



## **Spiegare i fenomeni senza cause. La spiegazione strutturale in fisica.**

Laura Fellingine  
Università di Roma Tre  
lfelline@uniroma3.it

### **Abstract**

In this article we present the structural model of scientific explanation. The original idea, formulated by R.I.G. Hughes, is illustrated and further developed over three main axes. First, we clarify how structural explanation works and formulate the conditions that a mathematical model must satisfy in order to be explanatory of a physical model. Secondly, we defend the non-causal nature of the structural explanation. Finally, we characterize structural explanation as a mathematical explanation of physical phenomena.

### **1. Introduzione**

Nella moderna filosofia della spiegazione scientifica la teoria della spiegazione causale svolge da sempre un ruolo centrale. Da circa due decenni tale ruolo sembra, se possibile, aumentare di importanza grazie soprattutto al nuovo interesse suscitato dalle più recenti teorie della spiegazione causale, prime fra tutte quella meccanicistica (Machamer *et al.* 2000, Glennan 1996) e quella controfattuale (Woodward 2005). Ma nonostante tale successo, la teoria della spiegazione causale non sembra applicabile a tutte le spiegazioni scientifiche e in fisica fondamentale i suoi limiti sono particolarmente evidenti. Gli stessi filosofi che propongono alcune tra le più efficaci formulazioni della spiegazione causale, infatti, hanno spesso notato come il ragionamento causale (come caratterizzato nel

contesto di tali teorie) non sia spesso applicabile allo studio dei fenomeni fisici<sup>1</sup>. E se da un lato questi limiti non implicano automaticamente una completa estraneità della spiegazione causale alla fisica fondamentale, d'altro canto essi testimoniano una riduzione dell'adeguatezza descrittiva della teoria causale della spiegazione in questo dominio.

La considerazione di questi casi ha portato alcuni filosofi alla conclusione che i fenomeni non spiegabili causalmente sono in generale fatti inspiegati e inesplicabili (*brute facts*, fatti bruti (Glennan 2002)) della scienza. Contro questa conclusione, l'assunzione alla base di questo articolo è che nella scienza esistono diverse varietà di spiegazione. Dunque, il fatto che un fenomeno non sia spiegato (o non sia spiegabile) causalmente non implica automaticamente che esso sia inspiegato o inspiegabile *tout court*.

Spiegazioni non causali sono presenti in tutti i livelli della ricerca scientifica (Berger 1998) e negli ultimi anni numerose ricerche hanno contribuito a svelare il funzionamento di tali spiegazioni e il loro contributo alla comprensione dei fenomeni naturali. In fisica fondamentale, una varietà di spiegazioni non causali, dette strutturali, merita un'indagine a parte date le sue particolari caratteristiche. Tali spiegazioni, infatti, non solo sono non causali ma, come sosterremo in questo articolo, esse si applicano in particolare a fenomeni che sembrano essere causalmente inspiegabili. Questa caratteristica rende le spiegazioni strutturali particolarmente interessanti per le potenziali implicazioni che tale teoria può riscontrare qualora applicata ad annosi dibattiti propri dei fondamenti della fisica.

L'idea della spiegazione strutturale (che d'ora in poi abbrevieremo con SE, dall'espressione inglese Structural Explanation) è stata originariamente introdotta da R.I.G. Hughes (1989a, b) per spiegare l'origine del potere esplicativo della meccanica quantistica. L'idea di base è che (alcuni) fenomeni quantistici sono spiegati tramite i modelli matematici esposti dalla teoria. Forse per il fatto che nell'opera di Hughes questa idea non è stata sviluppata in una vera e propria teoria della spiegazione, essa è stata per lo più trascurata dalla letteratura, con le eccezioni di un documento inedito di Clifton (1998) e le opere più recenti di Bokulich (2009), Feline (2010, 2011, 2015) e Dorato e Feline (2010, 2011).

Gli elementi principali del modello SE come illustrato da Hughes sono l'essere una spiegazione non causale e l'utilizzo dei modelli matematici

---

<sup>1</sup> Ad esempio Salmon (1984) mostra come la sua teoria della spiegazione causale dei processi non si applica in meccanica quantistica. (Woodward 2007) elenca diverse caratteristiche della spiegazione causale controfattuale che la rendono inapplicabile a molte istanze di spiegazione di fenomeni in fisica e (Kuhlmann e Glennan 2014) fanno la stessa cosa per la spiegazione meccanicistica.

esibiti dalle teorie scientifiche. La caratterizzazione fornita da Hughes del funzionamento della SE è alquanto sintetica:

una spiegazione strutturale esibisce gli elementi dei modelli usati dalla teoria e mostra come essi siano tra di loro congiunti. In termini più pittoreschi, essa smonta la scatola nera, mostra le parti in funzione, e poi la rimette di nuovo insieme. Fatti bruti della teoria vengono spiegati mostrando le loro connessioni con altri fatti, verosimilmente meno bruti.<sup>2</sup> (Hughes, 1989a, p.198, traduzione mia)

e ancora:

una spiegazione strutturale consiste nel rendere espliciti gli aspetti strutturali dei modelli utilizzati dalla teoria (ibid., p. 258, traduzione mia)<sup>3</sup>

Come osservato da Hughes stesso (1989a, p.256), il primo ostacolo alla formulazione di un resoconto del potere esplicativo della meccanica quantistica è l'assunzione che la spiegazione di un fenomeno implichi necessariamente la descrizione dei processi causali che producono il fenomeno. Questa assunzione è particolarmente problematica nel contesto della meccanica quantistica, dato il ben noto problema dell'interpretazione del formalismo quantistico, ossia il problema di fornire una adeguata descrizione ontologica dei processi e delle entità sottostanti il verificarsi dei fenomeni quantistici. La conclusione di Hughes è che, per riuscire a rendere conto del potere esplicativo della meccanica quantistica, c'è bisogno di una teoria non causale della spiegazione, che sia indipendente da assunzioni metafisiche riguardo i tipi di entità e i tipi di processi che giacciono nel dominio di una teoria.

Riassumendo, secondo Hughes la SE è una spiegazione che: 1) funziona rendendo espliciti gli aspetti strutturali dei modelli utilizzati dalla teoria; 2) utilizza i modelli matematici utilizzati dalla teoria; 3) è non causale e indipendente dal tipo di entità o processi che sottostanno al verificarsi dell'*explanandum*<sup>4</sup>.

---

<sup>2</sup> A structural explanation displays the elements of the models the theory uses and shows how they fit together. More picturesquely, it disassembles the black box, shows the working parts, and puts it together again. 'Brute facts about the theory are explained by showing their connections with other facts, possibly less brutish.

<sup>3</sup>the explanation consists in making explicit the structural features of the models the theory employs

<sup>4</sup> In filosofia della spiegazione scientifica l'*explanandum* è ciò che viene spiegato, mentre l'*explanans* è ciò che spiega.

Lo scopo di questo articolo è di sviluppare gli spunti forniti da Hughes e, anche tenendo conto dei contributi più recenti, fornire un resoconto più organico di tale spiegazione scientifica che affronti alcuni nodi lasciati finora irrisolti. Come esempi illustrativi illustreremo due casi storicamente significativi di SE: la spiegazione della contrazione delle lunghezze in relatività speciale e la spiegazione della relazione di indeterminazione tra momento e posizione in meccanica quantistica (§ 2). Dall'analisi di questi esempi, trarremo poi conclusioni più generali circa la portata epistemica di questo tipo di spiegazione (§ 3). In questa sezione – che rappresenta la parte centrale del presente articolo – prima di tutto chiariremo in che senso un modello matematico di un fenomeno  $P$  può dirsi esplicativo rispetto ad un fenomeno fisico, indipendentemente da ipotesi circa le entità e i processi sottostanti al verificarsi di  $P$ . Per anticipare alcuni dei risultati dell'analisi proposta, sosterremo che un modello matematico è esplicativo nei confronti di un fenomeno fisico: 1) grazie alla sua funzione rappresentativa, che gli permette di fungere da surrogato dell'oggetto rappresentato nella nostra indagine sul mondo; 2) quando la sua struttura matematica fornisce nuove informazioni e regole che servono a guidare il nostro ragionamento controfattuale. Per quanto riguarda il funzionamento della SE, essa verrà caratterizzata come una spiegazione controfattuale, ossia che funziona inserendo l'*explanandum* in uno schema di dipendenze controfattuali regolate dalle proprietà e le leggi matematiche del modello.

Le due sezioni seguenti saranno dedicate a due caratteristiche centrali di questa teoria: il suo carattere non causale e quello di spiegazione matematica. In particolare, nella § 4 renderemo esplicito il contrasto tra SE e spiegazione causale, nonché il significato dell'affermazione che la SE è una spiegazione non causale. Nel caratterizzare la nostra versione della SE proposta sosterremo in particolare che la SE è una teoria non causale nel senso di non meccanicistica. L'indagine su tale contrasto ci porterà quindi a definire più precisamente e a giustificare la caratterizzazione della SE come spiegazione dei fenomeni fisici che definiremo meccanicamente fondamentali. Il ruolo centrale svolto dalla matematica nella SE suggerisce che la SE sia una varietà di quelle che in letteratura sono chiamate spiegazioni matematiche nelle scienze naturali. Nella § 5 verrà illustrato il concetto di spiegazione matematica come sviluppato in due tra le proposte più accreditate in letteratura. Mostriamo che secondo entrambe la SE è in effetti una spiegazione matematica. L'articolo si conclude con alcune questioni ancora aperte per la ricerca futura (§ 6).

