



Stefano Bordoni ✉
stefano.bordoni@gmail.com
Università di Bologna



Laureato in Fisica presso l'Università di Bologna, ha successivamente ottenuto tre Ph.D. rispettivamente in Storia della Scienza, Antropologia e Epistemologia della complessità e Filosofia. Ha conseguito l'abilitazione a professore associato per Logica, Filosofia e Storia della Scienza e insegnato presso le Università di Pavia, Udine, Urbino e Bologna. Tra le sue numerose pubblicazioni, ricordiamo *When Historiography met Epistemology, Sophisticated Histories and Philosophies of Science in French-speaking Countries in the Second Half of the Nineteenth Century* (Brill, 2017) e *Taming Complexity. Duhem's third pathway to Thermodynamics* (Editrice Montefeltro, 2012).

Dalla termodinamica ALLA TRADIZIONE FILOSOFICA

LE RICERCHE DI **Pierre Duhem** TRA IL 1891 E IL 1896

di Stefano Bordoni

Pierre Duhem è conosciuto e tuttora studiato come filosofo della scienza e storico della scienza: alcune sue tesi epistemologiche e storiografiche infatti sono state lungamente dibattute nel corso del Novecento. Egli era tuttavia un fisico teorico che ha dato importanti contributi alla Fisica e alla Chimica [1]. Le sue ricerche storiche e filosofiche emersero dalla sua prassi scientifica, in particolare dalla necessità di chiarire metodi e obiettivi della effettiva, quotidiana pratica scientifica. Duhem trovò nella termodinamica un quadro teorico unificante per la Fisica e la Chimica. Nello stesso tempo, egli riconobbe nella meccanica analitica un linguaggio formale assai generale che poteva essere esteso oltre i confini della meccanica. Tentò di costruire una teoria generale che integrasse la base concettuale della

termodinamica con l'apparato fisico-matematico della meccanica analitica. La teoria generale poteva anche descrivere fenomeni irreversibili quali processi dissipativi, deformazioni permanenti (isteresi) e brusche trasformazioni di energia o esplosioni. Per qualificare tale impresa teorica, usò il termine *Energetica*, che era già stato introdotto dall'ingegnere scozzese William Macquorn Rankine nel 1855.

Alcuni cenni al panorama materiale e intellettuale di fine Ottocento serviranno a contestualizzare il processo di sistematizzazione della termodinamica e il contributo di Duhem e ci introdurranno alle ricerche teoriche che Duhem intraprese tra il 1891 e il 1896. Vedremo infine come queste ricerche furono seguite da acute riflessioni sul metodo scientifico e da originali ricostruzioni storiche.

