

APhEx 18, 2018 (ed. Vera Tripodi)
Ricevuto il: 25/02/18
Accettato il: 03/10/18
Redattore: Bianca Cepollaro

APhEx
PORTALE ITALIANO DI FILOSOFIA ANALITICA
GIORNALE DI **FILOSOFIA**
NETWORK

N° 18, 2018

P R O F I L I

Ernst Mach

Stefano Bordoni

Ernst Mach (1838-1916) appartiene a due grandi tradizioni: la fisica europea di fine Ottocento e la filosofia tedesca post-kantiana. Egli considerava il pensiero e l'esperienza umana come parte della natura: da questo radicale naturalismo discendeva l'ipotesi di una stretta connessione tra fisica e psicologia. Egli si concentrò sull'analisi e la ricostruzione storico-critica della fisica e dei suoi fondamenti logici, empirici e fisiologici. Consapevole della provvisorietà e incompletezza di ogni teoria scientifica, egli vedeva nello studio della storia della scienza l'antidoto a ogni dogmatismo. La fisica e la nascente filosofia della scienza dei primi decenni del Novecento sono state variamente influenzate dalle sue tesi e dalle sue ricerche meta-teoriche.

INDICE

1. ESSENZIALI ELEMENTI BIOGRAFICI
2. IL CONTESTO MATERIALE E INTELLETTUALE
3. DALLE PRIME RICERCHE ALL'ANALISI DELLE SENSAZIONI
4. IL SAGGIO DEL 1872 SULLA CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA
5. *I PRINCIPI DELLA MECCANICA*
6. *CONOSCENZA ED ERRORE*
7. MACH NELLA SCIENZA E FILOSOFIA DEL SUO TEMPO
8. OSSERVAZIONI CONCLUSIVE
9. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI
 - 9.1 OPERE DI MACH
 - 9.2 ALTRE OPERE CITATE

1. Essenziali elementi biografici

Ernst Mach è stato un fisico, un fisico sperimentale innanzitutto, che ha portato contributi originali in questo settore. La fisica lo ha condotto ad approfondire la fisiologia e la psicologia delle sensazioni, settori nei quali egli ha intrapreso significative ricerche. Pur non avendo portato contributi originali alla fisica teorica, ha analizzato e approfondito i fondamenti teorici e meta-teorici della fisica, ha esplorato la storia della fisica, ed è stato tra i fondatori della disciplina che oggi è nota come filosofia della scienza. Storia e filosofia della scienza sono proprio i campi della conoscenza per i quali Mach è oggi noto e studiato. Egli ha proposto una riflessione sulla scienza nella quale storia, antropologia e psicologia della conoscenza erano privilegiati strumenti di analisi (Banks 2003, pp. ix e 16; Wolters 2012, p. 42)¹.

Mach nacque nel 1838 nei pressi di Brno, città che appartiene ora alla Repubblica Ceca e apparteneva allora all'impero asburgico, e morì nel 1916 nei pressi di Monaco di Baviera. Le sue più importanti ricerche, il suo insegnamento universitario e la sua opera di divulgazione culturale si realizzarono in due importanti città dell'impero, dapprima Vienna, poi Praga e di nuovo Vienna. La sua biografia intellettuale si snoda tra gli anni sessanta dell'Ottocento e i primi anni del Novecento. Le più interessanti riflessioni e le tesi più note, quelle che possono essere a lui attribuite con ragionevole certezza, sono rintracciabili nei libri che egli pubblicò tra il 1872 e il 1905:

1872, *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*,
(Storia e radici del principio di conservazione del lavoro),

¹ Può essere condivisibile la sintesi di Erik Banks: «... the best title for Mach is the epithet so often given to Galileo and Newton: natural philosopher» (Banks 2003, p. 16).

- 1883, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*,
(La meccanica presentata nel suo sviluppo storico-critico),
1886, *Beiträge zur Analyse der Empfindungen*,
(Contributo all'analisi delle sensazioni),
1896, *Die Prinzipien der Wärmelehre. Historisch-kritisch entwickelt*,
(I principi della teoria del calore nel loro sviluppo storico-critico),
1905, *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung*,
(Conoscenza ed errore. Lineamenti di psicologia della ricerca).

In questi testi noi troviamo una impostazione unitaria dei processi fisici e fisiologici, e della teoria della conoscenza. Si è parlato spesso di monismo, nel senso che Mach voleva superare la dicotomia cartesiana tra mente e corpo o tra spirito e materia. In una prospettiva di unificazione tra le scienze, e nel tentativo di dare una spiegazione scientifica dei processi della percezione e del pensiero, l'orizzonte della scienza doveva essere ampliato in modo da includere un insieme di discipline che si estendeva dalla tradizionale meccanica alla psicologia.

Mach si addottorò a Vienna nel 1860, nel 1861 iniziò a tenere delle lezioni di fisica per medici, e nel 1863 pubblicò un *Compendium der Physik für Mediziner*, nel quale sviluppava i temi fondamentali della fisica «dal punto di vista della meccanica e della teoria atomica». Nel 1866 divenne professore ordinario a Graz, e dal 1867 al 1895 insegnò fisica sperimentale all'università di Praga, quando fu chiamato a Vienna a ricoprire una cattedra di *Storia e teoria delle scienze induttive* (Mach 1863a, p. 271; D'Elia 1971, p. 3).

Nelle sue prime ricerche di fisica sperimentale, Mach si occupò di effetto Doppler e velocità ultrasoniche, in particolare delle velocità dei proiettili. Riuscì, in particolare, a costruire dispositivi sperimentali per fotografare questi proiettili e le loro scie. Nel periodo praghese, fu eletto rettore dell'università nel 1879 e 1883, e dovette affrontare problemi politici di grande delicatezza quali le rivendicazioni culturali e politiche dei giovani cechi e l'antisemitismo. Fin dal 1879, in un clima di accesi conflitti tra cechi e tedeschi, egli fu tra i primi a suggerire una divisione dell'università di Praga in una componente di lingua ceca e una di lingua tedesca. La divisione fu poi realizzata nel 1881 (Mach 1885, pp. 625-38; Mach 1887, pp. 764-80; Mach 1889, pp. 41-50; D'Elia 1971, pp. 231-35; Hoffmann 1992, pp. 29-30, 38 e 41; Blackmore, Itagaki e Tanaka 2001b, p. 6; Pojman 2009, pp. 1, 4-5; Debernardi 2010, p. 24).

Nel periodo viennese, Mach divenne un punto di riferimento per gli intellettuali progressisti, anche fuori dai confini nazionali. Egli potrebbe essere qualificato come «(u)n progressista liberale fermamente persuaso del valore culturale, sociale e morale dell'impresa scientifica». Nel 1901 rifiutò un titolo nobiliare offerto dalle autorità imperiali ma accettò la nomina a senatore, impegnandosi a favore delle istituzioni che curavano la formazione culturale delle classi lavoratrici, a favore dell'educazione pubblica, e contro razzismo e antisemitismo. Rimase sempre vivo il suo interesse per un insegnamento della scienza coinvolgente e intellettualmente evoluto: scrisse vari articoli per la rivista

dei docenti di fisica e chimica su questioni didattiche e utilizzo del laboratorio (Pievani 2010, p. 8; Debernardi 2010, pp. 24, 26-7 e 79-80).

Il noto *Circolo di Vienna* (Wiener Kreis), la cui nascita viene fatta risalire ufficialmente al 1929, si era già costituito come *Verein Ernst Mach* l'anno precedente. La figura e l'opera di Mach furono effettivamente rilevanti nella formazione di alcuni matematici, scienziati e filosofi che contribuirono allo sviluppo della moderna filosofia della scienza. Troviamo tracce profonde ed esplicitamente riconosciute del ruolo svolto da Mach nella formazione intellettuale di Philipp Frank, Erwin Schrödinger, Rudolf Carnap e Otto Neurath. In quest'ultimo troviamo anche uno specifico interesse per la riflessione di Mach su inerzia e gravitazione (Neurath 1983 (1916), pp. 14, 28-9 and 31; Carnap 1991, pp. 16 e 18 [Blackmore, Itagaki e Tanaka 2001a, p. 166]; Stöltzner 2001, pp. 105, 107 e 117-118; Debernardi 2010, pp. 15 e 93-4; Bordoni 2017, pp. 287-288)².

Poiché l'analisi e la ricostruzione storico-critica della fisica e dei suoi fondamenti logici, empirici e fisiologici fu obiettivo permanente di tutta la vita di Mach, ci sembra che il modo migliore di rendergli giustizia sia offrire una ricostruzione storico-critica della sua prassi, del suo pensiero e delle sue tesi. Per fare questo, dobbiamo partire dal senso delle parole che abbiamo appena usato, soprattutto dal senso che tali parole avevano negli ultimi decenni dell'Ottocento: dobbiamo in particolare capire che cosa significavano in quel periodo espressioni quali «meccanica» «fisica» e «filosofia della scienza», e quali trasformazioni avevano subito. Come scriveva Friedrich Adler nel 1918, «[n]ulla sarebbe in contraddizione con lo spirito di Mach più di una esposizione dogmatica delle sue idee» (Adler 1918b (2001), p. 44).