## 2. La Spiegazione Strutturale: due esempi

Come già sostenuto da Hughes (1989b), le spiegazioni geometriche della teoria della relatività speciale costituiscono un chiaro esempio di SE. In questa sezione illustreremo in dettaglio il funzionamento di tali spiegazioni. Scopo principale di questa sezione è mostrare che esistono delle spiegazioni in fisica fondamentale che non sono causali, ma comunque comunemente accettate come delle genuine spiegazioni scientifiche. In secondo luogo, l'illustrazione particolareggiata del caso di studio servirà come base per l'analisi del funzionamento della SE che sarà l'oggetto della prossima sezione.

Prendiamo l'esempio della contrazione delle lunghezze, ossia il fenomeno per cui la lunghezza di un regolo, quando misurata da un osservatore in moto relativo inerziale, è minore della sua lunghezza propria<sup>5</sup>. Solitamente, la spiegazione di tale fenomeno viene illustrata tramite l'uso di modelli spaziotemporali di Minkowski. Per spiegare questo fenomeno rappresenteremo con un diagramma spazio-temporale due regoli di lunghezza propria 1, il primo (sistema di riferimento  $S$ ) in quiete rispetto a noi, il secondo solidale con il sistema  $S'$ , in moto inerziale rispetto a  $S$  (figura 1). Fatto questo, confronteremo i due regoli nel diagramma.

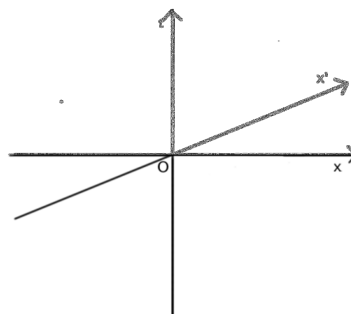


Figura 1. Coordinate spaziotemporali per i sistemi di riferimento  $S$  e  $S'$  in moto relativo.

Prima cosa da fare, dunque, è disegnare i due regoli. Per rappresentare un regolo in un diagramma spazio-temporale (in ciascun sistema di riferimento) è necessario trovare i due eventi che 1) giacciono agli estremi del regolo e 2) sono simultanei nel suo sistema di riferimento. Diciamo che

---

<sup>5</sup> La lunghezza propria di un oggetto è la sua lunghezza nel sistema di riferimento in cui esso è in quiete.

l'origine  $O$  è uno di questi eventi (per entrambi i regoli). Il secondo evento  $A$  ( $A'$  per il regolo in quiete in  $S'$ ) è l'evento a distanza spazio-temporale 1 dall'origine  $O$  e che giace sull'asse  $x$  ( $x'$ ) di  $S$  ( $S'$ ). Per trovare  $A$  ( $A'$ ) bisogna dunque trovare il luogo geometrico dei punti a distanza spazio-temporale  $I = 1$  da  $O$  e trovare il punto di intersezione  $A$  ( $A'$ ) di questo luogo geometrico con l'asse  $x$  ( $x'$ ).

A questo punto è necessario notare che mentre in geometria euclidea la distanza  $I$  tra due punti segue il teorema di Pitagora:

$$I^2 = x^2 + y^2, \quad (2.1)$$

in geometria minkowskiana la stessa distanza rispetta l'equazione:

$$I^2 = x^2 - y^2. \quad (2.2)$$

Come conseguenza, mentre nello spazio-tempo galileiano (euclideo), il luogo geometrico dei punti alla stessa distanza spazio-temporale  $I$  dall'origine di un sistema di riferimento è dato dall'equazione 2.1, nello spazio-tempo di Minkowski, il luogo geometrico dei punti a distanza spazio-temporale 1 da  $O$  è la cosiddetta iperbole invariante  $x^2 - y^2 = 1$ . (Figura 2)

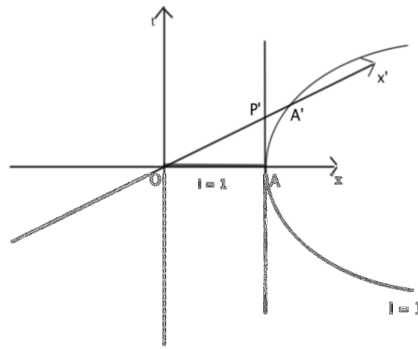


Figura 2. Iperbole invariante e contrazione delle lunghezze.

Abbiamo dunque disegnato i due regoli  $OA$  e  $OA'$  con la stessa lunghezza propria 1. A questo punto bisogna notare come nel sistema di riferimento  $S$ , il luogo degli eventi che stanno a distanza spaziale 1 dall'origine è rappresentato dalla retta passante per  $A$  e parallela all'asse  $t$ <sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Questo è facilmente intuibile se si pensa che l'equazione di tale luogo geometrico deve essere  $x = 1$ .

Rispetto al sistema  $S$ , dunque, un regolo solidale con  $S'$  e di lunghezza 1 è rappresentato dal segmento  $OP'$ , più corto di  $OA'$  (Figura 2). Visto che quest'ultima è la lunghezza propria del regolo solidale con  $S'$ , si conclude che la lunghezza propria di un regolo è maggiore della sua lunghezza come misurata da un sistema in movimento relativo. Infine, e anche se per ragioni di semplicità non illustreremo questo punto qui, si può mostrare con lo stesso procedimento che, rispetto a  $S'$ , il regolo solidale con  $S$  misura meno della sua lunghezza propria 1.

Secondo Hughes, quella appena illustrata è una SE. Essa infatti funziona rendendo esplicite le caratteristiche strutturali dei modelli (ad esempio l'equazione per la distanza spazio-temporale tra due punti) e utilizza una rappresentazione matematica della realtà (ossia i modelli dello spazio-tempo di Minkowski).<sup>7</sup> Inoltre, in essa la struttura categoriale della teoria<sup>8</sup> (data da una interpretazione dello spazio-tempo che può essere in termini di sostanza o di relazione) è completamente irrilevante per la spiegazione e questa spiegazione non è una spiegazione causale, in quanto in questo caso le caratteristiche dinamiche del regolo in questione sono irrilevanti e gli effetti relativistici non sono intesi come dinamicamente o causalmente prodotti (questo punto verrà approfondito in § 4). Essi sono invece l'espressione delle caratteristiche geometriche fondamentali degli oggetti quadridimensionali che abitano lo spazio-tempo di Minkowski.

Dorato e Feline (2011) forniscono un altro esempio storicamente rilevante di SE: la spiegazione delle relazioni di indeterminazione di Heisenberg.<sup>9</sup> Analizzando il caso della posizione ( $x$ ) e momento ( $p$ ), Dorato e Feline definiscono l'explanandum come l'esistenza di un limite alla simultanea prevedibilità di due osservabili.

Nel tentativo di spiegare questo fenomeno, Heisenberg descrive la misura della posizione di un elettrone in cui si proietta un fascio di luce sulla particella - minore è la lunghezza d'onda della luce, più precisa è la misura. Tuttavia, per lunghezze d'onda brevi, l'effetto Compton non è trascurabile: l'interazione dell'elettrone con il fascio di luce deve quindi essere considerata come una collisione di almeno un fotone con l'elettrone. In una tale collisione, l'elettrone subisce un rinculo che ne disturba

---

<sup>7</sup> Questo punto verrà approfondito in § 3.

<sup>8</sup> La struttura categoriale ('categorical framework') di una teoria è l'insieme di ipotesi metafisiche fondamentali su quali tipi di entità e quali tipi di processi si trovano all'interno del dominio di detta teoria.

<sup>9</sup> Altri esempi di SE in meccanica quantistica possono essere trovati in (Clifton 1998) e (Bokulich 2009).

momento. Ne consegue che minore è la lunghezza d'onda, maggiore è la variazione di momento, in modo tale che l'equazione:

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar / 2 \quad (2.3)$$

(dove  $\Delta x$  e  $\Delta p$  sono le incertezze, rispettivamente, di posizione e momento, e  $\hbar$  è la costante di Planck) viene soddisfatta.

Questo è un resoconto meccanico che rende comprensibile il perché delle relazioni di incertezza tra posizione e momento; tuttavia tale spiegazione di Heisenberg è considerata al giorno d'oggi non tanto una descrizione realistica dei processi quantistici quanto piuttosto, nella migliore delle ipotesi, una intuitiva illustrazione delle relazioni all'interno di un'ottica quasi-classica. Infatti, lo stesso termine 'incertezza' viene utilizzato con significati diversi (ontologico ed epistemologico) in diverse parti dell'articolo di Heisenberg, il che rende l'intero resoconto apparentemente inconsistente (Uffink 1990).

In conclusione, non abbiamo al momento una spiegazione meccanica del nostro explanandum – e tuttavia i fisici (e non solo loro) non considerano tale principio incomprensibile, ma lo considerano una parte perfettamente intelligibile della meccanica quantistica. La spiegazione di ciò sta nel fatto che i fisici hanno a loro disposizione una robusta SE delle relazioni di incertezza tra posizione e quantità di moto.

Tale spiegazione, secondo Dorato e Feline, consiste nel mostrare come la funzione  $\Psi (px, py, pz)$  (il rappresentante formale del momento dell'elettrone) è la trasformata di Fourier della funzione  $\Psi (x, y, z)$  (il rappresentante formale della posizione della particella).

Detto questo, è utile aggiungere che un passo fondamentale verso l'odierna comprensione delle relazioni di Heisenberg è stato intrapreso alcuni anni dopo la prima derivazione di Heisenberg, attraverso la derivazione più generale formulata nel 1929 da Robertson (1929). In sostanza, tale derivazione ha permesso una più profonda comprensione delle relazioni di Heisenberg tramite una diversa SE.