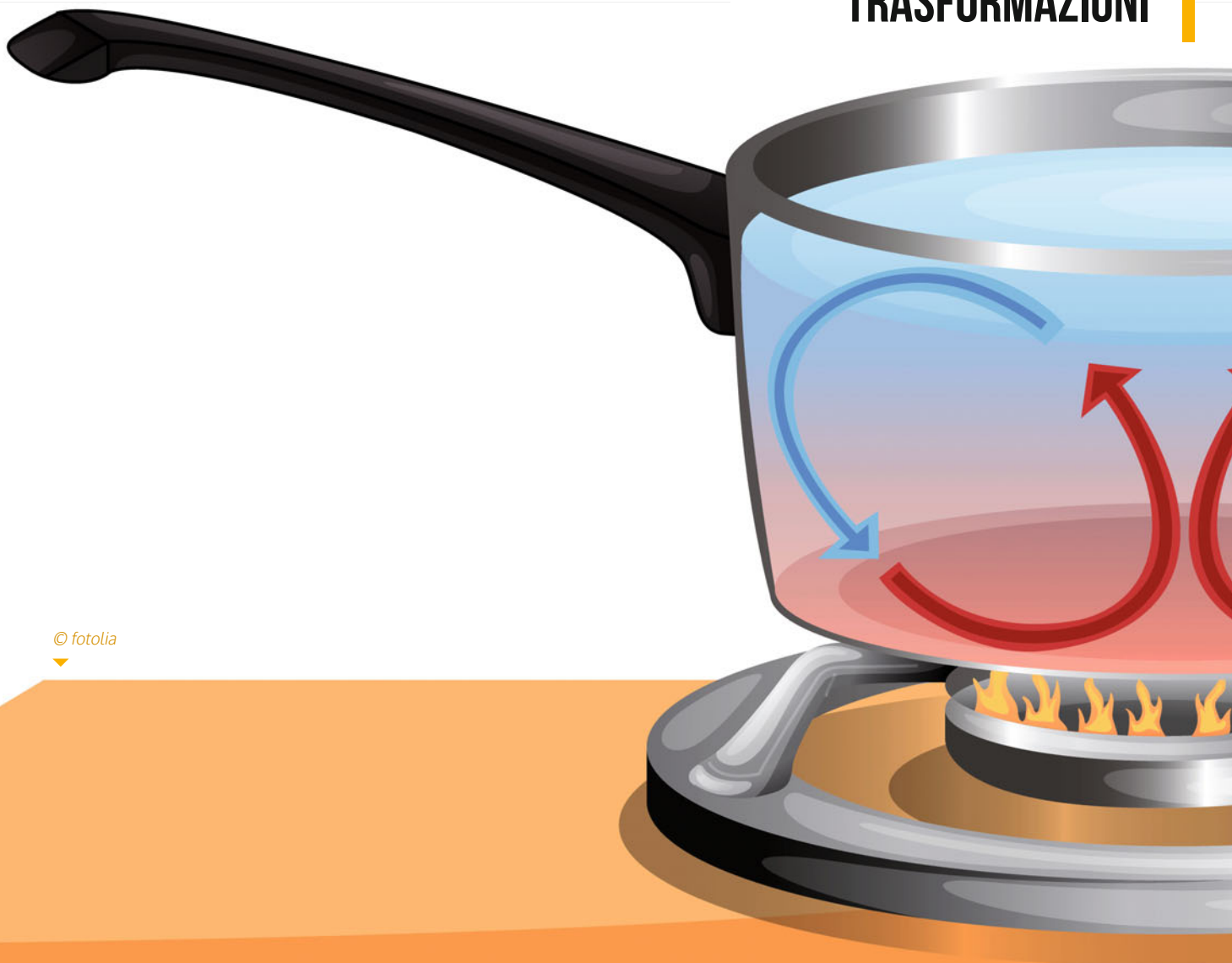
IL PANORAMA DI FINE OTTOCENTO

Duhem nacque nel 1861 e visse in Francia in un periodo caratterizzato da grandi trasformazioni: la guerra contro la Prussia e gli stati tedeschi, la sconfitta, la sanguinosa insurrezione della Comune, la successiva repressione, il collasso del Secondo Impero, la nascita della Terza Repubblica e l'egemonia culturale del positivismo. Negli ultimi decenni dell'Ottocento, per la prima volta nella storia della scienza moderna, lo sviluppo teorico condusse alla diffusione di tecnologie che modificarono profondamente la società. La cosiddetta rivoluzione scientifica aveva modificato il panorama intellettuale dell'Europa, ma non

aveva condotto a quei cambiamenti materiali vagheggiati da Francis Bacon. Nell'Ottocento, la Chimica, e successivamente la Fisica, furono in grado di produrre reali benefici nella vita quotidiana. In particolare le tecnologie elettriche contribuirono a cambiare le città e le abitazioni tramite la distribuzione dell'energia elettrica e la proliferazione delle linee telegrafiche [Galison 2003, pp. 174-80]. Le nuove tecnologie elettriche offrivano una energia pulita e facilmente trasportabile su lunghe distanze. Le tecnologie in generale, incluse quelle connesse alle macchine termodinamiche, ebbero un ruolo importante nella

retorica del progresso scientifico e nella fiducia che questo progresso potesse favorire il progresso sociale. 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 si-

**“DUHEM VISSE IN
FRANCIA IN UN PERIODO
CARATTERIZZATO
DA GRANDI
TRASFORMAZIONI”**



© fotolia

stemi filosofici. Nei sei volumi del *Cours de philosophie positive* che Auguste Comte pubblicò tra il 1830 e il 1842, troviamo codificato il nuovo orientamento scienziista [Comte 1830, pp. VII-VIII] [2]. Seppure egemone in molti ambienti, la metafisica scienziista, basata sul presunto rifiuto della metafisica, non fu ovviamente la sola corrente filosofica presente nel panorama francese. Troviamo anche l'influenza dell'epistemologia pascaliana nei dibattiti di fine Ottocento su determinismo e riduzionismo. Si può quindi comprendere che Duhem abbia trovato in Pascal un importante riferimento filosofico [Eastwood 1936, pp. 2, 5, 9, 13 e 26; Stoffel 2007, pp. 299 e 301].

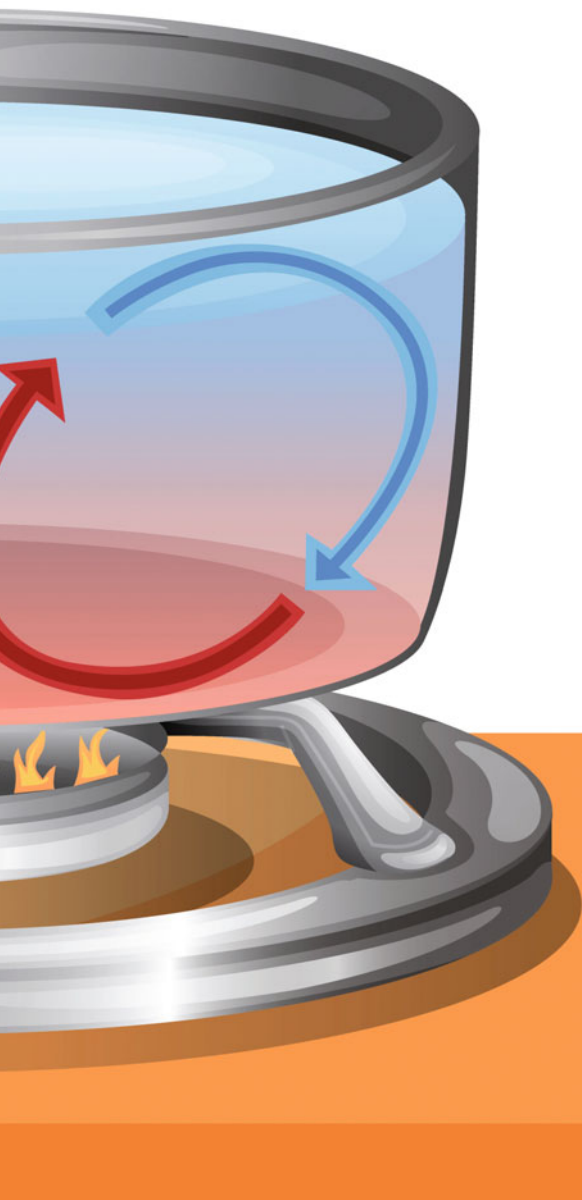
La professionalizzazione della Fisica si realizzò nella seconda metà del diciannovesimo secolo e il fenomeno più interessante di questo processo fu la nascita della Fisica teorica. Essa emerse dalla consapevolezza che l'alleanza tra "*sensate esperienze*" e "*certe dimostrazioni*" non era sufficiente per lo sviluppo di una matura prassi scientifica: era necessario costruire una rete di congetture e modelli, basati su ipotesi meta-teoriche non sempre dichiarate esplicitamente. Tra il dominio delle pratiche empiriche e il dominio delle procedure logiche e matematiche vi era uno spazio *teorico*, che conferiva un carattere di intrinseca storicità e pluralità alla prassi scientifica [Cassirer 1950, pp. 83-4; McCormmach e Jungnickel 1986, vol. 2, pp. 33, 41-3, 48, e 55-6] [3].