2. Il contesto materiale e intellettuale

Negli ultimi decenni dell'Ottocento, il panorama materiale dell'Europa subì profondi cambiamenti, e lo sviluppo della scienza ebbe un ruolo importante in questi cambiamenti. Infatti, per la prima volta nella storia della scienza moderna, alcune teorie scientifiche portarono alla diffusione di tecnologie che modificarono la vita materiale e le abitudini delle persone. Questo processo era realmente nuovo: la cosiddetta *Rivoluzione scientifica* aveva certamente modificato il panorama intellettuale dell'Europa, ma non aveva portato cambiamenti materiali tali da realizzare il sogno di Francis Bacon, il miglioramento delle condizioni materiali dell'umanità.

² Alcuni studiosi hanno rintracciato specifiche assonanze tra il contenuto degli scritti di Mach e il contenuto di alcuni scritti di Wittgenstein (Visser 2001, p. 141). Altri hanno analizzato l'influenza che Mach ha avuto su alcuni scrittori di lingua tedesca nei primi anni del Novecento (Imai 2001, pp. 197-200; Debernardi 2010, pp. 86-93).

Solo nel XIX secolo la chimica, e successivamente la fisica, furono in grado di generare nuove tecnologie, di diffonderle, e di produrre benefici nella vita quotidiana. Mi limiterò qui a ricordare le tecnologie elettriche, che cambiarono l'aspetto delle città e delle abitazioni tramite la graduale diffusione dell'illuminazione elettrica e la proliferazione delle linee telegrafiche. In generale, le nuove tecnologie elettriche offrivano la possibilità di una energia più pulita dell'energia prodotta con combustibili, e facilmente trasportabile su lunghe distanze (Lami 1891, p. 743; Galison 2003, pp. 174-80).

In questa fase della storia dell'Europa si realizzò la professionalizzazione della fisica. Con tale espressione intendiamo che la fisica ha assunto il carattere di un definito corpo di conoscenze, un definito percorso di formazione e un definito ruolo istituzionale. Il fenomeno più interessante che ha accompagnato questo processo di differenziazione e professionalizzazione fu la nascita della fisica teorica. Essa emerse dalla consapevolezza che l'alleanza tra *sensate esperienze* e *certe dimostrazioni* non era sufficiente per lo sviluppo di una matura prassi scientifica: era necessario contare su una rete di ipotesi e congetture, su una rete di modelli concettuali, e sulla consapevolezza della intrinseca storicità del metodo scientifico (Cassirer 1950, pp. 83-5; McCormmach and Jungnickel 1986, vol. 2, pp. 33, 41-3, 48 e 55-6; Kragh 1996, p. 162; Garber 1999, p. 167 e 317; Lacki 2007, p. 248; McCormmach and Jungnickel 2017, pp. 32-36)³.

Elettrodinamica e termodinamica si svilupparono come due nuovi settori delle scienze fisiche, il cui rapporto con il tradizionale settore della meccanica appariva problematico⁴. Come interpretare meccanicamente i nuovi concetti e le nuove grandezze fisiche, in particolare il concetto di «campo elettromagnetico», emerso dalle teorie elettrodinamiche dell'azione contigua, e il concetto di «entropia», emerso dalla ricerche sui fondamenti dei processi termici? Emersero vari tentativi di sistematizzazione dell'elettromagnetismo e della termodinamica su base Lagrangiana, come applicazioni di una meccanica più astratta e più generale (Renn e

³ Per una ricostruzione storica dal punto di vista di un osservatore di inizio ventesimo, si veda Merz 1912, p. 199. Sul concetto di fisica teorica dal punto di vista di un fisico direttamente coinvolto, si veda Boltzmann 1892, pp. 5-11, e Boltzmann 1899, p. 95.

⁴ Per comprendere il ruolo della meccanica nell'Ottocento, occorre ricordare che per due secoli essa aveva costituito un ponte tra ciò che noi oggi chiamiamo matematica e ciò che chiamiamo fisica (Garber 1999, pp. ix, 1, 62, 64).

Rauchhaupt 2005, pp. 31-2; Garber 1999, p. 206 e 260; Darrigol 2010, pp. 145-54 e 157-9, Bordoni 2012, pp. 209-240)⁵.

Sul versante filosofico, ancor prima della vasta diffusione delle nuove tecnologie, la fiducia nella scienza influenzò in maniera decisiva il panorama intellettuale, e diede origine a nuove correnti e sistemi filosofici. I sei volumi del *Cours de philosophie positive* che Auguste Comte pubblicò tra il 1830 e il 1842 rappresentano certamente una fase decisiva di quel processo. Egli fece uso dell'espressione «*philosophie positive*» con la quale intendeva lo studio delle «caratteristiche generali delle diverse scienze», e la ricerca di un comune metodo. La nuova concezione della filosofia si basava su almeno tre ipotesi meta-teoriche: il rifiuto di ogni problema o questione che non fosse suscettibile di trattazione scientifica, la possibilità di un metodo comune per scienze naturali e scienze umane, e la fede nel progresso (Comte 1830, pp. VII-VIII).

Dopo Comte, la nascita della fisica teorica portò a una analisi molto più sofisticata e spregiudicata dei fondamenti della scienza. Nel 1861 il matematico, economista e filosofo Antoine Augustin Cournot pubblicò una attenta analisi storica e storiografica, e una disamina dei presupposti filosofici espliciti e impliciti nella prassi scientifica. Nel 1882, negli Stati Uniti, l'outsider di origini tedesche Bernhard Stallo, pubblicò un libro nel quale veniva discussa la profonda relazione tra «inerzia e forza», l'impossibilità di isolare un corpo dalle interazioni gravitazionali, e le incongruenze della teoria atomica (Cournot 1861, pp. II-II e VI-VII; Stallo 1882, pp. pp. 28-35, 39-45, 68, 83, 119-122, 152, 161-3, and 205).

3. Dalle prime ricerche all'*Analisi delle sensazioni*

Le prime ricerche di Mach si concentrarono sul rapporto tra fisica e fisiologia, un settore che aveva già una tradizione, e nel quale dominava la figura di Hermann von Helmholtz. Già nel 1863, Mach sottolineava la complessità dei processi fisiologici, e più in generale la complessità dei processi della natura, la quale «non ha studiato alla École Polytechnique». Nelle ricerche sull'acustica e sull'ottica, egli cercava una corrispondenza tra processi fisici e psicologici. Secondo Mach, gli organi di senso non

⁵ Sulla effettiva separazione tra fisica matematica e fisica teorica, gli storici della fisica Russell McCormach e Elizabeth Garber hanno espresso tesi leggermente diverse. McCormach ha sottolineato quanto il processo di differenziazione sia stato lungo e problematico, e ha fatto risalire i primi tentativi di una fisica teorica al diciottesimo secolo (Garber 1999, p. 167; McCormach and Jungnickel 2017, pp. 3, 8-9 e 39).

trasmettono semplicemente le informazioni ricevute, ma le traducono, le elaborano e accentuano i contrasti. Inoltre riconoscono somiglianze strutturali nel flusso delle informazioni, come nel caso di melodie suonate con scale diverse (Mach 1863b, p. 290; Mach 1865, p. 319; Mach 1868a, p. 19; D'Elia 1971, pp. 26-29 e 32-35; Pojman 2009, pp. 6-7).

È dallo studio delle interazioni tra processi fisici e percezioni che si sviluppò l'anti-meccanicismo e l'anti-atomismo di Mach. Si trattava di un anti-riduzionismo dettato dalla consapevolezza che modelli meccanici semplificati, ingenui modelli molecolari inclusi, non potessero spiegare la complessità dei processi biologici. Tutti questi temi trovarono una parziale sistematizzazione nel volume che Mach pubblicò nel 1886 sotto il titolo *Beiträge zur Analyse der Empfindungen* (*Contributo all'analisi delle sensazioni*). Anche se esso fu pubblicato dopo il saggio sulla conservazione dell'energia (1872) e il più famoso trattato sulla meccanica (1883), verrà qui analizzato per primo proprio perché i fenomeni e i problemi ai quali esso fa riferimento sono quelli che Mach ha affrontato all'inizio della sua attività accademica⁶.

Mach riteneva che ogni processo naturale potesse essere interpretato o come processo fisico o come processo fisiologico, e che i processi più complessi potessero essere scomposti in processi più elementari che conservavano il duplice carattere e la duplice interpretazione. In questa prospettiva monistica, scompariva quindi «il contrasto tra l'io e il mondo, fra sensazione o rappresentazione e fatto», e l'io non era più «una unità invariabilmente determinata con confini profondi e netti». Questo radicale naturalismo, che è stato talvolta confuso con l'idealismo, portava Mach a considerare i corpi materiali non come dati ma come risultati di un processo cognitivo che partiva da «complessi di elementi» o «complessi di sensazioni». Quindi Mach si collocava in opposizione alla tradizionale dottrina che vedeva i corpi o fenomeni come sorgenti delle nostre sensazioni (Mach 1903a, pp. 2, 6, 13, 16, 28, 35 e 63)⁷.

