

SEZIONE II

La nascita dell'elettromagnetismo classico: un'analisi storico-epistemologica

Michelangelo De Maria

1 Approccio meccanicistico e dinamico alla scienza

1.1 Meccanicismo in fisica matematica

La rivoluzione scientifica del XVII secolo è spesso presentata come una "meccanizzazione dell'immagine del mondo".

Nella storia del pensiero, e in particolare del pensiero scientifico, è possibile mettere in luce un conflitto tra l'approccio "dinamistico" e uno "meccanicistico", che assume varie forme in differenti contesti e differenti epoche. In filosofia il contrasto è tra Aristotelici e Platonici: Platone procede dalla mente al mondo esterno, Aristotele procede dal mondo esterno alla mente. Platonismo/aristotelismo o realismo/nominalismo sono, per Gustav Jung, "gli opposti tra cui la scienza ha oscillato". L'utilizzazione di queste categorie in modo universale appare assai problematica perché può portare a difficoltà e inconsistenze, ma si tratta di una dicotomia fondamentale che risulterà estremamente utile per comprendere lo sviluppo della scienza del XIX secolo alla luce di contrasto tra una visione del mondo "meccanicistica" e una "dinamistica".

Una prima differenza tra i due approcci è la seguente: la "filosofia dinamistica" della natura considera le "forze" come "qualità primarie" e rifiuta ogni ipotesi non verificabile empiricamente sulla struttura microscopica "nascosta" del mondo naturale, mentre la "filosofia meccanicistica" è fondata su ipotesi microscopiche specifiche, come l'esistenza degli atomi e di loro particolari configurazioni geometriche e spaziali che determinano le proprietà macroscopiche dei corpi.

Alla luce di quanto detto forniamo delle esemplificazioni relative ad alcuni filosofi naturali dei secoli XVI, XVII e XVIII.

GALILEO GALILEI [1564–1642] e FRANCIS BACON [1561–1626]. In generale vengono considerati filosofi meccanicisti, secondo una classificazione che può essere fuorviante, perché sono in parte riconducibili alla filosofia dinamistica, rifuggendo entrambi da ipotesi meccanicistiche¹.

RENÉ DESCARTES [1596–1650]². La sua concezione del mondo costituisce sotto molti aspetti un prototipo di “teoria meccanicistica”. Il mondo di Descartes è costituito da un *plenum* di atomi duri e impenetrabili che interagiscono esclusivamente attraverso azioni di contatto. Tutte le differenze tra i fenomeni naturali, sia organici che inorganici, derivano da combinazioni e differenze tra forme, dimensioni e moti di questi atomi.

CHRISTIAAN HUYGENS [1629–1695]. Era un notevolissimo matematico e sperimentatore. Sviluppò un’ipotesi relativa alla gravitazione terrestre in cui la gravitazione era attribuita all’esistenza di un etere costituito di particelle rotanti attorno alla terra ad alta velocità e in o-

¹ Galilei affermò in molte occasioni che la materia è composta di particelle estremamente piccole, ma nei *Discorsi* sostenne anche che i liquidi devono consistere di particelle indivisibili che formano il continuum della materia, e osservando anche che, non potendo tali particelle essere ottenute attraverso successive suddivisioni di corpi finiti, queste finiscono con l’assumere un carattere più matematico che fisico. Francis Bacon, pur mantenendo un atteggiamento ambiguo verso il carattere particellare della materia, riteneva che gli esperimenti e l’osservazione empirica fossero necessari per sostenere tale convinzione, e che il moto delle particelle fosse il primo responsabile delle proprietà fisiche di quest’ultima, come appare dalle lunghe disquisizioni sulle cause del calore contenute nel suo *Novum Organum* [1620].

