



Le due biblioteche. Dal metodo scientifico a una didattica che costruisca metodi

Tommaso Corridoni, docente di fisica presso il Liceo cantonale di Bellinzona

| 45

In equilibrio su un limite

Ogni docente ha due biblioteche: una composta da testi specialistici su singole materie, l'altra dalle innumerevoli osservazioni dei propri studenti¹. La prima cresce lentamente, perché è materiale e organizzata da quando l'insegnante ha cominciato a leggere; la seconda resta invece spesso aneddotica perché in continua ed ingestibile espansione da quando insegna. Soprattutto poi per quel che riguarda le *scienze sperimentali*, la prima è costituita da trattazioni complicate ma rassicuranti nella loro coerenza, perché il docente sa che per quanto una *teoria* (che vuol dire 'fila') possa essere lunga e difficile nella sua *lettura* ('lezione'), la sua validità è stabilita dal grado con cui esperti di un'intera società riconoscono collettivamente che riesce a *s-piegare* qualcosa della *com-plicata* ('piegata su di sé') realtà sperimentale. La seconda appare invece sempre come un *com-plesso* ('intreccio', Morin 2008) di osservazioni individuali, meravigliose o incomprensibili ma sempre eccezionali, sia nel loro dis-/accordo con la realtà, sia nel loro dimostrare il *mestiere di apprendere* degli studenti.

Perché ciò che alla fin fine differenzia le due biblioteche è il modo in cui in esse sono ricercati, definiti e utilizzati *metodi e strumenti*, di lavoro e pensiero. Nella prima sono talmente sicuri e chiari che la fase di ricerca è spesso ridotta al minimo, lasciando spazio a teorie costruite con il gusto anche irrazionale ma consapevole della narrazione di un'interpretazione del mondo. Nella seconda, invece, il loro mestiere di apprendere spinge gli studenti a continui tentativi di ricerca e sperimentazione di metodi, con approcci individuali molto variegati (scrivere, disegnare, formulare, calcolare, elencare, analizzare, ricordare, dedurre...), e selezionati soprattutto in base al fascino e alla paura di scoprire chi si potrebbe essere, cosa si sa decidere, pensare, realizzare, qui e ora, nel mondo e nel futuro (ORM 2018). Non a caso, i tentativi sono sempre intermedi fra la capacità di riproporre/estendere autonomamente qualcosa di già visto e la totale perdita di riferimenti, i due estremi di *inter-esse* ('essere in') che si osservano se *in-segnando* ('mettendo i segni') si lascia totalmente allo studente la responsabilità di *trovarsi* in precisi metodi e strumenti.

A forza di comparare le due biblioteche, un docente dovrebbe invece riconoscere quanto sia importante la *ricerca di metodi a scuola*. Importante per lui, che si accorgerebbe di come il suo lavoro non consista nel far domande di cui sa già la risposta, ma nel cogliere quali

siano invece quelle di chi scopre un sapere, per arrivare a rispondere alle quali, insieme, ha l'immenso privilegio di re-imparare quello che sa in altri modi e con altre emozioni. Importante per i ragazzi, che si renderebbero conto di essere incoraggiati a raggiungere autonomamente una rappresentazione di sé nel mondo, riconoscendosi in una crescita identitaria che permetta di dire che, una volta che l'ho costruito io, il *teorema di Pitagora* (ad esempio) non è *di Pitagora*, ma *mio*. Importante infine per la società, che ricorderebbe che la *scuola* non è 'precedente' alla vita, ma un laboratorio tecnico e sociale 'di vita', dove i docenti innescano nei ragazzi (e viceversa) processi di rielaborazione di esperienze scientifiche che non è detto incontrerebbero 'dopo e fuori', affinché trovino metodi e strumenti autonomi e consapevoli, vecchi e nuovi (tutto è nuovo, se lo scopri tu), che li portino a pensare da oggi il mondo che verrà.