Se volessimo ad ogni costo etichettare il pensiero di Mach, dovremmo probabilmente usare espressioni quali *monismo* e *naturalismo* ma anche

⁶ Facciamo qui riferimento all'edizione italiana del 1903, della quale Mach stesso controllò le bozze, e alla quale antepose una breve prefazione.

⁷ Mach ha sempre negato la contiguità tra il suo pensiero e l'idealismo, in particolare quello di Berkeley. Il confronto tra Berkeley e Mach proposto da Popper appare piuttosto approssimativo dal punto di vista della ricostruzione storica, ma la conclusione è sicuramente efficace: «While Berkeley says that there can be nothing physical behind the physical phenomena, Mach suggests that there is nothing at all behind them» (Popper 1969, p. 173).

relativismo e *pragmatismo*. Nella sua concezione, ogni punto di vista appariva come il risultato di una lunga storia e di una lunga catena di esperienze: a nessun giudizio poteva essere dato un valore permanente, essendo utile e significativo solo in relazione a un determinato obiettivo. In una prospettiva Darwiniana, le idee e la mente stessa dovevano essere interpretate come un prodotto dell'evoluzione biologica, e soggette a una specifica lotta per l'esistenza e una specifica selezione naturale (Mach 1903a, pp. 46, 57-8, 76)⁸.

La scelta antimetafisica conduceva Mach alla critica del concetto di causa in quanto non ben fondato sull'esperienza. Tale concetto filosofico veniva sostituito dal concetto matematico di funzione: piuttosto che relazioni di causa ed effetto, egli ipotizzava relazioni o mutue dipendenze tra i fenomeni, che potevano essere espresse in forma matematica. Anche i concetti base della scienza quali spazio, tempo e materia apparivano come «specie particolari di sensazioni» fra loro interconnesse. Queste esperienze suggerivano l'intrinseca irreversibilità del tempo, e l'interpretazione della materia come «un complesso relativamente stabile di elementi sensoriali». Lontano da ogni rozzo empirismo, Mach sottolineava che il mondo non poteva comunque ridursi a «una semplice somma di sensazioni» ma piuttosto a «relazioni funzionali di elementi» (Mach 1903a, pp. 110, 119, 360, 399, 403, 407 e 416).

4. Il saggio del 1872 sulla conservazione dell'energia

Nel 1872 Mach si concentrava sul Principio di conservazione dell'energia che, dopo la pubblicazione del saggio di Helmholtz del 1847, *Die Erhaltung der Kraft* (*La conservazione della forza*), era diventato un principio unificante per tutta la fisica⁹. Mach riteneva che l'interpretazione meccanica di Helmholtz fosse riduttiva e non sufficientemente generale. Il fondamento generale del Principio era da rintracciarsi nell'impossibilità del moto perpetuo, e nell'impossibilità di creare lavoro dal nulla. La posizione di Mach era simile a quella dell'ingegnere e filosofo naturale scozzese Rankine, il quale aveva generalizzato il concetto di lavoro meccanico fin

⁸ Russell qualificò la teoria degli elementi di Mach come «*neutral monism*», e dopo un periodo di opposizione aderì sostanzialmente a tale posizione. Vi sono caratteri comuni nelle teorie della conoscenza di Mach, James e Russell (Banks 2003, pp. 151, 153 e 157; Banks 2010, pp. 173-174; Banks 2013, p. 58).

⁹ Il contenuto del saggio era già stato esposto da Mach in una conferenza, l'anno precedente (Mach 1977, pp. 277-278). Nella successiva edizione del 1909 fu aggiunta solo una pagina e mezzo finale di brevi note.

dagli anni cinquanta dell'Ottocento, estendendo il concetto di lavoro a trasformazioni non meccaniche, quali trasformazioni termiche, elettriche e chimiche (Rankine 1851, p. 49; Rankine 1853a, pp. 310-311, 313 e 317; Rankine 1853b, p. 203; Rankine 1855, pp. 210-218 e 222-227; Mach 1872, pp. 3, 12, 15, 17-19 e 33; D'Elia 1971, pp. 86-88 e 93-4; Bordoni 2012, pp. 16 e 115-127).

Mach sottolineava l'impossibilità di isolare un sistema fisico, e seguirlo nel corso del tempo, con la certezza che non vi fosse alcuna interazione con le restanti parti dell'universo. Lo stesso scorrere del tempo non era altro che un processo periodico in un sistema fisico esterno, quali una stella o un altro corpo celeste. In altre parole, lo scorrere del tempo era dato dal ripetersi di moti ragionevolmente prevedibili di alcuni astri. Non era possibile monitorare l'evoluzione dell'universo nella sua totalità in quanto sarebbe venuto a mancare un riferimento esterno: qualunque asserzione sull'universo nella sua totalità era quindi priva di senso dal punto di vista fisico (Mach 1872, pp. 18-20 e 35-37).

Sulla natura degli atomi la critica di Mach era particolarmente interessante sia dal punto di vista fisico sia dal punto di vista logico. In breve, come possiamo pensare di spiegare la materia ordinaria su base atomistica se rappresentiamo gli atomi come minuscoli enti materiali ai quali attribuiamo quelle proprietà della materia macroscopica (come impenetrabilità o elasticità) che essi dovrebbero spiegare? Il generico atomismo che egli aveva esposto nel *Compendium* del 1863 veniva quindi radicalmente superato (Mach 1872, p. 26).

Mach rimarcava che anche le leggi fisiche o i principi ritenuti più ovvi o fondamentali avevano richiesto lo sforzo congiunto di molte menti nel corso del tempo: una profonda comprensione di quei fondamenti richiedeva quindi una paziente analisi storica e concettuale. Egli insisteva sull'intrinseca storicità del sapere scientifico, e sulla necessità di un viaggio a ritroso verso le basi del sapere, alla ricerca delle sue radici materiali e antropologiche. Riportare alla luce quelle origini era anche un modo per insegnare la scienza in modo vivo e convincente, e per liberarla da ogni dogmatismo. Ripercorrere la storia della scienza, e illustrare la competizione tra i diversi punti di vista, era il modo più chiaro e onesto di mostrare la provvisorietà e l'incompletezza di ogni teoria (Mach 1872, pp. 2-3).

5. I principi della Meccanica¹⁰

Nella prefazione all'edizione italiana della *Meccanica* del 1909, Giovanni Vailati ricordava che l'analisi storica aveva per Mach «il carattere non di uno scopo, ma di un mezzo, o di un sussidio, per l'analisi critica delle teorie». Diversamente da Tannery e Duhem, per i quali l'analisi storica aveva valore in se stessa, e portava a nuove ipotesi storiografiche, Mach affidava alla storia un ruolo prevalentemente pedagogico (Gargani 1982, pp. XIV-XV). In una prefazione di poco precedente, Mach indicava la necessità di una didattica più evoluta della scienza, che mostrasse proprio ciò che la didattica tradizionale occultava, cioè la genealogia dei concetti e principi più importanti, «da quali fonti» erano emersi, e fino a che punto fossero ben fondati. Egli sottolineava il suo «intento critico», e antimetafisico (Mach 1883, pp. 27-28; Vailati 1909, pp. VI-VII; Mach 1903, p. X; Mach 1977, p. 40)¹¹.

L'analisi critica dei concetti fondamentali della fisica e dei principi della dinamica costituisce certamente la parte più stimolante della *Meccanica*. In particolare, l'esperimento mentale del secchio rotante che Newton aveva proposto nei *Principia* costituì per Mach una autentica miniera di riflessioni critiche. La descrizione di Newton è piuttosto scarna: essa richiede che qualche dettaglio venga qui reso esplicito. Immaginiamo di riempire parzialmente di acqua un secchio e di appenderlo al soffitto. Torciamo poi la corda in modo che, lasciata libera, permetta al secchio di ruotare intorno al proprio asse di simmetria. Analizziamo i fenomeni da due sistemi di riferimento: quello solidale con la stanza e quello solidale con il secchio. Quando il secchio inizia a ruotare, per un istante l'acqua «resta indietro» e poi si pone in rotazione solidalmente con il secchio. In quella breve fase transitoria, l'acqua è in quiete rispetto alla stanza e in moto rispetto al secchio, e la sua superficie resta piana. Quando poi l'acqua si pone in moto solidalmente con il secchio, la sua superficie si incurva. Se poi arrestiamo improvvisamente la rotazione del secchio, per un breve istante l'acqua resta in moto prima di arrestarsi. In tale fase transitoria, essa ha una superficie incurvata, trovandosi in moto rispetto al primo riferimento e pure in moto rispetto al secondo. In sintesi, nel primo riferimento, la superficie piana dell'acqua corrisponde alla quiete e la superficie curva corrisponde

¹⁰ Utilizzeremo sia l'edizione italiana del 1909 con prefazione di Giovanni Vailati sia quella del 1977 con prefazione di Alfonsina d'Elia.

¹¹ Mach ricordava quanto precoce fosse stata la sua ricerca sui fondamenti della meccanica, che egli faceva risalire al breve scritto *Über die Definition der Masse* che gli *Annalen der Physik* pubblicò nel 1868 (Mach 1912, p. 31; Mach 1977, p. 277).

univocamente al moto. Al contrario, nel secondo riferimento, non vi è alcuna univoca correlazione tra la configurazione geometrica dell'acqua e il suo stato di moto (Newton 1989, pp. 112-113; Mach 1977, pp. 244-245).