² Investigò in tutte le discipline scientifiche, applicando il metodo matematico formale di cui era sostenitore, e ricercando sempre una spiegazione rigorosamente meccanicistica della natura (primi due libri del *Discorso sul metodo*, 1637). Con la riduzione di tutti i fenomeni naturali a due soli parametri, materia e movimento locale, sotto ipotesi meccanicistiche, Cartesio intendeva conferire unità e sistematicità all’universo. La condanna di Galilei lo indusse a non pubblicare *Il Trattato del Mondo e della luce*, opera in cui presenta, seppure in via del tutto ipotetica e in contrasto col finalismo tradizionale, la possibile formazione meccanica del cosmo, a partire da uno stato iniziale di caos (particelle di materia dalle forme e grandezze diverse, agitate da movimenti nelle direzioni più diverse), unicamente in virtù delle leggi generali della natura: principio di inerzia, leggi della comunicazione del movimento, ecc. Nell’asserire che la somma di tutti i movimenti di queste particelle non variava nell’universo, Descartes formula scientificamente per la prima volta il principio di conservazione della quantità di moto.

gni direzione. Modificò anche l'ipotesi cartesiana sulla natura della luce, sostituendo all'idea della pressione dell'etere ottico, quella di un moto di onde nell'etere e, per spiegare l'origine di tali onde, ricorse all'analogia con le onde acustiche.³ La sua teoria non rendeva conto del colore, ma spiegava la doppia rifrazione scoperta nei cristalli di calcite da E. Bartholin nel 1669.⁴ Huygens era convinto che il concetto di forza potesse essere reso intellegibile soltanto interpretandolo in termini di una pressione dell'etere: così, per spiegare il magnetismo, ricorse ad un nuovo tipo di etere. Huygens fu, a Parigi, il mentore del giovane Leibniz, facendo entrambi parte di un gruppo strettamente legato all'Académie Royale des Sciences. Tuttavia, per quanto riguarda la matematica, Leibniz era, già a quel tempo, di gran lunga superiore al suo maestro.

ISAAC NEWTON [1642–1727]. La sua immagine dominante per i filosofi naturali dell'Illuminismo come Laplace, sarà certamente quella di un filosofo meccanicista, ma nei suoi scritti si possono ritrovare molti elementi riconducibili alla filosofia dinamistica. Dopo che Newton ebbe introdotto il concetto di forza in modo rigoroso e mate-

³ *Traité de la lumière* [1690]. Tra i fondatori della meccanica, Huygens studiò il moto di un punto materiale nei sistemi rigidi, introdusse la nozione di momento di inerzia ed espose i principi di conservazione della "vis viva", la moderna energia cinetica, e della quantità di moto, oltre ad una teoria sul pendolo semplice e composto [*Horologium oscillatorium*, 1673], avvalendosi della sua esperienza parigina di costruttore di orologi.

⁴ Il suo *Traité de la lumière*, scritto nel 1678, fu pubblicato solo nel 1690. La *Dioptrique* apparve nel 1704. Huygens rifletté a lungo sulla propagazione rettilinea della luce e si convinse che la luce non poteva essere costituita di corpuscoli materiali, in quanto questi si sarebbero scompaginati intersecandosi a vicenda o attraversando la materia solida. Paragonando la materia al suono (come già Hooke e Newton avevano supposto), Huygens avanzò l'ipotesi che la luce consistesse di onde, ossia di vibrazioni rapidissime prodotte dalle particelle di materia. Poiché queste onde si propagano anche nel vuoto, deve esistere un mezzo estremamente sottile (l'etere) che ne costituisca il supporto. Le proprietà di questo etere sono esclusivamente meccaniche: è perfettamente duro ed elastico ma anche sottile al punto da penetrare in tutti i corpi; non è però percepibile mediante i nostri sensi. Un centro luminoso propaga attorno a sé onde concentriche, costituite dal moto delle particelle d'etere, le quali, a loro volta, emanano altre onde meno ampie, e così via. Si forma, in tal modo, un fronte d'onda composto dall'inviluppo di tutte le onde prodotte. Con questa teoria, Huygens riuscì a spiegare la riflessione, la rifrazione e, in parte, anche la doppia rifrazione della luce; non prese in considerazione, invece, la diffrazione.