Nella seconda metà del secolo, elettrodinamica e termodinamica si svilupparono come due settori autonomi rispetto al tradizionale settore della meccanica, ritenuta cuore e paradigma di ogni buona teoria fisica. La termodinamica classica, così come sviluppata da Rudolf Clausius intorno alla metà del secolo, realizzava una sintesi teorica tra la teoria delle macchine termiche di Sadi Carnot e la teoria della conduzione termica di Joseph Fourier. Clausius introdusse il concetto di entropia e ne diede una interpretazione in chiave cosmologica: l'entropia dell'intero universo non poteva diminuire [Clausius 1865, pp. 31-5 e 44]. Il concetto di entropia fu variamente discusso e interpretato e la legge generale di aumento dell'entropia nei sistemi isolati fu sottoposta a critica soprattutto da parte dei fisici Britannici. Questa nuova grandezza fisica si mostrò ricca di conseguenze in vari settori della Fisica e della Chimica e inoltre ispirò dibattiti di carattere più generale, nei quali si intrecciavano contenuti scientifici, riflessioni filosofiche e dibattiti teologici [Deltete 2012, p. 123].

In realtà, le teorie di Clausius e Rankine erano costituite da due parti distinte e sostanzialmente indipendenti: una teoria macroscopica delle trasfor-

mazioni termodinamiche e modelli cinetici microscopici per la descrizione del comportamento termomeccanico dei gas. Rankine propose la prima generalizzazione del concetto di lavoro meccanico, che poteva essere esteso ai processi termici o a qualunque tipo di trasformazione fisica e chimica. La teoria cinetica dei gas e l'interpretazione cinetica microscopica del concetto di entropia furono successivamente sviluppate da James Clerk Maxwell e da Ludwig Boltzmann [Rankine 1855, pp. 210, 213-7 e 222; Maxwell 1867, pp. 43-4; Boltzmann 1877, pp. 166-9 e 216-7] [4]. Il dibattito sull'interpretazione meccanico-probabilistica dell'entropia fu assai vivace e impegnò i fisici teorici fino quasi alla fine del secolo. Henri Poincaré sottolineò come modelli meccanici e termodinamica fossero intrinsecamente incompatibili, dato che i primi erano fondati su un principio di reversibilità mentre la seconda includeva processi irreversibili [Poincaré 1893, pp. 534-7; Culverwell 1895, p. 246; Boltzmann 1895, p. 535; Brush 1976, libro 2, p. 622].

Alcuni fisici e ingegneri proposero una trattazione puramente macroscopica, fondata sulla analogia strutturale tra la termodinamica e la meccanica dei potenziali e delle equazioni di Lagrange. Nel 1869 e nel 1876 l'ingegnere francese François Massieu riuscì a derivare alcune grandezze fisiche termodinamiche e alcune proprietà termiche dei materiali da due potenziali termodinamici [Massieu 1869, p. 859, e Massieu 1876, pp. 2-3, 29 e 43]. Intorno alla metà degli anni Settanta, l'ingegnere americano Josiah Willard Gibbs sviluppò l'analogia formale tra meccanica astratta e termodinamica e introdusse tre potenziali termodinamici, due dei quali erano proporzionali ai potenziali di Massieu. Nel 1882, l'autorevole fisico e fisiologo tedesco Hermann von Helmholtz esplorò le proprietà termiche e meccaniche di uno dei potenziali di Gibbs, che egli chiamò "energia libera" [Gibbs 1875-8, pp. 55-6 e 89; Helmholtz 1882, pp. 958-9 e 868-9] [5].