È bello, da docente, arrivare a tale consapevolezza. Ma il lavoro di tutti i giorni rischia spesso di far apparire retorica ogni visione complessiva dell'istruzione, perché comprendere problemi, soprattutto nelle scienze sperimentali, non vuol dire risolverli. Le due biblioteche restano infatti separate: gli specialisti continuano ad applicare metodi sottintesi per capire il mondo, i ragazzi a cercarne per capire chi siano loro nel mondo, e sebbene il docente aggiunga decine di testi ibridi su come si insegna, si apprende e si pensa (Morin 2001, Vygotsky 1986, Lakoff & Johnson 2003, Freeman 2000, Bateson 1984), ciò non fa che aumentare la risoluzione con cui osserva il confine fra le biblioteche, che appare sempre più come un'invalidabile frontiera, raggiunta *al limite*. Così, a scuola, il docente è a volte più disciplinare, a volte più pedagogico, a volte *in equilibrio sul limite*, dove le domande dei ragazzi lo spingono verso lezioni bellissime, nelle quali non può però porre loro il problema delle biblioteche così com'è, perché un funambolo non porta sul filo chi potrebbe cadere.

L'unica strategia è *costruire con i ragazzi percorsi che diano senso alla costruzione di metodi*, percorsi su cui sia loro, sia il docente possano riconoscere sulle rispettive scale di tempo e spazio una propria esperienza di vita, una propria identità in continuo sviluppo (Roletto 2005). E dato che la scuola si fa a scuola, nel senso che ogni sua astrazione va tradotta in azioni coerenti e utili, soprattutto nelle scienze sperimentali occorre far vedere a cosa serva un metodo, renderlo riconoscibile

Nota

¹ Per esigenze editoriali, molti sostantivi si utilizzeranno solo al maschile.

ai ragazzi nel fare. Ma questo obbliga il docente a riflettere prima su *quale sia il problema del metodo scientifico*, cosa che conviene affrontare analizzando esempi della prima biblioteca da cui comprendere quali elementi del processo di costruzione di un metodo siano traducibili in una prospettiva didattica.

Uno, nessuno et cetera: c'era una volta un metodo

L'etimologia di *metodo*, dal greco, è 'oltre il percorso': in termini metaforici, la strada da percorrere per arrivare a una conoscenza, teorica o pratica. Esistono così metodi per imparare a suonare uno strumento, scrivere una poesia, dipingere un quadro, differenti sia nei saperi tecnici, sia nella sensibilità estetica. Nascono così *diverse scuole*. Suonare la chitarra, ad esempio, implica sia usare le mani o un plettro in modo diverso, sia conoscere diversi stili, diversi metodi di scrittura, diversa letteratura, diversa sensibilità estetica. Si hanno quindi *scuole diverse quando i metodi divergono*, perché *'diverso' è il participio passato di 'divergere'*.

Nelle scienze sperimentali, la ricchezza data dalla diversità dei metodi deve tuttavia confrontarsi con il vincolo assoluto del reale. Il *metodo scientifico* (o *sperimentale*, a seconda che se ne voglia discutere in termini più filosofici o tecnici), vorrebbe essere infatti quello che definisce come arrivare alla conoscenza del mondo in base al confronto fra costruzione teorica e realtà sperimentale. Si tratta quindi di un metodo che porti a saperi che sappiano spiegare cosa accade e perché nella realtà, fino addirittura a controllarla e *pre-vederla*.

Innumerevoli testi di filosofia, epistemologia e storia della scienza trattano l'intero sviluppo del *problema* di trovare un tale *metodo* in ogni tempo (Bellone 1990, Russo 1996). Ma per capire perché sia un problema, perché si riproponga nei secoli e *come possa costituire un aspetto inevitabile della didattica di una scienza sperimentale* (soprattutto nella scuola media superiore), si analizzeranno pochi esempi, ben noti perché non a caso continuano a coinvolgere tanto i docenti quanto i ragazzi.