maticamente definito, l'oggetto di discussione tra meccanicisti e dinamisti diventò: le forze debbono essere trattate come "qualità primarie" inerenti o proprie di una materia "attiva" oppure debbono essere considerate come qualcosa di sovrapposto ad una materia inerte e passiva, come un'ulteriore componente dell'"armamentario" meccanico? Cioè le forze devono essere assunte come concetti "elementari", cioè come nozioni primitive non suscettibili di ulteriori spiegazioni, oppure devono essere spiegate a loro volta in termini di un mezzo etereo. A sua volta l'etere poteva essere trattato in modo dinamistico, come una "matrice" o un contenitore di forze, o meccanicistico, come un fluido materiale composto di atomi impenetrabili. Sul problema della forza lo stesso Newton fu riluttante ad avanzare ipotesi meccanicistiche, e assunse un atteggiamento neutrale. A proposito della gravità, per esempio, non si spinse molto al di là della constatazione che questa forza esiste (*Hypotheses non fingo*) e ne attribuisce la "causa" ad una manifestazione della Divina Presenza. Newton tuttavia non fu immune al fascino delle "speculations", congetture e ipotesi che giocarono spesso un ruolo euristico cruciale nelle sue ricerche. Nell'*Opticks, or a Treatise of the Reflexions, Inflexions and Colours of Light* (1707), egli avanzò per esempio congetture sulla natura corpuscolare della luce e della materia, ma sostenne una concezione dell'etere sostanzialmente dinamistica. In realtà anche la sua stessa concezione delle forze non fu strettamente meccanicistica, nel senso che non le concepì mai né come riconducibili esclusivamente ad azioni di contatto, né accettò mai il principio dell'azione a distanza come principio universale. Tuttavia molte delle congetture avanzate nelle "Queries" dell'*Opticks* si prestavano ad un'interpretazione meccanicistica, che divenne presto, assieme alla filosofia della natura di John Locke [1632–1704]⁵, il fondamento della scienza dell'Illuminismo e della filosofia naturale "newtoniana" del XVIII secolo.

I vangeli dell'Illuminismo furono i *Principia* (in particolare la sezione sulla gravità) e le "Queries" dell'*Opticks*, ma anche l'*Essay* di John Locke, che esprimeva una concezione coerentemente meccanicistica, ebbe un ruolo decisamente centrale. Per Locke il mondo naturale era composto di corpuscoli impercettibili, caratterizzati da qualità meccaniche "primarie", come solidità, estensione e moto. Ogni spie-

⁵ J. Locke, *Essay concerning Human Understanding*, 1690.

gazione causale doveva essere ottenuta mediante relazioni geometriche tra corpuscoli e tutte le forze dovevano essere ricondotte a forze di tipo impulsivo. Nella sua opera *Essay concerning Human Understanding* (1690) Locke attribuiva l'origine di tutte le nostre idee di spazio e tempo, di numero, ma anche di bene e male, alla nostra esperienza del mondo esterno: "Da dove la nostra mente riceve tutti i materiali della ragione e della conoscenza? A ciò io rispondo con una parola: dall'esperienza; in essa ha fondamento e da essa in ultimo deriva tutta la nostra conoscenza." In Francia la filosofia di Locke sarà sviluppata da Étienne Bonnot de Condillac [1715–1780]; il "sensismo" di entrambi sarà la filosofia dominante per tutto il XVIII e l'inizio del XIX secolo in Francia e in Inghilterra. Influenzati sia dal Newton della legge di gravitazione e delle "Queries" che da Locke, i cosiddetti filosofi naturali "newtoniani" dell'Illuminismo costruirono le loro teorie o in termini di fluidi imponderabili o di sistemi di particelle — atomi estesi — connessi da forze "passive" (cioè non inerenti alle particelle) di attrazione e di repulsione a distanza.