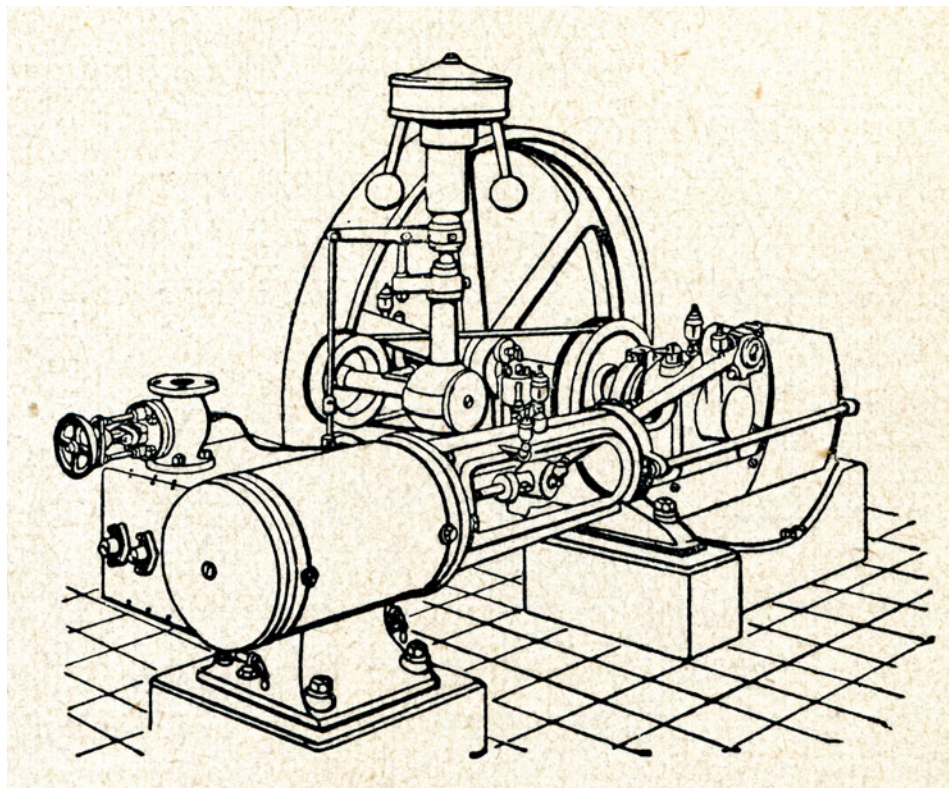


LA TEORIA GENERALE DI DUHEM

Nel 1891 Pierre Duhem pubblicò un saggio negli annali della *École Normale Supérieure* presso la quale si era brillantemente laureato e addottorato [6]. Dopo il riconoscimento esplicito dei contributi di coloro che lo avevano preceduto, in particolare Massieu, Gibbs, Helmholtz e Oettingen, egli proponeva una teoria basata su un insieme di coordinate generalizzate tra le quali figurava la temperatura. La teoria si sviluppava lungo due direttrici: la prima comportava la derivazione delle proprietà meccaniche e termiche del sistema da un potenziale, secondo lo schema già sviluppato da Helmholtz. La seconda direttrice portava a definire delle capacità termiche generalizzate, una per ogni coordinata generalizzata: una di queste, quella corrispondente alla coordinata-temperatura, corrispondeva all'ordinaria capacità termica [Duhem 1891, pp. 234 e 251].

L'anno seguente egli pubblicò un articolo, seguito da altri due con lo stesso titolo nella rivista *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*. I tre articoli, dal comune titolo "Commentaire aux Principes de la Thermodynamique", costituivano sostanzialmente un unico saggio diviso in tre parti. Nel 1894, nella terza parte del "Commentaire", Duhem partì dalle equazioni della meccanica e introdusse dei termini dissipativi generalizzati, che rappresentavano la generalizzazione degli attriti meccanici e permettevano una reinterpretazione dell'entropia in termini meccanici astratti. La generalizzazione del linguaggio e dei concetti della meccanica portava Duhem a una generalizzazione del concetto di movimento: il movimento o spostamento in senso meccanico diventava un caso particolare di un movimento inteso in senso più generale, nel senso di una qualunque trasformazione [Duhem 1894a, pp. 222-4 e 229].

La proposta appare sorprendente ed echeggia chiaramente il linguaggio e il concetto aristotelico di movimento



▲ Sistema termodinamico (motore a vapore, © fotolia)

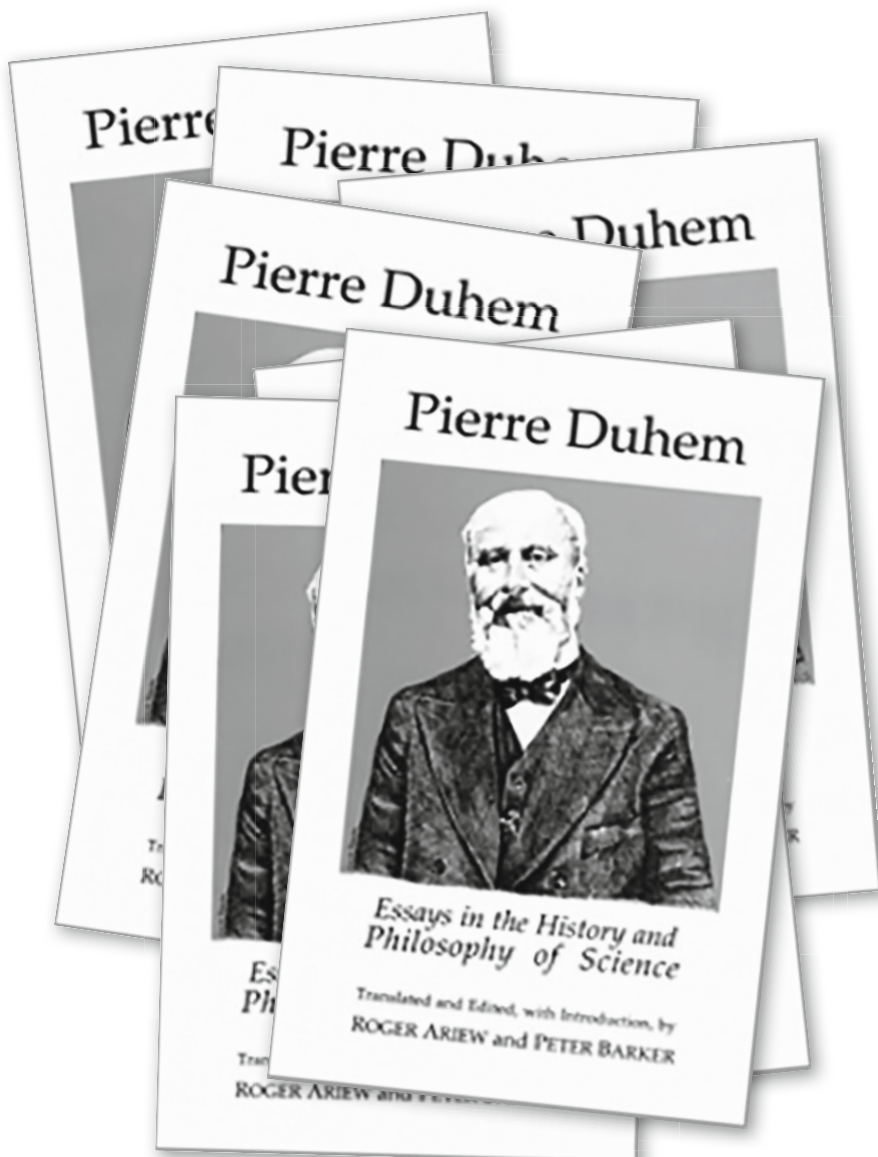
inteso come cambiamento o trasformazione: nel quadro della Filosofia naturale aristotelica, il movimento in senso fisico moderno era effettivamente un caso particolare del generale concetto di movimento. La matematizzazione della termodinamica coincideva con una generalizzazione della meccanica e questa conduceva a una imprevista connessione tra la Fisica matematica moderna e l'antica Filosofia naturale [Duhem 1894a, p. 285].