Il primo è la paradigmatica vita scientifica di Galileo Galilei, per la semplice ragione che, ritenuto l'iniziatore del metodo sperimentale, ha invece sempre dimostrato una notevole trasversalità metodologica (Bellone 1990). Senza laurea, diventa professore di matematica a Pisa risolvendo problemi di idraulica e calcolo dei baricentri; procuratosi alcuni cannocchiali dall'O-

landa, li perfeziona con l'artigiano Marcantonio Mazzoleni per venderli ai Veneziani, che, potendo vedere le navi nemiche in anticipo, lo fanno professore *a vita* a Padova; pur continuando a redigere oroscopi, cerca conferma alle idee di Copernico: nel 1609 punta il suo cannocchiale sulla Luna, scoprendo che ha montagne e 'mari'; ciò contraddice la teoria di Aristotele, *quindi* decide che la cosa migliore sia raccontarlo a tutti in un libretto che diventa un best-seller... (Bianucci 2012, Kuhn 1972, Scandaletti 1989).

In tutto questo Galileo non ha *un* metodo, ma l'eccezionale capacità di costruirne a seconda di quello che soddisfa la sua mirabile curiosità, mescolando strumenti matematici, capacità di osservazione, innovazione tecnologica, buon senso, orgoglio e spirito di sopravvivenza. Nella metafora delle due biblioteche, più che un professore, sembra divertirsi ad essere uno studente entusiasta e brillante, alla continua ricerca di metodi e strumenti per capire le maree, studiare i satelliti di Giove, osservare le macchie solari, scrivere pezzi di teatro in volgare per parlare di fisica con tutti.

Se viene considerato l'iniziatore del metodo scientifico, è perché da quando comprende il ruolo della matematica nei modelli della fisica, scopre che per andare oltre spiegazioni scientifiche *per analogia*, ad esempio osservando che i satelliti di Giove possono essere *visti come* il sistema solare ipotizzato da Copernico, occorre confrontare sistematicamente *teoria e dati sperimentali*. Ma anche a questo arriva divergendo, mescolando matematica e tecnica (Bellone 1990): liutista come il padre Vincenzo, usa la tecnologia dei tasti per studiare i moti sui piani inclinati; si accorge così di relazioni numeriche fra spazi e tempi *misurati*, che comincia a cercare sistematicamente (non riuscirà a definire matematicamente la velocità: Frajese 1964). Forse in tal modo (non abbiamo documenti certi) *vede che* sia nel moto lungo il piano inclinato, sia nell'oscillazione di un pendolo, una lunghezza è proporzionale al quadrato di un tempo, relazione *logica* fra due sistemi *non analoghi* (Drake 1992).

In sostanza, come molti suoi predecessori, Galileo passa anni a confrontare teorie e dati sperimentali, ma è il primo a far sì che *l'innovazione tecnologica consenta di mettere in primo piano*, fra tutti i suoi metodi divergenti, *il passaggio da un 'vedere come' analogico (fra sistemi), senza gradi di verità, ad un 'vedere che' logico (fra misure), capace di portare ad un vero-falso* (Hanson 1978).

È talmente evidente quel che scopre in tal modo, che non si preoccupa (anzi: ne è orgoglioso) del fatto che un tale passaggio, in quel momento storico, significa *avere un metodo* per stabilire la verità dell'unica conoscenza allora accettata. E infatti, nel 1633 l'Inquisizione lo processa non per le analogie visibili al cannocchiale (*viste come bizzarrie ottiche...*), ma *per il metodo logico*, ripetibile e pubblico grazie al cannocchiale (Redondi 1983).

È così che *il metodo scientifico* diventa *uno*, legandosi fortemente alla fisica. Non a caso, colleghi e seguaci di Galileo risultano molto più metodici di lui, perché avendo capito di dover esporre l'accordo fra teoria e dati mediante inattaccabili vero-falso logici, si dedicano in particolar modo allo sviluppo matematico delle teorie: Keplero passa l'intera vita a costruire e verificare sperimentalmente le sue leggi (e non evita comunque l'Inquisizione); Cartesio parla di *metodo* ma nelle scienze torna alla pura speculazione filosofica (in ottica usa esperimenti altrui); Newton pubblicherà le sue idee (1678) dopo vent'anni di revisione delle rigorose dimostrazioni matematiche e dell'accordo con i dati sperimentali, senza ipotesi filosofiche sul *perché* proprio in polemica con Cartesio (Bellone 1990, Kuhn 1972, Koyré 1968).

