

LE EURISTICHE DELLA TEORIA EINSTEINIANA DELLA RELATIVITÀ

Scienze cognitive e sociologia della conoscenza per una ricostruzione socio-cognitiva della scienza

di Andrea Cerroni

Università degli Studi di Siena e Università degli Studi di Milano-Bicocca

e-mail: andrea.cerroni@unimib.it

E' assai recente l'applicazione delle scienze cognitive allo studio della scienza, tradizionale terreno della storia e della filosofia della scienza e, più recentemente, della sociologia della scienza. Grazie alle scienze cognitive possiamo però meglio attrezzarci ad *apprendere dalla scienza* qualcosa di irrinunciabile sui suoi fondamenti e sul più generale ragionamento umano. Nei più eclatanti fenomeni "rivoluzionari" che conducono ad una grande scoperta scientifica, come è il caso della scoperta einsteiniana della Teoria della Relatività, vengono infatti in superficie con maggior visibilità lo stile, il metodo e gli strumenti cognitivi impiegati nel ragionamento comune, oltre che in quello propriamente scientifico. In questi casi, infatti, lo scienziato deve costruirsi nuove conoscenze sfruttando al massimo tutte le risorse disponibili, facendole quindi emergere con particolare chiarezza agli occhi dell'analista.

Premessa. Scienze cognitive e sociologia della scienza

Solo un approccio cognitivo sembrerebbe capace di gettare nuova luce sul rapporto fra scoperta scientifica e risorse culturali che, nei recenti sviluppi *costruttivisti* della sociologia della conoscenza scientifica, ha visto una progressiva perdita di specificità della produzione scientifica rispetto alle produzioni genericamente culturali. Ma la scienza non può essere ridotta *tout-court* ad una forma culturale, se solo si pone mente ai successi tecnologico, predittivo ed esplicativo in comparazione con le varie forme di magia che, pure, ancora sopravvivono nelle società contemporanee. D'altra parte, proprio quella cultura tanto spesso evocata, soprattutto da Kuhn in poi, è in realtà rimasta in ombra più come un presupposto dato per scontato che come un terreno di analisi sistematica. Laddove il "culturalismo" si è arenato, alcune delle euristiche cognitive che individueremo si prestano particolarmente bene a scomporre

le *Weltanschauungen* in termini più abordabili per la stessa indagine sociologica sulla conoscenza.

La scienza, insomma, sembra un laboratorio particolarmente proficuo tanto per le scienze cognitive quanto per la sociologia della conoscenza.

In questo articolo¹ lavoreremo all'interno del *framework cognitivo* elaborato da Tweney (in: Gholson *et al.* 1989; v. anche Gorman 1992), applicandolo agli scritti disponibili di Einstein. Giungeremo, in particolare, a mostrare che le sue *scelte teoriche* risultano, ad un'analisi cognitiva retrospettiva, alquanto razionali, mentre invece con i soli strumenti della filosofia della scienza, sarebbero classificate come irrazionali (Viale 1997). Questa razionalità, però, sarà limitata all'applicazione di alcune *assunzioni di credenza* che Einstein fece, più o meno inconsapevolmente, senza avere grandi garanzie della loro adeguatezza empirica. Ma questo non è che un caso particolare del procedere della conoscenza.

Alcune credenze, infatti, non vengono *scelte* razionalmente anche dallo scienziato "più razionale", ma sono piuttosto date per scontate, *presupposte* dal ragionamento, recepite inconsapevolmente dal repertorio cognitivo socialmente disponibile. Esse rinviano, perciò, alla dimensione culturale delle risorse cognitive che il ragionatore si ritrova a disposizione attraverso il suo percorso di acculturazione ed il contagio sociale delle idee. Queste credenze sono sostanzialmente *tacite* (Polanyi 1958), e possono avere la forma di teorie ingenuie (analogie, pre-idee, prototipi, ecc.), routine epistemiche (metodi di trattamento della conoscenza e delle sue fonti, criteri di attribuzione della rilevanza, criteri di controllo delle ipotesi, procedure di categorizzazione, schemi, script, ecc.), od anche semplici pratiche ed abilità non trasmissibili linguisticamente. Collettivamente, possiamo ricondurre con sufficiente esattezza queste credenze al tipo di conoscenza denominata *knowing-how* (Ryle), ma useremo di preferenza il termine usato da Hume di *credenze*, perché ha ormai dato origine ad una certa tradizione.² Tali conoscenze sono anche caratterizzate dall'essere svincolate da stringenti requisiti di coerenza logica e, in gran parte, dal controllo razionale di adeguatezza empirica e, spesso, persino dall'accesso immediato da parte del ragionatore.

Di quando in quando, comunque, alcune di queste credenze vengono tematizzate e divengono, così, oggetto di attenzione focale ed argomento di indagine razionale. Le grandi scoperte scientifiche (le "rivoluzioni kuhniane", per intendersi) sono alcuni di questi momenti, durante i quali lo scienziato cerca di sottoporre tali credenze a rigidi criteri di *coerenza interna* ed a sistematiche procedure di controllo della *coerenza esterna*. Da quel momento, almeno per lo scienziato in questione, queste credenze vanno ben distinte dalle altre, perché divengono *sistemi di idee* al pari di altre teorie esplicite, algoritmi risolutivi, definizioni e modelli espliciti. Conoscenze di questo secondo tipo richiamano, più o meno da vicino, il concetto di *knowing-that* (Ryle), ma anche in questo caso ci atterremo alla denominazione di Hume: *idee*. Successivamente, la comunicazione dei risultati inizia a diffondere il nuovo sistema razionalizzato, facendolo progressivamente entrare nel novero delle risorse condivise a livello sociale. Osserviamo, però, che nella fase di emersione delle credenze, lo

scienziato non può ricorrere soltanto a procedure rigorose, ma deve necessariamente affidarsi anche ad euristiche informali ed insicure, proprie, ad esempio, del pensiero immaginativo. In ogni caso, dunque, altre credenze lo guideranno, rimanendo il più delle volte al di sotto del livello della sua personale consapevolezza o della sua capacità di controllo effettivo.

Conformemente ad euristiche di questo tipo, alcuni concetti fondamentali della teoria disponibile vengono rivisti, nuove ipotesi vengono assunte ed altre scartate, linee di ricerca prima indipendenti vengono integrate nel corpus di conoscenza, nuovi sviluppi, infine, vengono delineati sotto forma di idee guida. Tre sono i contesti cognitivi nei quali queste euristiche divengono produttive: nella diagnosi iniziale, nella produzione di nuove ipotesi e nella selezione di alcune sole fra tutte quelle che vengono da lui prodotte. Sviluppando un'intuizione di van Fraassen (in: Nersessian 1987), la prima fase può essere definita *diagnosi personale*, la seconda *espansione sistolica*, e l'ultima *contrazione diastolica* (Cerroni 2001b).

L'approccio che seguiremo, in quanto cercherà di contemperare ragionamento e cultura, può essere denominato *approccio socio-cognitivo*.

Il percorso einsteiniano

Iniziamo stabilendo obiettivi ed idee guida del programma einsteiniano, onde articolare un primo profilo concettuale della cosiddetta "rivoluzione einsteiniana", scandito dalle due tappe fondamentali della formulazione della Teoria della Relatività, nella forma, rispettivamente, di *Teoria Speciale* e di *Teoria Generale*.³

In molti luoghi chiave della sua ricerca sulla relatività (1905; 1916; 1921sgg.) Einstein parte segnalando un difetto nelle spiegazioni o nelle modellizzazioni, una restrizione non motivata, o più in generale una insufficienza epistemologica nella teoria corrente, che egli si ripropone di superare.⁴

Nel primo articolo, ad esempio, egli osserva un'asimmetria esplicativa nella teoria elettrodinamica di Maxwell per il caso dell'azione reciproca che si esercita fra un magnete ed un conduttore in moto l'uno rispetto all'altro. Mentre ciò che può essere osservato dipende esclusivamente dal moto relativo dei due corpi, le *spiegazioni* fornite dall'elettrodinamica sono differenti se prendiamo un osservatore in un sistema di riferimento in quiete rispetto all'uno oppure all'altro. Si badi che, però, le *previsioni* nei due casi sono le medesime, e dunque l'asimmetria è anche fra spiegazioni *diverse* e previsioni *identiche* da parte della medesima teoria. Sorge il sospetto che tale asimmetria sia indizio di qualcosa che non funziona nella cinematica data per scontata ed impiegata senza una adeguata indagine, poiché non si vede come una differenza nella velocità del sistema dell'osservatore possa mutare la realtà di un fenomeno naturale. Tutt'al più, può cambiare la sua mera apparenza. Anzi, Einstein ritiene fermamente, più in generale, che le leggi scientifiche debbano essere *indipendenti* dalla velocità del sistema scelto. E ciò deve valere, innanzi tutto, per le equazioni con le quali il fisico le esprime. A questo stadio della sua ricerca, per esattezza, egli considera il solo caso dei *sistemi inerziali*, per i quali così già avviene

per la meccanica di Newton (*principio di relatività*). A queste esigenze teoriche si aggiunge anche il dato sperimentale dei ripetuti fallimenti nel rilevare la presenza dell'etere elettromagnetico, la materializzazione del concetto astratto di *spazio assoluto*. Con ciò, l'intero quadro depona a sfavore dell'idea di quiete assoluta ed il moto, conseguentemente, emerge come grandezza essenzialmente *relativa*.

Ecco, dunque, che Einstein passa a tematizzare alcuni concetti fondamentali fra i più usuali (più precisamente delle *pre-idee*): spazio, tempo e moto. Fa questo a partire dalle concrete misurazioni che possono essere pragmaticamente condotte entro un sistema di riferimento. A questo punto, egli assegna una nuova, particolare rilevanza al fatto che la velocità della luce compare esplicitamente nelle equazioni fondamentali di Maxwell per il campo elettromagnetico. Mentre nella cinematica tradizionale la prima dovrebbe variare in ogni sistema, queste debbono invece valere per ogni sistema. Per conciliare la presenza di questa velocità con l'invarianza delle equazioni, egli assume la prima come una grandezza fondamentale ed invariante della natura. In questo modo le equazioni di Maxwell rimangono, ovviamente, invarianti per i sistemi inerziali e l'equazione dell'addizione delle velocità nella dinamica newtoniana continua ad essere valida solo nell'approssimazione di velocità piccole rispetto a quella della luce, che diventa una velocità limite ed in tutto analoga alla velocità infinita della precedente teoria.

Così facendo, però, Einstein riesce anche a dare una *spiegazione* per le trasformazioni di coordinate che, come Lorentz aveva appena scoperto, lasciano invariate le equazioni di Maxwell. Contrazione delle dimensioni spaziali e dilatazione delle durate temporali, infatti, sono ora spiegate in quanto causate dalle modalità di misura: se le misuriamo in un sistema in cui gli strumenti impiegati appaiono in moto, i regoli di misura dello spazio si contraggono e gli orologi rallentano. Con questa ridefinizione delle misure degli spazi e dei tempi, e in definitiva degli stessi loro concetti, cinematica ed elettrodinamica vengono unificate, ed il concetto di etere diviene ormai superfluo.

Ma nel 1916 esce l'articolo con il quale Einstein conclude la sua ricerca sulla relatività. Stavolta egli stringe ancor di più l'attenzione sulle misure con le quali sole possiamo stabilire le grandezze fondamentali della fisica: tutte le misure che noi possiamo fare non sono mai altro che coincidenze fra punti materiali dei nostri strumenti di misura ed altri punti materiali, fra lancette di un orologio e punti sul quadrante dell'orologio, e così via. Se, dunque, tutta la nostra esperienza fisica può essere ridotta a tali coincidenze, perché mai preferire un sistema di coordinate ad un altro? Quale senso può avere, in particolare, distinguere i sistemi inerziali dai sistemi accelerati? La limitazione del *principio di relatività* ai soli sistemi inerziali sembra dunque costituire, stavolta, un'asimmetria *esplicativa* fra cinematica e fisica.