In tale dimostrazione, la disuguaglianza 2.3 viene mostrata essere un caso specifico di un principio più generale

$$\Delta \alpha \cdot \Delta \beta \geq \frac{1}{2} |(\Psi, [A, B] \Psi)|, \quad (2.4)$$

dove  $A$  e  $B$  sono due operatori che non commutano (spin in due direzioni diverse, per esempio) e  $[A, B]$  è il loro commutatore. Quindi, per ogni stato  $\Psi$  e ogni coppia di osservabili non commutanti  $\alpha$  e  $\beta$  e corrispondenti



operatori  $A$  e  $B$ , il prodotto delle loro incertezze è maggiore della espressione sul lato destro dell'equazione (3). Pertanto, la più generale SE delle relazioni di indeterminazione tra posizione e quantità di moto mostra che la stessa relazione vale per ogni coppia di osservabili non-commutanti e che dunque tale relazione è parte integrante della struttura algebrica delle osservabili quantistiche.

Anche in questo caso, la generalità tipica di questa più attuale spiegazione delle relazioni di indeterminazione è indipendente da qualsiasi modello meccanico del fenomeno.

### 3. Ancora sulla spiegazione strutturale

Con questi esempi in mente, siamo ora in grado di sviluppare più nei dettagli la nostra versione della SE. In questa sezione renderemo più precisa l'affermazione che una SE utilizza modelli matematici, quindi chiariremo che tipo di spiegazione dei fenomeni fisici può essere fornita da tali modelli e quale sia il suo funzionamento.

Hughes sosteneva (1989b) che il modello nomologico-deduttivo, sul quale per lungo tempo è durato il generale consenso della comunità filosofica sulla spiegazione scientifica, non potesse mettere in luce il contributo esplicativo di spiegazioni matematiche come quelle illustrate nella sezione precedente.

Ricordiamo che secondo il modello nomologico-deduttivo una spiegazione scientifica è un argomento che mostra come la proposizione che esprime l'*explanandum*  $E$  sia inferibile logicamente dall'*explanans*, dove quest'ultimo è composto da un insieme di proposizioni esprimenti le condizioni iniziali  $I_1, I_2, \dots, I_n$  e una o più leggi di natura vere  $L_1, L_2, \dots, L_n$  che 'coprono' ciò che deve essere spiegato:

$$\frac{I_1, I_2, \dots, I_n}{L_1, L_2, \dots, L_n} \\ \hline E$$

D'altronde, la letteratura è ricca di controesempi che mostrano come sussumere<sup>10</sup> un fenomeno sotto delle leggi di natura non fornisce necessariamente comprensione.

<sup>10</sup> In logica, sussumere un concetto significa ricondurlo nell'ambito di un concetto più generale.

Per utilizzare un esempio già visto, si potrebbe sostenere – in accordo con il modello nomologico-deduttivo – che la teoria della relatività spiega la contrazione delle lunghezze tramite una mera sussunzione dell'*explanandum* sotto i principi relativistici. In altre parole, potremmo assumere che ciò che nella SE noi chiamiamo ‘rendere espliciti gli elementi strutturali del modello’ corrisponde semplicemente alla derivazione dell'*explanandum* a partire dai principi relativistici (i quali sono istanziati nel modello). A questo approccio si potrebbe però contestare che una riformulazione delle spiegazioni della sezione precedente come una mera derivazione dai principi relativistici implicherebbe una forte perdita di potere esplicativo. Come già sostenuto, per esempio, da Brown e Pooley (2006), tale derivazione non farebbe che dimostrare che «se i due postulati sono entrambi veri, allora aste e orologi si devono comportare in maniera particolare. Ma questo difficilmente corrisponde a una spiegazione di tale comportamento.»<sup>11</sup> (P. 7)

Secondo Hughes, una significativa differenza tra il modello nomologico-deduttivo e la SE è che mentre il primo si inserisce nel contesto della visione sintattica delle teorie scientifiche, il quadro concettuale più naturale per la SE è la visione semantica (van Fraassen 1980). In questa specificità della SE risiede parte della spiegazione di come un modello matematico possa essere esplicativo nei confronti di un fenomeno fisico; è dunque utile spendere qualche riga di approfondimento su questo punto.

Secondo la tradizione neopositivista, nella concezione sintattica le teorie scientifiche sono calcoli non interpretati – una serie di regole deduttive che preservano la verità. All'interno di questa concezione, la naturale formulazione delle teorie scientifiche è quella dell'assiomatizzazione. Secondo la concezione semantica le regole deduttive non sono sufficienti per caratterizzare una teoria scientifica, che invece è costituita dai modelli matematici che rendono vera la teoria e rappresentano il mondo. Qualsiasi sistema fisico che esemplifica una legge può essere dunque rappresentato da un modello matematico che rende vera tale legge. Ad esempio, il modello di spazio-tempo di Minkowski rende veri i postulati della teoria della relatività speciale (principio di relatività e principio di invarianza della velocità della luce) e può rappresentare qualsiasi sistema che esemplifica tali principi (ad esempio una qualsiasi porzione di spazio-tempo). Il contributo principale della concezione

---

<sup>11</sup> Rods and clocks must behave in quite particular ways in order for the two postulates to be true together. But this hardly amounts to an explanation of such behaviour. (Traduzione mia)

semantica delle teorie sta proprio nel ruolo centrale della rappresentazione, che ci permette di imparare nuove cose sul mondo, investigando le caratteristiche del modello.

Secondo la caratterizzazione della più rigida visione semantica<sup>12</sup>, la rappresentazione consiste in una relazione binaria tra il modello e l'oggetto rappresentato, tipicamente qualche tipo di morfismo. Al fine di comprendere come i modelli matematici possano essere esplicativi rispetto ai fenomeni empirici, in questo articolo ci concentriamo invece sulle teorie pragmatiche della rappresentazione, che rifiutano la caratterizzazione di quest'ultima come una relazione binaria e si concentrano invece sul ruolo dei modelli come 'rappresentazione-come' ('*representation-as*')<sup>13</sup>.

Le rappresentazioni-come ci invitano a pensare all'oggetto rappresentato (il target) in termini del modello che lo rappresenta, che nel caso della SE è una struttura matematica. In questo modo, le rappresentazioni-come giustificano il cosiddetto *ragionamento surrogato* (*surrogative reasoning* (Swayer 2001)), vale a dire l'uso nella nostra indagine del modello come surrogato del target della rappresentazione. In altre parole, rappresentare il mondo con un modello matematico ci consente di usare le proprietà del modello come guida per le nostre inferenze e di tradurre le conclusioni della nostra indagine in conoscenza del target. Infine, perché l'indagine sul modello porti a nuove conclusioni circa il target, il modello deve possedere una dinamica interna indipendente dalla struttura nota del target (Hughes 1997).

Sofferarsi su questo ruolo di sostegno al ragionamento surrogato svolto dai modelli permette di comprendere in che modo la rappresentazione matematica di un fenomeno possa essere esplicativa rispetto ai fenomeni naturali, anche se non supportata da ipotesi sul tipo di entità e processi sottostanti. Il rapporto di rappresentazione ci permette di tradurre la nostra conoscenza del modello matematico in conoscenza del mondo – e quest'ultima aumenta grazie a quelle dinamiche interne (cioè leggi matematiche e proprietà) del modello, che sono indipendenti dalla nostra più limitata conoscenza del target rappresentato.

Diciamo dunque che un modello matematico è esplicativo nei confronti di un fenomeno naturale quando le informazioni rilevanti per la spiegazione del fenomeno sono informazioni di tipo matematico. Per chiarire questo punto, è prima di tutto necessario tenere in mente che la ricerca di una

---

<sup>12</sup> Si veda ad esempio (French e Ladyman 1999).

<sup>13</sup> Un esempio di tali approcci è proprio la teoria cosiddetta della Denotazione Deduzione e Interpretazione di Hughes (1997).

spiegazione ha spesso origine da un apparente contrasto tra l'*explanandum* e la nostra rappresentazione della realtà: visto sullo sfondo di tale rappresentazione, l'*explanandum* pare generare una tensione. Il riferimento al caso di studio illustrato sopra può aiutare a rendere questo punto più concreto. Nel caso delle relazioni di Heisenberg vi è una tensione tra il naturale presupposto che l'incertezza sul valore di una osservabile abbia una natura epistemica<sup>14</sup> e il fatto che le probabilità quantistiche non si comportano come epistemiche. La ricerca di una spiegazione della contrazione delle lunghezze, invece, è motivata da una tensione tra il fatto che la lunghezza propria di un'asta è maggiore della sua lunghezza quando misurata da un sistema di riferimento in movimento inerziale relativo e il fatto che non esiste uno stato di quiete assoluta rispetto al quale il movimento possa essere definito.

Per risolvere questa tensione sono necessarie nuove informazioni, che possono riguardare la storia causale dell'*explanandum* (ad esempio, una forza prima sconosciuta che accorcia i regoli), ma possono anche fornire informazioni sugli elementi della rappresentazione scientifica della realtà che ci portano a rivedere il quadro concettuale che dà forma alla nostra visione del mondo. In quest'ultimo caso la spiegazione dimostra che, una volta modificato il quadro concettuale alla base della nostra rappresentazione della realtà, la tensione che ha spinto verso la ricerca di una spiegazione è risolta senza bisogno di aggiungere nuovi elementi causali alla nostra rappresentazione della realtà.

Spiegazioni di questo tipo sono spesso SE, per esempio quando le nuove informazioni riguardano proprietà precedentemente considerate universali (ad esempio, la proprietà commutativa dell'algebra delle osservabili), cinetiche, o anche a priori (ad esempio, la nuova geometria dello spazio-tempo che diventa da euclidea a minkowskiana). Così la contrazione delle lunghezze si spiega mostrando che essa non è il risultato di un processo a cui sono sottoposti i corpi materiali, ma piuttosto una esemplificazione di parte della struttura geometrica dello spazio-tempo, che, continua la spiegazione, non è euclideo ma minkowskiano (Dorato 2007, Balashov e Janssen 2003, Janssen 2009).