E proprio l'approccio metodologico di Newton costituisce il secondo esempio. Sebbene in un contesto storico e sociale totalmente differente, con una personalità antitetica e una maggior consapevolezza del suo ruolo, anche Newton utilizza *più* metodi. Alla sua morte si scopre come abbia passato gran parte della vita a fare esperimenti di alchimia e a scrivere trattati di teologia con la stessa attenzione con cui, e solo su insistenza degli amici, pubblica le sue idee sulla gravitazione (Bianucci 2012). Ciò che porta la molteplicità metodologica di Newton 'oltre' quella di Galileo è che se questi sa scoprire quali metodi facciano capire il mondo, Newton vuole scoprire il mondo dai metodi: ne accetta più d'uno, ma li vuole definire prima. È in questo modo che fa convivere il rigore matematico e la perizia tecnico-sperimentale (inventa il telescopio, scompone la luce...), con ipotesi alchemiche come i 'sette colori' dell'arcobaleno (Bianucci 2012).

In sostanza, Newton sembrerebbe già consapevole di come all'interno di un unico processo di costruzione della conoscenza, uno stesso fenomeno possa essere spiegato in più *paradigmi* (Kuhn 1978), diversi *insiemi di concetti/grandezze, relazioni fra esse e linguaggi*

per esprimerle. È questo il passo avanti. A Newton non basta trovare accordi quantitativi che portino da rappresentazioni analogiche a verità logico-matematiche. Sia che si debba interpretare un insieme di dati sperimentali mediante una costruzione teorica, sia che si voglia progettare un esperimento di convalida, Newton cerca *modelli*, intesi come *rappresentazioni in un certo linguaggio della struttura delle relazioni fra concetti/grandezze, all'interno di un paradigma* (Hestenes 2006). Ad esempio, dove Galileo avrebbe visto una palla, compiacendosi di capire come fare a selezionare *ogni volta* da una sua rappresentazione analogica e complessa quali grandezze (massa, raggio...) ne influenzino un singolo comportamento (rotolare, rimbalzare...), Newton modella la palla con poche relazioni matematiche fra poche grandezze fisiche, valide in *tutti i casi*. La sua meccanica s-piega e pre-vede tanto il moto dei pianeti quanto quello degli oggetti sulla Terra, proiettando la realtà su una logica astratta. Il suo paradigma della meccanica genera modelli in cui *grandezze fisiche* astratte (posizione, tempo, massa...) si trovano in relazioni specifiche (*i principî della dinamica, il principio di conservazione della quantità di moto*) espresse nel linguaggio delle *flussioni*, oggi detto calcolo integro-differenziale.

La prudenza di Newton non nasce tanto da aspetti di fede, ma dal fatto che *se i modelli nascono in un paradigma, un metodo che voglia avvalorarli dipende da quest'ultimo*, ossia ci sono tanti metodi. Non a caso le sue idee sono subito messe in dubbio, o estese, in *altri paradigmi*: Leibniz gli contesta le flussioni, che ha inventato anche lui; Huygens che la luce sia composta da particelle, poiché pensandola come onda si hanno modelli di più fenomeni; nel Settecento si cominciano a definire paradigmi in cui i principî della dinamica diventano 'espressioni istantanee' di *principî di conservazione*, portando a modelli nei quali, non considerando l'evoluzione temporale, cambia radicalmente il modo di *vedere* i fenomeni (Viennot 1972, Feynman 1971).