Da questo esperimento mentale Newton deduceva l'esistenza di due diverse classi di sistemi di riferimento: quelli nei quali vi è una correlazione coerente tra geometria e cinematica, e quelli nei quali non vi è tale correlazione. I primi sarebbero sistemi di riferimento «assoluti», nei quali è possibile stabilire quale sia il moto «assoluto» dei corpi. I secondi sono semplicemente sistemi di riferimento «relativi», rispetto ai quali il moto non può ricevere alcun attributo affidabile. Il primo sistema di riferimento poteva essere sostituito da un riferimento in quiete rispetto al centro del sistema del mondo o alle *stelle fisse*. La distinzione netta tra i due sistemi di riferimento non era ritenuta convincente da Mach. Egli invitava a immaginare il secchio in quiete e l'universo ruotargli intorno. Era una configurazione che si potesse materialmente realizzare? L'impossibilità di realizzarla faceva dire a Mach che i due sistemi di riferimento non erano materialmente distinguibili ma erano semplicemente due diverse interpretazioni dello stesso fenomeno. Egli sinteticamente asseriva: «il sistema del mondo ci è dato *una sola volta*» e anche il sistema copernicano e il sistema tolemaico sono semplicemente interpretazioni, «entrambe ugualmente valide» (Mach 1977, p. 246).

Secondo Mach, il movimento di un corpo poteva essere definito solo in relazione ad altri corpi scelti come sistemi di riferimento. Inoltre, non era dato sapere fino a che punto un sistema di corpi potesse influenzare dinamicamente il movimento del corpo considerato. In altre parole un sistema di riferimento non era un puro ente geometrico ma un oggetto materiale che interagiva dinamicamente con il corpo considerato. Non era possibile dire che cosa sarebbe successo se le pareti del secchio fossero diventate «sempre più massicce, fino a uno spessore di qualche miglio» (Mach 1977, pp. 246-249).

Queste varie considerazioni chiamavano in causa, in modo più o meno esplicito, il ruolo delle forze gravitazionali, che non potevano essere eliminate dal panorama dell'universo. Secondo Mach, tutte le nostre conoscenze fisiche si fondano sulle interazioni tra le masse dell'universo: è da questa interazione che derivavano «*insieme* i moti accelerati e i moti inerziali». Anche questa congettura, che qualche decennio dopo Einstein avrebbe chiamato «Principio di Mach», doveva comunque essere sottoposta a «un costante controllo sperimentale» (Mach 1977, pp. 250, 253 e 258).

È nella parte finale del libro che Mach formulava una tesi meta-teorica che è stata spesso origine di fraintendimenti, cioè la tesi della funzione

economica della prassi scientifica («die Oekonomie der Wissenschaft»). Non si trattava innanzitutto di una svalutazione della prassi teorica, come talvolta viene ritenuto. Infatti, egli chiariva immediatamente che la funzione economica della scienza consisteva nel sostituire possibili esperienze con atti del pensiero, cioè atti razionali di riproduzione e anticipazione di eventi reali. Questa economia del pensiero era quindi una astrazione e una rappresentazione sostitutiva, nello stesso modo in cui il linguaggio ordinario sostituiva suoni e grafie a oggetti di esperienza. L'atto rappresentativo era una *economia* anche perché selezionava elementi ritenuti fondamentali, e trascurava quelli ritenuti ininfluenti per la comprensione di un evento o una classe di eventi. *Economia* e astrazione erano quindi due processi mentali interconnessi (Mach 1977, pp. 470-471)¹².

6. *Conoscenza ed errore*

Nel suo testo più propriamente filosofico, Mach sottolineava quanto egli fosse distante dalla pratica filosofica professionale: nonostante i suoi vasti interessi, egli si considerava un frequentatore della filosofia come «cacciatore domenicale» («nur als Sonntagsjäger»). Essendo uno scienziato e non un filosofo, non poteva proporre una nuova filosofia, ma voleva darsi un compito più limitato, un compito critico piuttosto che costruttivo: allontanare dalla scienza una filosofia sterile e datata. Nella prefazione alla seconda edizione, non nascondeva il suo entusiasmo per il testo fondamentale di Pierre Duhem, *La théorie physique, son objet et sa structure*, appena pubblicato in Francia. In pieno accordo con Duhem, egli sottolineava la necessità di una chiara separazione tra scienza e metafisica, e l'utilità di una ricerca storica («die historisch-genetische Darstellung der Theorien») che facesse luce sui fondamenti della scienza. Non mancava tuttavia a Mach la lucidità intellettuale di riconoscere e dichiarare esplicitamente una differenza di impostazione e sensibilità rispetto Duhem. Mentre quest'ultimo aveva sottolineato la distanza tra pensiero comune e pensiero scientifico, Mach aveva insistito proprio sulla loro stretta relazione. Egli non vedeva i due approcci meta-teorici come antagonisti, ma complementari (Mach 1905, pp. VII-VIII; Mach 1906b, pp. X-XI).

Proprio da questa ultima questione Mach partiva, per sottolineare come la nascita del pensiero scientifico si collocasse in un processo evolutivo che

¹² Banks ha sottolineato come il rifiuto del meccanicismo in Mach sia strettamente connesso alla sua teoria degli elementi, secondo la quale al di là degli elementi di esperienza non vi è altro che una rete di altri elementi di esperienza e delle loro relazioni funzionali (Banks 2013, pp. 63-64).

aveva avuto inizio «con le prime, semplici manifestazioni vitali», e che si era via via perfezionato fino ad arrivare alle più recenti acquisizioni scientifiche. Pronto a riconoscere il carattere progressivo della ricerca scientifica ma lontano da ogni retorica scienziata, gli si concedeva delle riflessioni sulle conseguenze sociali ed ambientali del progresso scientifico. In particolare, si interrogava sul funzionamento dei mezzi di trasporto, dei macchinari delle fabbriche e delle centrali elettriche, e sulla «massa di carbone che fanno volatilizzare ogni ora». In una epoca in cui la sensibilità ecologica non era diffusa, Mach si chiedeva se l'umanità sarebbe riuscita a contrastare lo sfruttamento e la consunzione del pianeta Terra (Mach 1982, p. 4).

Mostrando effettivamente una certa affinità con le contemporanee riflessioni di Duhem, Mach si soffermava sulla complessità delle procedure sperimentali e sulla impossibilità di dimostrare alcunché per mezzo di osservazioni isolate. La teoria aveva una «funzione ordinatrice e semplificatrice» che egli riconduceva a quel carattere *economico* della scienza sul quale si era soffermato nella *Meccanica*. Quanto egli fosse lontano da ogni rozzo empirismo è mostrato dall'insistenza sul carattere creativo dell'impresa scientifica. La storia della scienza e l'effettiva prassi di ricerca mostravano che «il lavoro di indagine scientifica esige una fantasia molto forte». L'osservazione, cioè l'adattamento delle idee ai fatti, era influenzata dalla teoria, che consisteva nell'adattamento delle idee tra loro (Mach 1982, pp. 123, 134, 152 e 161).

C'è un aspetto interessante in queste considerazioni di Mach, un aspetto che connette la sua ricerca allo sviluppo della fisica teorica in Europa negli ultimi decenni dell'Ottocento. Egli si rendeva conto che il lavoro teorico, cioè l'adattamento delle idee tra loro, «non si esaurisce nell'appianare le contraddizioni», cioè non si limita all'aspetto logico e computazionale. La prassi scientifica non poteva essere ricondotta alla pura alleanza tra coerenza logica, procedure matematiche e procedure empiriche. Essa richiedeva qualcosa in più, una attività concettuale, filosofica in senso lato, dove semplicità e armonia tra concetti e principi entravano in gioco. Questa attività del pensiero guidava anche le pratiche sperimentali e conduceva a costruire «*esperimenti mentali*» che talvolta precedevano e preparavano l'effettivo svolgimento dell'esperimento materiale (Mach 1982, pp. 173, 183-184, 188, 194 e 196).

Egli insisteva sulla necessità di una «*attività autonoma*» della ragione che si fondava sul «patrimonio mentale accumulato» collettivamente nel corso del tempo. L'impresa scientifica era una impresa dinamica, non prevedibile, collettiva e storicamente determinata. Perfino conoscenze

corrette potevano oscurarsi nel corso della Storia o essere dimenticate per poi essere ritrovate, trasformate, integrate e completate (Mach 1982, pp. 305-306, 308-310 e 382).¹³ La conclusione di *Conoscenza ed errore* era un atto di fiducia nella conoscenza umana. Mach ci invitava a non stare di fronte al mondo come se esso fosse inconoscibile. Gli esseri umani dovevano considerare se stessi come «una parte del mondo, presa nel fiume del mondo», come esseri «sufficientemente *affini* alle altre parti del mondo» da poter realizzare una conoscenza reale, autentica, progressiva (Mach 1982, p. 456).