Ecco che, allora, sarà la fisica a dover essere a sua volta rivista dalle fondamenta. Il cammino sarà, però, assai simile, in quanto si partirà dalle modalità (*covarianti* rispetto alle coordinate del sistema scelto) con le quali le grandezze fisiche vengono introdotte entro le equazioni, per trovare un modo nuovo e più generale di scriverle, così da tener conto della struttura dello spaziotempo (*calcolo differenziale assoluto* o

calcolo tensoriale). Il precedente principio di relatività *speciale* andrà, conseguentemente, generalizzato in un nuovo *principio di relatività generale*: per la descrizione dei processi naturali occorre esplicitare il sistema di riferimento scelto, ma l'equazione che rappresenta una legge di natura deve avere la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento. Resta inteso che i valori numerici delle singole grandezze (ovvero le loro misure) saranno, in generale, differenti in ogni sistema, ma sono le leggi ricavate in uno qualunque di essi che dovranno essere identiche a quelle ricavate in ogni altro, a prescindere dal suo stato di moto. Vedremo più avanti come Einstein affronterà questo problema, attraverso l'euristica di covarianza/invarianza. Nella diagnosi di Einstein, inoltre, vi sono anche altre non minori carenze esplicative nella fisica corrente.

In primo luogo, l'identità sperimentale fra la *massa gravitazionale passiva*, cioè quella che compare nella legge di attrazione universale di Newton, e la *massa inerziale*, quella che compare nella seconda legge fondamentale della dinamica, sembra una coincidenza del tutto casuale. Ciò a dispetto del fatto che si tratta di una proprietà palesemente fondamentale del campo gravitazionale, in quanto grazie ad essa ogni corpo che si trova in caduta entro un campo gravitazionale riceve la medesima accelerazione (le due masse si elidono e le traiettorie ne sono indipendenti), a prescindere dalla loro composizione chimico-fisica interna.

Per di più, risulta sempre possibile annullare ogni effetto gravitazionale, almeno all'interno di una zona di spazio sufficientemente piccola, introducendo un'opportuna accelerazione. Così come, viceversa, possiamo ristabilire la validità del principio d'inerzia all'interno di un sistema accelerato, introducendo un opportuno campo gravitazionale (*principio di equivalenza*). Possibile che sia tutto una dovuto ad una coincidenza casuale, si chiede Einstein (1911)? Invece di darle per scontate, egli cercherà di trovarne una spiegazione sistematica tematizzando il concetto di accelerazione e di gravità.

In secondo luogo, dalla Teoria Speciale della Relatività deriva che ad ogni quantità di energia è associata una *massa inerziale* ad essa proporzionale ($E=mc^2$). Sorge però una grave difficoltà non appena ci chiediamo se ci sia anche un proporzionale aumento di *massa gravitazionale*. Se, infatti, supponiamo che non ci sia, le due masse non saranno più uguali ed il corpo violerà il *principio di equivalenza* sperimentalmente ben stabilito. Se, invece, supponiamo che un pari aumento di massa gravitazionale ci sia effettivamente, la Teoria Speciale della Relatività si mostra del tutto sguarnita di spiegazioni causali per il legame fra peso di un corpo ed energia in esso contenuta. Questo legame rimane un dato per scontato della Teoria Speciale, e dunque un immotivata coincidenza.

Inoltre, la Teoria Speciale sembra, per certi aspetti, addirittura *contraddittoria* con la gravitazione. Se vi fosse un qualche effetto gravitazionale su un raggio luminoso, ad esempio, esso porterebbe ad una sua accelerazione, e questa variazione di velocità violerebbe il *principio di costanza della velocità della luce*. Ma se, d'altra parte, la luce fosse esente da effetti gravitazionali si verrebbe a violare il *principio di equivalenza* fra energia-massa inerziale e massa gravitazionale. Siamo, in questo

caso, di fronte addirittura ad un'antinomia, che può essere risolta soltanto superando la Teoria Speciale per inglobare anche la gravitazione in una nuova teoria.

Infine, la struttura dello spaziotempo entra nella fisica come presupposto fondato solo intuitivamente. Essa, però, si distingue per una sua natura curiosa: essa sembra agire su tutto, senza che sia possibile una qualunque azione su di essa (Einstein 1921 sgg.). Il passo ulteriore che farà Einstein sarà quello di concepire uno spaziotempo interagente con i corpi, e il tramite sarà, ovviamente, la gravitazione. La costante ricerca di sopprimere (gradualmente) tutti gli assoluti presenti nella dinamica newtoniana (e nella filosofia kantiana su di essa modellata) caratterizza, in effetti, tutto il percorso di Einstein. La teoria finale rimarrà con il solo invariante (a parte la conservazione dell'energia-impulso) della *distanza spaziotemporale*, che però è, a differenza degli altri, un elemento geometrico già strutturalmente imbevuto della dinamica del campo gravitazionale e conseguentemente, grazie proprio alle equazioni di campo di Einstein, *determinato* dalla distribuzione spaziotemporale di materia ed energia.

L'unificazione di geometria, gravitazione e dinamica operata con la Teoria Generale della Relatività elimina, perciò, tutti (o almeno quasi tutti) gli altri *ingombranti fantasmi* che nella Teoria Speciale venivano dati per presupposti: l'accelerazione assoluta, il sistema inerziale e la velocità della luce.

Il percorso einsteiniano, in conclusione, è caratterizzato dunque dalla progressiva introduzione di nuovi accenti di rilevanza a fatti (teorici ed empirici) già noti e dall'aspirazione ad eliminare asimmetrie, limiti e difetti epistemologici insiti nelle correnti teorie, in un'ottica che possiamo definire *satisficing* (Simon p.es. 1972; Giere 1988). Il programma, inoltre, della progressiva *relativizzazione* della fisica, consistente nella ricerca di leggi invarianti più generali possibile e nell'eliminazione delle grandezze assolute, era iniziato già con Galileo Galilei e giungeva così con Einstein al suo (temporaneo) compimento. La nuova Teoria Generale era stata ricavata a partire dalla gravitazione e dinamica newtoniana e, poi, dalla stessa Teoria Speciale, che erano stati assunti, così, come degli specifici casi limite. Essa risulta effettivamente *invariante* per tutti i sistemi di riferimento (fisicamente) ipotizzabili proprio grazie alla loro definizione *covariante*.⁵ Torneremo su questo punto fondamentale più avanti.

Vediamo ora i principali strumenti euristici utilizzati da Einstein nel percorrere le tappe fondamentali che abbiamo appena visto in questo breve excursus. Ci occuperemo, nell'ordine, delle quattro *euristiche astrattive*, di impiego assai generale nel ragionamento (Nersessian in: Giere 1992), e delle quattro *euristiche orientative*, invece assai più specifiche della scoperta einsteiniana (Cerroni 1999). Tutte le euristiche sono degli strumenti cognitivi *deboli*, e in questo si distinguono dagli *algoritmi*, poiché non garantiscono l'esito di una soluzione (comunque sia) e neppure prevengono gli errori. In altre parole, non è certa né la loro *efficienza conoscitiva* nel produrre ipotesi controllabili, né, tanto meno, la loro *efficacia conoscitiva* nel produrre conoscenza deduttivamente certa. Einstein, in effetti, venne più volte tratto fuori strada o rallentato proprio dal loro utilizzo, ma in questi casi imputò il

fallimento più a limiti personali che non a difetti delle euristiche stesse. Comunque, esse sono state capaci di fornirgli ottime (o meglio, *soddisfacenti*) ragioni per formulare un'ipotesi o un criterio per attribuire maggiore rilevanza ad un problema, ad un effetto o ad una coincidenza. In questo rivelano proprio la loro funzione cognitiva fondamentale, ma pure rinviano, come vedremo, ad altre credenze che le sostengono più o meno inavvertitamente.

Analizziamo, quindi, separatamente i due tipi di euristiche alle quali Einstein in maniera palese ricorse, a volte per condurre la sua diagnosi sullo stato della teoria, per generare nuove ipotesi e per selezionarne una sola: le *euristiche astrattive* e le *euristiche orientative*.

2. Le euristiche dell'astrazione

Le prime euristiche che affrontiamo sono molto utilizzate nel ragionamento comune come anche in quello scientifico, in particolare durante le sue fasi cosiddette "rivoluzionarie" e sono le seguenti (Nersessian in: Giere 1992): *ragionamento analogico*, *ragionamento per immagini*, *esperimento mentale* e *analisi di casi limite*. Esse sono strumenti di costruzione induttiva di astrazioni, e come vedremo la loro componente logico-proposizionale è minima, non potendo essere ridotte ad una sequenza di operazioni di calcolo.

Ragionamento analogico

Si tratta di un'euristica largamente utilizzata nel ragionamento comune, con grande naturalezza, ed anche gli scienziati vi ricorrono sovente. Un ragionamento analogico può essere schematizzato in questo modo: se un certo A (meglio conosciuto) ed un certo B (meno conosciuto) condividono alcune proprietà ($p_1 \dots p_m$) possiamo ipotizzare che un'altra proprietà p_n , di cui gode A, sia condivisa *analogamente* anche da B (Hesse 1966). Quest'inferenza è, però, molto debole, soprattutto perché, nelle applicazioni pratiche, viene usata quando le somiglianze fra A e B e fra p_n e le altre proprietà sono poco accurate. È proprio in questi casi, d'altra parte, che essa si mostra utile nel generare nuove ipotesi altrimenti impossibili a partire dai troppo scarsi elementi a disposizione.

In effetti, ad essere più precisi, la conoscenza che trasferiamo dal dominio A (*source*) al dominio B (*target*) non è mai, almeno nei casi scientificamente rilevanti, una proprietà isolata. Si tratta, piuttosto, di una certa struttura particolare di *relazioni fra le proprietà* del dominio *source* che viene proiettata sul *target*. Quello che avviene, dunque, è un *mapping isomorfo* della conoscenza del *source* sul *target* (Gentner in: Vosniadou, Ortony 1989).

In una fase successiva, lo scienziato deve comunque sempre intervenire con una qualche modifica finale, una "ri-rappresentazione" volta a fornire la corretta *interpretazione* dei termini, ovvero a stabilire quali debbano essere i significati esatti da attribuirsi agli elementi collegati ex-novo dalla struttura trasferita. In questa fase, egli deve tenere conto di quelli che debbono essere ritenuti i vincoli semantici specifici del dominio *target*, a differenza del *source*. Il diverso grado di conoscenza

dei due domini e la ricontestualizzazione semantica sul nuovo, inoltre, rendono conto del fatto che l'analogia non istituisce necessariamente un legame transitivo.

L'analogia viene così a creare un nesso *astratto* che, se ripetuto fino a diventare abitudine o altrimenti rafforzato dall'attenzione e dal convincimento, può divenire un nesso stabile ed essere, quindi, successivamente riutilizzato intuitivamente, divenendo uno *schema* di collegamento fra due domini anche assai eterogenei. Questo schema diviene, perciò, una *nuova* conoscenza incamerata dallo scienziato.