Nello stesso anno e nel successivo, Duhem pubblicò alcuni articoli in cui tentava di costruire una teoria matematica per alcuni processi irreversibili quali deformazioni permanenti o isteresi e successivamente deformazioni permanenti di tipo non meccanico, cioè isteresi chimiche e magnetiche [Duhem 1894b]. Nel frattempo,

nel 1893, aveva pubblicato un libro sui processi chimici e in particolare l'elettrochimica, in cui la Chimica teorica veniva fondata su basi termodinamiche [Duhem 1893a].

**“DUHEM PROPONEVA UNA
TEORIA BASATA SU UN
INSIEME DI COORDINATE
GENERALIZZATE TRA
LE QUALI FIGURAVA LA
TEMPERATURA”**

Nel 1896 questi diversi progetti teorici si integrarono in una teoria unificata, in cui la ricerca delle equazioni generali della termodinamica si



▲ la copertina del volume di Pierre Duhem *Essays in the History and Philosophy of Science* (Hackett Publishing, 1996) in cui compare una delle rare foto d'epoca dell'autore

saldava con la ricerca di una teoria per i fenomeni di isteresi e con la ricerca di una teoria matematica per le trasformazioni chimiche. Il lungo saggio che pubblicò mentre si trovava da poco a Bordeaux a occupare la cattedra di Fisica teorica, proponeva una teoria generalizzata dei processi irreversibili e dissipativi e l'unificazione matematica tra Fisica e Chimica su base termodinamica. Il riferimento ai "falsi equilibri chimici" indicava equilibri chimici che persistevano oltre le condizioni di equi-

librio stabilite dalla teoria classica e che improvvisamente davano luogo a reazioni chimiche esplosive. Le equazioni generalizzate di tipo lagrangiano contenevano una pluralità di termini: accanto ai termini classici apparivano termini dissipativi che corrispondevano alla generalizzazione dell'attrito statico e della viscosità. L'annullarsi di questi termini conduceva alle equazioni della meccanica classica. L'annullarsi dei tradizionali termini cinetico-meccanici o "inerziali" portava a equazioni che potevano

descrivere reazioni chimiche esplosive. Più precisamente, le equazioni che Duhem utilizzò per interpretare le reazioni chimiche contenevano tre tipi di termini: le derivate di un potenziale termodinamico e le due funzioni di dissipazione, corrispondenti alla generalizzazione dell'attrito statico (con il suo effetto di brusca transizione) e della viscosità. La meccanica classica e la Chimica rappresentavano i due poli opposti della meccanica generalizzata di Duhem. Trascurare i termini dissipativi generalizzati conduceva ai processi meccanici, mentre trascurare i termini inerziali conduceva alle reazioni chimiche [Duhem 1896a, pp. 8, 72-5, 89-91 e 105].

Dopo alcune semplificazioni e approssimazioni nell'equazione per la velocità delle reazioni chimiche, Duhem otteneva una velocità di reazione inversamente proporzionale alla viscosità generalizzata. Questo significava che, all'annullarsi della viscosità, la velocità di reazione diventava infinita. Dal punto di vista empirico, questo effetto era coerente con la presenza di una reazione chimica esplosiva. Dal punto di vista teorico, si era in presenza di una Fisica nella quale una velocità finita era garantita solo dalla presenza di effetti dissipativi. In assenza di questi, la velocità sarebbe diventata infinita. Questa Fisica era strutturalmente simile alla Fisica aristotelica, nella quale i corpi si muovono in presenza di un mezzo. Quindi Duhem si trovava di fronte una Fisica generalizzata ed equazioni del moto generalizzate, nelle quali l'esclusione di alcuni termini portava alla Fisica classica di Newton e Lagrange, mentre l'esclusione di altri termini portava a una Chimica teorica che reinterpretava la Fisica aristotelica [Duhem 1896a, pp. 128-31] [7].

Negli anni in cui Duhem aveva sviluppato la sua teoria, il fisico tedesco Georg Helm aveva proposto una *Energetica* di portata meno generale, fondata sulla universalità del concetto di energia. L'impostazione *energetista* di Helm era a sua volta leggermente diversa da quella di un

altro fisico tedesco, Wilhelm Ostwald, che comportava una più accentuata idealizzazione del concetto di energia e la sostituzione della grandezza fisica fondamentale *massa* con l'energia. Mantenendosi fedele alla concezione originaria di Rankine, Duhem aveva sviluppato una teoria matematica di vasta portata, oltre l'orizzonte teorico di Helm e Ostwald [Helm 1898, pp. 55 e 65; Ostwald 1896, pp. 159-60; Kragh e Weinger 1996, pp. 106-7; Brenner e Deltete 2004, p. 223].