La filosofia meccanicistica del XVIII secolo si sviluppò secondo tre fili intrecciati:

- a) Teorie legate alle concezioni cartesiane, sostanzialmente di scarsa importanza, anche se l'enfasi data da Cartesio all'esistenza di un *plenum* di atomi "duri" ebbe un peso notevole nello sviluppo da parte di Leonhard Euler della fisica matematica dei mezzi continui, che giocherà un ruolo centrale per lo sviluppo successivo della teoria dei campi.
- b) Teorie dei fluidi imponderabili (calorico, fluidi elettrici, flogisto).
- c) Teorie derivate da Newton e da Locke, che consideravano sistemi di particelle, vuoto e forze a distanza tra particelle nel vuoto.

I due principali artefici del successo del paradigma meccanicistico furono due scienziati francesi, ANTOINE-LAURENT LAVOISIER [1743–1794]⁶ e PIERRE SIMON DE LAPLACE [1749–1827].

⁶ Membro giovanissimo dell'Accademia delle Scienze, partecipò nel 1790 alla commissione per la definizione del sistema metrico decimale. Introducendo nell'analisi chimica l'uso sistematico della bilancia, definì la materia in base alla proprietà di essere pesante ed enunciò la legge di conservazione della massa, giungendo alla definizione moderna di elemento. Il calorico occupa un posto centrale nella sua tavola di quelle sostanze elementari "che appartenevano a tutti i regni della

Lavoisier ebbe un approccio completamente meccanicistico alla chimica, concentrandosi esclusivamente su pesi e densità delle sostanze, piuttosto che sulle forze di legame delle combinazioni chimiche, entità non trattabili meccanicamente. Sarà JOHN DALTON [1766–1844], all'inizio del XIX secolo a sviluppare, basandosi sull'opera di Lavoisier, la teoria atomica degli elementi chimici su cui è basata la chimica moderna.

PIERRE SIMON DE LAPLACE [1749–1827]⁷. Laplace scrisse nel 1796, il trattato astronomico divulgativo *Exposition du Système du Monde*, nel quale avanza l'ipotesi nebulare secondo cui l'origine del sistema solare è dovuta al raffreddamento e alla contrazione di una nebulosa gassosa primitiva. In questa opera Laplace sviluppa con notevole successo, all'interno del paradigma newtoniano, il programma di riduzione di tutta la fisica a corpuscoli legati da forze di tipo meccanico (*riduzionismo meccanicistico*). Il cardine del suo programma è costituito infatti dall'ipotesi di molecole di dimensioni finite, che rappresentano, in accordo con le concezioni chimiche di Lavoisier, i più piccoli elementi in cui la materia può essere suddivisa senza perdere le sue particolari proprietà chimiche. La metodologia fisica adottata da Laplace nel suo trattato, consisteva nel partire da un sistema, del tutto ipotetico, di molecole e di forze intermolecolari centrali a distanza, postulato fondamentale che caratterizza la concezione meccanicistica del mondo

Natura ed erano da considerare come elementi costitutivi di tutti i corpi" [*Trattato elementare di chimica*, 1789]. Le altre sostanze elementari universali dello stesso tipo erano la luce, l'ossigeno, l'azoto (nitrogeno) e l'idrogeno. Con Laplace effettuò le prime misure del calore specifico di alcune sostanze [1780].

⁷ Di 13 anni più giovane di Lagrange, figlio di contadini, a 19 anni va a Parigi e diventa professore all'École Militaire, su proposta di d'Alembert; nel 1773 diventa membro dell'Accademia delle Scienze. Inizia i suoi studi sulla stabilità del sistema solare e nel 1780 inventa con Lavoisier il calorimetro a ghiaccio, insieme compiono le prime misure sul calore specifico delle sostanze e dimostrano che la respirazione è una forma di combustione. Nel 1796 scrisse il trattato astronomico divulgativo *Exposition du Système du monde*, all'interno del sistema newtoniano. Ministro degli interni con Napoleone, poi vicepresidente del Senato [1803], fece parte della commissione per la scelta del sistema metrico decimale. Tra i fondatori della teoria della probabilità nel *Saggio filosofico sulle probabilità* [1814] considerò criticamente i problemi posti dall'applicazione del calcolo probabilistico allo studio dei fenomeni naturali. In fisica stabilì la legge delle trasformazioni adiabatiche dei gas e formulò la legge dell'induzione elettromagnetica. In analisi formulò il teorema sulla legge esponenziale degli errori e contribuì allo sviluppo dell'analisi infinitesimale e algebrica.