7. Mach nella scienza e filosofia del suo tempo

Mach guardava con simpatia alle teorie fisiche di Duhem e a quella *Energetica* che era stata proposta da Rankine, e Duhem aveva poi sistematizzato in modo originale. Fin dagli anni ottanta dell'Ottocento Duhem aveva perseguito un imponente progetto teorico di generalizzazione della meccanica analitica, cioè una teoria matematica unificata per meccanica, termodinamica, chimica e qualunque tipo di processo irreversibile, fondata sui due principi della termodinamica. Questa *Energetica* era piuttosto diversa da quella propagandata da Georg Helm e Wilhelm Ostwald, che si fondava sostanzialmente sul principio di conservazione dell'energia (Rankine 1855, pp. 210-8 e 222; Ostwald 1896, pp. 159-60; Duhem 1896, pp. 8-9, 70-75 e 130-131)¹⁴.

Rispetto alla riflessione epistemologica di Duhem, quella di Mach appare tutto sommato meno radicale. Nella sua ricerca delle origini antropologiche e psicologiche delle conoscenze scientifiche, Mach aveva chiarito quanto l'esperienza umana e il dato empirico fossero inevitabilmente contaminati da ipotesi teoriche implicite o esplicite. Tuttavia l'elemento meta-empirico che Mach ha più frequentemente sottolineato era quello evolutivo, che si manifestava attraverso la pressione dell'adattamento della specie umana all'ambiente. Duhem invece ha sottolineato soprattutto la pervasività dell'aspetto teorico e la pluralità delle interpretazioni teoriche di uno stesso dominio di fenomeni (Duhem 1892a, pp. 269-; Duhem 1892b, pp. 139-140, 143-158, 160-164 e 170; Duhem

¹³ Ci sembra che queste riflessioni di Mach non giustifichino la convinzione che egli abbia «minimizzato il ruolo delle teorie meccaniche, in realtà di tutte le teorie», né che egli abbia «adottato e divulgato una teoria empirista della conoscenza» sulla scia di Berkeley e Hume (Bunge 1966, pp. 243 e 261).

¹⁴ Ostwald, in particolare, sviluppò una metafisica dell'energia che non poteva risultare gradita né a Mach né a Duhem.

1893, pp. 55-56, 58-60, 62-63, 65-66 e 68-71; Duhem 1894, pp. 147-151, 153-157, 160-165, 175-179, 181, 188, 190 e 195)¹⁵.

La critica di Mach fu a sua volta criticata da alcuni scienziati e filosofi contemporanei. La riduzione della fisica a una correlazione tra elementi di esperienza venne trattata come una forma di idealismo, sebbene non vi fosse in Mach alcun predominio della mente sul corpo, o della ragione sulla materia, poiché mente e ragione erano pensati come prodotti della natura. Nel 1903, ne *I Principi della Matematica*, Bertrand Russell criticava l'approccio di Mach allo spazio assoluto di Newton. Egli vi vedeva un vistoso fraintendimento: poiché il moto andava riferito ad assi cartesiani non soggetti a forze, «nessun asse materiale potrà soddisfare tale requisito» essendo sottoposto alla gravità, come lo stesso Mach aveva evidenziato¹⁶. Quindi gli assi dovevano essere enti puramente spaziali: Russell ne concludeva che, «se lo spazio assoluto non esistesse, neppure tali assi potrebbero esistere» (Russell 1903, pp. 490-492).

Particolare rilevanza ebbe la critica di Planck a Mach, anche a causa dei toni inusualmente polemici di Planck, autorevole esponente della fisica tedesca. Planck sottolineava il valore universale della scienza in quanto sapere purificato dagli elementi contingenti della sensibilità e dell'esperienza individuale. La scienza era progredita proprio rompendo quella continuità tra ragione e comuni pratiche empiriche che Mach considerava la base di ogni reale prassi scientifica. La risposta di Mach, affidata alla rivista tedesca *Physikalische Zeitschrift* e alla rivista italiana *Scientia*, fu altrettanto netta. Egli riteneva che il continuo aggiornamento delle conoscenze scientifiche comportasse anche una revisione dei fondamenti, che restavano intrinsecamente congetturali e provvisori. Proprio per questo motivo, la scienza poteva difficilmente andare oltre una sofisticata descrizione matematica dei fenomeni; non poteva pretendere di spiegare la realtà in modo definitivo. La risposta di Mach provocò la replica di Planck sulla *Physikalische Zeitschrift*, nella quale questi confermava le

¹⁵ Sebbene i neo-positivisti considerassero Duhem un seguace francese di Mach, in più occasioni Roberto Maiocchi ha opposto l'*induttivismo* di Mach al *deduttivismo* di Duhem, (Maiocchi 1985, pp. 14, 297, 305, 348, e 355; Maiocchi 1990, pp. 387-8 e 398). C'è qualcosa di vero in questa tesi di Maiocchi, anche se mi sembra più convincente parlare di complementarità piuttosto che opposizione tra i punti di vista di Duhem e Mach, come quest'ultimo ha esplicitamente osservato (Mach 1906b, pp. X-XI).

¹⁶ Qualche anno prima, un fisico poco conosciuto, Alois Höfler, aveva criticato l'equivalenza fenomenologica tra il secchio di Newton rotante nello spazio delle stelle fisse e l'universo rotante intorno al secchio. Secondo Höfler, nel secondo caso, non ci sarebbe comunque stata alcuna rotazione dell'acqua (Höfler 1900b, pp. 125-126; Norton 1995, p. 40).

precedenti critiche con particolare asprezza (Planck 1964, pp. 37-38 e 60-64; Mach 1910b, pp. 227 e 231; Planck 1910, pp. 1188-89).

Planck era un realista che riconosceva alla scienza la funzione di spiegare il mondo. Le sottigliezze storiche e filosofiche di Mach non lo interessavano: gli apparivano perfino pericolose perché sminuivano e problematizzavano l'aspirazione alla conoscenza razionale del mondo. Il realismo di Planck confliggeva con le ricostruzioni critiche di Mach, e con il suo naturalismo. Certamente Planck coglieva nel segno quando evidenziava in Mach la presenza di uno specifico tipo di metafisica, ma non riconosceva la presenza di una più ingenua metafisica nelle proprie tesi. L'attitudine critica di Mach veniva esercitata con la stessa severità sia nei confronti della fisica classica sia nei confronti della nuova fisica, teorie della Relatività e teorie dei quanti incluse (Planck 1910, pp. 1186-7 e 1189-90; Pojman 2009, p. 12)¹⁷.

Dal punto di vista della storia e della filosofia della scienza è forse più importante il rapporto tra Mach e Einstein, sia per le riflessioni di Einstein sul valore dell'eredità intellettuale di Mach, sia per la relazione tra la critica di Mach ai fondamenti della fisica e la *Teoria generale della relatività*. Ne discende talvolta una interpretazione *a posteriori* di Mach, alla luce della fisica Einsteiniana (Gargani 1982, pp. XXIII-XXIV; Debernardi 2010, pp. 119-120). Nella *Teoria generale*, Einstein sottolineava il contributo di Mach alla chiarificazione di «un difetto epistemologico» («ein erkenntnistheoretischer Mangel») nella meccanica classica e nella *Teoria ristretta della relatività*, cioè l'insoddisfacente trattazione dei moti circolari. Tuttavia, una esplicita critica alla teoria apparve in un volume postumo di Mach sull'ottica, edito dal figlio nel 1921 (Einstein 1916a, p. 771; Einstein 1916b, p. 102; Mach 1921, pp. VIII-IX; Holton 1968, p. 231)¹⁸.

Nel suo «pellegrinaggio filosofico», Einstein passò dal giovanile entusiasmo nei confronti del progetto intellettuale di Mach alla posizione più marcatamente razionalista della maturità (Holton 1968, pp. 219 e 226; Kuhn 1962 (2001), pp. 64-65). Ciò che in letteratura viene chiamato

¹⁷ Qui è in gioco un punto cruciale dell'impresa intellettuale di Mach. Il suo obiettivo era più semplice di quello al quale Planck lo invitava provocatoriamente a cimentarsi: una chiarificazione dei fondamenti della scienza piuttosto che una scienza basata su diversi fondamenti. Mai Mach ha voluto o saputo proporre teorie alternative per la meccanica, la teoria del calore o le teorie elettromagnetiche, come sottolineato dal fisico e filosofo Philipp Frank (Frank 1941, p. 37).

¹⁸ Sebbene la prefazione all'*Ottica* di Mach fosse datata 1913, sono stati sollevati dubbi sulla autenticità di quel testo, ed è stata formulata l'ipotesi di una interpolazione da parte del figlio Ludwig. In tale prefazione, Mach rilevava il carattere dogmatico sia della *Teoria della relatività* sia della teoria atomica (Mach 1921, pp. VIII-IX; Debernardi 2010, p. 102).

«Principio di Mach» si riferisce sostanzialmente all'ipotesi che l'inerzia dei corpi abbia una relazione con le interazioni gravitazionali, onnipresenti e *universali*, tra i corpi stessi. In altre parole, può definirsi consistentemente l'inerzia di un corpo anche in uno spazio vuoto? Se dapprima Einstein propendeva per una stretta dipendenza tra inerzia e gravitazione, i primi coerenti modelli cosmologici suggerivano che tale legame non fosse così stringente¹⁹.