RIFLESSIONI SUL METODO

La teoria fisica di Duhem aveva conseguenze importanti sul modo di considerare una teoria fisica e sul modo in cui la storia della Fisica era stata trasmessa. Nello stesso periodo in cui sviluppava la sua meccanica generalizzata, Duhem approfondiva la riflessione sulla storia e sui fondamenti e metodi della scienza. Nel 1892 pubblicò il primo articolo a carattere epistemologico sulla rivista belga

Revue des Questions Scientifiques. Duhem metteva in luce la complessità della prassi scientifica, nella quale i passaggi dai dati dell'esperienza alla predisposizione di un esperimento, da questo alla formulazione di specifiche leggi e da queste alla costruzione di più vasti sistemi teorici comportavano una pluralità di scelte possibili. Questo aspetto venne sviluppato anche in un successivo articolo nel 1893, dove egli esplorò il rapporto tra Fisica e Metafisica. Anche questo rapporto era

BIBLIOGRAFIA

- Boltzmann L. 1877, "Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht"; in Boltzmann L. 1909, II. Band, pp. 164-223.
- Boltzmann L. 1892, "On the methods of theoretical physics"; in Boltzmann L. 1974, pp. 5-12.
- Boltzmann L. 1895, "On certain Questions of the Theory of Gases", *Nature*, 51, pp. 413-15; in Boltzmann L. 1909, III. Band, pp. 535-44.
- Boltzmann L. 1899, "On the Development of the Methods of theoretical Physics in recent Times"; in Boltzmann L. 1974, pp. 77-100.
- Boltzmann L. 1909, *Wissenschaftlichen Abhandlungen*, Barth, Leipzig.
- Boltzmann L. 1974, *Theoretical Physics and Philosophical Problems*, (McGuinness B. ed.), D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland/Boston-U.S.A.
- Bordoni S. 2012, *Taming Complexity. Duhem's third pathway to Thermodynamics*, Editrice Montefeltro, Urbino.
- Brenner A. e Deltete R.J. 2004, "Essay Review", *Foundations of Chemistry*, 6, pp. 203-32.
- Brouzeng P. 1987, *Duhem 1861-1916 – Science et Providence*, Belin, Paris.
- Brush S.G. 1976, *The Kind of Motion we call Heat*, Books 1 and 2, North Holland Publishing Company, Amsterdam-New York-Oxford.
- Cassirer E. 1950, *The problem of Knowledge. Philosophy, Science, and History since Hegel*, (ed. by W.H. Woglom and C.W. Hendel), Yale University Press, New Haven.
- Clausius R. 1865, "Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie", in Clausius R. 1867, pp. 1-44.
- Clausius R. 1867, *Abhandlungen über die mechanische Wärmelehre*, zweite Abtheilung, Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig.
- Comte A. 1830, *Cours de philosophie positive*, Tome premier, Rouen Frères, Paris.
- Culverwell E.P. 1895, "Boltzmann's Minimum Theorem", *Nature*, 1895, n. 1315, vol. 51, p. 246.
- Darrigol O. e Renn J. 2003, "La nascita della meccanica statistica", *Storia della Scienza*, Istituto della Enciclopedia Italiana, pp. 496-507.
- Deltete R.J. 2012, "Planck, Ostwald, and the Second Law of thermodynamics", *HOPOS*, 2, 1, 121-46.
- Duhem P. 1891, "Sur les équations générales de la Thermodynamique", *Annales Scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure*, 3^e série, tome VIII, p. 231-66.
- Duhem P. 1892, "Quelques réflexions au sujet des théories physiques", *Revue des questions scientifiques*, 31, pp. 139-77.
- Duhem P. 1893a, *Introduction à la mécanique chimique et à la théorie des phénomènes électriques*, Ad. Hoste, Gand.
- Duhem P. 1893b, "Physique et métaphysique", *Revue des questions scientifiques*, 34, pp. 55-83.
- Duhem P. 1894a, "Commentaire aux principes de la Thermodynamique – Troisième partie", *Journal de Mathématiques pures et appliquées*, 4^e série, tome X, p. 207-86.
- Duhem P. 1894b, "Sur les déformations permanentes et l'hystérésis", *Mémoires présentées par divers savants étrangers et Mémoires couronnées par l'Académie de Belgique*, Classe des Sciences, tome LIV, 13 octobre 1894.
- Duhem P. 1894c, "Quelques réflexions au sujet de la physique expérimentale", *Revue des questions scientifiques*, 36, pp. 179-229.
- Duhem P. 1894d, "Les théories de l'optique", *Revue des deux mondes*, 123, pp. 94-125.
- Duhem P. 1896a, "Théorie thermodynamique de la viscosité, du frottement et des faux équilibres chimiques", *Mémoires de la Société des Sciences physiques et naturelles de Bordeaux*, 5^e série, tome II.
- Duhem P. 1896b, "L'évolution des théories physiques du XVII^e siècle jusqu'à nos jours", *Revue des questions scientifiques*, 40, pp. 463-99; ristampato in Duhem P. 1987, pp. 198-234.
- Duhem P. 1903, *L'évolution de la mécanique*; in Duhem 1992, pp. 1-348.
- Duhem P. 1906, *La théorie physique. Son objet et sa structure*, Chevalier & Rivière Éditeurs, Paris.

aperto a una pluralità di possibilità, nel senso che una teoria fisica non poteva in alcun modo implicare l'adesione a uno specifico sistema metafisico. L'indipendenza tra scienza e metafisica andava esplicitamente dichiarata, anche se nessuna prassi scientifica poteva dirsi perfettamente svincolata da influenze metafisiche. Nel 1894, egli chiarì il carattere non esclusivamente empirico della prassi sperimentale. La sua tesi meta-teorica più discussa e criticata, successivamente qualificata

come *olismo epistemologico*, asseriva che il controllo sperimentale non poteva confutare con precisione un singolo enunciato teorico [Duhem 1892; Duhem 1893b; Duhem 1894c].