di Laplace, per arrivare a spiegare i fenomeni macroscopici osservati mediante i metodi dell'analisi matematica: «Ho voluto stabilire che i fenomeni naturali si riducono in ultima analisi a un'azione *ad distans* da molecola a molecola, e che l'esame di queste azioni dovrebbe servire da base per la teoria matematica di questi fenomeni»⁸.

I risultati, ottenuti con un procedimento di integrazione erano da confrontare, secondo Laplace, con i dati sperimentali: se si riusciva a prevedere correttamente il comportamento osservato dei sistemi, ciò veniva interpretato come una conferma delle ipotesi di partenza. L'influenza e il prestigio di Laplace furono enormi anche grazie alla sua opera *Mécanique Celeste* [1799], che rappresentò una sistematizzazione analitica definitiva della meccanica celeste newtoniana.

La marcata tendenza verso l'astrazione e la generalizzazione della fisica matematica del XVIII secolo, che caratterizza in particolare il lavoro del matematico francese Jean-Baptiste Le Rond d'Alembert, è un processo che culmina con Joseph-Louis Lagrange.

JEAN-BAPTISTE LE ROND D'ALEMBERT [1717–1783]. Mentre per i fisici matematici meccanicisti, in particolare per gli allievi e i seguaci di Newton in Inghilterra, le leggi del moto traevano la loro validità dall'esperienza, d'Alembert tratta la teoria di Newton come un sistema matematico astratto, basato su assiomi che erano considerati veri in modo autoevidente, dimostrabili mediante la pura ragione e indipendenti da qualsiasi verifica empirica. Tuttavia nel suo *Traité de dynamique* respinse il concetto di forza in quanto “oscuro e metafisico” e come tale non suscettibile di una definizione precisa. Egli considerava la meccanica come la scienza degli effetti osservati, una cinematica, piuttosto che una dinamica, cioè uno studio delle cause del movimento⁹.

⁸ P. S. de Laplace, *Oeuvres Completes*, Parigi 1878–1912; cit. vol. 12, p. 295.

⁹ Educato nel giansenista Collège des Quatre-Nations si segnalò subito per la sua grande versatilità nel campo della matematica e delle scienze, divenendo membro dell'Académie des sciences (*Sulla rifrazione dei corpi solidi*, 1739; *Sul calcolo infinitesimale*, 1740; *Ricerche sulla precessione degli equinozi*, 1749; *Ricerche su differenti punti importanti del sistema del mondo*, 1754). Nel celebre *Discorso preliminare* per l'*Enciclopedia* [1751], manifesto programmatico del pensiero illuminista, d'Alembert tracciò, tra l'altro, un quadro organico dei rapporti tra le varie branche del sapere guidato da quell'“esprit systématique” tipico della sua ricerca di principi sempre più generali sotto i quali riunire i risultati parziali delle singole scienze, attraverso l'uso del criterio dell'esperienza e della certezza matematica. Nel *Traité de dynamique* [1743] enunciò il fondamentale principio che permette di ricondurre i problemi

