studies*. Vol. 1. *Einstein and the History of General Relativity*. (Originarium. Public. in *Historical Studies in the Physical Sciences*, 14: pp. 253-316). Boston: Birkhäuser, pp. 101-59.
- , (1987): «Einstein, the Hole Argument and the Reality of Space», in J. Forge, ed., *Measurement, Realism and Objectivity*. Dordrecht: Reidel, pp. 153-88.
- , (1988): «The Hole Argument», in A. Fine e J. Leplin, eds., *Proceedings of the 1988 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Vol. 2, East Lansing, Michigan: Philosophy of Science Association, pp. 56-64.
- , (1989): «Coordinates and Covariance: Einstein's View of Space-Time and the Modern View», *Foundations of Physics*, Vol. 19, No. 10, pp. 1215-63.
- , (1999): «The Hole Argument», *Stanford Encyclopedia of Philosophy*: <http://plato.stanford.edu/entries/spacetime-holearg/>
- Pais, A., (1982): “Sottile è il Signore...” *La scienza e la vita di Albert Einstein*, ed. it. (1991), Torino: Bollati Boringhieri.
- Pauri, M., (1996): «Oggettività e realtà», in F. Minazzi, a cura di, *L'oggettività della conoscenza scientifica*. Milano: Franco Angeli, pp. 79-112.
- Pauri, M., Vallisneri, M., (2002): «Ephemeral Point-Events: Is There a Last Remnant of Physical Objectivity?», *Dialogos* 79, pp. 263-303. Anche in: <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000931>
- Penrose, R., (1996): «On Gravity's Role in Quantum State Reduction», *General Relativity and Gravitation* 28, pp. 581-600.
- Pooley, O., (2002): *The Reality of Spacetime*. Ph.D Thesis in Philosophy: University of Oxford.

- Pooley, O., (2005): «Points, Particles, and Structural Realism», in French, S., Rickles, D., Saatsi, J. eds., *Structural Foundations of Quantum Gravity*. Oxford: Oxford University Press. Anche in: <http://users.ox.ac.uk/~ball0402/papers/pvsp.pdf>
- Rickles, D. P., (2004): *Spacetime, Change and Identity. Classical and Quantum Gravity in Philosophical Focus*. Ph.D Thesis in Philosophy: University of Leeds.
- Rovelli, C., (1997): «Halfway Through the Woods: Contemporary Research on Space and Time», in J. Earman e J. Norton, eds., *The Cosmos of Science*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, pp. 180-223.
- , (2004): *Quantum Gravity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rynasiewicz, R., (1994): «The Lessons of the Hole Argument», *The British Journal for the Philosophy of Science* 45, pp. 407-36.
- , (1996a): «Absolute Versus Relational Space-Time: an Outmoded Debate?», *The Journal of Philosophy*, Vol. XCIII, num. 6, pp. 279-306.
- , (1996b): «Is There a Syntactic Solution to the Hole Problem?», *Philosophy of Science* 63S, pp. S55-S62.
- Slowik, E., (2005): «Spacetime, Ontology, and Structural Realism», *International Studies in the Philosophy of Science* 19, No. 2, pp. 147-166.
- Smolin, L., (2000a): «The Present Moment in Quantum Cosmology: Challenges to the Arguments for the Elimination of Time», <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000153>
- , (2000b): *Three Roads to Quantum Gravity*. Great Britain: Basic Books.
- Stachel, J., (1980): «Einstein's Search for General Covariance, 1912-1915», letto al *Ninth International Conference on General Relativity and Gravitation*, Jena; public. in Howard, D., Stachel, J. eds., *Einstein Studies*. Vol. 1. *Einstein and the History of General Relativity*. Boston: Birkhäuser, 1989, pp. 63-100.
- , (1993): «The Meaning of General Covariance», in J. Earman, A. Janis e G. Massey, eds., *Philosophical Problems of the Internal and External Worlds: Essays on the*

Philosophy of Adolf Grünbaum. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, pp. 129-160.

—, (2002): *Einstein from “B” to “Z”*. Boston: Birkhäuser.

—, (2005): «Structure, Individuality and Quantum Gravity», *arXiv:gr-qc/0507078*

Torretti, R., (1999): *The Philosophy of Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Wald, R. M.,(1984): *General Relativity*. Chicago: University of Chicago Press.

Weingard, R.,(1975): «On the Ontological Status of the Metric in General Relativity», *The Journal of Philosophy* 72, No. 14, pp. 426-431.

Worrall, J.,(1989): «Structural Realism: the Best of Both Worlds?», *Dialectica* 43, pp. 99-124.

Note

¹ Eliot (1974, 258).

² Da Stachel (1980, 70).

³ Einstein si pronunciò esplicitamente sull'argomento in quattro occasioni, formulandolo essenzialmente in due versioni: la prima, del 1913, ripetuta sostanzialmente immutata in due seguenti articoli degli inizi del 1914 (il primo firmato da solo, il secondo con l'amico matematico Marcel Grossmann); la seconda versione presentata nell'esposizione definitiva della teoria di Einstein-Grossmann all'Accademia di Berlino nell'ottobre del 1914. Per quanto tali due versioni sembrino diverse, il loro contenuto è ormai ritenuto essere il medesimo (per un esame puntuale e approfondito di tutto il lungo tormentato percorso di Einstein fino al raggiungimento delle equazioni di campo finali della relatività generale si vedano Stachel (1980) e Norton (1984)).

⁴ È significativo che persino l'eminente matematico David Hilbert credette, almeno temporaneamente, che l'argomento del buco potesse precludere tutte le teorie generalmente covarianti (cfr. Stachel 2002, 339-46).

