

NOTE SULLA «MECCANICA CLASSICA» E LA CONCEZIONE MECCANICISTICA DELLA NATURA

ENRICO RENATO ANTONIO GIANNETTO

Università di Bergamo

1. Introduzione: la «meccanica classica»

Con l'espressione «meccanica classica» s'intendono spesso cose diverse: di solito la si usa in contrapposizione alla «meccanica relativistica» e alla «meccanica quantistica», e, in quest'ultimo caso, comprende al suo interno anche la «meccanica relativistica». Rimossa questa ambiguità, ne restano ancora altre: sotto questo stesso nome potrebbero essere indicate la meccanica di Newton, la meccanica di Lagrange, la meccanica di Hamilton, la meccanica di Hertz, e questo per citare solo le più note. Queste varie meccaniche sono differenti dal punto di vista dei principi fisici che ne sono alla base, dal punto di vista dei differenti fenomeni fisici ed esperimenti dei quali possono dare conto, dal punto di vista dei linguaggi matematici che le caratterizzano, dal punto di vista epistemologico, ovvero dalle differenti concezioni di teoria fisica e dalle differenti concezioni del mondo che esprimono.

Le ricerche storiche più recenti hanno ormai evidenziato una complessità e una varietà di «meccaniche» del tutto rimosse dai libri di testo di fisica: tra i fisici prevale un punto di vista pragmatico che considera le teorie come meri strumenti di calcolo o come indicazioni «stenografiche» di operazioni sperimentali da effettuare e che quindi tende ad azzerare le differenze fra le varie meccaniche. Fino a poco tempo fa, però, si riteneva che in effetti le varie meccaniche potessero essere considerate come una cosa sola, non solo da un punto di vista pratico ma anche da un punto di vista fondamentale, concettuale: al di là delle differenti formulazioni poteva essere data un'unica interpretazione legata a un'unica concezione del mondo, la cosiddetta «concezione meccanicistica della natura».

2. La concezione meccanicistica della natura

Che cosa s'intende per concezione meccanicistica della natura? Precisamente questo: la natura non è altro che una macchina, il cui funzionamento può essere spiegato riconducendosi ai semplici urti delle particelle materiali del tutto inerti che la costituiscono. Se è così, allora ogni fenomeno fisico può essere ricondotto a fenomeni meccanici, e la meccanica diviene la disciplina fondamentale fra le varie discipline. Questa concezione della natura non è stata sempre quella dominante e in effetti la si può comprendere solo se si fa riferimento a un altro punto di vista precedentemente prevalente e al quale questa si contrappone.

Sin dall'alba della preistoria per la specie umana la natura non era tanto considerata come oggetto di riflessione, ma era una «grande madre» che ci aveva generato e alla quale si apparteneva, era una divinità vivente, comprensiva e a volte «terribile» per la vita umana, e nella quale comunque si viveva e alla quale si tornava alla morte. La natura non era considerata quindi come inerte, ma era «potenza generatrice», e aveva in sé il principio di ogni mutamento, di ogni moto come della vita. Anche quando nella storia umana, in relazione alla transizione nel mondo greco da una cultura orale a una cultura basata sulla scrittura, dal *mythos* (mito), dall'elaborazione di racconti mitici si passò al *logos*, ovvero a un discorso che a questi si contrapponeva come «scienza» fondata su basi certe, anche allora la natura era considerata come un organismo vivente e principio di ogni mutamento.

La fisica, come quella di Aristotele, dominante per vari secoli, era la scienza generale dei mutamenti nella natura; al contrario, la «meccanica» era un'arte tecnica, i cui principi in parte codificati matematicamente si riferivano al funzionamento delle macchine statiche allora note: la meccanica era, come ha scritto lo storico Alexandre Koyré, un'«anti-fisica» in quanto il suo obiettivo era legato all'uso di macchine statiche, che aggirassero, «ingannassero» i principi del moto della natura per favorire il lavoro umano ovvero in definitiva l'uso e lo sfruttamento tecnico (l'agricoltura, l'allevamento, la caccia) della natura da parte dell'uomo. Da questo punto di vista, la meccanica non poteva costituire una conoscenza della natura, dei suoi principi di mutamento.

Tuttavia, nel mondo greco, seppure non dominante, un'altra fisica era stata formulata da Leucippo e da Democrito, radicata in una concezione del tutto contrapposta al mito e atea. Tale forma di ateismo, implicando il rifiuto di tutti gli dèi, comportava la «spoliazione» della natura da ogni potenza e quindi da ogni principio interno di mutamento e di moto: i fenomeni fisici erano quindi ridotti agli urti casuali tra atomi, ovvero tra le particelle considerate indivisibili e «ultime» di una materia (non più madre vivente) inerte e priva di qualsiasi principio di moto e di vita, e i mutamenti erano ascritti al cambiamento di luogo degli atomi. Questa concezione atomistica della natura, anche se in qualche modo era la controparte «ideologica» di una relazione con la natura legata a un suo uso tecnico e anche se presupponeva come suo modello il funzionamento di alcune macchine, non si poteva configurare ancora come «meccanicistico»: e non perché non ci fossero i presupposti di una concezione meccanicistica, ma perché ancora le stesse macchine non erano concepite come contrapposte ai viventi e appartenevano sempre alla natura vivente come i loro elementi costitutivi.