JOSEPH LOUIS LAGRANGE [1736–1813]¹⁰. Nella prefazione alla sua *Mécanique analytique* [1788] Lagrange scrive: «I metodi da me utilizzati non richiedono né costruzioni né ragionamenti geometrici o meccanici: soltanto operazioni algebriche, soggette a procedimenti regolari e uniformi»¹¹. Rinunciando all'immediatezza della rappresentazione geometrica in favore di un'esposizione puramente algebrica, sviluppa un sistema di equazioni del moto del tutto generale, applicabile a qualsiasi sistema fisico¹². Lo stesso Lagrange, cosciente della loro immensa portata, le

dinamici a quelli dell'equilibrio statico. Le equazioni da risolvere diventano equazioni di un sistema all'equilibrio. La ricerca delle configurazioni di equilibrio presuppone i concetti di spostamento virtuale, cioè qualunque spostamento compatibile con i vincoli a cui il sistema è sottoposto, e di lavoro virtuale, cioè il lavoro che sarebbe compiuto dalle forze a cui è sottoposto il sistema in corrispondenza di tali spostamenti. In base al principio dei lavori virtuali uno stato è appunto di equilibrio quando il lavoro corrispondente a qualunque spostamento virtuale è nullo o negativo.

¹⁰ Il padre, tesoriere del Re di Sardegna, perse le sue fortune in speculazioni sbagliate: "Se fossi stato ricco, probabilmente non mi sarei dedicato alla matematica". Il suo interesse per la matematica viene risvegliato dalla lettura di una memoria dell'astronomo inglese Edmund Halley. A 19 anni insegna matematica alla scuola di artiglieria di Torino, città dove contribuisce alla fondazione dell'Accademia delle Scienze. Le sue prime pubblicazioni vertevano sulla propagazione del suono e sul concetto di massimo e minimo. Inizia le sue prime ricerche sviluppando il metodo variazionale nel contesto dell'opera di Leonhard Euler, con cui intrattenne una corrispondenza su questo argomento. Nel 1761 vince un premio dell'Accademia delle Scienze di Parigi per un saggio sulle librizzazioni della faccia della luna. Vince ancora i premi dell'Accademia nel '72, '74 e '78. Si reca a Berlino nel 1776, su proposta di Euler e su invito di Federico II il Grande, il quale esprime il desiderio che "il più grande re d'Europa" avesse alla sua corte "il più grande matematico d'Europa". Resterà a Berlino come docente all'Accademia delle Scienze fino al 1787. La sua produttività è prodigiosa. Si occupa fra l'altro del problema dei tre corpi, di equazioni differenziali, di teoria della probabilità, di teoria dei numeri, della stabilità del sistema solare. Con il suo lavoro *Réflexions sur la résolution algébrique des équations* studiò la teoria delle equazioni algebriche, interessandosi del concetto di irrisolvibilità delle equazioni di grado superiore al 4°. Alla morte di Federico il Grande va a Parigi su invito di Luigi XVI divenendo presidente della Commission des Poids et Mesures, partecipando alla formalizzazione del sistema metrico decimale. Nel 1795, in occasione dell'apertura dell'École Polytechnique, diviene il più importante professore di matematica. Le sue lezioni danno origine alla pubblicazione delle opere: *Théorie des fonctions analytiques* [1797], *Leçons sur le calcul des fonctions* [1805]. Napoleone lo nomina Senatore e Conte dell'Impero.

¹¹ Cit. in C. Lanczos, *The variational principles of Mechanics*, Univ. of Tor. Press, Toronto, 1949, p. 297.

¹² Lagrange derivò le sue equazioni partendo dalle leggi di Newton (nella formulazione di Euler) attraverso il passaggio da una formulazione vettoriale ad una formulazione scala-

re. Nel trattamento analitico lagrangiano è sufficiente conoscere una singola funzione scalare (completamente determinata in ogni punto dello spazio da un numero relativo) dipendente dalle posizioni dei punti materiali in movimento; questa "funzione lavoro" contiene implicitamente tutte le forze agenti sui punti materiali del sistema. Un altro vantaggio è quello di non richiedere la conoscenza di forze come quelle che producono la rigidità di un corpo o quelle che agiscono fra le particelle di un fluido. Tali forze vengono sostituite da una condizione cinematica: durante il moto la distanza tra due punti del corpo non può variare e, analogamente, il volume di ogni parte del fluido deve conservarsi. Le n equazioni differenziali del secondo ordine che descrivono il moto di sistemi a n gradi di libertà in funzione della loro energia cinetica T e delle forze lagrangiane dovute a sollecitazioni attive Q_h , in assenza di vincoli addizionali oltre quelli olonomi, hanno la forma generale:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{p}_h} - \frac{\partial T}{\partial q_h} = Q_h$$