⁵ In genere i campi B^i sono dinamicamente indipendenti dai "soprastanti" campi D^j , l'opposto non è vero: i D^j soddisfano le leggi direttamente connesse ai B^i .

⁶ Friedman (1983, 32).

⁷ Ricordiamo brevemente le più importanti strutture contenute nelle teorie dello spaziotempo: *metrica* (dà senso all'idea di distanza fra due punti e di lunghezza di una curva); *affine* (fornisce una nozione di linea dritta e di trasporto parallelo di vettori lungo una curva); *conforme* (dà senso all'idea di angolo fra rette intersecantisi); *differenziale* (permette di definire le derivate relative alla coordinatizzazione dei punti); *topologica* (ci informa su come sono connesse le parti della varietà). Per una spiegazione più esauriente si veda, fra i tanti, il classico testo del Friedman (1983).

⁸ $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$, dove $R_{\mu\nu}$ è il *tensore di Ricci*, R lo scalare di curvatura.

⁹ Fatto riassunto dalla memorabile frase di Wheeler: «La materia dice allo spazio come incurvarsi; lo spazio dice alla materia come muoversi» (Misner, Thorne, Wheeler, 1973).

¹⁰ In generale, $\langle M, g, \phi * T \rangle$ non sarà un modello permesso proprio per questo legame indissolubile fra g e T : è insomma necessario, "gattopardianamente", che tutto cambi affinché nulla cambi, continuando così a essere, il nuovo modello, ancora un modello della teoria.

¹¹ La scelta migliore è ovviamente nei termini contingenti di una sensata adesione matematica al sistema fisico: non sarà, ad esempio, conveniente – né in termini di calcolo, né di forma delle equazioni e, quindi, anche d'intuizione fisica – adottare coordinate cartesiane per una distribuzione di materia a simmetria sferica, che invece ospiterebbe, con più naturalezza, coordinate sferiche.

¹² Stiamo semplicemente dicendo questo: immaginiamo un tavolo coperto da una più ampia tovaglia a quadretti numerati T . Inizialmente, su un dato punto p del tavolo è poggiato un certo quadretto T , e, spostando di una distanza ϕ la tovaglia, su p andrà a posarsi un altro quadretto T' diverso da T (quindi $T(p) \neq T'(p)$); ora, per ripristinare la condizione iniziale relativa (cioè T sopra p) possiamo: o ripetere, banalmente, l'esatta ma opposta, operazione iniziale di trascinamento della tovaglia sul tavolo fermo, oppure spostare (ovviamente ancora di ϕ) lo stesso tavolo, allorquando il punto p diventerà un certo p' , ma proprio sotto al "suo" ritrovato quadretto iniziale detto ora T' (e quindi $T'(p') = T(p)$); si noti che la situazione iniziale è ripristinata solo in senso relativo (da qui gli apici), cioè nel senso della relazione fra tavolo e tovaglia, e non in modo assoluto (la stanza che li accoglie, per dire, li vedrà entrambi spostati, logicamente, dello stesso ammontare (vettoriale) ϕ iniziale).

¹³ Riadattata da Norton (1987).

¹⁴ Fondamentalmente quella di Descartes, con la sua idea di spazio come estensione, quindi come proprietà essenziale della materia.

¹⁵ Gran parte del dibattito assolutismo/relazionalismo è rinvenibile nel famoso epistolario che Leibniz intrattenne negli anni 1715-16 col reverendo Clarke, seguace della filosofia naturale newtoniana (cfr. Earman (1989) e Leibniz (1717)).

¹⁶ Il concetto di "sostanza" include così – come nota Dorato (2005, 23) – almeno due accezioni: quella vicina a Newton, Descartes, Spinoza – in riferimento a "ciò che esiste indipendentemente da altro", nel nostro caso uno spaziotempo come "contenitore" – e quella, più forte, prossima a Leibniz: uno spaziotempo costituito da punti spaziali e da istanti temporali dotati singolarmente di un qualche tipo d'identità. Notiamo, inoltre, che il sostanzialismo, a differenza dell'assolutismo, acclude uno spaziotempo dinamico, cioè che tiene conto – come visto – dell'influenza deformante della materia.

¹⁷ Che ha «rappresenta[to] probabilmente la più profonda trasformazione subita dai fondamenti della fisica dopo Newton» (Einstein 1936, 543).

¹⁸ Si pensi alla radiazione elettromagnetica di *background* che permea l'universo: tutti i punti dello spaziotempo sono allora occupati?

¹⁹ Mentre, però, T è un tensore a tutti gli effetti – quindi se esprime, per un certo evento, una densità d'energia (non gravitazionale) non nulla, tale rimarrà per ogni cambiamento del sistema di coordinate – t è, matematicamente, “solo” un cosiddetto *pseudotensore* e quindi, se per un dato evento è diverso da zero, si può sempre scegliere un sistema di coordinate in cui si annulla. Non è evidente fino a che punto questo sia solo un balzello matematico o, invece, un ben più cospicuo tributo imposto (d)alla questione filosofica se ciò che è *reale* dev'essere *comune* a tutte le descrizioni.

²⁰ Anche se T s'annulla dovunque – visto che esistono soluzioni delle equazioni di Einstein di spaziotempo “vuoti” (di ordinaria materia), ma con onde gravitazionali portanti energia – non ha senso alcuno che anche g si annulli: dovremmo, allora, considerare occupati tutti i punti dell'universo, anche se non vi fosse, per tornare all'esempio precedente, radiazione cosmica di fondo?

²¹ Einstein (1920).

²² Si pensi alle onde gravitazionali che si propagano nello spazio, la cui energia, in linea di principio, potrebbe essere raccolta e convertita in altri tipi d'energia.