Nel 1894 e nel 1896 egli pubblicò anche due articoli di carattere storico, il primo sulla storia dell'Ottica e il secondo sulla storia dei fondamenti delle teorie fisiche negli ultimi duecento anni. Si trattava di una storia critica, nel solco di una recente tradizione che era stata inaugurata da Antoine Augustin

Cournot e perfezionata con estrema accuratezza filologica da Paul Tannery. Negli anni successivi Duhem intensificò le sue ricerche sulla Storia della Fisica e sulla Filosofia della scienza. Gli articoli che aveva scritto tra il 1892 e il 1896 confluirono nel libro *La théorie physique, son objet, sa structure* [Duhem 1906] che lo rese famoso come filosofo della scienza. Egli ripropose una rivalutazione tutt'altro che ingenua e regressiva della Filosofia naturale di Aristotele [Duhem 1894d; Duhem 1896b].

- Duhem P. 1911, *Traité d'énergétique ou de thermodynamique générale*, 2 vols., Gauthier-Villars, Paris.
- Duhem P. 1992, *L'évolution de la mécanique – suivi de «Les théories de la chaleur»*, «Analyse de l'ouvrage de Ernst Mach: La Mécanique», Librairie philosophique J. Vrin, Paris.
- Eastwood D.M. 1936, *The Revival of Pascal - A study of his relation to French modern thought*, Clarendon Press, Oxford.
- Fraassen van B.C. 1989, *Law and Symmetry*, Oxford University Press, Oxford and New York.
- Galison P. 2003, *Einstein's Clocks, Poincaré's Maps – Empires of Time*, Norton & C, New York/London.
- Gibbs J.W. 1875-8, "On the Equilibrium of Heterogeneous Substances", *Transactions of the Connecticut Academy*; in Gibbs J.W. 1906, pp. 55-349.
- Gibbs J.W. 1906, *The Scientific Papers of J. Willard Gibbs*, Longmans, Green, and Co., London, New York, and Bombay.
- Helm G. 1898, *Die Energetik nach ihrer geschichtlichen Entwicklung*, Verlag von Veit & Comp., Leipzig.
- Helmholtz H. 1882, "Die Thermodynamik Chemischer Vorgänge", *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, (2 Febr. 1882) vol. I. pp. 22-39; in Helmholtz H. 1883, pp. 958-78.
- Helmholtz H. 1883, *Wissenschaftliche Abhandlungen*, II Band, Barth, Leipzig.
- Jaki S.L. 1984, *Uneasy Genius: the Life and Work of Pierre Duhem*, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague.
- Kragh H. 2008, "Pierre Duhem, Entropy, and Christian Faith", *Physics in Perspective*, 10, pp. 379-95.
- Kragh H. and Weininger S.J. 1996, "Sooner Silence than Confusion: The Tortuous Entry of Entropy into Chemistry", *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 27, 1, pp. 91-130.
- Maiocchi R. 1985, *Chimica e filosofia – Scienze, epistemologia, storia e religione nell'opera di Pierre Duhem*, La Nuova Italia, Firenze.
- Martin R.N.D. 1991, *PIERRE DUHEM – Philosophy and History in the Work of a Believing Physicist*, Open Court, La Salle (Illinois).
- Massieu F. 1869, "Sur les Fonctions caractéristiques des divers fluides", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* LXIX, pp. 858-62.
- Massieu F. 1876, "Mémoire sur les Fonctions caractéristiques des divers fluides et sur la théorie des vapeurs", *Mémoires des Savants étrangers* XXII, pp. 1-92.
- Maxwell J.C. 1867, "On the Dynamical Theory of Gases", *Philosophical Transactions*, 157, pp. 49-88; in Maxwell J.C. 1890, vol. 2, pp. 26-78.
- Maxwell J.C. 1890, *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, (Niven W.D. ed.), 2 vols, University Press, Cambridge
- McCormmach R. and Jungnickel C. 1986, *Intellectual Mastery of Nature*, 2 vols. The University of Chicago Press, Chicago/London.
- Müller I. 2007, *A History of Thermodynamics. The Doctrine of Energy and Entropy*, Dover, New York.
- Ostwald W. 1896, "Zur Energetik", *Annalen der Physik und Chemie*, 58, pp. 154-67.
- Paul H.W. 1968, "The Debate Over the Bankruptcy of Science in 1895", *French Historical Studies*, 5, 3, pp. 299-327.
- Picard É. 1922, "La vie et l'œuvre de Pierre Duhem", *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut de France*, 57, pp. CIII-CXLII.
- Poincaré H. 1893, "Le mécanisme et l'expérience", *Revue de Métaphysique et de Morale*, pp. 534-7.
- Prigogine I. 1947, *Etude Thermodynamique des Phénomènes Irréversibles*, Dunod, Paris/ Desoer, Liège.
- Rankine W.J.M. 1855, "Outlines of the Science of Energetics", in Rankine W.J.M. 1881, pp. 209-28.
- Rankine W.J.M. 1881, *Miscellaneous Scientific Papers*, Charles Griffin and Company, London.
- Stoffel J-F. 1996, *Pierre Duhem et ses doctorants*, Centre interfacultaire d'étude en histoire des sciences, Louvaine-la-Neuve.
- Stoffel J-F. 2002, *Le phénoménalisme problématique de Pierre Duhem*, Académie Royale de Belgique, Bruxelles.
- Stoffel J-F. 2007, "Pierre Duhem: dans le sillage de Blaise Pascal", *Revista Portuguesa de Filosofia*, 63, pp. 275-307.
- Truesdell C. 1984, *Rational Thermodynamics*, Springer-Verlag, New York/ Berlin/ Heidelberg/ Tokio.