Le analogie sono spesso presenti nei ragionamenti che conducono a delle scoperte scientifiche.⁶ In alcuni casi si tratta di riconoscere *somiglianze o analogie fra problemi* (Kuhn 1977). Così è anche nel caso di Einstein, quando, ad esempio, prende a modello per la sua teoria del campo gravitazionale la teoria di Maxwell per il campo elettromagnetico, (Einstein 1921sgg.). L'analogia individuata gli fa imporre la condizione che le equazioni della Teoria Generale siano alle derivate parziali del secondo ordine tanto nella metrica che nel campo gravitazionale. Ma le peculiarità del *target* gli impongono che le stesse equazioni siano non-lineari, visto che l'energia del campo gravitazionale è essa stessa fonte di campo gravitazionale.

Per altro verso, si noti la debolezza dell'euristica applicata al caso in questione: Einstein si fisserà inutilmente sull'analogia con la teoria maxwelliana anche successivamente, quando tenterà invano un'ulteriore generalizzazione della Teoria Generale (Einstein 1921sgg.).

Fra le altre analogie fondamentali usate da Einstein, e più o meno stringenti, si possono citare quelle fra spazio e tempo; fra sistemi di coordinate tridimensionali, quadridimensionali e poi gaussiane; e fra problema matematico della Teoria Generale della Relatività e teoria gaussiana delle superfici.

Ragionamento per immagini

Un ragionamento di tipo analogico particolarmente potente è quello che impiega un'immagine sensoriale (generalmente visiva) come se fosse un *correlato percettivo di un modello mentale, considerato da un preciso punto di vista* (Johnson-Laird 1983). In questo modo lo scienziato può rappresentarsi una certa struttura semplificata dei fenomeni e compiervi agevolmente delle operazioni (Kosslyn 1983), grazie alla facilità con cui la nostra mente costruisce inferenze con materiale di tipo percettivo. L'astrazione che così si costruisce è di livello intermedio fra i fenomeni rappresentati e le formule matematiche. Si tratta di una tecnica molto diffusa nel lavoro scientifico, soprattutto nei periodi che Kuhn definirebbe di "crisi", ed è ormai ben studiata (Mach 1905, Hadamard 1945, Miller 1984, Finke *et al.* 1992).

Vediamo alcuni esempi di ragionamento per immagini condotto da Einstein che compaiono nei suoi scritti.⁷

Nei lavori di taglio storico-divulgativo egli ricorre molto spesso a questa euristica: la *tavola di marmo* ed il *mollusco di riferimento* con cui egli si rappresenta, rispettivamente, il continuo spazio-temporale ed un sistema di riferimento non rigido in relatività generale; i *dischi rotanti* e gli *esseri piatti dotati di strumenti piatti* (Einstein 1917), i *fantasmi bidimensionali*, in analogia con le immagini dei

personaggi di un film proiettato sullo schermo (Einstein, Infeld 1938); gli *uomini che conoscono solo una parte molto piccola della superficie terrestre* e che non riescono a vedere le stelle (in: Schilpp 1949).

Pur essendo molto più difficile acquisire evidenze dell'uso di questa euristica nel processo di scoperta, Einstein stesso riferisce di farvi ricorso (cit. in Wertheimer 1945,1959):

(...) durante tutti quegli anni ci fu la sensazione di una direzione, dell'andare direttamente verso qualcosa di concreto. Naturalmente è molto difficile esprimere a parole quella sensazione, ma decisamente le cose stavano così, ed erano tali da venir distinte chiaramente da considerazioni successive circa la forma razionale della soluzione. Naturalmente dietro a una tale direzione c'è sempre qualcosa di logico; ma in me è sempre presente sotto forma di una specie di sguardo generale, in un certo senso, in modo visivo.

Analizzando più da vicino i suoi lavori, sembra di poter condividere il giudizio espresso da Miller (1984) secondo il quale Einstein tende a *cristallizzare i problemi in immagini fino a che non ne scaturisce la soluzione*. Forse possiamo allora concludere, con Holton (1981), che egli avesse *l'abitudine di pensare per immagini*.

L'uso più o meno spinto di immagini da parte di uno scienziato fornisce un criterio per distinguere due *stili cognitivi* fundamentalmente diversi. Ad uno *stile logico*, fondato su ragionamenti stringenti e argomenti rigorosamente deduttivi, infatti, si può contrapporre uno *stile immaginativo* che privilegia la malleabilità cognitiva del ragionamento per immagini.⁸ Nella storia della scienza vi sono casi notevoli di scienziati che spiccano per ciascuno dei due stili.

Esperimento mentale

Alle volte sull'immagine si compie una vera e propria *simulazione mentale*, un vero e proprio *esperimento mentale*. Questo può risultare decisivo qualora un esperimento reale risulterebbe irrealizzabile, per motivi di ordine tecnico o per la violazione di limitazioni fisiche, o semplicemente per attrezzarsi con un modello mentale particolarmente semplificato per la situazione studiata. L'accuratezza e capacità predittiva che spesso li caratterizza ci spingono a non condividere la concezione "idealista" (come quella di Koyré 1966) che vorrebbe l'esperimento mentale condotto *a priori*, cioè utilizzando esclusivamente delle risorse interne alla costituzione della mente. Nei casi che ora esamineremo esso assolve alla medesima funzione psicologica di un esperimento reale, e l'esser compiuto all'interno di un modello mentale non sembra costituire una particolare specificità epistemica (Johnson-Laird 1983, Gooding 1990, Boniolo 1997, Gooding 1994).⁹

Il primo esempio di esperimento mentale che è d'uopo rilevare in Einstein è quello al quale si riferiva come al *pensiero più felice della mia vita* (cit. in: Pais 1982): *per un osservatore che cada liberamente dal tetto di una casa, non esiste - almeno nelle immediate vicinanze - alcun campo gravitazionale*. Standosene comodamente seduto in poltrona nella sua stanza presso l'ufficio brevetti di Berna, un certo giorno del novembre 1907 questo ragionamento, all'apparenza banale, gli permette di focalizzare l'attenzione sul *principio di equivalenza* fra massa inerziale e massa

gravitazionale e di rendersi, come abbiamo visto, meglio conto degli stretti legami fra campi gravitazionali e sistemi di riferimento accelerati.

Un altro esperimento, famoso perché riportato nei testi più popolari (Einstein, Infeld 1938), è quello dell'*uomo in un ascensore*. Un ascensore si trova *all'ultimo piano di un grattacielo molto, ma molto più alto di quelli che esistono realmente*. Improvvisamente immaginiamo che si spezzi il cavo che lo sostiene e l'ascensore inizia a cadere nel vuoto. Vediamo le due differenti varianti rappresentative che, della medesima situazione fisica, possono formarsi un osservatore all'interno dell'ascensore ed uno al suo esterno, che rimanga solidale con il resto del grattacielo, ma possa guardare al suo interno.

All'interno dell'ascensore, l'accelerazione di caduta dell'ascensore (trasmessa a tutti gli oggetti che si trovano al suo interno) annulla esattamente, grazie al *principio di equivalenza*, la forza peso alla quale tutti gli oggetti sono sottoposti. Quindi, la variante che può farsi l'osservatore al suo interno non contempla alcuna accelerazione: tutti gli oggetti (se stesso compreso) sono rigorosamente immobili. Con i soli mezzi disponibili dentro l'ascensore (cioè, senza guardare all'esterno) non si può che concludere di trovarsi in un sistema inerziale. È chiaro invece che, nella variante costruita dall'osservatore esterno, l'ascensore (e tutto il suo contenuto) appare in palese moto accelerato all'interno di un campo gravitazionale. Dunque, ne conclude Einstein (qui assieme a Infeld), possiamo rinunciare allo statuto privilegiato di sistema inerziale a patto di introdurre la gravitazione, che esiste per l'osservatore esterno, ma non per quello interno.

Cambiamo adesso l'intera situazione: l'ascensore, stavolta, viene *tirato con forza costante verso l'alto*. L'osservatore al suo interno sperimenta un campo di forze (locali) *in tutto* equivalenti a quelle che eserciterebbe un campo gravitazionale che lo spingesse verso il basso. L'osservatore all'esterno, invece, vede l'ascensore soggetto soltanto ad un'accelerazione verso l'alto. Non vi è modo di decidere quale delle due rappresentazioni è quella vera. Ma supponiamo che sopraggiunga adesso un raggio luminoso proveniente dall'esterno, passi attraverso l'ascensore correndo a velocità costante parallelamente alla sua base, andando a colpire la parete opposta a quella di entrata. L'osservatore all'interno vedrà un percorso luminoso curvato verso il basso (durante il percorso, la seconda parete "scorrerà" un poco verso il basso, dato che l'ascensore, a differenza del raggio, si sposta verso l'alto), in violazione del principio fondamentale dell'ottica geometrica (propagazione rettilinea). L'osservatore all'esterno, invece, vedrà (come noi) un percorso luminoso rettilineo, perché, per lui, sarà stato l'ascensore, durante il passaggio del raggio, ad essersi spostato verso l'alto. Per riconciliare le due descrizioni, e ristabilire una perfetta *equivalenza* fra le rappresentazioni che possono farsi i due osservatori, bisogna che la luce venga "curvata" da un campo gravitazionale.

Nelle due diverse situazioni descritte, se entrambi gli osservatori vogliono formarsi una teoria fisica generale, debbono poter trovare le medesime equazioni, visto che la situazione fisica è una sola. Einstein ne conclude di dover ricercare un unico sistema di equazioni *invariante* che descriva la medesima situazione fisica e che

contemporaneamente permetta le due diverse *varianti* rappresentative, che divengono il prodotto di una semplice variazione di sistema di riferimento.¹⁰ Oltre all'importanza di questo esperimento, ovviamente irrealizzabile in laboratorio, si può vedere l'accuratezza della sua elaborazione, la dovizia di particolari, la successione di diversi esperimenti con il medesimo "apparato sperimentale". Questo sembra confermare la validità che può essere attribuita all'euristica.

Nelle pagine di Einstein si possono trovare anche altri esperimenti mentali.

Ad esempio, quello di due osservatori che registrano un evento improvviso, uno da un *vagone ferroviario* in moto rettilineo ed uniforme lungo i binari di una ferrovia, e l'altro fermo sulla banchina di una stazione (Einstein 1917). Da questo esperimento, che è una rielaborazione di quello simile già esposto in (Einstein 1905), Einstein ricava stavolta la necessità di ridefinire il concetto di simultaneità, poiché essa non può essere definita al di fuori di un sistema di riferimento.

Infine, vi è l'esperimento che Einstein ci dice di essersi immaginato all'età di sedici anni (in: Schilpp 1949, v. anche: Pais 1982): se fosse possibile andare *a cavallo di un raggio di luce*, il campo elettromagnetico sarebbe per noi un'onda stazionaria e le leggi dell'ottica non sarebbero più quelle che possiamo sperimentare in ogni contesto reale: la velocità della luce deve avere un significato del tutto particolare.

In conclusione, va notato che, dietro all'esperimento mentale dell'*ascensore* come dietro a quello del *vagone ferroviario*, riecheggia l'esperimento della *nave* ferma in porto e poi in moto rettilineo uniforme usata da Galilei (1632). Ma già prima di Galilei esso era diventato *tradizionale*, con Buridano, Oresme, Copernico e Bruno, e l'esperimento verrà anche successivamente ripreso da Newton e Kant. Dall'osservazione di questa tradizione, dunque, intravediamo un repertorio cognitivo definito di analogie, immagini e modelli al quale Einstein verosimilmente ha attinto, probabilmente traendone anche ispirazione per il suo stile.

Analisi di un caso limite

In alcuni esperimenti mentali si fa un esperimento, oppure un calcolo, in condizioni estreme, che dobbiamo definire come *condizioni limite*, perché alcuni parametri critici vengono portati ad un loro "valore limite". I risultati dell'esperimento così condotto vengono utilizzati per fattorizzare un problema in sotto-problemi cognitivamente più facili o per evidenziare parametri e situazioni particolarmente critici.