²³ Ricordiamo che la struttura affine permette di distinguere la classe dei moti inerziali da quella dei moti accelerati, poiché definiamo il moto su rette come il moto libero da forze.

²⁴ Quanto all'energia del campo gravitazionale, essa non rappresenterebbe un problema insormontabile soprattutto grazie alla sua natura pseudo-tensoriale.

²⁵ La cui caratura è tale, per Pauri, da farla assurgere a «il nucleo fondamentale dei problemi teorici e filosofici della fisica attuale» (1996, 107).

²⁶ Non si è qui d'accordo con Dorato (2005, 127) che afferma: «Il sostanzialismo trionfa in modo chiaro solo *dopo* la filosoficamente controversa scelta di identificare spaziotempo e campo metrico» (Stachel, come vedremo, anche se adotta la suddetta identificazione, si reputa un relazionalista).

²⁷ Soprattutto questa inconciliabilità della metrica sia con la categoria di spazio sia con quella di materia – il suo stare, insomma, un po' a metà del guado – ha spinto Rynasiewicz (1996a) a giudicare l'intero dibattito sostanzialismo/relazionalismo non più molto significativo (a suo dire: «fuori moda»), se appunto inquadrato con le suddette obsolete categorie ottocentesche che si prestano ormai solo in modo fallimentare a essere proiettate sui moderni paradigmi fisici, in particolare su uno spaziotempo dinamico. Per Rovelli, l'inquadramento della metrica in “spazio” o “materia” è in fondo solo una questione terminologica: il punto centrale è, invece, che la vecchia costruzione della realtà fisica, basata su spazio e tempo nei quali la materia si muove, nella RG collassa (ci torneremo nel par. 6).

²⁸ In verità è a John Stachel (1980) che dobbiamo la prima epifania della versione einsteiniana.

²⁹ Un esempio è Pais (1982, 243-4, 264-5). Il *busillis* sta essenzialmente in un'ambigua traduzione, in un linguaggio moderno, di un apparato matematico ancora in formazione, e quindi impreciso, qual era quello di Einstein e, ovviamente, del suo tempo. Per una chiara contrapposizione tra il moderno quadro concettuale delle teorie dello spaziotempo e quello einsteiniano si veda Norton (1989).

³⁰ Si può immaginare lo spaziotempo foliato in superfici spaziali, dette di *simultaneità*, ognuna delle quali lo rappresenta in un certo istante di tempo (tutti i punti di una stessa superficie rappresentano eventi simultanei), il “trascorrere” del quale – così – “pone in essere” via via altre superfici. Per i dettagli matematici – tutt'altro che banali – del problema ai valori iniziali in RG si rimanda, tra i tanti, a Hawking-Ellis (1973), Wald (1984).

³¹ Riadattata da Norton (1999).

³² È il caso di separare tre nozioni spesso (con)fuse assieme: determinismo, causalità e predicibilità. Se la nozione di *determinismo* è «relativa a una precisa modalità di evoluzione degli stati di un sistema fisico in funzione del tempo e di certe particolari condizioni presenti a un certo istante convenzionalmente fissato come istante “iniziale”» (Laudisa 2005, 401), e quindi si ha una relazione di “determinazione” tra due stati che si basa sull'esistenza di una legge dinamica che li “collega” (più avanti ne vedremo una definizione precisa), tale relazione, in generale, non è, però, pensabile come una sorta di “produzione” del secondo stato da parte del primo (in un rapporto diretto, quindi, di causa-effetto), peculiarità che pertiene, invece, alla nozione di *causalità*; insomma: «Il determinismo *non* implica il sussistere di una relazione di causalità» (*ibid.*). L'altra assunzione di equivalenza logica da sfatare è quella tra determinismo e *predicibilità*, per esempio laddove – come ancora spiega bene Laudisa – esistono fenomeni fisici di dinamica non lineare che obbediscono a una legge deterministica, ma le cui traiettorie, fortemente dipendenti dalle condizioni iniziali, divengono presto imprevedibili. Mentre, quindi, causalità e predicibilità hanno un senso più marcatamente epistemologico (possibilità di una conoscenza), il determinismo concerne più l'ontologia, il quadro del mondo interno a una teoria (cfr. pure Earman (1986); Butterfield 1998, 33).

³³ Infatti, se prendiamo due punti q e r in M , la loro distanza – calcolata con le due diverse metriche g e $g' = d_H * g$ – sarà diversa: $d_g(q, r) \neq d_{g'}(q, r)$. Se g' calcola la distanza sui punti trasportati $q' = d_H q$ e $r' = d_H r$, invece otteniamo la stessa che si aveva con g : $d_g(q, r) = d_{g'}(q', r')$. Tornando per un attimo a Einstein, egli vide l'indeterminismo proprio nella disuguaglianza $g(x) \neq g'(x)$ – metrica diversa, sistema di coordinate uguale – e non, come alcuni più vecchi commentatori hanno ritenuto, nella $g(x) \neq g(x')$ – metrica uguale, sistema di coordinate diverso, quindi banale trasformazione di coordinate (cfr. la quarta più esplicita esposizione einsteiniana dell'argomento in Stachel (1980, 72-3)).

³⁴ Il riferimento a Leibniz è in onore alle sue posizioni sul noto *argomento dello spostamento* (del quale il diffeomorfismo attivo qui in gioco è una sorta di veste moderna) proposto da Clarke nella loro surricordata corrispondenza, e che suonava così: se ogni cosa del mondo fosse traslata di una certa distanza in una data direzione (o ruotata di un qualche angolo attorno a un asse), conservando tutte le relazioni esistenti fra i corpi, otterremmo un mondo differente dall'originario? Alla risposta affermativa dell'assolutista (tutti i luoghi e gli istanti sono dotati d'identità distinte, allora se il mondo occupa un luogo differente si origina un mondo differente), Leibniz contrapponeva le "censure" dei suoi due ben conosciuti principi di *ragion sufficiente* e d'*identità degl'indiscernibili*.