Nel 1917 Einstein si accorse che, nell'ambito della *Teoria generale della relatività*, poteva esistere inerzia anche in assenza di materia: lo spazio-tempo quadridimensionale di Minkowski e la soluzione di Schwarzschild mostravano «una struttura metrico-inerziale che non poteva discendere da una distribuzione di materia». Egli tentò di risolvere il problema introducendo un «termine cosmologico» nelle equazioni di campo ma la soluzione risultò inefficace, come mostrato dall'astronomo olandese Willem De Sitter nello stesso anno. Dopo più di un anno di ulteriori infruttuosi tentativi, Einstein abbandonò l'impresa. Anche l'astronomo Alan Friedmann nel 1922 e nel 1924, e il matematico Kurt Gödel nel 1949 mostrarono la possibilità di risolvere le equazioni di campo per mezzo di un modello di universo privo di materia. Sembra quindi che la *Teoria generale della relatività* non implichi necessariamente il *Principio di Mach*, anche se la fiducia nella sua validità aveva originariamente stimolato Einstein a costruirla (Boniolo 1988, pp. 151-152 e 156-158; Norton 1995, p. 39; Höfer 1995, p. 74)²⁰.

Se nel 1916 Einstein riteneva che un universo privo di corpi non lasciasse dietro di sé uno spazio vuoto ma semplicemente il nulla, nel 1930 egli considerava lo spazio come l'unica realtà residua dopo l'eliminazione di etere, tempo, campi e particelle. Nel 1920, in una conferenza tenuta a Leyden, avvenne il passaggio cruciale: Einstein collegava «gli effetti

¹⁹ L'espressione «Principio di Mach» apparve per la prima volta nella lingua tedesca probabilmente in Moritz Schlick nel 1915 e in Einstein con maggiore precisione nel 1918. Quest'ultimo ne aveva già discusso esplicitamente il contenuto nel 1912 (Einstein 1912, p. 39; Schlick 1915, p. 171; Barbour e Pfister 1995b, p. 2; Norton 1995, pp. 42 and 47; Hofer 1995, p. 68). Occorre anche ricordare che la questione era stata affrontata da alcuni fisici, indipendentemente gli uni dagli altri, alle soglie del Novecento, ma senza suscitare interesse nella comunità scientifica (Barbour e Pfister 1995b, pp. 1 e 3; Norton 1995, pp. 10-11, 22 e 34).

²⁰ Come ha sinteticamente scritto il fisico teorico Bruno Bertotti qualche decennio fa, Mach era riuscito a mostrare «le basi fragili e in certa misura convenzionali» della fisica di Newton, e aveva cercato di riferire le rotazioni a «punti di riferimento esterni e lontani». Ma né Mach né altri fisici dopo di lui sono mai riusciti a «formalizzare una teoria *machiana* alternativa e applicabile» (Bertotti 1988, pp. 10-11).

inerziali direttamente con la natura dello spazio», uno spazio dotato di proprietà fisiche, e quindi «chiamato nuovamente etere». Secondo Jürgen Renn, l'intuizione Machiana dell'inerzia come proprietà che emergeva dall'interazione tra i corpi aveva avuto una funzione simile a quella dell'etere nell'elettrodinamica di Lorentz: in entrambi i casi, si trattava di «una utile euristica» che aveva condotto al proprio superamento (Renn 1994, pp. 1 e 3; Renn 2012, p. 308).

8. Osservazioni conclusive

Mach può effettivamente essere considerato parte di una tradizione fenomenalista che ha radici nella prassi intellettuale di «salvare i fenomeni» tipica della filosofia naturale antica, sopravvissuta attraverso la cosiddetta *Rivoluzione scientifica* nella cultura di lingua tedesca. La ritroviamo, sotto varie forme e sfumature, nelle filosofie di Leibniz e Kant, nella *Psychophysik* di Gustav Fechner, fino alle posizioni di alcuni membri del *Circolo di Vienna* (Blackmore, J., Itagaki, R. e Tanaka, S. 2001b, pp. 2-3 e 11; Banks 2003, pp. 5-7, 37 e 157).

Secondo la testimonianza di Philipp Frank, nella Vienna di inizio ventesimo secolo era normale che gli scienziati fossero interessati alla filosofia della scienza, e fossero simpatetici con l'impresa intellettuale di Mach, anche se erano affascinati dalle teorie atomiste di Boltzmann. Il fatto è che il cosiddetto anti-atomismo di Mach consisteva di una critica ai modelli meccanici di atomo, in particolare al fatto che gli atomi erano pensati come copie microscopiche dei corpi macroscopici, cioè erano essi stessi dotati di quelle caratteristiche (quali impenetrabilità ed elasticità) che avrebbero dovuto spiegare. Analogamente al caso di Stallo e Duhem, il cosiddetto *anti-atomismo* di Mach può essere interpretato in due modi differenti: come un banale rifiuto di stare al passo con i tempi, oppure come la consapevolezza di alcune incongruenze fondazionali nella teoria atomica (Schrödinger 1995, pp. 121-122 – De Regt 2001, p. 88 –; Kuhn 1962 (2001), pp. 62-66).

Nell'opera di Mach riemerge continuamente, con forza, l'ancoraggio delle idee scientifiche e filosofiche all'esperienza comune degli esseri umani. La prassi scientifica è il prodotto di una evoluzione che mantiene salde radici nelle più arcaiche esperienze e rappresentazioni della specie umana. La continuità tra evoluzione biologica ed evoluzione culturale ci dice che non è compito della mente umana rispecchiare la realtà, dato che la mente è una componente della realtà, e contribuisce a costruirla e

trasformarla (Mach 1923c, pp. 205; Mach 1923b, p. 218; Pievani 2010, p. 13; Debernardi 2010, p. 42).

Possiamo dire che Mach non fu un positivista, e nemmeno un *neo-positivista logico*. Sebbene il cosiddetto Circolo di Vienna si fosse inizialmente costituito con la denominazione *Ernst Mach Verein*, la posizione di Mach appare distante da quella del neo-positivismo logico, se non altro perché egli aveva un obiettivo critico e riformatore relativamente alla effettiva prassi scientifica e alle sue narrazioni (Banks 2003, pp. ix, 3 e 15; Banks 2013, pp. 57, 74 e 76-7).

Che cosa resta oggi di Mach? Come osservava sinteticamente Paul Feyerabend qualche decennio fa, resta il valore di una filosofia della scienza *aperta*, «che abbandona completamente l'idea di una fondazione della conoscenza». In particolare, una filosofia della scienza che non si limita a una «ricostruzione logica» delle teorie scientifiche, che non dà per scontato che l'ultima, o spesso la penultima, teoria scientifica sia sostanzialmente indiscutibile, ma scava criticamente nella storia e nei fondamenti. Per l'approccio filosofico di Mach possiamo accettare l'etichetta di *monismo neutrale*, purché si sottolinei preventivamente il carattere storico e critico della sua indagine sulla scienza e sulla sua prassi. Questo doppio carattere ha portato Mach a guardare con sospetto qualunque tentativo di fondare una stabile visione del mondo. Secondo Mach, la conoscenza resta intrinsecamente parziale e provvisoria. E' questa una consapevolezza che si è affermata alla fine del XIX secolo, e che non sembra inutile oggi richiamare (Feyerabend 1970, pp. 173, 180 e 183; Gori 2009, p. 155).

9. Bibliografia²¹

9.1. Opere di Mach

1859, *Über elektrische Entladung und Induktion*, SW, vol. 37, pp. 477-524.

1863a, *Compendium der Physik für Mediziner*, Wien: Wilhelm Braumüller.

1863b, «Zur Theorie des Gehörorgans», SW, 2, 48, pp. 283-300.

1865, «Über die Wirkung der räumlichen Vertheilung des Lichtreizes auf die Netzhaut», SW, 2, 52, pp. 303-322 (parte prima).

1868a, «Über die physiologische Wirkung räumlich vertheilter Lichtreize», SW, 2, 52, pp. 11-19 (parte quarta).

²¹ La sigla «SW» indica gli Atti dell'Accademia di Vienna, per esteso *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-naturwissenschaftliche Classe. Wien*.