Si parte da un modello (in genere un'immagine sensoriale) molto scarno e semplificato, perfettamente dominato dallo scienziato in tutte le variabili da lui ritenute rilevanti. A questo punto egli compie un esperimento mentale "ottimale", per poi generalizzare i risultati a tutti i casi ipotizzabili, con i rischi che vanno messi nel conto di ogni generalizzazione induttiva.

Il caso paradigmatico di analisi di caso limite nella storia della fisica è probabilmente quello dell'esperimento mentale che Galilei compie nel *Dialogo* sul principio di inerzia. Egli immagina delle sfere, progressivamente sempre più levigate, fino alla sfericità perfetta, in caduta lungo un piano inclinato, con superficie sempre più

levigata fino ad annullare le asperità. Ne ricava che le sfere si fermeranno sempre più lontano, e, al limite in cui si saranno rimossi tutti gli impedimenti, proseguiranno di moto rettilineo uniforme. La generalizzazione che egli ne fa costituisce il primo principio della dinamica, e consiste nell'affermazione che ogni corpo non soggetto a forze esterne o è in quiete o si muove di moto rettilineo uniforme.

Anche Einstein ricorre sovente all'analisi di casi limite. Un caso valga per tutti: quando egli (Einstein 1916, *Parte E*) costruisce l'approssimazione di campo gravitazionale debole e quasi-statico e vi deduce la teoria newtoniana della gravitazione quale prima approssimazione della Teoria Generale. Quindi, calcola il valore del coefficiente di proporzionalità fra "fisica" e "geometria" e le tre nuove previsioni della Teoria Generale: spostamento verso il rosso delle righe spettrali di una sorgente in un campo gravitazionale, deflessione gravitazionale dei raggi di luce da parte del Sole e di Giove, precessione del perielio dell'orbita di Mercurio. Questo caso è emblematico di tutti quei casi in cui egli pone la teoria che sta costruendo nelle condizioni limite di buona validità della vecchia teoria, onde usare questa in conformità con l'euristica di covarianza esplicativa, che esamineremo tra breve.

Inutile dire che, tanto i criteri di rilevanza che lo scienziato introduce per tenere sotto controllo l'esperimento, quanto quelli che utilizza per condurre la generalizzazione finale, non sono sempre suffragati da un'indagine paragonabile a quella della conduzione dell'esperimento. Questi criteri poggiano su credenze di qualche tipo, come l'omogeneità ed isotropia dello spazio, la continuità dei domini fenomenici, la capacità di riprodurre mentalmente lo stesso ordine che regge le sorti dei fenomeni fisici, e così via.

3. Le euristiche di orientamento

Nella ricerca einsteiniana è diffusamente presente un secondo tipo di euristiche che illuminano sul contenuto della Teoria della Relatività ed in certa misura ne costituiscono addirittura il cuore scientifico-filosofico. Esse sono, sostanzialmente, delle sistematizzazioni di credenze che Einstein recepisce, in qualche con grande consapevolezza in altri meno, ed utilizza con grande incisività e perseveranza per produrre delle mutazioni all'interno della teoria corrente. Quello che intravedremo, dunque, non sarà soltanto il tipo di ragionamento che possiamo presumere abbia condotto Einstein alla sua scoperta, stando almeno agli scritti che prenderemo in considerazione, ma anche lo stesso contenuto epistemologico e, in certa misura, l'intero retroterra culturale della Teoria della Relatività.

Come notazione generale possiamo dire che nessuna di queste euristiche deve soddisfare necessariamente un criterio di *coerenza logica*, sia nel suo essere applicata radicalmente fino alle sue estreme conseguenze, sia nel confronto con le conclusioni che possono essere tratte dalle altre. Piuttosto, l'intera impresa cognitiva è intonata ad un generale criterio di *razionalità satisficing*, che può dunque legittimamente essere concepita come un'ulteriore euristica della scoperta. Lo stesso criterio di coerenza,

anzi, viene sostituito dall'assai più sfumata *perfezione interna* della teoria, che costituisce proprio la prima di queste euristiche.

Perfezione interna

Un requisito necessario per una teoria scientifica è, senza dubbio, un (soddisfacente) grado di *conferma esterna*, ovvero di corrispondenza fra previsioni teoriche e dati empirici disponibili. Non è questa la sede per affrontare i problemi di filosofia della scienza insiti nei criteri di accertamento del grado di conferma e del suo concetto stesso. Ciò che dobbiamo qui invece notare è che, comunque, ad una ricognizione storica non si rivela un requisito *sufficiente*. Una teoria scientifica deve anche avere, infatti, un (soddisfacente) grado di *perfezione interna*.

Questa euristica è molto diffusa nella scienza, ed è ben presente nel pensiero di Einstein. Egli infatti afferma esplicitamente (in: Schilpp 1949): *una teoria è tanto più convincente quanto più semplici sono le sue premesse, quanto più varie sono le cose che essa collega, quanto più esteso è il suo campo d'applicazione*. Dunque, la perfezione interna consiste nella semplicità dei presupposti espliciti, nell'assenza (per quanto possibile) di ipotesi *ad hoc*, e nell'ampiezza e diversificazione dei domini da essa unificati.¹¹ Similmente, Thagard (1992) ha esaminato il ruolo della *explanatory coherence* nella scelta delle teorie, riferendosi con questo termine allo "stare insieme" di un sistema di proposizioni per mezzo di strette relazioni di spiegazione, e dunque non solo per via deduttiva.

Rientrano come casi di applicazione di questa euristica da parte di Einstein il superamento di tutti quei difetti delle spiegazioni e modellizzazioni, quelle limitazioni teoriche che sembrano artificiali, e le altre carenze epistemologiche che abbiamo fin qui visto.

Un punto particolare merita, comunque, di essere approfondito. Einstein afferma (1948) di aver sempre voluto costruire una teoria che, invece di costruire una rappresentazione a partire da costituenti elementari (come per una teoria che egli chiama *costruttiva*), formuli dei principi generali che governano i fenomeni e ne produca *deduttivamente* delle equazioni che valgono in tutti i casi particolari (*teoria di principi*). La differenza fra i due tipi di teoria sta nel fatto che, nel primo caso, la teoria può essere particolarmente chiara, ma nel secondo la teoria può essere ben più salda (Einstein 1948). La perfezione interna, inoltre, riguarda soltanto la *teoria fisica nel suo complesso*, geometria compresa, e non ciascun ingrediente che la compone, preso singolarmente (in: Schilpp 1949).

A questo proposito, infatti, Einstein si mostra spesso disposto a rinunciare, almeno temporaneamente, alla facilità del calcolo matematico ed all'intuitività della geometria, e persino all'intelligibilità di singoli termini (Zahar 1973) a vantaggio della semplificazione della fisica ed all'allargamento della sua portata teorica.¹²

Un impiego più puntuale di questa euristica è quello in cui egli cerca di costruire delle (assai complicate) equazioni covarianti per il campo gravitazionale, senza disporre dell'interpretazione fisica degli enti matematici che ha dovuto introdurre. La conseguente *compattezza logica* della teoria fa sì che, *se una qualsiasi deduzione*

tratta dalla teoria dovesse rivelarsi insostenibile, la teoria dovrebbe esser messa da parte per intero. Una sua modificazione sembra impossibile senza distruggere la struttura di insieme (Einstein 1936).¹³ E questo, evidentemente, è per lui un punto di vantaggio della sua rispetto alle teorie precedenti.

Questa sembra, dunque, un'euristica particolarmente esplicita. Ma dietro di essa si possono intravedere delle credenze che, più implicitamente, sembrano guidare il ragionamento di Einstein. Fra esse, possiamo individuare la credenza in un ordine logico nella natura, tanto astratto quanto semplice, il cui disegno va svelato superando le molte complessità in cui l'uomo si imbatte nella sua ricerca. Ancora, un'altra credenza data per scontata è che un criterio di verità per una teoria sia la sua generalità. Le ascendenze di queste credenze rimontano al *rasoio di Occam* ed al *veritatis splendor* di origine medievale, ma con anticipazioni nella filosofia greca (Platone). Per altro, i criteri estetici per una teoria scientifica sono certo cambiati storicamente, e quella di Einstein svolge tuttora da ottimo esemplare di riferimento.

Spiegare-o-assumere

Un'euristica più elementare, ma non meno potente, che compare molto di frequente negli scritti di Einstein, sia in quelli scientifici, sia in quelli storici e metodologici è riassumibile con il principio di *non considerare come casuali le connessioni regolari tra fenomeni percepiti o descritti come distinti* (Petroni 1990; cfr. Zahar 1973, 1989).

Si possono fare molti esempi:

- la non rilevabilità del moto assoluto gli suggerisce che questo non esista(1905);
- la fondamentale invarianza delle equazioni di Maxwell sotto trasformazioni di Lorentz per le coordinate gli impone di trovarne una qualche spiegazione (1905);
- l'evidenza a favore della costanza della velocità della luce in tutti i sistemi di riferimento (inerziali) gli suggerisce di assumere questa come nuovo principio fondamentale (1905);
- l'eguaglianza fra massa inerziale e massa gravitazionale lo spinge alla ricerca di una teoria che colleghi cinematica e dinamica gravitazionale (1911).

Per ogni dato empirico o relazione teorica che appare tanto certa quanto inspiegabile, dunque, bisogna cercare una spiegazione opportuna, oppure, in via subordinata, trasformarla in un principio fondamentale per una nuova teoria della quale controllare successivamente le previsioni.

Questa euristica è palesemente basata sulla credenza implicita che ogni fatto abbia una sua causa e che la scienza debba proprio andare di queste cause che reggono tutte le regolarità che possiamo riscontrare. Ma, è chiaro, non tutti i dati empirici vanno necessariamente spiegati: se, ad esempio, per Keplero il numero dei pianeti del sistema solare era legato all'intero ordine del cosmo, per Newton ed Einstein esso è solo un dato contingente che non merita una spiegazione cosmologica, ma una semplice ricostruzione locale. I criteri che vengono utilizzati per attribuire queste

rilevanze, e quindi per applicare l'euristica *spiegare-o-assumere* concretamente ai problemi scientifici, variano, dunque, storicamente.

Corrispondenza esplicativa

All'inizio degli anni Venti del XX secolo, il grande scienziato Niels Bohr introdusse questa euristica nella maniera più esplicita, come principio base per la teoria quantistica, il *principio di corrispondenza*. Essa ha anche ricevuto grande attenzione da parte dei metodologi (Achinstein 1968, Fadner 1985, Popper 1951-6, Reichenbach 1920, Radder 1991, Toraldo di Francia 1976,1981) Zahar 1973, 1989), Post (1971), in particolare, la interpreta anche come principio euristico ed è stata studiata in Einstein da Zahar (1973, 1989).

Possiamo mettere l'euristica in questi termini: ogni nuova teoria scientifica dovrebbe ridursi alle precedenti teorie formulate nel medesimo dominio di fenomeni, negli ambiti particolari in cui queste sono ben corroborate dai dati empirici. Le vecchie teorie, dunque, divengono dei particolari casi limite o delle approssimazioni della più generale e più precisa nuova teoria. Questo vale, innanzi tutto, per le equazioni nelle quali le teorie trovano espressione matematica. Ma, nella solita maniera non definitiva delle nostre euristiche, questo tende a valere anche per la semantica degli stessi termini teorici (Achinstein 1968).