³⁵ E, significativamente, Earman-Norton chiosano: «Sottolineiamo che il nostro argomento non deriva dalla convinzione che il determinismo è o dovrebbe essere vero [...]. Se una metafisica, che forza tutte le nostre teorie a essere deterministiche, è inaccettabile, allora ugualmente una metafisica, che automaticamente decide in favore dell'indeterminismo, è pure inaccettabile. Il determinismo può fallire, ma se fallisce dovrebbe farlo per ragioni di fisica, non perché ci si affida a proprietà sostanziali che possono essere sradicate senza effetto sulle conseguenze empiriche della teoria» (1987, 524).

³⁶ Rinviamo, per più ampie disamine, a Belot (1996), Macchia (2006), Pooley (2002), Rickles (2004).

³⁷ Trascuriamo, in verità, una quarta, che privilegia un punto di vista sintattico, applicando all'argomento del buco le analisi di Putnam sull'inscrutabilità della referenza, e guardando ai modelli diffeomorfi come a interpretazioni permutate di un linguaggio (cfr. Leeds (1995), Liu (1996), Mundy (1992), Rynasiewicz (1994; 1996b)).

³⁸ S'intuisce che per mondi fisicamente possibili intendiamo mondi in cui valgono – o mondi compatibili con – le leggi di natura del nostro.

³⁹ Genericamente, l'*ecceità* è ciò che rende qualcosa il genere di cosa ch'essa è, differentemente da qualsiasi altra.

⁴⁰ Earman (1986, 13).

⁴¹ L'accordo dei mondi è in termini di tutte le proprietà fisiche rilevanti, mentre quello dei modelli è in termini di oggetti geometrici, ed è reso possibile dai diffeomorfismi che permettono di comparare un oggetto in un punto, in uno spaziotempo, con un oggetto in un punto in un altro spaziotempo (non ha, infatti, alcun senso fare confronti "a distanza" fra oggetti geometrici, come tensori o vettori, in diverse varietà: bisogna "trasportarli" e farli coincidere, e lo si fa, appunto, con un diffeomorfismo).

⁴² Non possiamo qui entrare nei numerosi dettagli: si veda Butterfield (1987; 1989a).

⁴³ Attraverso esempi, sinceramente tanto sottili quanto fantasiosi, sostiene che la teoria delle controparti – che utilizza una nozione di determinismo basata sul concetto di *duplicazione* di Lewis (1983), con tutto il suo corredo, di non immediata definizione, di *proprietà* e *relazioni perfettamente naturali* (Lewis, 1986) – non può liberarci dall'argomento del buco.

⁴⁴ Di un qualunque fenomeno, immaginiamo di bloccarlo, farlo scorrere all'indietro nel tempo fino a un certo punto della storia del mondo, e da lì farlo ripartire lungo un'altra storia: futuri possibili differenti corrispondono a *rami* possibili differenti.

⁴⁵ Denominate "modali" per intendere, genericamente, un richiamo a "modi d'essere", o "di presentarsi", principalmente delle proprietà attribuite a un oggetto, qui i punti dello spaziotempo.

⁴⁶ Bartels (1996) ritiene, al contrario, che l'essenzialismo conduce i modelli diffeomorfi a rappresentare la stessa possibilità fisica: se un punto a di un modello è mappato su b di un altro modello, a deve "portarsi dietro", proprio perché essenziali, le sue proprietà metriche. Brighouse (1994) e Belot (1996) notano, inoltre, che l'essenzialismo di Maudlin rende alcuni controfattuali falsi, portando a situazioni metafisiche assurde.

⁴⁷ Egli vede la riconciliazione fra determinismo e sostanzialismo comporsi di due aspetti: quello che chiama «tecnico» (visto prima nel par. 5.1), riguardante la possibilità di utilizzare, nell'argomento del buco, una definizione più esatta di determinismo, e quello «filosofico» (che ora stiamo introducendo), attinente, soprattutto, alle modalità d'identificazione e distinzione dei punti dello spaziotempo.

⁴⁸ Una *controparte* è un'entità che differisce dall'"originale" in almeno una proprietà accidentale (intrinseca o estrinseca). Si veda Lewis (1986).

⁴⁹ Norton (1988) imputa a Butterfield, e a Maudlin, sia una violazione della covarianza generale (in base alla quale *tutti* i modelli devono valere, non solo *alcuni* scelti su basi metafisiche), sia, per di più, l'insensatezza nel rintracciare, fra i modelli diffeomorfi, quello "vero" e quello "impostore".

⁵⁰ Tale domanda non è sulla *possibilità* di uno scambio: credere nell'essenzialità di certe proprietà porterebbe a una risposta negativa; alla questione del *senso*, invece, lo stesso essenzialista, credente all'identità primitiva delle sostanze, risponderebbe positivamente.

⁵¹ Comunque Hoefer è un *sostanzialista del campo metrico*, in quanto considera tale campo indispensabile a una sensata nozione fisica di spaziotempo.