Dall'Illuminismo in poi, lo schema 'paradigma, modelli teorici, metodi sperimentali' si ripete con frequenza crescente. Basti pensare che fra Otto e Novecento, e solo in fisica, nascono: il concetto di *campo* (equazione del calore di Fourier), la *meccanica analitica* (Lagrange, Hamilton), l'elettromagnetismo (Maxwell, Faraday), il paradigma microscopico della *meccanica statistica* (Boltzmann), la termodinamica

(nei paradigmi di Carnot, Kelvin, Clausius, Onsager: Zemansky & Dittman 1996, Ben-Naim 2012), i ‘fotoni’ (Planck, Einstein) e la meccanica quantistica nelle formulazioni di Bohr, Heisenberg (*meccanica delle matrici*), Schrödinger (*meccanica ondulatoria*), Dirac (i *bra(c)ket*), Feynman (*integrali di cammino*): Bellone 1990, Donini 1982.

Il terzo esempio da considerare, ossia l’opera di Einstein, vista sempre come eccezionale (Gallo 2016), è invece coerente con questo processo. Esterno alla comunità scientifica, nel 1905 Einstein riesce ad unificare paradigmi (Born 1973): mette fenomeni meccanici ed elettromagnetici in uno stesso riferimento (relatività ristretta); spiega l’effetto fotoelettrico con la quantizzazione di Planck; cerca una prova macroscopica della natura discreta della materia (random walk). Non a caso non lo convincono le teorie quantistiche in cui il dualismo onda-particella *rende necessari più paradigmi* (il senso probabilistico della funzione d’onda fa sì che il *come* si misura influenzi *cosa* si può sapere: Born 1961), mentre è convinto dalle idee di De Broglie e soprattutto di Schrödinger (1928), che costruisce un potente modello dell’atomo di idrogeno con metodi matematici ben noti. Il lavoro di Einstein è quindi unico in quanto la sua capacità di spaziare fra tematiche diverse gli ha permesso di cogliere i nodi concettuali rimasti insoluti fino a quel tempo, ma dal punto di vista del metodo conferma il quadro finora dato (non a caso, anche Poincaré, matematico simile ad Einstein per creatività e profondità di visione, aveva costruito una teoria della relatività).

Pur ricercando grandi teorie unificanti, e ferma restando la necessità dell’accordo dati-teoria, oggi si è tornati ad accettare la molteplicità metodologica. Se quarant’anni fa Feyerabend (1979), da filosofo, dichiarava che non possono porsi limiti ai metodi, oggi Penrose (2021), da Nobel in fisica, ritiene che alcune teorie di fisica moderna si sviluppino per *moda, fede o fantasia* (intesa come favola); tendenze considerate *fantascientifiche* nella ricerca scientifica del Novecento. Eppure, basta considerare casi analizzati solo oggi, ‘finito’ il Ventesimo secolo, come la storia della crittografia quantistica (Kaiser 2012), per capire che la scelta di Penrose nasce dal non sapere proprio definire con quale metodo oggi si sviluppa la scienza in generale e la fisica in particolare. Probabilmente il problema di avere un solo metodo scientifico è destinato a restare aperto. Ma per introdurre le scienze sperimentali a scuola, come vedremo ora, ciò è paradossalmente molto utile.

Concezioni e modelli

Sebbene superficiale e limitata a pochi esempi della sola fisica, l’analisi precedente ha introdotto tutte le idee che servono nella didattica di una disciplina sperimentale a scuola, dall’infanzia in poi.

Si è chiamato *paradigma* un insieme di concetti, relazioni fra essi e linguaggi per esprimerle, e *modello* una rappresentazione in questi linguaggi della struttura di queste relazioni (Hestenes 2006). Il disegno di un sistema (un animale, un ingranaggio) che ne illustri la struttura, la dinamica, l’organizzazione interna o riferita ad un ambiente è un modello, così come la rappresentazione cartesiana o la formulazione di relazioni quantitative come equazioni algebriche, differenziali, formule chimiche. Riconoscere ogni *rete organizzata di relazioni* come oggetti di pensiero permette di scoprire come tutte le persone facciano scienza, quelle di tre anni così come i professori.