Anche se non con la manifesta esplicitazione di Bohr, un'evidenza di applicazione dell'euristica nella prima accezione in Einstein si ha in (Einstein 1921sgg.). Qui egli così scrive a proposito della Teoria Generale:

per decidere se le equazioni sono in accordo con l'esperienza, è necessario anzitutto esaminare se, in prima approssimazione, conducono alla teoria newtoniana. A tal fine introdurremo in esse varie approssimazioni.

Più in generale, si può notare la costante ricerca che egli compie di riottenere le teorie già disponibili sotto forma di casi particolari della nuova che va elaborando (Einstein 1905, 1916).

Per quanto riguarda l'accezione semantica dell'euristica, ci possiamo aspettare che, nell'elaborare la nuova teoria lo scienziato consideri le vecchie teorie come repertori di termini semanticamente ben connotati per poter aggiungere delle nuove entità teoriche o per interpretare, magari anche ricorrendo ad analogie, termini ed equazioni della nuova teoria. Di quest'uso semantico dell'euristica di corrispondenza esplicativa v'è traccia in Einstein quando egli interpreta, nella nascente Teoria Generale, i coefficienti dei differenziali delle coordinate (metrica dello spazio) come campo gravitazionale, poiché ricorre alla metrica della (vecchia) Teoria Speciale (1916). Quando, poi, deve interpretare il tensore energia-impulso che compare nell'equazione del campo gravitazionale, sostiene addirittura di dover utilizzare *i concetti della fisica prerelativistica, adattandoli soltanto a posteriori al principio della relatività generale* (Einstein 1921sgg.).

Possiamo, perciò, sostenere che la nuova teoria viene costruita sfruttando sistematicamente un'*analogia semantica* parziale con quello che si ottiene dalle vecchie pur nei soli ambiti in cui queste vengono ancora accettate. Ma a questo ruolo "parassitario" o continuista della nuova teoria, fa da contrappeso la coerenza

esplicativa che la nuova teoria porta in dote alle vecchie teorie, fornendo loro una nuova luce ed una nuova portata: l'universo di Einstein, in un certo senso, è più vasto di quello di Newton, poiché contempla casi semplicemente inconcepibili all'epoca di Newton. È chiaro, però, che alcune conseguenze della nuova teoria possono essere del tutto imprevedibili a partire dalle vecchie.

Una generale credenza che si può facilmente scorgere dietro questa euristica può essere riassunta nell'immagine medievale di *nani sulle spalle di giganti*, nella presupposizione, dunque, di un lavoro continuativo dell'umanità nell'accertamento della verità.¹⁴ Scrive al proposito Einstein nel 1921 (cit. in: Holton 1986):

Si è ampiamente diffusa tra il grande pubblico la falsa opinione che la teoria della relatività si discosti radicalmente dai precedenti sviluppi della fisica da Galileo e Newton in poi, e che essa si opponga drasticamente alle loro deduzioni. È vero il contrario. Senza le scoperte di ciascuno dei giganti della fisica, ovvero coloro che in passato ne formularono le leggi, non sarebbe stato possibile concepire la relatività e tanto meno garantirle una base. È psicologicamente impossibile pervenire d'un balzo a tale teoria, prescindendo dal lavoro che essa presuppone. Galileo, Newton, Maxwell e Lorentz sono stati coloro che hanno gettato le fondamenta della fisica su cui ho potuto costruire la mia teoria.

Non sembra, perciò, condivisibile la tesi kuhniana secondo cui *la teoria di Einstein può essere accettata soltanto se si riconosce che quella di Newton era sbagliata* (Kuhn 1962sgg.). Al contrario, Einstein utilizza costantemente la teoria di Newton per prevedere sia la forma generale della nuova teoria, sia alcuni requisiti delle sue equazioni, e addirittura i significati di alcuni nuovi termini. La teoria newtoniana, dunque, entra in quella di Einstein carica di molti suoi presupposti, molti dei quali implicitamente recepiti. Solo una futura teoria che generalizzi la stessa Relatività Generale, probabilmente, potrà esplicitare queste credenze.

Covarianza/invarianza (relatività metodologica)

Il vizio di fondo delle teorie scientifiche disponibili contro il quale Einstein si scaglia costantemente è quello, da noi già incontrato, di non fornire una risposta adeguata all'esigenza di contemperare leggi *invarianti*, cioè indipendenti dal sistema di riferimento, e grandezze fisiche costruite all'interno di un dato sistema di riferimento, e dunque naturalmente *covarianti* con esso. Filosoficamente i due aspetti appaiono come antinomici, ma la (senza dubbio parziale) soluzione da lui trovata ci fornisce invece un programma di mediazione metodologicamente assai interessante.

Tale è il rilievo che questo obiettivo fondamentale ha per Einstein, che esso diventa un vero e proprio criterio guida per tutto il suo percorso di ricerca. Egli si riferisce esplicitamente, infatti, al valore euristico o direttivo della *teoria* della relatività o del *principio generale* di relatività (Einstein 1917; v. anche in: Schilpp 1949) che così stabilisce in (Einstein 1916)¹⁵:

Le leggi generali della natura debbono essere espresse da equazioni che valgono per tutti i sistemi di coordinate, cioè che sono co-varianti rispetto ad ogni sostituzione qualsiasi (generalmente co-varianti).

Si riscorrano le pagine appena trascorse, e si troverà costante traccia dell'euristica. Vediamo ora, però, di discutere meglio i due termini di covarianza ed invarianza.

A parte i (pochi) parametri numerici fondamentali, per ogni grandezza che compare nella teoria vale quello che scrive (Reichenbach 1927):

se si passa da un sistema di riferimento a un altro, essa muta, varia insieme a - questo è il significato della parola covariante. Non è da credere, tuttavia, che con ciò si sia eliminato il significato oggettivo della conoscenza della natura, poiché tutte queste descrizioni che possono essere fornite a partire da sistemi di riferimento diversi costituiscono soltanto diversi modi di parlare attraverso i quali si può cogliere il vero carattere della natura. (...) tutte queste descrizioni intendono riferirsi a un solo e medesimo stato oggettivo. Questo stato è l'invariante, ciò che non muta. Nella coppia di concetti invariante-covariante si esprime forse con la massima chiarezza la peculiarità della matematica relativistica: covariante è il tipo della descrizione, invariante lo stato colto in comune da tutte le diverse descrizioni.

Non è sufficiente, però, una mera invarianza-in-forma delle equazioni.¹⁶ Osserva, infatti, van Fraassen (1989) che, *per essere veramente generale, una proposizione deve essere covariante, deve avere questo status logico: o è vera in tutti i sistemi di riferimento oppure non è vera in nessuno.*

Quindi la sostituzione di un sistema di riferimento con un altro deve lasciare invariata l'intera struttura fondamentale del problema, in modo tale che le soluzioni che vengono prodotte siano sempre le medesime. Le rappresentazioni prodotte nei diversi sistemi di riferimento, dunque, sono così ricondotte ad una legge più generale (van Fraassen 1989). E' a questo punto, però, che questa euristica, che possiamo anche denominare *euristica della relativizzazione*, diviene speculare a quell'euristica della *corrispondenza esplicativa* che abbiamo incontrato poco sopra.

Fra le rappresentazioni ottenute nei vari sistemi di riferimento e la legge più generale si viene a stabilire un legame in certa misura speculare a quello che vigeva fra le vecchie teorie inizialmente disponibili, da una parte, ed una nuova teoria in corso di formazione, dall'altra. La legge più generale, non solo ha validità più ampia, ma fornisce una vera e propria reinterpretazione delle differenti rappresentazioni, con ciò rafforzandole proprio nel momento in cui le scopre motivate da un contesto teorico-esplicativo, oltre che empirico, più generale. Nella scrittura covariante delle equazioni, infatti, vengono esplicitati e riconosciuti come oggettivamente fondati i processi di costruzione delle grandezze fisiche che prima erano dati per scontati. E queste spiegazioni vanno ad arricchire l'intero sistema di idee disponibile per il dominio oggetto di studio. Per altro verso, la generalizzazione è possibile proprio perché la legge più generale viene ottenuta non *contro* le rappresentazioni locali, ma proprio a partire da una concreta situazione pragmatica ricostruita nei suoi processi fondamentali. Questa è, inoltre, la migliore garanzia di poter riottenere le rappresentazioni locali ben corroborate come casi particolari della legge più generale. Riassumendo, le grandezze fisiche fondamentali debbono essere costruite con "memoria" delle coordinate del sistema dal quale vengono calcolate e non in maniera astratta (devono avere *forma tensoriale*). Le componenti delle grandezze, quindi, debbono variare-*con* le coordinate del sistema di riferimento scelto, cioè esattamente come variano le misurazioni delle coordinate. Contemporaneamente, però, affinché la sostituzione del sistema di riferimento usato (per misurare quelle grandezze e formulare le leggi fondamentali che le collegano) con un qualunque altro sistema (all'interno della *classe di equivalenza*) lasci *in*-variata la relazione che la legge

generale stabilisce fra le grandezze, deve ammettere una *simmetria* per tali sostituzioni. La relatività sembra in realtà, dunque, una ricerca di *invarianza*, perseguita attraverso la strumentale *covarianza*. Così egli scrive a proposito del nome della sua teoria (Einstein 1921 cit. in: Holton 1986):

Veniamo ora al nome teoria della relatività. Riconosco che si tratta di un'espressione infelice, che ha dato adito a fraintendimenti filosofici. Il termine 'Invarianz-Theorie' sarebbe adatto a descrivere un metodo di ricerca della teoria, ma non, purtroppo, il suo contenuto materiale (...) ma credo che cambiare, dopo tutto questo tempo, il nome generalmente accettato sarebbe motivo di confusione".

È possibile rintracciare alcune credenze che muovono questa euristica. Innanzi tutto, un'ostilità di principio verso gli assoluti ed un'attenzione speciale alle concrete dinamiche processuali dei mutamenti. Entrambe compaiono non solo in tanta parte della storia della fisica, da Galilei a Mach (p.es. Tonnelat 1971), ma anche in molte elaborazioni filosofiche lungo tutto l'Ottocento, fino all'imperativo di *smascherare la relatività di tutte le astrazioni* (Nietzsche). Esse si possono ritrovare anche in linee di ricerca scientifica all'interno di altri domini del secolo precedente ad Einstein (Marx, Darwin, Freud, Simmel). Altri riferimenti di ordine culturale possono ancora essere individuati nel retroterra culturale di Einstein, dalla formazione comune a gran parte degli intellettuali della sua generazione (Feuer 1982) alla sua educazione religiosa (Cerroni 1999).

Conclusioni

Da quanto abbiamo qui esaminato possiamo trarre alcune conclusioni di interesse per le scienze cognitive e per la sociologia della conoscenza.

1) Abbiamo, innanzi tutto, visto che adeguatezza empirica e successo predittivo non esauriscono il valore epistemologico della teoria della relatività. La scoperta che l'ha prodotta non sembra potersi concepire come *nient'altro che pattern recognition* (Simon 1972; 1977; 1995; Langley *et al.* 1987).¹⁷ La *superiorità esplicativa* di una teoria (Petroni 1990), che appare epistemologicamente irrinunciabile quanto filosoficamente inattuabile, può venir precisata proprio grazie a criteri valutativi che esorbitano dall'impresa scientifica considerata, e rinviano al fondamento storico-genetico (psicologico, antropologico, sociologico) dell'esperienza umana contestualizzata.