- 1868b, *Über die Definition der Masse, Repertorium für Experimental-Physik, für physikalische Technik, mathematische und astronomische Instrumentenkunde* (Carl's Repertorium), 4, pp. 355-359.
- 1872, *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit*, Prag: Calve.
- 1883a, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, Leipzig: Brockhaus.
- 1883b, Prefazione alla prima edizione; in Mach E., 1977), pp. 27-28.
- 1886, *Beiträge zur Analyse der Empfindungen*, Jena: Fisher.
- 1895, *Popular Scientific Lectures*, Chicago: Open Court.
- 1896, *Die Prinzipien der Wärmelehre. Historisch-kritisch entwickelt*, Leipzig: Barth.
- 1903a, *Analisi delle sensazioni*, Torino: Bocca.
- 1903b, Prefazione dell'autore, in Mach E., 1909, pp. X-XIII.
- 1905, «Vorwort»; in Mach E., 1906a, pp. V-IX.
- 1906a, *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung*, Leipzig: Barth.
- 1906b, «Vorwort zur zweiten Auflage»; in Mach E., 1906a, pp. X-XI.
- 1909, *I principi della meccanica esposti criticamente e storicamente nel loro sviluppo*, Roma-Milano: Società Editrice Dante Alighieri.
- 1910a, «Die Leitgedanken meiner wissenschaftlichen Erkenntnislehre und ihre Aufnahme durch die Zeitgenossen», *Physikalische Zeitschrift*, 11, pp. 599-606.
- 1910b, «Die Leitgedanken meiner wissenschaftlichen Erkenntnislehre und ihre Aufnahme durch die Zeitgenossen», *Scientia*, 7, 14, pp. 225-240.
- 1912, «Prefazione alla settima edizione»; in Mach E., 1977, pp. 31-32.
- 1921, *Die Prinzipien der physikalische Optik. Historisch und Erkenntnispsychologisch entwickelt*, Leipzig: Barth.
- 1923a, *Populär-wissenschaftliche Vorlesungen*, Leipzig: Barth.
- 1923b, «Leben und Erkennen»; in Mach E., 1923a; traduzione italiana in Mach E., 2010, pp. 215-220.
- 1923c, «Sinnliche Elemente und naturwissenschaftliche Begriffe»; in Mach E., 1923a; traduzione italiana in Mach E., 2010, pp. 195-205.
- 1977, *La Meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, Torino: Boringhieri.
- 1982, *Conoscenza ed errore*, Torino: Einaudi.
- 2008-, *Ernst Mach Studienausgabe*, Berlin: Xenomoi Verlag.
- 2010, *L'evoluzione della scienza. Nove lezioni popolari*, Milano: Melquiades.
- Mach E., Salcher P., 1887, «Photographische Fixirung der durch Projectile in der Luft eingeleiteten Vorgänge», *SW*, 2, 95, pp. 764-78.

- Mach E., Salcher P., 1889, «Über die in Pola und Meppen ballistisch-photographischen Versuche», *SW*, 2, 98, pp. 1-50.
- Mach E., Wentzel, J. 1885, «Ein Beitrag zur Mechanik der Explosionen», *SW*, 2, 92, pp. 625-38.

9.2. Altre opere citate

- Adler F., 1918a, *Ernst Machs Überwindung des mechanischen Materialismus*, Wien: Wiener Volksbuchhandlung Ignaz Brand.
- Adler F., 1918b, «Vorwort» zu Adler, F. (1918a), pp. 5-11; English translation in Blackmore, J., Itagaki R. e Tanaka S. 2001a, pp. 42-45.
- Banks E.C., 2003, *Ernst Mach's World Elements*, Dordrecht/ Boston/ London: Kluwer.
- Banks E.C., 2010, «Neutral Monism Reconsidered», *Philosophical Psychology*, 23 (2): pp. 173-187.
- Banks E.C., 2013, «Metaphysics for Positivists: Mach Versus the Vienna Circle», *Discipline Filosofiche* 23 (1), pp. 57-77.
- Barbour J.B., Pfister H. (eds.) 1995a, *Mach's Principle: From Newton's Bucket to Quantum Gravity*, Boston/ Basel/ Berlin: Birkhäuser.
- Barbour J.B., Pfister H., 1995b, «Introduction» to Barbour, J.B., and Pfister, H. (eds.) 1995a, pp. 1-5.
- Bertotti B., 1988, «Prefazione» a Boniolo G., 1988, pp. 9-12.
- Blackmore J., 1991, «Introduction» to Blackmore, J. (ed.) 1992, pp. xiii-xix.
- Blackmore J., (ed.) 1992, *Ernst Mach – A deeper Look*, Boston Studies in the Philosophy of Science, Dordrecht/ Boston/ London: Kluwer.
- Blackmore J., Itagaki, R., Tanaka S. (ed.) 2001a, *Ernst Mach's Vienna 1895-1930*, Dordrecht/ Boston/ London: Kluwer.
- Blackmore J., Itagaki R., Tanaka S., 2001b, «Introduction» to Blackmore J., Itagaki R., Tanaka S. (ed.) 2001, pp. 1-27.
- Boltzmann L., 1899, «On the Development of the Methods of theoretical Physics in recent Times»; in Boltzmann L., 1974, pp. 77-100.
- Boltzmann L., 1892, «On the methods of theoretical physics»; in Boltzmann L. 1974, pp. 5-12.
- Boltzmann L., 1974, *Theoretical Physics and Philosophical Problems*, (McGuinness B. ed.) Dordrecht/ Boston: Reidel.
- Boniolo G., 1988, *Mach e Einstein*, Roma: Armando
- Bordoni S., 2012, *Taming Complexity. Duhem's third pathway to Thermodynamics*, Urbino: Editrice Montefeltro.
- Bordoni S., 2017, *When Historiography met Epistemology. Sophisticated*

- Histories and Philosophies of Science in French-speaking Countries in the Second Half of the Nineteenth Century*, Series: History of modern science, Leiden/ Boston: Brill.
- Boutroux P., Sarton, G., 1938, «L'oeuvre de Paul Tannery», *Osiris*, 4, pp. 690-705.
- Brenner A., 2003, *Les origines françaises de la philosophie des sciences*, Paris: Presses Universitaires de France.
- Bunge M., 1966, «Mach's critique of Newton's Mechanics», *The American Journal of Physics*, 34, pp. 585-596; in Blackmore J. (ed.) 1992, pp. 243-261.
- Carnap R., 1991, «The Development of my Thinking»; in Schlipp P.A. (ed.) 1991, pp. 3-39.
- Cassirer E., 1950, *The problem of Knowledge. Philosophy, Science, and History since Hegel*, (ed. by Woglom W. H., Hendel C. W.), New Haven: Yale University Press.
- Comte A., 1830, *Cours de philosophie positive*, Tome premier, Paris: Rouen Frères.
- Cournot A. A., 1861, *Traité de l'enchaînement des idées fondamentales dans les sciences et dans l'histoire*, 2 tomes, Paris: Hachette.
- D'Elia, A. (1971), *Ernst Mach*, Firenze: La Nuova Italia.
- D'Elia, A. (1977), «Introduzione» a Mach E., 1977, pp. 7-23.
- Darrigol O., 2010, «James MacCullagh's ether: An optical route to Maxwell's equations?», *The European Physical Journal H*, pp. 133-172.
- De Regt H.W., 2001, «Erwin Schrödinger»; in Blackmore J., Itagaki R., Tanaka S. (ed.) 2001a, pp. 85-104.
- Debernardi M., 2010, «Le ragioni di una rilettura di Ernst Mach»; in Mach E., 2010, pp. 15-145.
- Duhem P., 1892a, «Notation atomique et hypothèses atomistiques», *Revue des questions scientifiques*, 31, pp. 391-454
- Duhem P., 1892b, «Quelques réflexions au sujet des théories physiques», *Revue des questions scientifiques*, 31, pp. 139-177.
- Duhem P., 1893, «Physique et métaphysique», *Revue des questions scientifiques*, 34, pp. 55-83.
- Duhem P., 1894, «Quelques réflexions au sujet de la physique expérimentale», *Revue des questions scientifiques*, 36, pp. 147-197.
- Duhem P., 1896, *Théorie thermodynamique de la viscosité, du frottement et des faux équilibres chimiques*, Paris: Hermann.
- Duhem P., 1906, *La théorie physique. Son objet et sa structure*, Paris: Chevalier & Rivière.

- Einstein A., 1912, «Gibt es eine Gravitationswirkung die der elektrodynamischen Induktionswirkung analog ist?», *Vierteljahrsschrift für gerichtliche Medizin und öffentliches Sanitätswesen der Physik*, 44, pp. 37-40.
- Einstein A., 1916a, «Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie», *Annalen der Physik*, 49, pp. 769-822.
- Einstein A., 1916b, «Ernst Mach», *Physikalische Zeitschrift*, 7, pp. 101-104.
- Feyerabend P.K., 1970, «Philosophy of Science: A Subject with a Great Past», *Minnesota Studies in Philosophy of Science*, 5 (Historical & Philosophical Perspectives of Science), pp. 172-183.
- Frank P., 1941, *Between Physics and Philosophy*, Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Galison P., 2003, *Einstein's Clocks, Poincaré's Maps – Empires of Time*, New York and London: Norton & Company.
- Garber E., 1999, *The Language of Physics*, New York: Springer.
- Gargani A., 1982, «La 'buona austriacità' di Ernst Mach»; in Mach, E., 1982, pp. VII-XXXIII.
- Gori P., 2009, «The Usefulness of Substances. Knowledge, Science and Metaphysics in Nietzsche and Mach», *Nietzsche-Studien*, 38, pp. 111-155.
- Hoefer C., 1995, «Einstein's Formulations of Mach's Principle»; in Barbour J.B., Pfister H. (eds.) 1995a, pp. 67-87.
- Hoffmann D., 1992, «Ernst Mach in Prague. First Study: Ernst Mach and the conflict of nations»; in Blackmore J. (ed.) 1992, pp. 29-46.
- Hoffmann D., Bevilacqua F., Stuewer R.H. (eds.) 1996, *The Emergence of Modern Physics*, Proceedings of a Conference held at Berlin in 1995, Pavia: Università degli Studi di Pavia.
- Höfler A., 1900a, *Immanuel Kant. Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft. Mit Neu Herausgegeben mit einem Nachwort: Studien zur gegenwärtigen Philosophie der Mechanik*, Leipzig: Pfeffer.
- Höfler A., 1900b, *Studien zur gegenwärtigen Philosophie der Mechanik*; in Höfler A., 1900a, pp. 10-164.
- Holton G., 1968, «Mach, Einstein, and the search for reality», *Daedalus*, Spring, pp. 636-673; in Holton G., 1973, pp. 219-259.
- Holton G., 1973, *Thematic Origins of Scientific Thought. Kepler to Einstein*, Cambridge Massachusetts: Harvard University Press.
- Howard D., 1990, «Einstein and Duhem», *Synthese*, 83, pp. 363-384.
- Imai M., 2001, «Musil between Mach and Stumpf»; in Blackmore J., Itagaki R., Tanaka, S. (ed.) 2001a, pp. 187-209.
- Jungnickel C., McCormmach R., 2017, *The Second Physicist. On the*