dove le q_h sono le coordinate lagrangiane scelte per descrivere il sistema, mentre le p_h si dicono velocità generalizzate. Se le forze in gioco sono conservative, esprimibili cioè come derivate di un potenziale, una funzione $U(q_h)$ tale che, istante per istante, dipenda dalle sole posizioni occupate nello spazio dal sistema meccanico alle quali si applicano le Q_h , per queste ultime vale appunto che

$$\frac{\partial U}{\partial q_h} = Q_h$$

In tal caso, introdotta una funzione $L = T + U$, detta lagrangiana del sistema, le equazioni precedenti si riscrivono:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{p}_h} - \frac{\partial L}{\partial q_h} = 0$$

Tali equazioni permettono appunto di confrontare la dinamica di sistemi completamente diversi tra loro dal punto di vista geometrico e materiale, pur di scegliere un opportuno insieme di coordinate lagrangiane: la loro invarianza rispetto ad un'arbitraria trasformazione di coordinate implica un'assoluta libertà nella scelta del sistema di coordinate più adatto alla natura del problema. Lagrange fu il primo ad esprimere in forma matematica generale delle proposizioni espresse fino ad allora in forma particolare, come la legge delle forze vive, il moto del baricentro e il principio di minima azione, applicando questi risultati a problemi diversi come la meccanica celeste, le corde vibranti e l'idrodinamica. La meccanica analitica di Lagrange, pur essendo una formulazione del tutto generale della legge del moto, è tuttavia limitata alle sole forze conservative, per le quali il lavoro compiuto dipende unicamente dallo stato iniziale e dallo stato finale e non dal modo in cui viene prodotto. Tale denominazione deriva dal fatto che l'energia totale di un corpo soggetto alle azioni del campo, e in moto nel campo stesso, in assenza di cause dissipative di energia si conserva, durante il moto, invariata. Tutte le forze dissipative che trasformano l'energia meccanica in calore, e che rendono il moto irreversibile sono quindi completamente escluse. Contrariamente alla meccanica di Newton nella sua forma più generale, quella di Lagrange è reversibile e non contiene una freccia del tempo, il quale assume il ruolo di semplice parametro. Questa restrizione porta tuttavia ad una meccanica che descrive movimenti dominati dalle leggi

defini "equazioni differenziali per la soluzione di tutti i problemi della dinamica".¹³ Nella prefazione alla *Mécanique analytique*, che sarà definita da William Rowan Hamilton "una sorta di poema scientifico" Lagrange scrive: "Il lettore non troverà alcuna figura in quest'opera", mentre invece i *Principia* di Newton ne contenevano circa duecentocinquanta. Nel rielaborare la meccanica dei *Principia* alla ricerca di una forma delle sue equazioni più generale e adattabile ai casi concreti più diversi, Lagrange fonda una meccanica razionale puramente analitica, nella quale pone a fondamento della propria costruzione teorica il principio dei lavori virtuali e definisce i sistemi fisici in termini di arbitrarie coordinate "generalizzate", del tutto disgiunte da qualsiasi rappresentazione o costruzione visualizzabile, geometrica o meccanica, invece di considerare modelli e sistemi specifici per i quali vengono risolte le equazioni del moto.