2) Dalla transizione dall'elettrodinamica classica alla Teoria Speciale della Relatività, come anche dalle successive transizioni dalla Teoria Speciale a quella Generale e dalla teoria newtoniana della gravitazione alla Teoria Generale della Relatività, si ricava, inoltre, una prospettiva sul progresso nelle teorie scientifiche radicalmente diversa da quella che vuole che *la teoria di Einstein può essere accettata soltanto se si riconosce che quella di Newton era sbagliata* (Kuhn 1962sgg.; cfr. anche Zahar 1989). Proprio al contrario, il profondo legame semantico fra teorie successive, tessuto da Einstein con grande chiarezza e determinazione, suggerisce una ridefinizione del dualismo continuità-incommensurabilità attraverso l'impiego di un'*euristica di corrispondenza* fra nuova teoria *in fieri* e vecchia teoria ben corroborata. L'adeguatezza empirica ed il successo predittivo emergeranno come

supporto o controllo certamente utili nella definizione della ricerca, ma *complementari* rispetto agli obiettivi concettuali di Einstein, e dunque ad esigenze di ordine, in primo luogo, epistemologico e, in secondo, culturale.

3) Lo statuto di universalità delle teorie scientifiche viene ad essere ridefinito, attraverso l'*euristica di covarianza/invarianza*, nella direzione di un superamento della contrapposizione tradizionale fra assolutezza (decontestualizzazione) e relativismo (contingenza). Il concetto di *relatività* va inteso metodologicamente come la caratteristica distintiva di quelle costruzioni astratte che fanno dei propri criteri di fondazione empirica l'oggetto specifico di un programma controllabile. La questione dei fondamenti cessa, in altre parole, di essere una questione filosofica, e diviene una questione di accertamento scientifico dei processi concreti di elaborazione socio-cognitiva. La non conclusività di una tale indagine è controbilanciata dall'apertura delle questioni metodologiche sulla *Scienza* alle acquisizioni delle *scienze reali*.

4) Si potrà, infatti, notare che le euristiche esaminate sono emerse, sia come strumenti (presumibilmente) utilizzati da Einstein per giungere alla scoperta scientifica che porta il suo nome, sia anche (nel caso delle euristiche che abbiamo chiamato *orientative*) come cuore epistemologico stesso della teoria da lui elaborata. Il cosiddetto *contesto della giustificazione* si è così innestato sul cosiddetto *contesto della scoperta* in maniera inscindibile, fornendo un argomento a sostegno della tesi, che possiamo far risalire a Quine, che uno studio cognitivo è una via privilegiata per risalire ai fondamenti epistemologici della scienza.

5) Quasi sempre Einstein, come abbiamo visto, attacca alcuni dei più resistenti presupposti dati per scontati in quanto, in realtà, ereditati poco avvertitamente assieme con più ponderate idee scientifiche, consolidatesi nella storia disciplinare. A volte, dietro tali presupposti si staglia un'intera tradizione culturale ove, al di sotto di sistemi di idee filosofiche e persino sistemi scientifici, risiedono osservazioni ingenuamente surrettiziamente ipostatizzate a partire dalla realtà dell'esperienza percettiva. Così, Einstein non appare tanto iniziatore di *un nuovo programma di ricerca* o portatore di un'ipotesi tanto *assurda e inverosimile* (cfr. Lakatos 1970). Egli sembra, piuttosto, farsi carico di un percorso cognitivo di revisione delle credenze tradizionali lungo il quale si è snodata la storia della fisica e tanta parte della cultura moderna. In questo senso, la modernità va intesa come intrinsecamente *riflessiva* (cfr. Bech *et al.* 1999).

6) Inoltre, i concetti scientifici che abbiamo visto in costante mutazione mostrano una *flessibilità* che non può essere in alcun modo cristallizzata in una definizione classica del concetto, in quella concezione, cioè, basata su vincoli rigidi di proprietà singolarmente necessarie e congiuntamente sufficienti. Sarebbe opportuno indagare più a fondo sulle reali potenzialità di concezioni alternative, come quella per *prototipi* e *similarità* elaborata nell'ambito delle scienze cognitive (ad es. in Smith, Medin 1981) ed altre più recenti (per una rassegna si veda Cerroni 1999). Questo potrebbe risultare d'aiuto, sia nel mettere alla prova le varie proposte sinora avanzate, sia anche nel risolvere le molte controversie sorte nell'ambito della storia della scienza in relazione alla "reale" coincidenza di concetti in autori diversi (Nersessian in: Giere 1992). Finché pensiamo che un concetto sia definito da proprietà necessarie e

sufficienti, non abbiamo infatti alcun criterio per riconoscere una eventuale “somiglianza di famiglia” (Wittgenstein 1945sgg.), una genealogia o una parentela per un dato concetto. Sembra esistere, al contrario, una conoscenza riguardante i concetti che esorbita dalla capacità di una qualsiasi definizione ed è con questa, anzi, in *tensione essenziale*.

7) Le teorie scientifiche, dal canto loro, non sembrano esauribili in una visione *sintattica* o proposizionale. Ciò è dovuto, oltre che ai limiti riscontrati dai fautori del cosiddetto approccio *semantico* (p.es. Suppe 1972, van Fraassen 1980), anche al rilievo che nelle teorie assumono credenze spesso tacite, non coerenti, esplicitabili quasi solo *a posteriori* dall’analista con notevole sforzo interpretativo e senza certezze ultimative. Ma un generico appello ad una *matrice disciplinare* (Kuhn 1962sgg, 1977) non può essere sufficiente a garantire la specificità della conoscenza scientifica. Generalizzazioni simboliche, modelli, analogie, valori, tecniche, strumenti ed esemplari, per citare i componenti principali di una matrice disciplinare kuhniana, vanno articolati molto meglio, per trovare insiemi di più elementari schemi interpretativi (Goffman), euristiche (Simon, Kahneman & Tversky), stili cognitivi (Duhem, Fleck, Galison), fino a credenze e teorie ingenuie (Fleck, Atran, Gopnik & Meltzoff, Vosniadou) del tipo delle credenze che abbiamo posto in evidenza nelle euristiche di Einstein.

8) Se il riferimento delle teorie scientifiche alla cultura dello scienziato porta inevitabilmente, almeno da Kuhn in poi, a qualche forma di *relativismo culturalista*, la successiva riduzione della cultura ad insiemi di credenze e sistemi di idee può fornire una *seconda relativizzazione*, che può (dovrà) essere in grado di trasformare ogni relativismo in un *programma scientifico di relativizzazione*. Si dovrebbe cercare di spiegare ognuna di queste componenti più elementari come prodotto specifico di concreti processi, pragmaticamente contestualizzati, di ordine antropologico-evoluzionistico e socio-comunicativo (Cerroni 2001a). Ma qui, più che alle conclusioni di una ricerca, siamo appena agli inizi di un nuovo programma di ricerca.

Un approccio socio-cognitivo alla ricostruzione delle scoperte scientifiche, che qui abbiamo mostrato nel caso della teoria della relatività di Einstein, sembra anche particolarmente utile per superare l’attuale frantumazione degli studi sulla scienza. Esso si pone, infatti, sullo snodo fra studi di sociologia della conoscenza, scienze cognitive, storie delle varie discipline scientifiche e filosofia della scienza. In questa sua posizione esso trova tutta la forza potenziale proveniente dalle acquisizioni di tutte le scienze, e tutta la debolezza che è conveniente, però, attribuire ai limiti dell’analista.

1 L'esposizione delle euristiche di Einstein è basata su una rielaborazione del Capitolo 5 del mio libro *Categorie e relatività* (Cerroni 1999) alla luce di ulteriori ricerche (Cerroni 2000, 2001a, 2001b).

2 La contrapposizione fra credenze ed idee si può ritrovare con grande chiarezza, oltre che in Hume (1739), anche in Locke (1689), Leopardi (1817-1832), Dewey (1919,1933), Ortega y Gasset (1934), Fleck (1935), e soprattutto in Polanyi (1958) e, più recentemente, Dennett (1978) e Cohen (1992).

3 Va notato che Poincaré giunse assai vicino alla formulazione della Teoria Speciale della Relatività fra il 1904 ed il 1905, dunque, quasi contemporaneamente ad Einstein, forse addirittura in anticipo (v. Zahar 1973). D'altra parte, Hilbert arrivò cinque giorni prima di Einstein a quelle che chiamiamo equazioni di Einstein e che stabiliscono la Teoria Generale della Relatività. Non ci interessa sollevare questioni di priorità, la fisica del resto fu sempre più chiara ad Einstein che a chiunque altro. E' interessante piuttosto rilevare che anche nel caso della Teoria Generale della Relatività, e per certi aspetti ancor più che nella Teoria Speciale della Relatività, egli non era l'unico a lavorare sulla stessa linea. Questo ci fa rinviare per approfondimenti agli studi mertoniani sulla scoperta multipla (Merton 1973).

4 Per tutti gli aspetti tecnici si rinvia agli ormai tradizionali testi di riferimento: (Weinberg 1972), (Landau, Lifšits 1972), (Misner *et al.* 1973), (Friedman 1983), Norton (1993).

5 Senza successi fu la successiva ricerca che Einstein intraprese di una ulteriore generalizzazione della sua teoria per unificare anche l'elettromagnetismo.

6 Holyoak e Thagard (1995) ne riportano molte: suono/onde d'acqua (Crisippo, Vitruvio), terra/magnete (Gilbert), terra/luna (Galilei), terra/nave (Galilei), luce/sonno (Huygens), pianeta/proiettile (Newton), illuminazione/elettricità (Franklin), respirazione/combustione (Lavoisier), calore/acqua (Carnot), competizione di animali e piante/crescita della popolazione umana (Darwin), selezione naturale/selezione artificiale (Darwin), forze elettromagnetiche/meccanica del continuo (Maxwell), benzene/serpente (Kekulé), cromosoma/filo imperlato (Morgan), mutazione batterica/slot machine (Luria), mente/computer (Turing), molecole di gas/palle da biliardo (storicamente molto comune) e atomo/sistema solare (Rutherford, Bohr). Altri ne vengono citati da Kuhn (1977).

7 Per ulteriori approfondimenti si rinvia ai molti lavori di Holton, in particolare quelli riportati in bibliografia, nei quali questi dedica al ragionamento per immagini molti studi.

8 Si rammentino l'*esprit de finesse* e l'*esprit de géometrie* di Pascal, concetti ripresi per il ragionamento scientifico da Duhem (1906). Con questi egli indica due tipi di mentalità: la prima, ampia ed immaginativa, la seconda, invece, rigorosa ed astratta. Si veda anche utilmente la contrapposizione fra tradizione immaginativa e tradizione logica nei dispositivi sperimentali della microfisica che portano alla formazione diretta, rispettivamente, di immagini o di conteggi (Galison 1997).

9 Mach è storicamente il primo a studiare con attenzione l'esperimento mentale nel ragionamento degli scienziati. È utile riportare un passo in cui egli, nel 1897 (ora in: Mach 1905), parla dell'esperimento mentale: "Il sognatore, il costruttore di castelli in aria, il poeta di utopie sociali o tecniche, sperimentano mentalmente. Ma anche il solido commerciante, l'inventore o lo scienziato seri fanno la stessa cosa (...) Mentre i primi però combinano nella fantasia delle circostanze che non si incontrano nella realtà, oppure le pensano accompagnate da conseguenze che non vi sono legate, i secondi - le cui rappresentazioni sono buone copie dei fatti - restano col pensiero vicino alla realtà. La possibilità degli esperimenti mentali riposa sulla maggiore o minore esattezza della riproduzione involontaria dei fatti nelle rappresentazioni".