Ovviamente, è questione di consapevolezza. Un bambino, un ragazzo e un docente non hanno le stesse immagini mentali, non definiscono le stesse relazioni e non utilizzano gli stessi linguaggi, e mentre un docente condivide gran parte della sua scienza con altri, un ragazzo può non saper illustrare le sue idee. Ma questo evidenzia proprio gli obiettivi cui deve mirare il docente a scuola.

Il punto di partenza è differenziare, all’interno di un paradigma comune, i modelli costruiti dagli adulti da quelli di bambini e ragazzi, detti *concezioni* (De Vecchi & Giordan 2002, Astolfi 1998). In generale, un modello è *complicato ma (meta)stabile*, perché è un *prodotto, un punto di arrivo collettivo, indipendente dall’identità* del singolo; una concezione è invece *complessa e instabile* perché è un *punto di partenza di un processo individuale di ridefinizione delle rappresentazioni* (Karmiloff-Smith 1995), *innescato dalla ridefinizione dell’identità a seguito dell’esperienza*.

Date queste caratteristiche, sembrerebbe più semplice far crescere le concezioni di un bambino o di un ragazzo verso una stabilità identitaria e di pensiero, che portare un’intera società a cambiare i propri modelli (ad esempio di sviluppo), il che richiede in effetti una rivoluzione scientifica che li destabilizzi. Ma è solo questione di scala: tutti i giorni a scuola si innescano rivoluzioni scientifiche *nella classe*, dimostrando come sia *‘metodo’ qualunque processo di riorganizzazione/rielaborazione consapevole di un’esperienza, in grado di far evolvere una concezione instabile, personale, com-*

plexa in un modello stabile, collettivo, complicato, a seconda dell'accordo con il dato sperimentale. Quando nuovi esperimenti evidenzieranno poi l'esigenza di nuovi concetti, nuove relazioni o nuovi linguaggi, si parlerà di paradigmi, definiti quindi più nel loro cambiamento che nella loro stabilità (Viennot 1972, 2003, 2008), perché ogni paradigma porta a cambiare modelli e quindi anche metodi per ottenerli dalle concezioni (come accade considerando la luce come *raggio*, poi *onda*, poi *insieme di 'quanti'*).

Nella didattica delle scienze sperimentali, quindi, la molteplicità metodologica serve proprio ad avere più modi per *passare da concezioni a modelli, da paradigmi spontanei a specifici*, cosa che per essere vissuta a scuola deve tradursi in pratiche di aula e soprattutto di laboratorio. Pensare in questo modo aiuta a capire quali difficoltà possano incontrare i ragazzi nell'affrontare consapevolmente il problema delle biblioteche, *la prima fatta da modelli, la seconda da concezioni*. Probabilmente, sono già divise in tal modo anche le loro bi-

biblioteche, dove oggi dovrebbero conciliare testi sull'esigenza di nuove visioni dell'educazione (Morin 2001) e di sintesi disciplinare (Penrose 2005) con tentativi di raccontare la scienza senza i linguaggi propri dei modelli (ossia senza matematica, *#Mathfree*: Greison 2020), o partendo da paradigmi non spontanei (Rovelli 2014).

Ma comunque la si pensi, dovranno essere loro, una volta costruiti i propri metodi e magari diventati docenti in equilibrio sul limite, a stabilire cosa sia meglio per il mondo che staranno vivendo.

Bibliografia

Astolfi, Jean-Pierre, *Comment les enfants apprennent les sciences?*, Paris, Retz, 1998.

Bateson, Gregory, *Mente e natura*, Milano, Adelphi, 1984.

Bellone, Enrico, *Caos e Armonia*, Torino, UTET, 1990.

Ben-Naim, Arieh, *Entropy and the second law*, Singapore, World Scientific, 2012.

Bianucci, Piero, *Storia sentimentale dell'astronomia*, Milano, Longanesi, 2012.

Born, Max, *La fisica e il nostro tempo*, Firenze, Sansoni, 1961.