Quest'ultima considerazione ci porta a un'altra importante caratteristica della SE. Non solo essa è una spiegazione non causale, ma è anche una spiegazione che si verifica quando si esclude la possibilità di una spiegazione causale dell'*explanandum* (Dorato e Feline 2011). Per

---

<sup>14</sup> Ossia che essa sia un riflesso della nostra ignoranza sullo stato del sistema, dovuta a un disturbo meccanico di detto sistema al momento della misura

esempio, abbiamo buoni motivi per essere scettici circa la possibilità di una spiegazione causale della contrazione delle lunghezze. Appropriandoci delle parole di Michael Janssen (2009) sui fenomeni relativistici<sup>15</sup>

è un errore continuare a cercare ulteriori spiegazioni di un fenomeno, una volta che tale fenomeno è stato dimostrato in maniera convincente essere un fenomeno cinematico. Uso il termine ‘fenomeno cinematico’ per esprimere semplicemente la specifica istanza di una caratteristica generica del mondo, nel caso dei fenomeni esaminati in questo articolo di predefinito comportamento spazio-temporale. In questo senso, a meno di una obiezione sulla classificazione del fenomeno come cinematico – ed è l’universalità delle caratteristiche rilevanti che milita fortemente contro tale riclassificazione – non c’è nulla in più da imparare da quel particolare fenomeno, né sul sistema specifico in cui si verifica né sulla caratteristica generica di cui il fenomeno è un’istanza.<sup>16</sup> (p. 4, traduzione mia).

C’è un’ultima questione da affrontare, prima di passare alla prossima sezione. L’affermazione che ‘un modello matematico è esplicativo rispetto a un fenomeno  $P$  quando le informazioni rilevanti per la spiegazione di  $P$  sono informazioni matematiche’ rischia di essere vuota, senza una definizione della relazione di rilevanza esplicativa che delimita quali informazioni sono necessarie per la spiegazione. Abbiamo dunque bisogno di rendere esplicita la relazione di rilevanza che sta alla base del funzionamento della SE, allo stesso modo in cui il modello nomologico-deduttivo individua la derivazione logica o la spiegazione causale la produzione causale.

Abbiamo visto che il suggerimento (citato nell’introduzione) di Hughes è che “i fatti bruti sono spiegati mostrando le loro connessioni con altri fatti meno bruti”, ma anche questo suggerimento non ci porta troppo avanti.

Recentemente alcune teorie della spiegazione convergono sull’ipotesi che il nucleo di una spiegazione scientifica giaccia nella dipendenza controfattuale tra *explanans* e *explanandum*. Morrison (2000) per esempio

---

<sup>15</sup> Le considerazioni di Janssen ricalcano in parte l’argomento visto sopra che mostra come l’universalità delle spiegazioni illustrate nella sezione 2 testimoniano a favore dell’impossibilità di fornire un resoconto meccanico di un fenomeno così generale.

<sup>16</sup> [i]t is a mistake to keep looking for further explanation of a phenomenon once that phenomenon has convincingly been shown to be kinematical. What it means for a phenomenon to be kinematical, in the sense in which I want to use this term, is that it is nothing but a specific instance of some generic feature of the world, in the case of the phenomena examined in this paper instances of default spatio-temporal behavior. Unless one challenges the classification of the phenomenon as kinematical in this sense—and it is the universality of the relevant feature that will militate strongly against such reclassification—there is nothing more to learn from that particular phenomenon, neither about the specific system in which it occurs nor about the generic feature it instantiates.

sostiene che i modelli esplicativi mostrano un certo tipo di dipendenza strutturale. Elaborando questa idea, Bokulich (2009) sostiene che questa dipendenza strutturale dovrebbe essere articolata in termini di dipendenza controfattuale. Lo stesso punto è stato ripreso più recentemente da Reutlinger (2012) e Pincock (2014).

Allo stesso modo, le connessioni tra l'*explanandum* e gli altri elementi del modello di cui parla Hughes si possono articolare nei termini di strutture di dipendenze controfattuali tra (il rappresentante formale del) l'*explanandum* e gli altri elementi del modello. Ad esempio, la spiegazione della contrazione delle lunghezze mostra che quest'ultima dipende dal carattere minkowskiano della geometria dello spazio-tempo (e in particolare dalla formula della distanza spazio-temporale tra due punti) perché mostra che se la geometria spazio-temporale avesse una metrica euclidea (ossia se essa fosse una geometria dove la distanza tra punti spazio-temporali seguisse il teorema di Pitagora), allora la contrazione delle lunghezze non avrebbe luogo. Se l'algebra delle osservabili quantistiche fosse commutativa, allora non varrebbe il Principio di indeterminazione di Heisenberg.

Il ruolo esplicativo dei modelli è quindi legato alla possibilità che la loro dinamica interna, indipendente dalla struttura nota del target, fornisca informazioni sui rapporti di dipendenza controfattuale che spiegano l'*explanandum*.

L'affermazione che l'informazione sulla dipendenza controfattuale rimane al centro della spiegazione scientifica può comprendere diverse varietà di spiegazioni scientifiche, tra le quali anche la spiegazione causale, ad esempio nella versione promossa dalla nuova filosofia meccanicistica. Questo è evidente soprattutto in quelle teorie che attribuiscono un ruolo centrale alla dipendenza controfattuale nella definizione di meccanismo (Craver 2007, Glennan 2010)<sup>17</sup>. In questo quadro, la differenza tra SE e altri tipi di spiegazioni si trova nelle varie 'origini' di tale dipendenza controfattuale (Bokulich 2009). Per esempio, in una spiegazione meccanicistica l'*explanandum* dipende controfattualmente da una proprietà meccanica dell'*explanans*, tramite un rapporto di produzione causale.

#### 4. La spiegazione strutturale a confronto con la spiegazione causale

Nella sezione 2, abbiamo etichettato gli esempi illustrati come spiegazioni non causali, in quanto i dettagli su processi e sistemi sottostanti al verificarsi dell'*explanandum* sono irrilevanti nella spiegazione. Inoltre,

---

<sup>17</sup> Si veda la sezione successiva per una breve illustrazione di questo approccio.

l'*explanandum* non è inteso come dinamicamente o causalmente prodotto, ma come manifestazione di una struttura fondamentale del mondo. In questa sezione approfondiamo questa caratterizzazione della natura non causale della SE e investighiamo alcuni corollari di tale caratterizzazione.

Cominciamo con un po' di storia. Come accennato nell'introduzione, la SE è stata originariamente introdotta da Hughes per rendere conto del potere esplicativo della meccanica quantistica; per Hughes, tale compito è reso più difficile del necessario dall'assunzione diffusa (tra i filosofi) che la spiegazione scientifica sia necessariamente causale e si basi dunque su ipotesi relative alla struttura categoriale di una teoria. Data questa assunzione, particolarmente forte nel caso della spiegazione causale, la mancanza di una interpretazione ontologica accettabile del formalismo quantistico preclude la possibilità di una spiegazione dei fenomeni quantistici (Hughes 1989a, pp. 206-7). Con le parole di Pierre Duhem:

Perché i filosofi che appartengono a una certa scuola si dichiarino pienamente soddisfatti di una teoria formulata dai fisici della stessa scuola, bisognerebbe che tutti i principi utilizzati da tale teoria fossero dedotti dalla metafisica della stessa scuola: se si farà appello, nel corso di una spiegazione di un fenomeno fisico, a qualche legge che tale metafisica non è in grado di giustificare, la spiegazione non sarà valida, la teoria fisica avrà mancato il suo scopo." (1906, p.21, traduzione mia)<sup>18</sup>

Il carattere non causale della SE trova origine in questo contesto concettuale, ed è direttamente legato alla dimensione anti-metafisica che Hughes vedeva nella spiegazione in meccanica quantistica. Negli ultimi anni, tuttavia, la teoria della spiegazione causale è progredita significativamente, grazie soprattutto al nuovo approccio meccanistico (Machamer *et al.* 2000, Bechtel e Abrahamsen 2005, Glennan 2002). Nell'analisi fornita da tale approccio, il ruolo delle entità e dei processi nella spiegazione causale va oltre quello di fornire una struttura categoriale per una spiegazione metafisica. Un confronto tra la SE e la spiegazione causale alla luce di tali nuovi sviluppi può portare a interessanti corollari sia riguardo la SE, sia riguardo il pluralismo nella spiegazione e alla convivenza tra diversi tipi di spiegazione scientifica.

---

<sup>18</sup> Pour que les philosophes appartenant à une certaine école se déclarent pleinement satisfaits d'une théorie édifée par les physiciens de la même Ecole, il faudrait que tous les principes employés dans cette théorie fussent déduits de la Métaphysique que professe cette Ecole: s'il est fait appel, au cours de l'explication d'un phénomène physique, à quelque loi que cette Métaphysique est impuissante à justifier, l'explication sera non avenue, la théorie physique aura manqué son but.

Per anticipare alcuni contenuti dell'analisi proposta in questa sezione, sosterrò che il carattere non causale della SE va concepito in contrapposizione alla nuova visione meccanicistica della spiegazione causale. Come conseguenza, la SE verrà caratterizzata come spiegazione dei fenomeni meccanicamente fondamentali. Dopo aver investigato il rapporto tra SE e spiegazione meccanicistica considereremo l'ipotesi che la SE, anche se non causale nel senso di meccanicistica, possa essere una spiegazione causale secondo la concezione controfattuale della spiegazione causale (Woodward 2005). Anche questa domanda avrà una risposta negativa.