10 Si applica in questo esperimento l'euristica di covarianza/invarianza sulla quale ci diffonderemo più avanti.

11 Si veda in proposito (Kuhn 1962, 1977), (Lakatos 1970) ed il criterio GA 1.4 in (Donovan *et al.* 1988). Più recentemente Weinberg ha ripreso il concetto di bellezza dei principi che ispirano assoluta inevitabilità in (Weinberg 1987, 1993)

12 Così scrisse ad esempio in (Einstein, Infeld 1938): il mio apparato matematico è più complicato del vostro, ma le mie supposizioni fisiche sono più semplici e più naturali.

13 Si veda Lakatos (1970) ed il criterio GA 1.5. in (Donovan *et al.* 1988).

14 Per una ricognizione storica si veda (Merton 1965).

15 Scrive Norton, uno dei massimi studiosi di Einstein (Norton 1993, v. anche Boniolo 1988): la questione di cosa Einstein esattamente scoprì rimane irrisolta, poiché non vi è consenso sulla esatta natura dei fondamenti della teoria. I problemi ancora aperti sono, infatti, molti. Il primo consiste nell'accertamento dell'effettiva generalizzazione operata Teoria Generale nei confronti della Teoria Generale Speciale. Per la verità, non si può ragionevolmente sostenere, ed in effetti nessuno oggi sostiene che nella Teoria Generale rimangano dei sistemi di riferimento privilegiati. Ma alcune soluzioni delle equazioni di campo trovate Einstein descrivono effettivamente universi in cui dei sistemi di riferimento sono privilegiati, spingendo persino a sostenere che Einstein avrebbe, in un certo senso, fallito il suo programma di relativizzazione completa della fisica (Weinberg 1972; Boniolo, Dorato in: Boniolo 1997). Un'altra questione ancora

aperta consiste nell'osservazione, ampiamente condivisa, che l'origine dell'inerzia è e rimane il più oscuro fra tutti gli argomenti della teoria delle particelle e dei campi (Pais 1982). Infine, anche la stessa connessione fra principio di covarianza generale, principio di relatività e principio di equivalenza è ancora oggetto di riflessione e dibattito. Per un'esauriente panoramica su questo punto si veda (Norton 1993) e, per alcune riflessioni particolarmente incisive (van Fraassen 1989). L'interpretazione che qui fornisco in certa misura prescinde dall'effettiva riuscita della scoperta einsteiniana, poiché recupera la visione programmatica della relativizzazione propria dello stesso Einstein quando afferma (nel 1917, cit. in Pais 1982): non ho dubbi che verrà il giorno in cui anche quest'ultima descrizione dovrà cedere il passo a un'altra, per ragioni che al momento non sospettiamo neppure. Sono convinto che questo processo di approfondimento della teoria non abbia limiti.

16 Kretschmann dimostrò nel 1917 che ogni legge fisica può sempre essere scritta in forma covariante. È anche ben noto che Einstein concordò con questa conclusione (Einstein 1918).

17 Si veda, per ulteriori inadeguatezze, Petroni (1990; 1997) a proposito di leggi più precise dei dati (disponibili all'epoca della scoperta e tuttora) e di eccedenza di contenuto concettuale rispetto ai dati, come è proprio il caso che esaminiamo in questo lavoro. E inoltre, Bhaskar (1975) a proposito del fatto che ogni pattern lascia supporre l'esistenza di una regolarità nella realtà, e che anzi la scoperta scientifica, se vi è davvero una significativa scoperta, è proprio scoperta di questa regolarità. Da ultimo, si ponga mente al convenzionalismo sottodeterminista duhemiano, che consiste nella possibilità di ipotizzare molte (se non proprio infinite) teorie che, grazie a concettualizzazioni differenti, possono tutte dar parimenti conto dei dati disponibili, pur fornendo delle rappresentazioni completamente diverse del mondo. E ancora, come ben riconosce lo stesso Simon (in Langley *et al.* 1987), a partire da un set (finito) comunque grande di dati (anche perfettamente noti, senza approssimazioni o errori sperimentali), in mancanza di ipotesi aggiuntive, si possono generare infiniti pattern numerici che differiscono in tutto o in parte per i casi non considerati. Ma allora si può concludere che l'interpretazione di una legge come pattern è ipso facto assolutamente incapace di effettuare predizioni: non vi è davvero alcun motivo perché altri dati debbano essere conformi ai vecchi. Non credo che alcuno scienziato sarebbe disposto a scegliere, a questo punto, un modello numericamente soddisfacente ma esplicativamente muto, se non come "atto di disperazione" ed in trepidante attesa di una "spiegazione" o, più semplicemente, di un modello teorico. E comunque, questo non è certamente il caso di Einstein.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Achinstein P.
1968 Concepts of science. A philosophical analysis, Johns Hopkins Pr., Baltimore (Mar.).
- Atran S. (1998), Folk biology and the anthropology of science: cognitive universals and cultural particulars, Behavioral and Brain Sciences 21 (4), pp. 547-569.
- Bech U., Giddens A., Lash S.
1994 Reflexive modernization, Polity Press, ed.it. a cura di P.Marrone, Modernizzazione riflessiva, Asterios, Trieste 1999.
- Bhaskar R.
1975 A realist theory of science, Leeds Books, London.
- Boniolo G.
1988 Mach e Einstein. Spazio e massa gravitante, Armando, Roma.
- Boniolo G. (a cura di)
1997 Filosofia della fisica, Mondadori, Milano.
- Cerroni A.
1999 Categorie e relatività. Metodo, cognizione e cultura nella scoperta di Albert Einstein, Unicopli-Cuesp, Milano 1999.
2000 Covariance/invariance: a cognitive heuristic in Einstein's Relativity Theory formation, Foundations of Science 5 (2), pp 209-224.
2001a Beliefs and ideas: socio-cognitive relativity beyond relativism, Scipolicy 1 (2).
2001b Discovering relativity: towards a socio-cognitive model for Einstein's Relativity Theory formation, relazione presentata alla "Conference MBR'01. Model-Based Reasoning: Scientific Discovery, Technological Innovation, Values", (Università degli Studi di Pavia 17-19 Maggio), (in corso di pubblicazione).
- Cohen J.
1992 Beliefs and acceptance, Oxford University Press, Oxford.
- Dennett D.
1978 Brainstorms. Philosophical essays on mind and psychology, Bradford Books, trad.it. di L.Colasanti, Brainstorms. Saggi filosofici sulla mente e la psicologia, Adelphi, Milano 1991.
- Dewey J.
1910,1933 How we think, Heat, Boston, trad.it. di A.Guccione Monroy, Come pensiamo, La Nuova Italia, Firenze 1961.
- Donovan A., Laudan L., Laudan R. (eds)
1988 Scrutinizing science, Kluwer, Dordrecht.
- Duhem P.
1906 La theorie physique: son object, sa structure, Rivière, Paris, trad.ingl. di Ph.P.Wiener, The aim and structure of physical theory, Princeton U.P., Princeton 1982.
- Einstein A.
1905 Zur Elektrodynamik bewegter Körper, Annalen der Physik 17, pp. 891 sgg., trad.ingl. in: Einstein et al. 1923.
1911 Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes, Annalen der Physik 35, trad.ingl. in: Einstein et al. 1923.
1916 Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, Annalen der Physik 49, pp. 769-822, trad.ingl. in: Einstein et al. 1923.
1917 Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie (gemainverständlich), Vieweg, Braunschweig, trad.it. di V.Geymonat, Relatività: esposizione divulgativa, Boringhieri, Torino 1967.
1918 Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie, Annalen der Physik 55 (4), pp. 241-4.
1921sgg. Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie, gehalten in Mai, 1921, an der Universität Princeton, Vieweg, Braunschweig 1922, trad.ingl. di E.P.Adams, The meaning of relativity: four lectures delivered at Princeton University, May, 1921, Princeton U.P., Princeton (N.J.) 1921, (con nuove appendici nelle edizioni successive: 1945, 1950, 1953, 1955), trad.it. di L.A.Radicati di Brözolo, Il significato della relatività, Boringhieri, Torino 19762.
1936 Physik und Realität, Franklin Institute Journal 221, pp. 313-47, ripubblicata in: Einstein 1950.
1948 Tempo, spazio, e gravitazione, ed.orig. in: Einstein 1950, trad.it. di L.Bianchi, Pensieri degli anni difficili, Boringhieri, Torino 1965.
1950 Out of My Later Years, Philosophical Library, New York 1950, trad.it. di L.Bianchi, Pensieri degli anni difficili, Boringhieri, Torino 1965.

- Einstein A., Infeld L.
1938 The evolution of physics. The growth of ideas from early concepts to relativity and quanta, Simon & Schuster, New York, trad.it. di A.Graziadei, L'evoluzione della fisica, Boringhieri, Torino.
- Einstein A., Lorentz H.A., Weyl H., Minkowski H.
1923 The principle of relativity. A collection of original papers on the special and general theory of relativity, Dover, New York.
- Fadner W.L.
1985 Theoretical support for the generalized correspondence principle, American Journal of Physics 53, pp. 829-838.
- Feuer L.S.
1982 Einstein and the generations of science, Transaction, New Brunswick, trad.it. di G.Ceccarelli, Einstein e la sua generazione, Il Mulino, Bologna 1990.
- Finke R.A., Ward Th.B., Smith S.M.
1992 Creative cognition. Theory, research, and applications, MIT Pr., Cambridge (Mass.).
- Fleck L.
1935 Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache, Suhrkamp, Frankfurt, trad.it. di M.Leonardi e S.Poggi, Genesi e sviluppo di un fatto scientifico. Per una teoria dello stile e del collettivo di pensiero, Il Mulino, Bologna 1983.
- Friedman M.
1983 Foundations of space-time physics. Relativistic physics and philosophy of science, Princeton University Press, Princeton (N.J.).
- Galilei G.
1632 Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, Landini, Firenze, in Opere vol.II, UTET, Torino 1980, II ed. riv. e corr.
- Galison P.
1997 Image and logic. A material culture of microphysics, Univ. of Chicago Pr., Chicago (Ill.).
- Gholson B., Shadish W.R. Jr, Neimeyer R.A., Houts A.
1989 Psychology of science. Contribution to metascience, Cambridge U.P., Cambridge.
- Giere R.
1988 Explaining science. A cognitive approach, U. of Chicago P., Chicago (Ill.), trad.it. di G.P.Mugnai, Spiegare la scienza, Il Mulino, Bologna 1996.
1989 The cognitive structure of scientific theories, Philosophy of Science 61, pp. 276-296.
- Giere R. (ed.)
1992 Cognitive models of science, Minnesota Studies in the Philosophy of Science XV, Minnesota U.P.
- Goffman E.
1974 Frame analysis, Harper & Row, New York.
- Gooding D.
1990 Experiment and the making of meaning. Human agency in scientific observation and experiment, Kluwer, Dordrecht.
1994 Imagery science, British Journal for the Philosophy of Science 45, pp. 1029-1045.
- Gopnik A., Meltzoff A.
1996 Words, thoughts, and theories, MIT Pr., Cambridge (Mass.), trad.it. di P.Nobili e E.Vegni, Costruire il mondo. Una teoria dello sviluppo cognitivo, McGraw-Hill, Milano 2000.
- Gorman M.E.
1992 Simulating science. Heuristics, mental models, and technoscientific thinking, Indiana U.P., Bloomington
- Hadamard J.
1945 The psychology of invention in the mathematical field, Princeton U.P., Princeton (N.J.), trad.it di B.Sassoli, La psicologia dell'invenzione in campo matematico, Cortina, Milano 1993.
- Hesse M.B.
1966 Models and analogies in science, Notre Dame U.P., Notre Dame (Ind.), trad.it. e cura di C.Bicchieri, Modelli e analogie nella scienza, Feltrinelli, Milano 1979
- Holton G.
1973 Thematic origins of scientific thought: Kepler to Einstein, Harvard U.P., Cambridge (Mass.), trad.it.