- History of Theoretical Physics in Germany*, Switzerland: Springer.
- Kragh H., 1996, «The New Rays and the Failed Anti-Materialistic Revolution»; in Hoffmann D., Bevilacqua F., Stuewer R.H. (eds.) 1996, pp 61-77.
- Kuhn T., 1962, «Transcript of a Tape-recorded Interview (16 July 1962)», *Archives for the History of Quantum Physics*, Niels Bohr Library, American Institute of physics, College Park, Maryland USA; parzialmente riprodotto in Blackmore J., Itagaki R., Tanaka S. (ed.) 2001a, pp. 61-66.
- Lacki J., 2007, «Les Principes de la Mécanique de Heinrich Hertz: une prélude à l'axiomatique»; in Pont J.C., Freland L., Padovani F., Slavinskaia L. (eds.) 2007, pp. 241-62.
- Lehner C., Renn J., Schemmel M. (eds.) 2012, *Einstein and the Changing Worldviews of Physics*, Einstein Studies 12, New York/ Dordrecht/ Heidelberg/ London: Springer.
- Maiocchi R., 1985, *Chimica e filosofia – Scienze, epistemologia, storia e religione nell'opera di Pierre Duhem*, Firenze: La Nuova Italia.
- Maiocchi R., 1990, «Pierre Duhem's The aim and structure of physical theory: a book against conventionalism», *Synthese*, 83, pp. 385-400.
- McCormmach R., Jungnickel C. 1986, *Intellectual Mastery of Nature*, 2 vols., Chicago and London: The University of Chicago Press.
- McCormmach R., Jungnickel C. 2017, *The Second Physicist*, Chicago and London: The University of Chicago Press.
- Merz J.T., 1912, *A History of European Thought in the Nineteenth Century*, W. Blackwood and Sons, vol. II, Edinburgh/London.
- Neurath O., 1916, «Zur Klassifikation von Hypothesensystemen», *Jahrb. D. phil. Gesell. A. d. Univ. Wien. GpmS*, pp. 85-101; in Neurath O., 1983, pp. 13-31.
- Neurath O., 1983, *Philosophical Papers 1913-1946*, (Cohen R.S., Neurath M. eds.), Dordrecht, Boston, and Lancaster: Reidel.
- Newton I., 1989, *Principi matematici della filosofia naturale*, Torino: UTET.
- Norton J.D., 1995, «Mach's Principle before Einstein»; in Barbour J.B., Pfister, H. (eds.) 1995a, pp. 9-55.
- Ostwald W., 1896, «Zur Energetik», *Annalen der Physik und Chemie*, 58, pp. 154-167.
- Pievani T., 2010, «Prefazione» a Mach E., 2010, pp. 7-13.
- Planck M., 1909, *Die Einheit des physikalischen Weltbildes*, Leipzig: Hirzel.
- Planck M., 1910, «Zur Mach'schen Theorie der Physikalischen Erkenntnis.

- Eine Erwiderung», *Physikalische Zeitschrift*, 11, pp. 1186-1190.
- Planck M., 1964, *La conoscenza del mondo fisico*, Torino: Boringhieri.
- Pojman, P. (2009), Ernst Mach, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <https://plato.stanford.edu/entries/ernst-mach/>, (accesso 22/08/2017).
- Pont J-C., Freland L., Padovani F., Slavinskaia L. (eds.) 2007, *Pour comprendre le XIX^e. Histoire et philosophie des sciences à la fin du siècle*, Firenze: Olschki.
- Popper K. R., 1969), *Conjectures and Refutations*, London: Routledge and Kegan Paul.
- Rankine W. J. M., 1851, «On the Centrifugal Theory of Elasticity and its Connection with the Theory of Heat», in Rankine W.J.M., 1881, pp. 49-66.
- Rankine W. J. M., 1853a, «On the Mechanical Action of Heat», Section VI; in Rankine W.J.M., 1881, pp. 310-38.
- Rankine W. J. M., 1853b, « On the General Law of the Transformation of Energy»; in Rankine W.J.M., 1881, pp. 203-208.
- Rankine W. J. M., 1855, *Outlines of the Science of Energetics*; in Rankine W. J. M., 1881, pp. 209-228.
- Rankine W. J. M., 1881, *Miscellaneous Scientific Papers*, London: Griffin.
- Renn J., 1994, «The Third Way to General Relativity. Einstein and Mach in Context», Berlin: *Max Planck Institute for the History of Science, Preprint 9*.
- Renn J. (ed.) 2005, *Albert Einstein chief engineer of the universe – One hundred authors for Einstein*, Berlin: Wiley/ MPIWG.
- Renn J., 2012, *Sulle spalle di giganti e nani*, Torino: Bollati Boringhieri.
- Renn J., Rauchhaupt, U., 2005, «In the Laboratory of Knowledge»; in Renn J. (ed.) 2005, pp. 26-33.
- Russell B., 1903, *The Principles of Mathematics*, Cambridge: University Press.
- Schlick M., 1915, «Die philosophische Bedeutung des Relativitätsprinzips», *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik*, 159, pp. 164-171.
- Schlipp P. A. (ed.) 1991, *The Philosophy of Rudolf Carnap*, La Salle: Open Court.
- Schrödinger E., 1995, *The Interpretation of Quantum Mechanics: Dublin Seminars 1949-1955 and Other Unpublished Essays*, (Bitbol M., ed.), Woodbridge: Ox Bow Press.
- Stallo J. B., 1882, *The concepts and theories of modern physics*, New York: Appleton.
- Stöltzner M., 2001, «Otto Neurath 1913-1915»; in Blackmore J., Itagaki R., Tanaka, S. (ed.) 2001a, pp. 105-122.

- Vailati G., 1909, «Prefazione alla traduzione italiana»; in Mach E., 1909, pp. VI-IX.
- Visser H., 2001, «Wittgenstein's Machist Sources»; in Blackmore J., Itagaki R., Tanaka, S. (ed.) 2001a, pp. 139-158.
- Wolters G., 2012, «Mach and Einstein, or, Clearing Troubled Waters in the History of Science»; in Lehner C., Renn J., Schemmel M. (eds.) 2012, pp. 39-57.

AphEx.it è un periodico elettronico, registrazione n° ISSN 2036-9972. Il copyright degli articoli è libero. Chiunque può riprodurli. Unica condizione: mettere in evidenza che il testo riprodotto è tratto da www.aphex.it

Condizioni per riprodurre i materiali --> Tutti i materiali, i dati e le informazioni pubblicati all'interno di questo sito web sono "no copyright", nel senso che possono essere riprodotti, modificati, distribuiti, trasmessi, ripubblicati o in altro modo utilizzati, in tutto o in parte, senza il preventivo consenso di AphEx.it, a condizione che tali utilizzazioni avvengano per finalità di uso personale, studio, ricerca o comunque non commerciali e che sia citata la fonte attraverso la seguente dicitura, impressa in caratteri ben visibili: "www.aphex.it". Ove i materiali, dati o informazioni siano utilizzati in forma digitale, la citazione della fonte dovrà essere effettuata in modo da consentire un collegamento ipertestuale (link) alla home page www.aphex.it o alla pagina dalla quale i materiali, dati o informazioni sono tratti. In ogni caso, dell'avvenuta riproduzione, in forma analogica o digitale, dei materiali tratti da www.aphex.it dovrà essere data tempestiva comunicazione al seguente indirizzo (redazione@aphex.it), allegando, laddove possibile, copia elettronica dell'articolo in cui i materiali sono stati riprodotti.

In caso di citazione su materiale cartaceo è possibile citare il materiale pubblicato su AphEx.it come una rivista cartacea, indicando il numero in cui è stato pubblicato l'articolo e l'anno di pubblicazione riportato anche nell'intestazione del pdf. Esempio: Autore, *Titolo*, <<www.aphex.it>>, 1 (2010).