⁵² Hoefer (1996, 24). La paternità di questa operazione la riconosce ad A. Maidens (bibl. in Hoefer) che compara la nozione d'identità dei punti dello spaziotempo al ruolo che le particelle hanno in ambito classico e in ambito quantistico, dove vigono, rispettivamente, la statistica di Maxwell-Boltzmann e la statistica di Fermi-Dirac (solo la prima, però, permette di assegnare rigidamente una "etichetta" a una particella, manifestando una specie d'identità trascendentale primitiva che la distingue in molti mondi possibili). Maidens suggerisce l'analogia fra punti e particelle quantistiche (la cui esistenza non si discute), e, proprio come a queste ultime non è permesso di possedere, dalla statistica quantistica, quel tipo d'identità che consente l'identificazione attraverso mondi (o anche la distinzione entro lo stesso mondo), così ai primi ciò è vietato dall'argomento del buco. È da notare, però, che, mentre due particelle sono ancora ontologicamente distinguibili se rivelate in regioni dello spaziotempo diverse, così non si può dire per i punti stessi dello spaziotempo.

⁵³ Negare l'identità primitiva non è, comunque, sbarazzarsi di un fatto da poco, in quanto si potrebbe obiettare che essa sia parte, per una "cosa", del suo *essere sostanza*, oppure – con Earman (1989, 196-9) – si potrebbe credere nella necessità, per oggetti qualitativamente identici differenti *solo numero*, di un "principio d'individuazione" *intrinseco* che permetta, appunto, di distinguerli.

⁵⁴ Torneremo nell'ultimo paragrafo sulle qualità strutturali.

⁵⁵ Aggettivo mutuato da Belot-Earman (2001).

⁵⁶ Se il sostanzialismo "classico" è condotto al cosiddetto *inflazionismo* – cioè all'ammissione che una teoria, date le sue simmetrie, possa generare (una classe d'equivalenza di) mondi possibili qualitativamente indistinguibili –, mentre la condizione opposta, tipicamente relazionalista, è diretta al *deflazionismo* – la riduzione, invece, proprio di quella proliferazione di mondi a uno solo: l'originario –, il *sostanzialismo sofisticato*, quindi tutti quelli di questo paragrafo che si fanno carico dell'equivalenza di Leibniz, può spogliarsi dell'inflazione, così come il *relazionalismo non sofisticato* può liberarsi della deflazione (Rickles (2004) sostiene fortemente queste due ultime implicazioni).

⁵⁷ In due sole precedenti lettere – del 26/12/1915, a Ehrenfest; e del 3/1/1916, a Besso (cfr. Stachel, 1980, 86) – Einstein esplicita questa sua soluzione correlandola all'argomento del buco, del quale, in seguito, "si dimenticò", probabilmente perché lo considerò risolto, almeno da un punto di vista "pragmaticamente" fisico.

⁵⁸ Einstein (1916, 289-90). Nella suddetta lettera a Besso, Einstein fu persino ontologicamente più drastico: «Niente è fisicamente *reale* tranne la totalità delle coincidenze del punto dello spaziotempo».

⁵⁹ E quindi: «Non c'è contenuto fisico se, rispetto allo *stesso* sistema di coordinate [...], esistono due differenti soluzioni $G(x)$ e $G'(x)$ [G indica la totalità dei potenziali gravitazionali $g_{\mu\nu}$, ndr]» (Einstein, dalla succitata lettera a Besso). Sottolineiamo, *en passant*, che tutte le considerazioni di Einstein a riguardo gravitano attorno alle trasformazioni di coordinate, e non ai diffeomorfismi attivi, nozione matematica – come già sottinteso – allora ignota.

⁶⁰ Si veda anche un *gedankenexperiment*, tratto da una lettera di Einstein a Ehrenfest del gennaio 1916, dov'egli sostiene uno spaziotempo costituito, appunto, da coincidenze (Earman 1989, 187-8; Norton 1987, 173-4). Per una traduzione matematicamente più consona dell'argomento del punto-coincidenza, attraverso le linee d'universo di due particelle, si consulti Rovelli (2004, 67-70).

⁶¹ Sottolineiamo che Einstein non si pose direttamente la questione se il suo argomento del buco potesse sfavorire una particolare ontologia dello spaziotempo (comunque, non risulta che egli pensò mai a uno spaziotempo di sola varietà come richiesto da Earman-Norton: ricordiamo la sua frase all'inizio del par. 3 di questo articolo), ma si pose il problema se allo spaziotempo spettasse, o meno, un'attribuzione di realtà indipendente dagli oggetti fisici (bastino due cenni: la sua prefazione a Jammer (1953), e Einstein (1917, 44)), soprattutto alla luce del concetto "ibrido" di campo e all'identità qualitativa fra questo e la materia che egli spesso sottolineava. Nonostante l'argomento del punto-coincidenza sia impossibile da leggere sostanzialisticamente, e nonostante Einstein dichiarò esplicitamente che il concetto di "spazio vuoto" non potesse avere più significato, le sue propensioni ontologiche a tal riguardo – funzioni anche, com'è naturale, dell'epoca delle sue riflessioni – non si affacciano affatto sempre e con chiarezza sul relazionalismo. Tra l'altro, non è facile barcamenarsi nella messe di denominazioni che riserva, più o meno direttamente, all'entità spaziotemporale – *campo*, *proprietà del campo*, *etere*, *nuovo etere*, *etere dematerializzato*, *spazio fisico*, *stato fisico dello spazio*, *campo dell'inerzia*, *etere gravitazionale*, ecc. –, ma è, comunque, viva

testimonianza, forse significativa, soprattutto, di un lungo “travaglio” *anche* epistemologico (la questione è stuzzicante, non solo per chi ha afflato storico; come inizio si consiglia Kostro (2001)).

⁶² Corrispondenza vietata da Maudlin che, come visto, non accetta l'equivalenza di Leibniz considerando illegittimo “riadattare” la metrica trasportata anche su punti “trasportati”: ogni punto x è un'entità fisica che esiste indissolubilmente solo col suo valore metrico $g(x)$.

⁶³ Stachel (1993, 139).