Secondo la nuova filosofia meccanicista (Glennan 2002, Bechtel e Abrahamsen 2005, Craver 2007, Illari e Williamson 2012), per spiegare meccanicamente un fenomeno *P* bisogna descrivere, in maniera più o meno idealizzata, i meccanismi responsabili per l'occorrenza di *P*. La novità della nuova filosofia meccanicistica risiede nella sua definizione dei meccanismi come sistemi complessi. Non vi è attualmente un vero e proprio consenso sulla corretta definizione di meccanismo come sistema complesso, ma per fortuna i dettagli di questo dibattito sono irrilevanti per lo scopo di questo articolo. Qui sarà sufficiente riportare una delle definizioni più citate:

Un meccanismo per un comportamento è un sistema complesso che produce tale comportamento tramite l'interazione di un numero di parti, dove le interazioni tra parti possono essere caratterizzate da generalizzazioni dirette, invarianti, legate al cambiamento. (Glennan 2002, p. S344, traduzione mia)<sup>19</sup>

Nella descrizione di un meccanismo come sistema complesso risiede, secondo i filosofi meccanicisti e le filosofe meccaniciste, l'essenziale contributo della spiegazione causale per la comprensione dei fenomeni (Machamer *et al.* 2000, Bechtel e Abrahamsen 2005). La spiegazione meccanicistica mostra come il fenomeno *explanandum* è il risultato delle interazioni tra le parti del meccanismo in virtù delle loro proprietà. Ad esempio, la pressione esercitata dal liquido sulla parete del contenitore è spiegata dagli urti (una interazione) delle particelle che compongono il gas (le parti del meccanismo), in virtù della loro posizione e momento.

Ritornando alla SE, questa nuova definizione di spiegazione causale ci può aiutare a ridefinire il contenuto dell'affermazione che la SE sia una spiegazione non causale. Se vista come in opposizione alla nuova spiegazione causale/meccanicistica, l'indipendenza della SE dal tipo di entità

---

<sup>19</sup> "A mechanism for a behavior is a complex system that produces that behavior by the interaction of a number of parts, where the interactions between parts can be characterized by direct, invariant, change-relating generalizations.



e di processi sottostanti il verificarsi dell'*explanandum* (che secondo Hughes era legata alla sua non causalità)<sup>20</sup>, non deve essere intesa unicamente con una connotazione 'anti-metafisica'. Essa invece implica anche l'indipendenza dai dettagli meccanici sottostanti l'occorrenza dell'*explanandum*. Più concretamente: la spiegazione della contrazione delle lunghezze non è solamente indipendente dall'interpretazione sostanzialista o relazionista dello spazio-tempo, ma anche dalla specifica costituzione del regolo, dalle caratteristiche delle entità che lo compongono e dalle interazioni tra esse.

Infine, questa caratterizzazione della non causalità della SE sembra più adatta alla descrizione del caso di studio visto sopra anche rispetto alle precedenti teorie della spiegazione basate sui processi. Secondo queste ultime, l'oggetto principale degli asserti causali è il processo causale, come linea di mondo nello spazio-tempo che è capace di trasportare un marchio (Salmon 1984), oppure una quantità conservata (Dowe 2000). D'altro canto, la contrazione delle lunghezze non è solamente indipendente dagli specifici processi come linee di mondo nello spazio-tempo (che essi trasmettano un marchio o una quantità conservata), ma anche dai dettagli costitutivi, dal tipo di entità che li compongono e dalle loro proprietà meccaniche, dei sistemi composti che realizzano l'*explanandum*. Anche in questo caso, la contrapposizione tra SE e spiegazione causale sembra dunque caratterizzata in maniera più completa attraverso la nuova filosofia meccanicista.

A proposito di questa osservazione, si può notare per inciso che questo aspetto della SE la avvicina alla spiegazione asintotica (Batterman 2002), una varietà di spiegazione che si applica a comportamenti universali realizzati da sistemi estremamente diversi tra loro. Tali comportamenti universali vengono dunque spiegati 'eliminando i dettagli', ossia mostrando che i dettagli fisici dei sistemi che realizzano tali comportamenti sono irrilevanti. In questa indipendenza dai dettagli meccanici delle singole occorrenze, la SE converge con la spiegazione asintotica di Batterman<sup>21</sup>.

Vi è però una importante differenza tra la SE e le spiegazioni asintotiche. Come già notato da Batterman stesso, le spiegazioni asintotiche sono spiegazioni di regolarità, mentre la spiegazione della singola occorrenza del fenomeno *explanandum* richiede generalmente un resoconto causale. Ad esempio, la spiegazione del perché i fluidi al raggiungimento della loro temperatura critica si comportano tutti allo stesso modo è una

---

<sup>20</sup> Cfr. Hughes 1989a, pp. 206-207.

<sup>21</sup> Con la differenza che quelli che Batterman chiama 'dettagli fisici' verranno qui chiamati 'dettagli meccanici'.

spiegazione asintotica (Batterman 2002); la spiegazione però dello stesso comportamento in una data istanza e realizzato da un dato fluido richiede un resoconto causale, che comprenda i dettagli della composizione del fluido e delle interazioni tra le sue parti. Al contrario delle spiegazioni asintotiche, le SE possono spiegare sia regolarità di natura che eventi individuali. Prendendo come esempio il caso di studio della contrazione delle lunghezze, il modello dello spazio-tempo di Minkowski utilizzato nella spiegazione illustrata nella sezione 2 può essere interpretato sia come modello generale, istanziato da generici regoli e generiche regioni spaziotemporali sia come rappresentazione di uno specifico regolo in una specifica regione spaziotemporale<sup>22</sup>. Nel primo caso, la spiegazione è la spiegazione del fenomeno della contrazione delle lunghezze come regolarità di natura, nel secondo caso la spiegazione risultante è la spiegazione del fenomeno singolo di contrazione del regolo dato in una data zona spazio-temporale.

Una caratteristica comune alle diverse attuali definizioni di meccanismo è che i meccanismi sono sistemi organizzati con una struttura gerarchica, nel senso che le parti di un meccanismo sono esse stesse scomponibili in parti.<sup>23</sup> Ogni generalizzazione che caratterizza i comportamenti di tali parti e le interazioni tra esse è quindi sostenuta essa stessa da un meccanismo e può essere spiegata dalla descrizione di quest'ultimo. Tale regresso, tuttavia, non è infinito: ad un certo punto si raggiungono dei comportamenti che sono fondamentali, nel senso che non possono essere spiegati da un meccanismo sottostante, in quanto riguardano il comportamento dei componenti più elementari della realtà. Chiamiamo questi comportamenti 'meccanicamente fondamentali'. Secondo Stuart Glennan tali comportamenti rappresentano fatti inspiegabili del nostro universo (Glennan 2002, p. S348). A questo punto dovrebbe essere chiaro al lettore che la SE contraddice questa conclusione: la SE si applica esattamente alle leggi meccanicamente fondamentali, come mostrano i casi illustrati in § 2.

La SE è spesso definita la spiegazione delle teorie fondamentali (Hughes 1989b, p.257, Bokulich 2009) – caratterizzazione anche questa spesso legata alla non causalità. Tuttavia, nonostante il fatto che la coincidenza tra fenomeni fondamentali e fenomeni non causali (e non causalmente spiegabili) sia tutt'altro che ovvia, tale legame rimane sino ad ora inspiegato. Il problema principale di un vago appello alla fundamentalità è che il termine non ha un'interpretazione univoca – alcuni considerano

---

<sup>22</sup> La stessa doppia valenza dei modelli è descritta per i modelli meccanicistici ad esempio in (Machamer et al. 2000).

<sup>23</sup> Cfr. (Glennan 2011, p. 809).

fondamentale solo una eventuale teoria del tutto, altri considerano fondamentali quelle teorie il cui dominio è la scala di lunghezza più piccola e altri considerano fondamentali le teorie sui costituenti ultimi del mondo. Una conseguenza diretta della caratterizzazione della non causalità della SE come contrapposizione alla spiegazione meccanicistica è che abbiamo una migliore comprensione del tipo di fundamentalità a cui si applica la SE: i fenomeni fondamentali sono qui fenomeni non meccanicamente spiegabili, nel senso che non sono riducibili al comportamento di, e interazioni tra, i suoi componenti.

All'interno di una visione atomista del mondo, in cui esiste un solo livello che è il più elementare, incluso in questa definizione è, banalmente, anche il comportamento dei componenti più elementari della realtà fisica. Ma il riferirsi ad un 'livello fondamentale' non implica necessariamente un quadro concettuale atomista. Anche all'interno di una filosofia in cui non esiste un livello più elementare, ha ancora senso parlare di fenomeni meccanicamente fondamentali – che includono anche fenomeni riguardanti sistemi complessi ma che non sono spiegabili tramite la descrizione di meccanismi sottostanti. La contrazione delle lunghezze e le relazioni di Heisenberg sono fenomeni di questo tipo; qualsiasi fenomeno che esemplifica il principio di conservazione dell'energia potrebbe essere un altro esempio.

A questo punto, considerazioni estetiche potrebbero suggerire una nuova 'congettura di complementarità' (Salmon 1998) tra la SE e spiegazione meccanicistica, secondo cui ciò che non è spiegabile dalla prima è sempre spiegabile dalla seconda, e viceversa. Tuttavia, questo passaggio sarebbe troppo rapido. Un grosso ostacolo per la valutazione di una tale congettura è che, non sapendo quali siano le leggi fondamentali, la sua corroborazione tramite analisi degli esempi conosciuti sarebbe molto limitata. D'altro canto, quello che si può fare è osservare quelli che sono i fenomeni più probabilmente fondamentali in fisica e la maniera in cui essi sono spiegati. A questo proposito la contrazione delle lunghezze è un buon candidato e lo stesso vale per la spiegazione delle relazioni di indeterminazione di Heisenberg. Certo, questo non ci porta molto lontano; tuttavia, è innegabile che più si scende con i livelli di descrizione della realtà, più concetti come entità e interazioni (alla base dell'approccio meccanista) scompaiono e più la matematica invece svolge un ruolo esplicativo insostituibile. Un esempio che varrebbe particolarmente la pena di indagare è il caso dell'applicazione della teoria dei gruppi in fisica delle particelle, in cui la simmetria interna è considerata da molti lo strato più fondamentale della gerarchia ontologica (Dorato 2017).