Born, Max, *La sintesi einsteiniana*, Torino, Bollati Boringhieri, 1973.

Consiglio Federale Svizzero. *Ordinanza 413.11 concernente il riconoscimento degli attestati liceali di maturità (Ordinanza sulla maturità, ORM), 15 febbraio 1995 (Stato 1° agosto 2018). Art. 5, comma 4.*

De Vecchi, Gérard; Giordan, André, *L'enseignement scientifique, Comment faire pour que ça marche?*, Paris, Delagrave, 2002.

Donini, Elisabetta, *Il caso dei quanti 1900-1927*, Bologna, CLUP-CLUED, 1982.

Drake, Stillman, *Galileo pioniere della scienza*, Padova, Franco Muzzio Editore, 1992.

Feyerabend, Paul Karl, *Contro il metodo*, Milano, Feltrinelli, 1979.

Feynman, Richard, *La legge fisica*, Torino, Bollati Boringhieri, 1971.

Frajese, Attilio, *Galileo matematico*, Roma, Universale Studium, 1964.

Freeman, Walter Jackson III, *How brains make up their minds*, New York, Columbia University press, 2000.

Gallo, Domenico, *Il ribelle del pensiero*, Milano-Udine, Mimesis, 2016.

Greison, Gabriella, *Ucciderò il gatto di Schrödinger*, Milano, Mondadori, 2020.

Hanson, Norwood Russell, *I modelli della scoperta scientifica*, Milano, Feltrinelli, 1978.

Hestenes, David, *Notes for a modeling theory of science, Cognition and instructions*, Proceedings of the 2006 GIREP conference, *Modelling in Physics and Physics Education*, Amsterdam, 2006.

Kaiser, David, *Come gli hippie hanno salvato la fisica*, Roma, Castelvecchi, 2012.

Karmiloff-Smith, Annette, *Oltre la mente modulare*, Bologna, il Mulino, 1995.

Koyré, Alexander, *Etudes newtoniennes*, Paris, Gallimard, 1968.

Kuhn, Thomas, *La rivoluzione copernicana*, Torino, Einaudi, 1972.

Kuhn, Thomas, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Torino, Einaudi, 1978.

Lakoff, George; Johnson Mark, *Metaphors we live by*, London, The University of Chicago Press, 2003.

Morin, Edgar, *La testa ben fatta*, Milano, Raffaello Cortina Editore, 2001.

Morin, Edgar, *I sette saperi necessari all'educazione del futuro*, Milano, Raffaello Cortina Editore, 2001.

Morin, Edgar, *On Complexity*, Cresskill-New Jersey, Hampton Press Inc., 2008.

Penrose, Roger, *La strada che porta alla realtà*, Milano, BUR, 2005.

Penrose, Roger, *L'Universo è ancora un segreto*, Milano, BUR, 2021.

Redondi, Pietro, *Galileo Eretico*, Torino, Einaudi, 1983.

Roletto, Ezio, *La scuola dell'apprendimento*, Trento, Erickson, 2005.

Rovelli, Carlo, *La realtà non è come ci appare*, Milano, Raffaello Cortina Editore, 2014.

Russo, Lucio, *La rivoluzione dimenticata*, Milano, Feltrinelli, 1996.

Scandaletti, Paolo, *Galileo privato*, Milano, Camunia, 1989.

Schrödinger, Edwin, *Collected papers on wave mechanics*, London & Glasgow, Blackie & Son, 1928.

Viennot, Laurence, *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, Paris, Hermann, 1972.

Viennot, Laurence, *Teaching Physics*, Dordrecht, Kluwer, 2003.

Viennot, Laurence, *Didactique, épistémologie et histoire des sciences*, Paris, Presses universitaires de France, 2008.

Vygotsky, Lev, *Thought and Language*, Cambridge Massachusetts, The MIT Press, 1986.

Zemansky, Mark; Dittman, Richard, *Heat and thermodynamics*, New York, McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1996.