L'approccio di Lagrange alla fisica matematica, a differenza di quello di Laplace, può essere considerato dinamistico per due ragioni: 1) perché sostiene che le leggi della dinamica traggono origine dalla "mente" piuttosto che dalla natura; 2) perché non fa uso di ipotesi meccaniche di alcun tipo, eliminando ogni tipo di forze interne (vincoli) che determinino la costituzione e la struttura dei corpi perché non verificabili a livello microscopico. Partendo dalle proprietà empiriche di un sistema macroscopico nel suo insieme, lo analizza in termini di forze esterne applicate e di "risposte" (reazioni).

di simmetria e di conservazione come si ritrova in tutti gli sviluppi della teoria, che dopo Poisson passeranno per Hamilton, Jacobi (il quale sembra sia stato il primo a notare la connessione tra leggi di conservazione e invarianza della lagrangiana sotto trasformazioni del gruppo di Galilei), Sophus Lie, Poincaré fino a culminare nel fondamentale teorema che sarà enunciato da Emmy Noether nel 1918 e che stabilirà definitivamente la connessione tra le simmetrie delle equazioni dinamiche e le leggi di conservazione della fisica, per cui, per esempio, dalle invarianze delle equazioni per traslazioni temporali, rotazioni e traslazioni spaziali seguono le leggi di conservazione, rispettivamente, dell'energia, del momento angolare e dell'impulso.

¹³ Come conseguenza delle equazioni di Lagrange si ottiene, in una formulazione matematica, il principio di minima azione. Lagrange aveva dimostrato, per un sistema di punti sottoposti a forze conservative (tutte le volte cioè che le forze derivano da un potenziale), che l'azione minima è una conseguenza delle equazioni di Lagrange che governano il moto e, viceversa, si ottengono le equazioni imponendo il principio di minima azione. Tale principio è indipendente da qualsiasi sistema particolare di coordinate, perché il minimo di una quantità scalare non dipende dalle coordinate rispetto alle quali una certa quantità viene misurata, di conseguenza anche le equazioni del moto sono appunto invarianti rispetto a una qualsiasi trasformazione di coordinate.

Mentre Lagrange considera gli assiomi fondamentali della meccanica come dedotti a priori dalla ragione umana, Laplace li considera dedotti dall'osservazione empirica del mondo fisico. Secondo l'opinione di Laplace, esponente di punta della tradizione meccanicistica, l'approccio di Lagrange è in totale contrasto con lo spirito della fisica newtoniana, al punto da ritenere che i suoi lavori non siano neppure classificabili come lavori di un fisico.

Secondo le affermazioni di Poisson, la “meccanica analitica” di Lagrange sarebbe stata rimpiazzata dalla “meccanica fisica” di Laplace, basata sull'ipotesi di moti e di forze molecolari e applicabile con successo ai più svariati problemi, come lo studio delle corde flessibili, delle superfici elastiche e della pressione di fluidi. La rivalità tra queste due scuole costituisce un elemento importante che caratterizzerà non soltanto la nascita e lo sviluppo della teoria elettromagnetica, ma estenderà il suo influsso anche in altri campi.

1.2 *Dinamismo in filosofia e in filosofia della scienza*

Mentre la filosofia meccanicistica si sviluppa in Inghilterra e in Francia, sotto l'influsso di Newton e Locke, le filosofie dinamistiche rivali si sviluppano soprattutto in Scozia e in Germania, sotto l'influenza degli elementi dinamistici dell'opera di Newton e, successivamente, delle concezioni di Immanuel Kant.

GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ [1646–1716] sviluppa un calcolo infinitesimale rivale di quello di Newton. Di quest'ultimo rifiuta naturalmente la posizione secondo cui la gravità poteva essere spiegata come conseguenza della Divina Presenza e al contrario ne cerca una spiegazione in termini di una qualche causa fisica; ma rifiuta ogni approccio meccanicistico alla fisica in termini di atomi e di forze a distanza nel vuoto.

Nella sua *Monadologia*, scritta in latino nel 1714 e pubblicata postuma in francese nel 1728, Leibniz sostiene una concezione della natura come *plenum* dinamico — un “continuo” di forze che considera “qualità primarie” — nel quale le forze stesse danno origine all'estensione dei corpi o alle altre qualità meccaniche come impermeabilità, solidità e moto, considerate quindi “qualità secondarie”. Anche se la filosofia di Leibniz non fornì di per sé un approccio valido da un