A questo punto è necessario notare che molti filosofi e molte filosofe (Hall 2004, Hitchcock 2007) ultimamente hanno sottolineato come esistano due diversi concetti di causa: il primo, che viene chiamato *causa per produzione*, in cui le cause producono, o danno luogo a, gli effetti, e il secondo, che viene chiamato *causa per rilevanza* in cui gli effetti dipendono dalle cause. Solo nel primo tipo di concetto la descrizione dei sistemi e dei processi sottostanti al verificarsi dell'*explanandum* è necessaria per un resoconto causale.

Una delle ragioni che abbiamo sino ad ora illustrato per sostenere che la SE è una spiegazione non causale è che essa non caratterizza l'*explanandum* come causalmente prodotto. In questo senso abbiamo dunque mostrato che la SE non è una spiegazione causale per produzione. Ci si può però ancora chiedere se la SE possa comunque essere una spiegazione causale per rilevanza.

Le teorie causali per rilevanza si concentrano specialmente sulla rilevanza come dipendenza controfattuale. La prima e più discussa formulazione è dovuta a David Lewis (1974) ed è basata sul suo approccio ai controfattuali (Lewis 1973) e sul suo criterio di similarità dei mondi possibili. Data questa specifica formulazione, l'applicazione della spiegazione causale controfattuale al caso della SE è sicuramente problematica. I controfattuali che reggono una SE, infatti, hanno antecedenti che violano leggi fondamentali, e il criterio di similarità dei mondi possibili non fornisce chiare istruzioni su come trattare questo tipo di controfattuali. Ad esempio, non è chiaro come implementare il criterio di ampiezza della regione spazio-temporale in cui vi è una corrispondenza perfetta tra fatti particolari del mondo attuale e di quello controfattuale, in un controfattuale in cui la geometria spazio-temporale è diversa.

D'altro canto, nonostante i suoi innegabili meriti, la teoria controfattuale di Lewis ha rivelato seri limiti quando applicata a specifiche classi di cause<sup>24</sup>, per cui si potrebbe sostenere che questa versione della spiegazione causale per rilevanza non è adatta per testare il carattere causale della SE. In effetti, la concezione della causalità per rilevanza ha recentemente trovato una sua formulazione più efficace in termini di equazioni strutturali nei lavori in particolare di Judea Pearl (2009) e Jim Woodward (2005). Grazie in particolare al lavoro di quest'ultimo, la teoria controfattuale della causalità ha ora una formulazione particolarmente fertile nella sua applicazione a vari aspetti della teoria della spiegazione scientifica. Nel valutare l'ipotesi che la SE possa rientrare in un modello di spiegazione

---

<sup>24</sup> Per una illustrazione di questi problemi si veda (Hall 2004).

causale per rilevanza, prenderemo in esame dunque in particolar modo questa versione, attualmente tra le più accreditate teorie della spiegazione accanto alla teoria meccanicista.

La nozione centrale nella teoria di Woodward è il concetto di intervento. Senza entrare in lunghi tecnicismi, si può spiegare un intervento (ideale) nel senso di Woodward come il risultato di un'azione diretta che modifica i fattori rilevanti, riuscendo ad alterare il meno possibile gli altri fattori. Per evitare una caratterizzazione eccessivamente antropomorfa del concetto di causalità Woodward slega il concetto di intervento da quelle che sono le reali limitazioni di manipolazione del mondo proprie dell'essere umano. Un intervento non va dunque concepito come una manipolazione praticamente fattibile dall'essere umano, ma piuttosto come una manipolazione almeno in teoria possibile.

Secondo la teoria di Woodward, dunque:

*C* spiega causalmente *E* se, con un intervento su *C*, *E* cambia di conseguenza.

Con questo criterio di rilevanza causale, una spiegazione mette in evidenza lo schema di dipendenza controfattuale dell'*explanandum* dai fattori che lo causano (Woodward 2005, p. 191). Se applicato al caso della spiegazione della contrazione delle lunghezze, il criterio di Woodward si tradurrebbe come segue: “la geometria dello spazio-tempo spiega causalmente la contrazione delle lunghezze se, con un intervento sulla geometria spazio-temporale, la contrazione delle lunghezze cambia di conseguenza”. A prima vista potrebbe sembrare che questo sia esattamente il tipo di funzionamento controfattuale con cui abbiamo caratterizzato la SE: la contrazione delle lunghezze dipende controfattualmente da una specifica caratteristica della geometria minkowskiana (la formula per la distanza tra due punti), modificando la quale non si ha più la contrazione delle lunghezze. Anche in questo caso, però, le cose sono più complicate di quanto potrebbe sembrare a prima vista. Secondo la definizione di intervento, infatti, perché la SE della contrazione delle lunghezze fosse interpretabile in maniera causale dovrebbe essere almeno in linea principio possibile per l'essere umano manipolare la struttura minkowskiana dello spazio-tempo. D'altro canto, è chiaro che tale intervento non è possibile e si può in effetti facilmente mostrare (anche se per ragioni di spazio non affronteremo questo punto) come la stessa difficoltà si ripete negli altri casi di spiegazione strutturale<sup>25</sup>.

---

<sup>25</sup> È utile notare che, oltre al problema appena illustrato, vi sono diverse caratteristiche della teoria controfattuale di Woodward che la rendono in generale inapplicabile a buona parte

In conclusione, dunque, possiamo scartare l'ipotesi che la SE sia una spiegazione causale per rilevanza.

Prima di concludere con questa sezione, vale la pena considerare una ultima caratterizzazione di spiegazione non causale, ultimamente molto discussa e che è direttamente collegata ai contenuti della prossima sezione, ossia la definizione di Marc Lange (2012). Lange respinge la mera citazione di cause come criterio per individuare le spiegazioni non causali. Queste ultime, invece, sono riconoscibili “perché non funzionano fornendo informazioni sulla storia causale di un dato evento o, più in generale, sulla rete di relazioni causali del mondo.”<sup>26</sup> (Lange 2012, p. 3) L'esempio usato da Lange per illustrare questo criterio è quello della madre, il cui insuccesso nel tentativo di dividere equamente tutte le 23 fragole tra i suoi 3 figli (senza tagliare nessuna fragola) è spiegato dal fatto che 23 non può essere diviso per 3. Lange sostiene che la ragione per cui questa spiegazione è matematica non è che in essa non vengono citate le cause dell'*explanandum*. Infatti, sia secondo la teoria controfattuale di Lewis che secondo quella di Woodward, che la mamma avesse 23 fragole e 3 bambini è effettivamente la causa del suo non essere in grado di dividere le fragole in modo equo tra i suoi figli. La ragione invece per cui questa spiegazione è una spiegazione non causale è che il fatto che 23 non può essere diviso per 3 non possiede il suo potere esplicativo in virtù del fatto che fornisce informazioni su processi o relazioni causali. (ivi, p.12)

Il nostro caso di studio di spiegazione della contrazione delle lunghezze rispetta anche in questo caso il criterio per la spiegazione non causale: come abbiamo visto nelle precedenti sezioni, questa spiegazione funziona mostrando come l'*explanandum* dipende controfattualmente da una caratteristica matematica del modello, piuttosto che fornendo informazioni causali. Anche in questo caso, dunque, possiamo dire che la SE rientra nella caratterizzazione di Lange di spiegazione non causale.

## 5. La spiegazione strutturale come spiegazione matematica

La pervasività della matematica in molte delle attività che compongono la ricerca scientifica (e in particolare in fisica), non è sicuramente una

---

della fisica fondamentale. Woodward (2007) mostra che le caratteristiche della spiegazione e del ragionamento causali secondo la teoria controfattuale non sono applicabili alla fisica fondamentale.

<sup>26</sup> “because they do not work by supplying information about a given event’s causal history or, more broadly, about the world’s network of causal relations.”

novità. Recentemente, però, vari filosofi hanno sostenuto l'esistenza di un tipo di spiegazione dei fenomeni naturali, la cosiddetta *spiegazione matematica*<sup>27</sup>, che non è solamente espressa in linguaggio matematico, ma in cui la matematica svolge un indispensabile ruolo esplicativo. L'interesse della ricerca contemporanea verso le spiegazioni matematiche nelle scienze naturali ha origine nel dibattito sull'ontologia della matematica (Sereni 2010, Colyvan 2011). Fu Putnam il primo a usare esplicitamente il ruolo indispensabile della matematica nelle teorie scientifiche in difesa del platonismo matematico (ossia la posizione filosofica che sostiene l'esistenza di oggetti matematici astratti), nel celebre argomento di indispensabilità di Quine/Putnam (Putnam 1971). Tale argomento è basato sul criterio quineano per l'impegno ontologico, che detta che *dobbiamo* impegnarci ontologicamente verso tutte e sole quelle *entità che* sono indispensabili alle nostre migliori teorie scientifiche (Quine 1948). Secondo l'argomento di indispensabilità di Quine/Putnam, dunque

la quantificazione sulle entità matematiche è indispensabile per la scienza [...]; dunque dovremmo accettare tale quantificazione; ma ciò ci impegna ad accettare l'esistenza delle entità matematiche in questione<sup>28</sup>. (Putnam, 1971, p. 347, traduzione mia)

Più recentemente, vari autori (Melia 2000, 2002, Colyvan 2002) hanno obiettato all'argomento di Putnam, sostenendo che per una corretta applicazione del criterio per l'impegno ontologico verso gli oggetti matematici non è sufficiente che la matematica sia genericamente indispensabile per la scienza. Per poter concludere l'esistenza degli oggetti matematici astratti è invece necessario che essi abbiano un ruolo esplicativo nelle teorie scientifiche.