⁶⁴ Un'osservabile è una quantità descritta dalla teoria che denota una grandezza fisica fondamentale e la teoria dovrebbe essere in grado di predirne unicamente il valore.

⁶⁵ Queste sono anche dette *osservabili di Dirac* (OD). Così, definiti tutti i campi ψ della teoria come funzioni sulla varietà, $\psi : M \rightarrow V$ (con V un certo spazio di valori del campo), e descritta la dinamica di una particella con la linea d'universo $\chi : \mathfrak{R} \rightarrow M$, una OD, Θ , è data da: $\Theta[\psi, \chi_n] = \Theta[\phi(\psi), \phi(\chi_n)], \forall \phi \in \text{Diff}_M$ (il gruppo dei diffeomorfismi), con $\chi_n (n = 1, \dots, N)$ le linee d'universo di N particelle. Il riferimento a Dirac affonda nel formalismo dei *sistemi hamiltoniani vincolati* che egli costruì per generalizzare il metodo hamiltoniano e che è stato poi applicato alla RG: la covarianza generale delle sue equazioni di campo esprime, infatti, una *libertà di gauge* (Wald 1984, 438) – cioè una ridondanza dei gradi di libertà matematici rispetto a quelli fisici –, e un sistema di gauge è sempre un sistema hamiltoniano vincolato (l'opposto no). Solo che teorie, come la RG, con invarianze spaziotemporali, e classiche teorie di gauge (come l'elettromagnetismo), seppure accomunate dal punto di vista *matematico* nel formalismo suddetto – dall'essere, genericamente, un loro sistema descritto da un numero di variabili maggiore dei gradi di libertà fisicamente indipendenti –, dal punto di vista *fisico* differiscono radicalmente in quanto nelle prime l'invarianza di gauge è sotto un gruppo di diffeomorfismi che, come sappiamo, agisce sullo spaziotempo stesso e quindi agisce, come visto poc'anzi, su ciò che è, o no, osservabile; risulta, allora, che «il meccanismo di fissare il gauge gioca il *ruolo duale* di rendere la dinamica *unica* (come in tutte le teorie di gauge), e di fissare l'*apparizione* del background dinamico spaziotemporale» (Lusanna-Pauri 2005, 4). L'argomento del buco stesso, da questa prospettiva (se vogliamo parallela a quella sintattica), diviene un aspetto del problema più generale di come interpretare la ridondanza matematica (specchio di una ridondanza metafisica) delle teorie di gauge, mentre le sue soluzioni diffeomorfe risultano corrispondere a scelte di gauge per la stessa soluzione e l'equivalenza di Leibniz è identificabile con un'equivalenza di gauge (cfr. Belot-Earman (2001), Pauri-Vallisneri (2002), Lusanna-Pauri (2005)).

⁶⁶ Rovelli (1997, 194). In sostanza accade che, essendo il moto di *ogni* oggetto fisico influenzato dal campo gravitazionale, non hanno più senso collezioni di oggetti prefissati e indipendenti (sistemi di riferimento) non partecipanti alla dinamica: contano solo le posizioni e i moti degli oggetti gli uni in relazione con gli altri, e tali sistemi, costituiti ora da oggetti concorrenti alla complessiva dinamica, non sono più un mezzo operativo che rivela le proprietà di un “sottostante” spaziotempo.

⁶⁷ È la posizione prevalente dei fisici interessati a tali questioni: ricordiamo Rovelli (2004, 74), Smolin (2000a, 5; 2000b, 20-5), Isham (1994, 13), e, infine, Penrose (1996, 591), che afferma: «I principi di base della relatività generale – come racchiusi nei termini “principio di covarianza generale” (e anche “principio di equivalenza”) – ci dicono che non c'è alcun modo naturale per identificare i punti di uno spaziotempo con i corrispondenti punti di un altro spaziotempo».

⁶⁸ Anche un sostanzialismo “indebolito” come quello sofisticato – che fa a meno, ricordiamo, di un'identità *a priori* dei punti – sinceramente non ci convince: seppure “sopravvive”, in esso, l'accezione di sostanza come esistenza indipendente di un contenitore spaziotemporale, e le cui singole parti sono in qualche modo intrinsecamente “neutre”, questo non esime dalla necessità che esse comunque occupino, *internamente*, determinati “posti”, tali perché inseriti in una struttura relazionale, e ciò si confà meglio – come fra poco vedremo – a una terza posizione filosofica.

⁶⁹ Egli rimanda ai lavori di Bergmann e Komar e al loro utilizzo di parti dei gradi di libertà del campo gravitazionale stesso – tramite la definizione di 4 scalari di curvatura funzionali della metrica e delle sue derivate prime – come coordinate invarianti intrinseche dei punti dello spaziotempo. Pauri-Vallisneri (2002), Dorato-Pauri (2004), Lusanna-Pauri (2005) hanno poi sviluppato questo metodo nella formulazione hamiltoniana vincolata della RG.

⁷⁰ Uno degli ultimi pronunciamenti sullo spaziotempo di Einstein (1952, 311): «Non esiste un qualcosa come uno spazio vuoto, ossia uno spazio senza campo. Lo spaziotempo non pretende di avere un'esistenza per proprio conto, ma soltanto una *qualità strutturale* del campo» [corsivo nostro].

⁷¹ Si può anche dire che non c'è corrispondenza biettiva fra punti (matematici) della varietà e punti-evento (fisici) dello spaziotempo: una classe di equivalenza di punti di varietà diffeomorfe corrisponde a *un* punto dello spaziotempo.

⁷² Torretti (1999, 297).

⁷³ Da Pauri-Vallisneri (2002, 8) e Dorato (2005, 129).