- riveduta dall'Autore in (1983) ed in (1984).
- 1978 The scientific imagination: case studies, Cambridge U.P., Cambridge (Mass.).
- 1979 Constructing a Theory: Einstein's Model, *The American Scholar* 48, 309-40, trad.it. in Holton 1983.
- 1981 Einstein's search for the "Weltbind", *Proceedings of the American Philosophical Society* 125 (1), pp. 1-15.
- 1983 L'immaginazione scientifica. I temi del pensiero scientifico, Einaudi, Torino, a cura dell'A., trad. di R.Maiocchi e M.Mamiani.
- 1984 L'intelligenza scientifica. Un'indagine sull'immaginazione creatrice dello scienziato, testo riveduto dall'A., trad. e cura di F.Voltaggio.
- 1986 The advancement of science, and its burdens, Cambridge U.P., Cambridge (Mass.), trad.it. parz. (parti I e II) di E.Bassato, Einstein e la cultura scientifica del XX secolo, Il Mulino, Bologna 1991.
- 1996 Einstein, history, and other passions. The rebellion against science at the end of the twentieth century, trad.it. di S.Ferraresi, La lezione di Einstein. In difesa della scienza, Feltrinelli, Milano 1997.
- Holton G., Elkana Y. (eds.)
- 1982 Albert Einstein. Historical and Cultural Perspectives. The Centennial Symposium in Jerusalem, Princeton U.P., Princeton (N.J.).
- Holyoak K.J., Thagard P.
- 1995 Mental leaps. Analogy in creative thought, MIT P., Cambridge (Mass.), London.
- Hume D.
- 1739 Treatise of human nature, London, trad.it. di A.Carlini, E.Lecaldano, E.Mistretta, Trattato sulla natura umana, Opere filosofiche vol.I, Laterza, Roma-Bari 1992, (varie edizioni precedenti).
- Johnson-Laird Ph.
- 1983 Mental models. Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness, Cambridge U.P., Cambridge, trad.it. di A.Mazzocco, Modelli mentali. Verso una scienza cognitiva del linguaggio, dell'inferenza e della coscienza, Il Mulino, Bologna 1988.
- Kahneman D., Slovic P., Tversky A. (eds)
- 1982 Judgment under uncertainty: heuristics and biases, Cambridge U.P., Cambridge.
- Kosslyne S.M.
- 1983 Ghosts in the mind's machine. Creating and using images in the brain, Norton, New York, trad.it. G.Noferi riveduta da A.Carassa, Le immagini della mente. Creare e utilizzare immagini nel cervello, Giunti, Firenze 1989.
- Koyré A.
- 1966 Etudes galiléennes, Hermann, Paris, trad.it. di M.Torrini, Studi galileiani, Einaudi, Torino 1976.
- Kuhn Th.S.
- 1962,1970 The structure of scientific revolution, Univ. of Chicago Pr., Chicago (Ill.), trad.it. di A.Carugo, La struttura delle rivoluzioni scientifiche. Come mutano le idee della scienza, Einaudi, Torino 1978, II ed.
- 1977 The essential tension, Chicago U.P., Chicago (Ill.), trad.it. di M.Vadacchino et al., La tensione essenziale. Cambiamenti e continuità nella scienza, Einaudi, Torino 1985.
- Lakatos I.
- 1970 Criticism and the methodology of scientific research programmes, in: I.Lakatos, A.Musgrave (eds), Criticism and the growth of knowledge, Cambridge U.P., Cambridge (Mass.), trad.it. di G.Giorello, Critica e crescita della conoscenza, Feltrinelli, Milano 1993, (varie ed. prec.).
- Landau L.D., Lifšits E.M.
- 1972 Teorija polja, Fizmatgiz, Moskva, trad.it. di A.Machov, Teoria dei campi, MIR-Moskva e Editori Riuniti, Roma, 1976.
- Langley P., Simon, H.A., Bradshaw G.L., Zytkow J.M.,
- 1987 Scientific discovery, MIT P., Cambridge (Mass.).
- Leopardi G.
- 1817-1832 Zibaldone di pensieri, (a cura di W.Binni), Sansoni, Firenze 1969.
- Locke J.
- 1689 An essay concerning human understanding, London, trad.it. di C.Pellizzi, Saggio sull'intelligenza umana, Laterza, Roma-Bari 1999, (varie edizioni precedenti).
- Mach E.
- 1905 Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forshung, Leipzig, trad.it. di S.Barbera, Conoscenza ed errore. Abbozzi per una psicologia della ricerca, Einaudi, Torino 1982.
- Merton R.K.

- 1965,1985 On the shoulders of giants, The Free Pr., New York, trad.it. di V.Teodori, Sulle spalle dei giganti. Postscripto shandiano, Il Mulino 1991.
- 1973 The sociology of science: theoretical and empirical investigations, Chicago U.P., Chicago (Ill.), trad.it. a cura di M.Protti, La sociologia della scienza. Indagini teoriche ed empiriche, Franco Angeli, Milano 1981.
- Miller A.I.
1984 Imagery in scientific thought: creating 20-th century physics, Birkhäuser, Boston, trad.it. di M.Carlucci, Immagini e metafore nel pensiero scientifico, Theoria, Roma-Napoli 1994.
- Misner Ch.W., Thorne K.R., Wheeler J.A.
1973 Gravitation, Freeman, S.Francoisco.
- Nersessian N. (ed.)
1987 The process of science, Martinus Nijhoff, Dordrecht.
- Norton J.D.
1993 General covariance and the foundations of general relativity: eight decades of disputes, Reports on Progress in Physics 56, pp. 791-858.
- Ortega y Gasset J.
1934 Ideas y creencias, trad.it. di L.Rossi, in: Aurora della ragione storica, Sugarco, Milano 1983.
- Pais A.
1982 "Subtle is the Lord..." The science and the life of Albert Einstein, Oxford U.P., trad.it. di L.Belloni e T.Cannillo a cura di T.Cannillo, "Sottile è il Signore..." La scienza e la vita di Albert Einstein, Boringhieri, Torino 1991, II ed.
- Petroni A.M.
1990 I modelli, l'invenzione e la scoperta. Saggio su Keplero, la rivoluzione copernicana e la "New philosophy of science", Angeli, Milano.
1997 La logica e la storia della scoperta scientifica. Una critica dei modelli di H.A.Simon, Sistemi Intelligenti IX, n.2, pp. 193-203.
- Polanyi M.
1958 Personal knowledge. Towards a post-critical philosophy, Routledge & Kegan Paul, London, trad.it. di E.Rivero, La conoscenza personale. Verso una filosofia post-critica, Rusconi, Milano 1990.
- Popper K.R.
1951-6 Postscript to the Logic of scientific discovery (3 voll), ed by W.Bartley III, Hutchinson, London 1982, trad.it. di M.Benzi e S.Mancini, a cura di A.Artosi e R.Festa, Poscritto alla Logica della scoperta scientifica (3 voll), Il Saggiatore, Milano 1984.
- Post H.R.
1971 Correspondence, invariance and heuristics: in praise of conservative induction, Studies in History and Philosophy of Science 2, pp. 213-255.
- Radder H.
1991 Heuristics and the generalized correspondence principle, British Journal for the Philosophy of Science 42, pp. 195-226.
- Reichenbach H.
1920 Relativitätstheorie und Erkenntnis apriori, Springer, Berlin, trad.it. di S.Ciulli Parrini e P.Parrini a cura di P.Parrini, Relatività e conoscenza a priori, Laterza, Roma-Bari 1984.
1927 Von Kopernikus bis Einstein. Der Wandel unseres Weltbildes, Ullstein, Berlin, trad.it. di S.Ciulli Parrini, Da Copernico a Einstein. Il mutamento della nostra immagine del mondo, Laterza, Roma-Bari, 1985.
- Schilpp P.A. (ed.)
1949 Albert Einstein: philosopher-scientist, The Library of Living Philosophers, Evanston (Ill.), trad.it. parz. di A.Gamba, Albert Einstein. Autobiografia scientifica. Con interventi di Pauli, Born, Heitler, Bohr, Margenau, Reichenbach, Gödel, Boringhieri, Torino 1979, (varie edizioni precedenti).
- Simon H.A.
1972 Theories of bounded rationality, in C.B.McGuire, C.Radner (eds), Decision and organization, North-Holland, Amsterdam, trad.it. di A.Menichetti, Le teorie della razionalità limitata, in H.A.Simon, Causalità, razionalità, organizzazione, Il Mulino, Bologna 1985.
1977 Models of discovery and other topics in the methods of science, Boston studies in the philosophy of science LIV (R.S.Cohen, M.W.Wartofsky, eds), Reidel, Boston.
1995 Explaining the ineffable: AI on the topics of intuition, insight, and ispiration, International Joint Conference on Artificial Intelligence, Morgan Kaufmann Publishers, trad.it. di M.Ricucci, Spiegare l'ineffabile: l'intelligenza artificiale a proposito di intuizione, insight e ispirazione, Sistemi Intelligenti IX

(1997), n.2, pp. 169-192.

Smith E.E., Medin D.L.

1981 Categories and concepts, Harvard U.P., Cambridge (Mass.).

Suppe P.

1972 What's wrong with the received view on the structure of scientific theories?, *Philosophy of Science* 39, pp.1-19.

Thagard P.

1992 *Conceptual Revolutions*, Princeton U.P., Princeton.

Tonnellat M.-A.

1971 *Histoire du principe de relativité*, Flammarion, Paris.

Toraldo di Francia G.

1976,1981 *L'indagine del mondo fisico*, Einaudi, Torino.

van Fraassen B.

1980 *The scientific image*, Oxford U.P., trad.it. di R.Festa, *L'immagine scientifica*, Clueb, Bologna 1985.

1989 *Laws and symmetry*, Oxford U.P., Oxford.

Viale R.

1997 *Teoria cognitiva della razionalità o del ragionamento scientifico?*, *Sistemi Intelligenti* IX, n.2:227-258.

Vosniadou S., Ortony A. (eds)

1989 *Similarity and analogical reasoning*, Cambridge U.P., Cambridge.

Weinberg S.

1972 *Gravitation and cosmology: principles and applications of the general theory of relativity*, Wiley, New York (N.Y.).

1987 *Towards the final laws of physics*, in: S.Weinberg, R.P.Feynman, *Elementary particles and the laws of physics*, Cambridge U.P., Cambridge, trad.it. di C.Bartocci, *Alla ricerca delle leggi ultime della fisica*, Il Melangolo, Genova,, 1993.

1993 *Dreams of a final theory*, trad.it. di G.Rigamonti, *Il sogno dell'unità dell'universo*, Mondadori, Milano 1993.

Wertheimer M.

1945,1959 *Productive thinking*, Harper, New York, trad.it. a cura di P.Bozzi, *Il pensiero produttivo*, Giunti, Firenze 1965.

Wittgenstein L.

1945-9 *Philosophische Untersuchungen*, Basil Blackwell, Oxford 1953, trad.it. a cura di M.Trincherò, *Ricerche filosofiche*, Einaudi, Torino 1983, (varie edizioni precedenti).

Zahar E.G.

1973 *Why did Einstein's programme supersede Lorentz's one?*, *British Journal for the Philosophy of Science* 24, trad.it. di L.Monti, in C.Howson (a cura di), *Critica della ragione scientifica. Metodo e valutazione nelle scienze fisiche*, Il Saggiatore, Milano 1981.

1989 *Einstein's Revolution. A Study in Heuristic*, Open Court, La Salle (Ill.).