Da qui nasce il dibattito sull'esistenza delle spiegazioni matematiche nelle scienze naturali. Emancipandosi da questa origine, molti autori hanno cominciato a investigare le spiegazioni matematiche concentrandosi su altre applicazioni e conseguenze filosofiche di tale concetto, che spaziano dal problema dei modelli e della rappresentazione nella scienza (Bueno e French 2010, Batterman 2010) sino alla questione del contributo epistemico della matematica applicata alle scienze empiriche (Pincock 2007, Batterman 2002).

---

<sup>27</sup> Per una introduzione, si veda (Molinini 2013).

<sup>28</sup> Quantification over mathematical entities is indispensable for science [...]; therefore we should accept such quantification; but this commits us to accepting the existence of the mathematical entities in question.

La SE è nata in un contesto molto diverso (i fondamenti della fisica) – quindi, se è vero (come sosterremo nella presente sezione) che la SE è una spiegazione matematica, allora il suo sviluppo potrebbe beneficiare di un dialogo con i risultati e le problematiche propri di quella letteratura. In questa sezione approfondiamo dunque il senso in cui si può dire che la SE sia una spiegazione matematica, e che cosa invece la caratterizzi rispetto alle altre spiegazioni matematiche. Come per il caso delle spiegazioni meccanicistiche e quelle controfattuali, esistono diverse proposte anche sull'esatta definizione di spiegazione matematica e il dibattito su questo tema è al momento molto vivace (Baker 2009, Saatsi 2011, Lange 2012, Pincock 2007, 2014). In questa sezione ci limitiamo a prendere in esame due delle proposte più accreditate (Pincock 2007, Lange 2012) e mostriamo come la SE corrisponda ad una spiegazione matematica secondo questi criteri.

Secondo (Pincock 2007) la matematica svolge un ruolo teoretico indispensabile dato che ci permette di essere guidati nelle nostre indagini da proprietà e leggi ben confermate, ossia le leggi e le proprietà del modello matematico. Lo stesso ruolo teoretico fondamentale è facilmente individuabile nella caratterizzazione fornita sopra della SE. Nella § 3, infatti, abbiamo fatto appello alla dinamica interna del modello, che deve essere indipendente dalla struttura nota del target della rappresentazione. Detta dinamica interna svolge un ruolo esplicativo permettendo di eseguire un ragionamento surrogato dal modello al target. In particolare, è tale dinamica interna che sta alla base della conoscenza controfattuale fornita dalla spiegazione, come illustrato in dettaglio nella sezione precedente. Così, per esempio, nell'utilizzare i modelli minkowskiani, e in virtù della relazione di rappresentazione tra modello matematico e target della rappresentazione, si può sfruttare la nostra conoscenza, tipicamente più solida, della geometria minkowskiana come se fosse conoscenza delle relazioni strutturali del target.

In secondo luogo, nella caratterizzazione di Pincock l'uso di un linguaggio matematico ci permette anche di studiare le proprietà del target, pur ignorando molte delle sue caratteristiche – e anche questa è una caratteristica della SE. Per esempio, dal momento che ciò che è rilevante nella SE sono le proprietà geometriche dello spazio-tempo, la stessa spiegazione può essere utilizzata sia nel contesto di una concezione relazionalista che in quello di una concezione sostanzialista dello spazio-tempo.

Questo ci porta a un'altra caratteristica delle spiegazioni matematiche, che getta ulteriore luce sul rapporto tra SE e spiegazione causale. Secondo



Marc Lange, le spiegazioni matematiche (o ‘caratteristicamente matematiche’, con un’espressione da lui adottata), oltre a essere spiegazioni non causali secondo il criterio esposto alla fine della sezione precedente,

funzionano facendo appello a fatti (inclusi, ma non solo, i fatti matematici) che sono modalmente più forti delle normali leggi causali.<sup>29</sup> (Lange 2012, p.7, traduzione mia)

Come conseguenza, le spiegazioni matematiche

mostrano come il fatto da spiegare fosse inevitabile in una maniera più forte di quanto possa risultare dai poteri causali conferiti dal possesso di diverse proprietà. Se un fatto ha una spiegazione caratteristicamente matematica, allora la forza modale della connessione tra cause ed effetti è insufficiente per spiegare l’inevitabilità di tale fatto. (ibid. p.3, traduzione mia)<sup>30</sup>

Abbiamo già visto come la SE rientri nel criterio di Lange (2012) di spiegazione non causale.

Inoltre, anche la SE funziona facendo appello a leggi matematiche. Dato che la matematica ha il ruolo di guidare le nostre inferenze, allora, se si assume la gerarchia modale delle leggi proposta da Lange, inferenze come quelle implicate nelle SE devono avere una forza modale diversa rispetto alle spiegazioni causali, che si fondano sulla contingenza delle leggi della dinamica e in generale delle leggi della fisica. Anche secondo la caratterizzazione di Lange, la SE è dunque a tutti gli effetti una spiegazione matematica.

## 6. Conclusioni

In questo articolo abbiamo sostenuto che alcuni fenomeni fisici sono spiegati dalla scienza strutturalmente. La SE è una varietà di spiegazione

---

<sup>29</sup> Secondo Lange, le leggi sono strutturate in una gerarchia per cui le leggi empiriche hanno una forza modale minore di quelle matematiche. Tralasciamo qui il dibattito riguardo la complessa e controversa metafisica delle leggi che sta alla base del resoconto di spiegazione scientifica di Lange.

<sup>30</sup> Mathematical explanations “work by appealing to facts (including, but not always limited to, mathematical facts) that are modally stronger than ordinary causal laws”. (p.7) Mathematical explanations show “how the fact to be explained was inevitable to a stronger degree than could result from the causal powers bestowed by the possession of various properties. If a fact has a distinctively mathematical explanation, then the modal strength of the connection between causes and effects is insufficient to account for that fact’s inevitability.” (p.3)

controfattuale che funziona mostrando come il rappresentante nel modello del fenomeno *explanandum* dipende controfattualmente da una caratteristica del modello di riferimento. Mentre in una spiegazione causale l'origine della dipendenza controfattuale risiede in un rapporto di produzione causale, nella spiegazione strutturale tale origine è matematica, nel senso che la dipendenza tra l'*explanandum* e l'*explanans* funziona attraverso un legame di relazione matematica. Un modello matematico è esplicativo rispetto a un fenomeno naturale *P* quando le informazioni rilevanti per la spiegazione sono proprietà e leggi matematiche esemplificate dal modello, mentre le entità e i processi sottostanti al verificarsi di *P* sono irrilevanti.

Parte dell'indagine qui svolta riguarda il rapporto tra la SE, la spiegazione causale e la spiegazione matematica. La spiegazione strutturale è una spiegazione non causale, ma è anche una spiegazione di fenomeni causalmente inspiegabili o, come li abbiamo definiti, meccanicamente fondamentali. Nonostante il suo carattere alternativo alla spiegazione matematica sia stato articolato in special modo nei termini di una contrapposizione alla nuova teoria della spiegazione meccanicistica, abbiamo mostrato che la SE non può essere considerata una spiegazione causale controfattuale.

Nella SE la matematica svolge il ruolo di guidare le nostre inferenze esplicative, ossia il nostro ragionamento controfattuale. Questo ruolo indispensabile della matematica nella SE rende quest'ultima una spiegazione matematica nelle scienze naturali secondo la caratterizzazione di (Pincock 2007). Infine, secondo la caratterizzazione di Lange, il fatto che il ragionamento controfattuale alla base della SE sia guidato da leggi matematiche rende la modalità con cui funziona la SE più forte di una spiegazione causale.

A conclusione di questo articolo, è utile una breve rassegna dei principali nodi ancora da sciogliere e dei possibili indirizzi di ricerca suggeriti dai temi qui trattati.

Prima di tutto, abbiamo visto che il ruolo essenziale svolto dalla matematica in fisica fondamentale suggerisce che la SE potrebbe essere applicabile ad altri importanti casi di spiegazione in fisica. Testare questa tesi, come abbiamo visto, non è un compito facile, ma è cruciale per una adeguata comprensione del contributo della fisica moderna alla nostra conoscenza del mondo. Particolarmente interessanti sono le spiegazioni di fenomeni che sono manifestazioni di simmetrie fondamentali.

Riguardo alla rilevanza esplicativa, abbiamo suggerito in questo articolo che la SE spiega mostrando il pattern di dipendenze controfattuali che sussiste tra *explanans* e *explanandum*. Questa ipotesi dovrebbe essere

capace di riunire SE e spiegazioni meccanicistiche sotto una stessa più generale teoria della spiegazione scientifica. Abbiamo anche visto per<sup>o</sup> che i controfattuali che stanno alla base della SE da una parte e della spiegazione causale dall'altra sono di tipi alquanto diversi – e questa diversità merita un approfondimento. Innanzitutto, i controfattuali legati alla SE si basano su antecedenti che violano leggi fondamentali, e non è immediatamente chiaro quale semantica possa essere adatta a interpretare controfattuali di questo tipo. Alcuni autori negano addirittura che i controfattuali alla base della spiegazione strutturale siano dei genuini controfattuali sul mondo e li interpretano piuttosto come condizionali indicativi che dicono qualcosa sulla teoria (Handfield 2004, Wilson 2013). Una soluzione di questo tipo, d'altronde, avrebbe delle ripercussioni potenzialmente importanti sull'interpretazione della SE in termini realistici. È dunque cruciale chiarire questo punto tramite una proposta sulla semantica dei controfattuali che affianchi una teoria generale della spiegazione controfattuale.