⁷⁴ Che le parti di spazio e di tempo *sono* grazie soltanto al «loro mutuo ordine e alla loro mutua posizione» è una tesi accettata anche da Leibniz, ma, mentre per Newton queste relazioni che costituiscono l'estensione, fornendo le sue parti d'individualità, sono relazioni *interne* (intrinseche), Leibniz riduce lo spazio a relazioni fra i corpi, e quindi sono, a esso, *esterne*.

⁷⁵ Inoltre, queste entità soddisfano collettivamente un insieme di condizioni: gli *assiomi* della struttura. Un insieme di base così equipaggiato è detto essere un *insieme strutturato*.

⁷⁶ «Il luogo della sottodeterminazione metafisica è la nozione di oggetto, così un modo per evitarla sarebbe quello di riconcettualizzare questa nozione interamente in termini strutturali. I pacchetti metafisici di individualità e non-individualità sarebbero allora visti in un modo simile a quello di una particella e di un campo in QFT [Quantum Field Theory, ndr], cioè come due differenti rappresentazioni (metafisiche) della stessa struttura», affermano French e Ladyman (2003, 37), due tra i fautori di questo impianto concettuale, in particolare modo in ambiente quantistico.

⁷⁷ Ci sia concessa la forzatura espressiva di dire che l'*unione* (ontologica) di spazio (contenitore metrico) e materia (contenuto energetico-gravitazionale) «diviene» struttura.

⁷⁸ Ordine strutturale che, rispettando l'invarianza per diffeomorfismi, non individua, *ancora*, i punti: ottenuta la soluzione delle equazioni di campo einsteiniane per una particolare distribuzione di materia, la struttura, come astrazione corrispondente alla classe (di equivalenza) delle metriche diffeomorfe alla soluzione trovata, non fornisce identità ai punti; solo una qualunque sua metrica, selezionata da tale classe spezzando la covarianza generale, lo fa.

⁷⁹ Dorato (2005, 128).

⁸⁰ Slowik (2005), filtrando queste analisi attraverso lo strutturalismo nella filosofia della matematica – dove si classifica uno *strutturalismo ante rem* (le strutture, e le loro parti, sono indipendenti dall'esistenza di sistemi di oggetti che le concretizzano; gli enti *matematici*, così, intesi in termini di "posti" nella struttura, esistono, anche se subordinati, ontologicamente, alla struttura che li accoglie) e uno *strutturalismo in re* (le strutture sono, invece, dipendenti dall'esistenza di sistemi) –, sostiene che le strutture matematiche avallate, nelle loro rispettive ontologie, da relazionalismo e sostanzialismo, cadono *entrambe* sotto una cosiddetta *classificazione nominalista* (appartenente al secondo tipo di strutturalismo), secondo la quale tali strutture si basano su una precedente esistenza di un qualche tipo di entità, concepita come sostanza non materiale (sostanzialismo), campo fisico (relazionalismo della metrica), oggetto fisico (relazionalismo classico). Risultato: nella filosofia (strutturalista) della matematica la dicotomia sostanzialismo/relazionalismo della filosofia della fisica si elide.

⁸¹ A grandi linee, questo asserisce che al massimo si può avere conoscenza della struttura del mondo esterno (fisico). Mentre l'*empiricismo strutturale* considera che le strutture matematiche – legittimamente usate in fisica per organizzare, spiegare e predire fenomeni empirici – non caratterizzano nulla oltre al fenomeno empirico stesso, il realismo afferma che il dominio della struttura matematica di una teoria fisica vera va al di là del limite empirico (e se quel dominio s'estende all'universo, allora l'intero universo è un esempio di struttura matematica). Inutile rimarcare che il realismo strutturale non è affatto immune da problemi (si veda, ad esempio, Pooley (2005) e McCabe (2006)). Da notare che, mentre la teoria quantistica è stata finora al centro degli studi dei realisti strutturali (ne è sintomo l'intero numero di *Synthese*: vol. 136, luglio 2003), ciò è accaduto in misura minore per lo spaziotempo della RG.

⁸² Il realismo strutturale epistemico sostiene che, nel progresso conoscitivo, nel passaggio a una nuova teoria scientifica ciò che viene preservato è il contenuto strutturale (o matematico-astratto) della teoria precedente, attribuendo quindi realtà alle relazioni (principalmente espresse da equazioni) fra gli oggetti piuttosto che alle loro proprietà intrinseche (comunque inconoscibili), rinunciando così all'esistenza di un corrispettivo reale delle singole entità teoriche (non osservabili) della teoria. Questo per conformarsi principalmente a due questioni: l'*argomento del miracolo*, in base al quale il successo empirico della scienza sarebbe miracoloso se non si potesse spiegare col fatto che essa descrive la realtà dietro ai fenomeni (e quindi molti termini non osservativi della scienza *devono* riferirsi a qualcosa di esistente), e la *meta-induzione pessimista*, secondo la quale la considerazione che teorie ormai sorpassate sono ora giudicate false nello spiegare la realtà nonostante avessero spesso fornito notevoli successi empirici, conduce a essere pessimisti riguardo alle attuali teorie (e agli attributi di realtà concessi alle loro entità teoriche) attese, al varco del progresso, da questo stesso destino. Il realismo strutturale, allora, grazie alla continuità che esso garantisce, all'avvicinarsi delle teorie, al livello di strutture, di forme di qualche quantità matematica invariante, consente il successo della scienza nel caratterizzare la struttura della realtà (nessun miracolo, quindi, nel suo successo empirico) senza, però, pretendere di penetrare al livello di specifici enti teorici (nessun impegno ontologico a "rischio pessimismo"). Di questa posizione (ripresa da Worrall, 1989) Poincaré è considerato il precursore: si ricordi la sua affermazione sulle (equazioni delle) teorie fisiche che «c'insegnano [...] che c'è quella tal relazione fra questa cosa e quella», ma che nel parlare di tali "cose" diamo solo *nomi* a «immagini che sostituiamo agli oggetti reali che la Natura nasconderà per sempre ai nostri occhi. Le vere relazioni fra questi oggetti reali sono la sola realtà che possiamo ottenere» (*La Science et l'Hypothese*, 1905). Meno lapidaria, ma dalla postura ancora epistemica (anche se quel «nella misura in cui» apre porte *non* strutturaliste), questa interessante dichiarazione di Cassirer