Nei suoi testi più esplicitamente filosofici, Duhem citò frequentemente Pascal, che appare un fondamentale punto di riferimento scientifico e filosofico. L'importanza di questa influenza è stata riconosciuta da diversi studiosi, dal matematico Émile Picard nel 1922, agli storici Niall D. Martin e Jean-François Stoffel verso la fine del Novecento. Pascal aveva criticato il meccanicismo di Descartes e aveva sottolineato la necessità di una prassi teorica, sintetica e intuitiva, accanto alla formalizzazione geometrica. L'esplicito riferimento a Pascal accentuò l'isolamento intellettuale di Duhem, sia rispetto allo scientismo positivista sia rispetto al cattolicesimo di impronta neo-tomista. Pur essendo tra loro avverse, entrambe le tendenze culturali si riconoscevano in una prospettiva realista più ingenua di quella di Duhem, il quale era orientato verso un realismo critico, di tipo strutturale piuttosto che ontologico. Pascal rappresentava per Duhem la terza via tra dogmatismo scienziasta e scetticismo filosofico [Picard 1922, pp. CXXX e CXXXV-CXXXVII; Martin 1991, p. 68, 90 e 115; Stoffel 2002, p. 196 e 345] [8].

L'EREDITÀ DI DUHEM

Duhem continuò a pubblicare sulla meccanica generalizzata fino alla sua prematura morte nel 1916. Nel 1903 pubblicò una storia dei fondamenti della Fisica, nella quale le sue teorie venivano interpretate come il tentativo di includere la complessità del mondo fisico nella tradizione della Fisica matematica [Duhem 1903]. Nel 1911 pubblicò un trattato in due volumi, nel quale inserì varie applicazioni a diversi settori della Fisica e della Chimica [Duhem 1911]. La sua meccanica generalizzata non ebbe grande successo presso i fisici e i chimici, mentre trovò maggiore attenzione presso i matematici interessati alla Fisica. I chimici trovavano questa trattazione troppo formale e matematizzata, mentre i fisici si stavano concentrando sui nuovi raggi e sull'esplorazione dei processi microscopici.

NOTE

- [1] Tra le biografie intellettuali di Duhem, citiamo Jaki 1984, Maiocchi 1985, Brouzeng 1987, Martin 1991, Stoffel 2002 e Bordini 2012. La biografia di Jaki è la più corposa e dettagliata ma piuttosto agiografica. Per una ampia bibliografia su Duhem e i suoi collaboratori, si veda Stoffel 1996.
- [2] Su origini e polisemia delle espressioni *scientismo* e *positivismo*, si veda Paul H.W. 1968, p. 299, nota 2.
- [3] 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] Sulla relazione tra la teoria cinetica dei gas e i differenti modelli atomici, si veda Brush 1976, book 1, p. 204.
- [5] Per una discussione dettagliata di questa parte della Storia della Fisica, si veda Müller 2007, pp. 70, 128-9, 131-2, 147-8 e 155; Kragh e Weinger 1996, p. 92, 94-9 e 102; Kragh 2008, pp. 388 e 394 nota 38; Deltete 2012, pp. 3-4; Darrigol e Renn 2003, pp. 503 e 505.
- [6] Per informazioni di carattere biografico sul giovane Duhem, in particolare il periodo trascorso presso la *École Normale Supérieure* e le vicende connesse alle sue tesi di dottorato, si veda Brouzeng 1987 e Jaki 1984.
- [7] Per una descrizione più dettagliata della teoria generale di Duhem si può fare riferimento a Bordini 2012.
- [8] Bas van Fraassen ha messo in luce la presenza della "*sotterranea epistemologia*" di Pascal nella storia della scienza [van Fraassen 1989, p. 151]. Più recentemente, Jean François Stoffel ha sottolineato la forte influenza di Pascal su Duhem, in particolare l'importante ruolo dall'intuizione "*accanto alla certezza della ragione deduttiva*", e la ricerca di una terza via tra dogmatismo scientifico e scetticismo [Stoffel 2007, pp. 299 e 301].

“DUHEM ERA ORIENTATO VERSO UN REALISMO CRITICO, DI TIPO STRUTTURALE PIUTTOSTO CHE ONTOLOGICO”

Un riconoscimento esplicito da parte di scienziati che hanno portato contributi originali alla Fisica e alla Chimica si ebbe solo dopo la seconda guerra mondiale. Nel 1947, Ilya Prigogine sottolineava la necessità di ampliare la portata della termodinamica, in modo da includere i fenomeni irreversibili, gli stati lontani dall'equilibrio e i sistemi aperti. Egli riconobbe il ruolo svolto da Duhem nella costruzione di una termodinamica generale. Negli anni Ottanta del Novecento, il fisico-matematico e storico della meccanica Clifford A. Truesdell richiamava nuovamente il potere unificante della termodinamica di Duhem, una teoria finalmente in grado di descrivere con chiarezza i reali processi naturali, cioè i processi irreversibili. Truesdell vedeva in Duhem il padre della moderna termodinamica razionale [Prigogine 1947, pp. 1-5 e 95-9; Truesdell 1984, pp. 2, 7, 24-5, 38, 40-1 e 45]. Sebbene le recenti teorie si affidino a più sofisticati apparati concettuali e matematici, la teoria di Duhem si è rivelata strutturalmente feconda sui tempi lunghi della storia della scienza. ■

Duhem il padre della moderna termodinamica razionale [Prigogine 1947, pp. 1-5 e 95-9; Truesdell 1984, pp. 2, 7, 24-5, 38, 40-1 e 45]. Sebbene le recenti teorie si affidino a più sofisticati apparati concettuali e matematici, la teoria di Duhem si è rivelata strutturalmente feconda sui tempi lunghi della storia della scienza. ■