Infine, una domanda essenziale legata alla spiegazione matematica, ma anche di maggiore importanza nel contesto SE, riguarda le conseguenze della SE per la teoria della rappresentazione scientifica e per il realismo scientifico. Per esempio, vi è la possibilità che due diversi formalismi (anche non isomorfi) possano fornire due diverse (ma entrambe apparentemente accettabili) SE dello stesso fenomeno (Clifton 2001). Sarebbe dunque importante investigare possibili casi in cui tali spiegazioni coesistono e le implicazioni di tale coesistenza per un'interpretazione realistica dei rispettivi modelli.

## Bibliografia

- Baker, A., 2009, «Mathematical explanation in science», *The British Journal for the Philosophy of Science*, 60(3), pp. 611-33.
- Balashov, Y. e Janssen, M., 2003, «Presentism and relativity», *The British journal for the philosophy of science*, 54(2), pp. 327-46.
- Batterman, R. W., 2002, *The devil in the details: Asymptotic reasoning in explanation, reduction, and emergence*, Oxford: Oxford University Press.
- , 2010, «On the explanatory role of mathematics in empirical science», *The British journal for the Philosophy of Science*, 61(1), pp. 1-25.

- Bechtel, W., e Abrahamsen, A., 2005., «Explanation: A mechanist alternative», *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 36(2), pp. 421-41.
- Berger, R., 1998, «Understanding science: why causes are not enough», *Philosophy of Science*, 65(2), pp. 306-32.
- Bokulich, A., 2009, «How scientific models can explain», *Synthese*, 180(1), pp. 33-45.
- Brown, H. R., & Pooley, O., 2006, «Minkowski space-time: a glorious non-entirety», *Philosophy and Foundations of Physics*, 1, pp. 67-89.
- Bueno, O. e French, S., 2012, «Can Mathematics Explain Physical Phenomena? », *The British Journal for the Philosophy of Science*, 63(1), pp. 85-113.
- Clifton, R., 1998, «Structural Explanation in Quantum Theory», On-line: <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000091/00/explanation-in-QT.pdf> .
- Colyvan, M., 2002, «Mathematics and Aesthetic Considerations in Science», *Mind*, 111, pp. 69–74.
- , 2011, «Indispensability Arguments in the Philosophy of Mathematics», *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. On-line: <http://plato.stanford.edu/archives/fall2004/entries/mathphil-indis/>
- Craver, C. F., 2007, *Explaining the brain: Mechanisms and the mosaic unity of neuroscience*, Oxford University Press.
- Dorato, M., 2007, «Relativity theory between structural and dynamical explanations», *International studies in the philosophy of science*, 21(1), pp. 95-102.
- , 2017, «Dynamical versus structural explanations in scientific revolutions», *Synthese*, 194(7) pp. 2307-2327.
- Dorato, M. e Feline, L., 2011, «Scientific explanation and scientific structuralism», in A. Bokulich e P. Bokulich (eds.), *Scientific*

- Structuralism*, Springer Netherlands, pp. 161-176.
- Dowe, P., 2000, *Physical causation*, Cambridge University Press.
- Duhem, P., 1906, *La théorie physique: son objet, et sa structure*, Paris, Chevalier & Riviere. Online:  
<https://archive.org/details/lathoriephysiqu00unkngoog>
- Felline, L., 2010, «Remarks on a structural account of scientific explanation», in Suarez, M. *et al.* (eds.) *EPSA philosophical issues in the sciences*, pp. 43-53, Springer Netherlands.
- , 2011, «Scientific explanation between principle and constructive theories». *Philosophy of Science*, 78(5), pp. 989-1000.
- , 2015, «Mechanisms meet structural explanation». *Synthese*, pp. 1-16.
- French, S., e Ladyman, J., 1999, «Reinflating the Semantic Approach». *International Studies in the Philosophy of Science*, 13, pp. 103-21.
- Glennan, S., 1996, «Mechanisms and the nature of causation», *Erkenntnis*, 44(1), pp. 49-71.
- , 2002, «Rethinking mechanistic explanation», *Philosophy of Science*, 69(S3), pp. S342-53.
- , 2010, «Mechanisms, causes, and the layered model of the world». *Philosophy and Phenomenological Research*, 81(2), pp. 362-81.
- , 2011, «Singular and general causal relations: A mechanist perspective». In P. M. Illari, F. Russo e J. Williamson (eds.), *Causality in the Sciences*, Oxford: Oxford University Press, pp. 789-817.
- Hall, N., 2004, «Two concepts of causation», in John Collins, Ned Hall e L.A. Paul (eds.), *Causation and counterfactuals*, pp. 225-276, Cambridge, MA,: Bradford Book/MIT Press.
- Handfield, T., 2004, «Counterlegals and necessary laws», *The Philosophical Quarterly*, 54(216), 402-419.
- Hitchcock, C. R., 2007, «How to be a causal pluralist», in G. Woters e P. Machamer (eds.), *Thinking about Causes: from Greek Philosophy to*

- Modern Physics*, pp. 200-21, Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Heisenberg, W., 1927, «Ueber den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik and Mechanik», *Zeitschrift für Physik*, 43, pp. 172-98, traduzione inglese in J. Wheeler e W.H. Zurek, 1983, W.H. (eds), 1983, *Quantum Theory and Measurement*, Princeton NJ: Princeton University Press, pp. 62-84.
- Hughes, R.I.G., 1989a, «Bell's theorem, ideology, and structural explanation», in J. Cushing e J. McMullin (eds.), 1989, *Philosophical Consequences of Quantum Theory*, Notre Dame, Ind., pp. 195-207.
- , 1989b, *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*, Harvard University Press.
- , 1993, «Theoretical Explanation», *Midwest Studies in Philosophy*, XVIII, pp. 132-53.
- , 1997, «Models and Representation», *Philosophy of Science*, 64(S4), pp. 325-33.
- Illari, P. M., e Williamson, J., 2012, «What is a mechanism? Thinking about mechanisms across the sciences», *European Journal for Philosophy of Science*, 2(1), pp. 119-35.
- Janssen, M., 2009, «Drawing the line between kinematics and dynamics in special relativity», *Studies In History and Philosophy of Science Part B: Studies In History and Philosophy of Modern Physics*, 40(1), pp. 26-52.
- Körner, S., 1969, *Fundamental questions of philosophy*, Harmondsworth, Middx.: Penguin Books.
- Kuhlmann, M., e Glennan, S., 2014, «On the relation between quantum mechanical and neo-mechanistic ontologies and explanatory strategies». *European Journal for Philosophy of Science*, 4(3), pp. 337-359.
- Lange, M., 2013, «What Makes a Scientific Explanation Distinctively Mathematical?», *The British Journal for the Philosophy of Science*, 0, pp. 1-27.
- Lewis, D., 1974, «Causation». *The journal of philosophy*, 70(17), 556-567.

- , 1973, «Counterfactuals and comparative possibility», in *Ifs*, pp. 57-85, Springer Netherlands.
- Lyon, A., & Colyvan, M., 2008, «The explanatory power of phase spaces», *Philosophia Mathematica*, 16(2), pp. 227-43.
- Machamer *et al.*, 2000, «Thinking about mechanisms», *Philosophy of science*, pp. 1-25.
- Melia, J., 2000, «Weaseling Away the Indispensability Argument», *Mind*, 109, pp. 458–79.
- , 2002, «Response to Colyvan», *Mind*, 111, pp. 75–9.
- Molinini D., 2013, «La Spiegazione Matematica». APhEx 7, (ed. Vera Tripodi), On-line  
<http://www.aphex.it/index.php?Temi=557D03012202740321070502777327>
- Morrison, M., 2000, *Unifying Scientific Theories*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Pearl, J., 2009, *Causality*, Cambridge university press.
- Petkov, V., 2009, *Relativity and the Nature of Spacetime*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Pincock, C., 2007, «A Role for Mathematics in the Physical Sciences», *Nous*, 41, pp. 253-75.
- , 2014, «Abstract explanations in science», *The British Journal for the Philosophy of Science*, axu016.
- Putnam, H., 1971, *Philosophy of logic*, Harper & Row, New York, traduzione italiana: *Filosofia della logica: nominalismo e realismo nella logica contemporanea*, ISEDI, Milano, 1975.
- Reutlinger, A., 2012, «Getting rid of interventions», *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 43(4), 787-795.

- Quine, W. V., 1948, «On What There Is», *The Review of Metaphysics*, 2(1), pp. 21–38.
- Robertson, J.P., 1929, «The Uncertainty Principle», *Physical Review*, 34, pp. 163–4.
- Saatsi, J., 2011, «The enhanced indispensability argument: Representational versus explanatory role of mathematics in science», *The British Journal for the Philosophy of Science*, 62(1), pp. 143-54.
- Salmon, W., 1984, *Scientific explanation and the causal structure of the world*, Princeton University Press.
- , 1998, *Causality and explanation*. Oxford: Oxford University Press.
- Sereni, A., 2010, «Argomenti di indispensabilità in filosofia della matematica». *APhEx* 1, (Ed. Vera) Tripodi, On-line:  
<http://www.aphex.it/public/sito/ita/docs.php?&nomeCat=1&sezione=1&content=14&cat=1&view=2&id=5>.
- Swoyer, C., 1991, «Structural Representation and Surrogate Reasoning», *Synthese*, 87, pp. 449–508.
- Uffink, J., 1990, *Measures of Uncertainty and the Uncertainty Principle*, PhD Thesis, University of Utrecht, On-line:  
<http://www.projects.science.uu.nl/igg/jos/publications/proefschrift.pdf>
- van Fraassen, B. C., 1980, *The Scientific Image*, Oxford: Oxford University Press.
- Wilson, A., 2013, «Schaffer on laws of nature», *Philosophical studies*, 164(3), pp. 653-67.
- Woodward, J., 2005, *Making things happen: A theory of causal explanation*, Oxford University Press.
- , 2007, «Causation with a human face», in H. Price & R. Corry (Eds.), *Causation, Physics, and the Constitution of Reality*, Oxford: Oxford University Press, pp. 66–105.