sull'elettromagnetismo: «Con *propria realtà fisica* del campo elettromagnetico non bisogna intendere altro che la realtà delle relazioni legali in esso valide, che si enunciano nelle equazioni maxwell-hertziane. Queste relazioni sono poste come l'ultima realtà raggiungibile, poiché e nella misura in cui sono l'ultimo oggetto, da noi raggiungibile, della scienza fisica» (Cassirer 1921, 108). Comunque, il vero padre dello strutturalismo epistemico è considerato essere, da alcuni autori, Bertrand Russell, il quale, in *The Analysis of Matter* del 1927, asseriva che, al massimo, «ciò che possiamo *conoscere* è la struttura del secondo ordine del mondo che cade al di là del fenomeno empirico, non le proprietà e relazioni fisiche del primo ordine che possiedono quella struttura» (da McCabe 2006, 2), cioè quelle proprietà – queste ultime – che qualificano i noumeni, l'intrinseca natura delle cose in sé che, appunto, gli strutturalisti epistemici ritengono irraggiungibile.

⁸³ Per tornare al Russell della fine della nota precedente, si ha che la struttura del secondo ordine del mondo fisico è – per lo strutturalismo ontico – tutto ciò che esiste. La stimolo principale allo sviluppo di questa metafisica si è avuto nell'ambito della fisica quantistica, sia per interpretare l'indistinguibilità empirica delle particelle, sia per favorire una priorità dell'ontologia del campo in QFT rispetto a un'ontologia delle particelle. Tale strutturalismo soddisfa anche una questione di *coerenza* fra epistemologia e metafisica (perché elide quell'"inutile" divario che sorge fra loro nel postulare enti metafisici dotati di proprietà intrinseche inafferrabili epistemicamente), e una questione di *parsimonia* che suggerisce di non spendere, oltre necessità, le nostre disponibilità metafisiche in entità che rischiano di essere superflue a sostenere le relazioni spaziotemporali.

⁸⁴ Slowik (2005, 161), che nota: «La dicotomia ontico/epistemica non costituisce un surrogato della distinzione sostanzialismo/relazionalismo» (*ibid.*, 162), infatti, la prima disputa è sul tipo di informazione (appunto: ontologica o epistemica) dato dalle teorie scientifiche, e *non* sull'attribuire, o meno, alla realtà fisica l'esistenza di qualche entità ontologica (come la struttura dello spaziotempo).

⁸⁵ Stachel (2005, 3-4). Le «cose» sono i costituenti la struttura nel senso più generale possibile.

⁸⁶ *Ibidem*. Altre due sottoclassi, Stachel le accantona come troppo particolari: escludendo totalmente i relata, la prima (e quindi riducendo – con Saunders (bibl. in Stachel) – qualsiasi oggetto a strutture: cancellando la possibilità di esistenza di costituenti ultimi del mondo che non siano, appunto, strutture di altre strutture, *ad infinitum*); escludendo totalmente le relazioni, viste come apparenti, la seconda.

⁸⁷ Per intenderci: per l'elettrone della fisica quantistica, massa, spin, carica sono essenziali, mentre posizione, momento, o energia – proprietà che può esibire diversamente nei processi – non lo sono.

⁸⁸ *Ibidem*.

⁸⁹ Altri autori (come Hofer, visto pagine addietro) sostengono l'analogia con le particelle, mentre altri la negano, rifiutando pure (come Pooley (2005)) uno strutturalismo (ontico) in RG.

⁹⁰ Ha ragione Quine nel sostenere "nessuna entità senza identità"?

⁹¹ Eddington, nel 1928, limpidamente afferma: «Le relazioni uniscono i relata; i relata sono i punti d'incontro delle relazioni. Gli uni sono impensabili senza gli altri. Non credo che un più generale punto di partenza di una struttura possa essere concepito» (da Rickles 2004, 235). Si noti solo come quei «punti d'incontro» richiamino i «punti-coincidenza» einsteiniani.

⁹² Lusanna-Pauri (2005, 6).

⁹³ *Ibid.*, 26.

⁹⁴ La stessa sua identità è "contaminata": se per taluni esso esprime una forma di relazionalismo (è, infatti, indicato come *relazionalismo non riduttivo*, cioè non dipendente da oggetti materiali, controparte di quello *riduttivo*, il relazionalismo più comunemente inteso), per talaltri viene, invece, a sovrapporsi al sostanzialismo sofisticato. Si commenti solo, qui, che questo non è affatto strano: proprio perché lo strutturalismo si sostanzia in una posizione di sintesi e, quindi, mediana al dibattito tradizionale, le posizioni "estreme" (e un po' spurie) – interne a questo – non possono che somigliarli.

⁹⁵ Metafisiche dall'adesione, forse, anche più *naturale* all'immaginario umano di spazio e tempo, che non l'idea moderna di struttura, più *interna* alle teorie e *mediata* da astrazioni matematiche.

⁹⁶ Da più parti si ritiene che la chiave di volta potrà aversi da una *vera* teoria quantistica della gravità.