Anche all'interno dello stesso paradigma dominante del cristianesimo che dopo la cultura greca e mescolandosi a essa caratterizzò la civiltà occidentale, non ci si allontanò mai da una relazione con la natura come madre vivente, abitata e animata dallo stesso Spirito Santo di Dio e da potenze angeliche come dai «principi seminali», «idee generative» del Logos-Verbo di Dio.

È solo dopo l'avvento della Riforma Protestante, in connessione con l'elaborazione di una particolare teologia che considerava la presenza di una qualsiasi potenza nella natura come nell'uomo quale un limite posto all'Onnipotenza e alla Grazia di Dio, alla azione del quale soltanto si deve ogni cosa e la salvezza, che si crearono le condizioni di possibilità storiche per una concezione meccanicistica

della natura, ridotta a mera materia inerte. I principali scienziati-filosofi che elaborarono per primi, in forme diverse, tale concezione sono: Marin Mersenne (1588-1648), Thomas Hobbes (1588-1679), René Descartes (Cartesio, 1596-1650), Pierre Gassendi (1592-1655) e, più per i contributi fisici, Galileo Galilei (1564-1642), Christian Huygens (1629-1695), e in maniera dibattuta lo stesso Isaac Newton (1642-1727). L'unico effettivo antagonista della concezione meccanicistica fu Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), che propose una concezione del tutto alternativa a quella.

La concezione meccanicistica della natura ha costituito il paradigma dominante per circa due secoli, ma la fisica del caos, la fisica della relatività e la fisica dei quanti che hanno rivoluzionato la fisica del novecento hanno fatto crollare tale concezione. La concezione meccanicistica della natura non può allora fornire un'interpretazione unica delle varie meccaniche: resta quindi una complessa varietà di «meccaniche» da analizzare nei loro processi di formazione e nelle loro interconnessioni storiche.

3. La meccanica di Newton e la «rivoluzione scientifica»

Non è possibile considerare la «meccanica classica» come qualcosa di univoco non solo rispetto agli sviluppi di successive meccaniche come quelle di d'Alembert, Lagrange, Hamilton, Hertz e di altri, ma anche rispetto agli sviluppi di precedenti fisiche: a uno scavo archeologico, la «meccanica classica», come presentata nei libri di testo di meccanica, appare come una complessa sovrapposizione di strati (modificati) di insediamenti successivi che derivano non solo dalla meccanica di Newton ma almeno anche dalla meccanica di Cartesio e di Huygens e dalla dinamica di Leibniz.

Qui ci si limiterà perciò ad analizzare, per brevi cenni, il processo di formazione della meccanica di Newton, escludendo quindi la considerazione di tutte le meccaniche successive che pure rientrano in quella che ora possiamo chiamare «famiglia», «classe» di meccaniche classiche, nel senso di non-relativistiche e non-quantistiche.

La meccanica di Newton viene solitamente presentata come ultimo atto che compie definitivamente quella «rivoluzione scientifica» che simbolicamente si fa iniziare nel 1543, data di pubblicazione del *De revolutionibus orbium coelestium* di Nikolaj Kopernik (Copernico, 1473-1543) e concludere appunto nel 1687, data di pubblicazione della prima edizione dei *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* di Newton (le successive edizioni sono del 1713 e del 1726). Non è qui possibile discutere i problemi legati al concetto di «rivoluzione scientifica»: è da sottolineare comunque che con tale locuzione si intende qui non solo un cambiamento metodologico – con l'introduzione del metodo sperimentale propugnato fra i primi da Francis Bacon (Bacone, 1561-1626), Robert Boyle (1627-1691) e Galileo Galilei – o un cambiamento di linguaggio – con l'incipiente e progressiva matematizzazione del pensiero scientifico sulla natura – ovvero un cambiamento della stessa concezione di conoscenza scientifica e di scienza, ma anche un cambiamento della stessa concezione della natura che «definisce», insieme ad altri eventi storici altrettanto epocali quali la

Riforma Protestante e la nascita del capitalismo, «l'età moderna» corrispondente a un reale cambiamento del nostro, umano, modo di vivere nel mondo.

È da questa prospettiva più generale che si può cogliere l'effettiva rilevanza culturale della meccanica di Newton al di là dell'importanza per la mera storia delle discipline fisiche.

4. La meccanica di Newton e i sistemi di Copernico e Keplero

Queste date e queste opere di Copernico e di Newton non sono state scelte ad arbitrio come «inizio» e «fine» ideali della «rivoluzione scientifica», ma in quanto connesse fra loro. Tuttavia, il rapporto fra la meccanica di Newton e il sistema cosmologico di Copernico o di Keplero non è così semplice come di solito si afferma.

Per comprendere tale connessione bisogna evidenziare che dal punto di vista della cinematica, ovvero dello studio del moto (*kynesis*, in greco, significa moto, mutamento) a prescindere da sue eventuali cause, nonostante la battaglia culturale contro la Chiesa operata da Galileo Galilei, non esisteva nessuna differenza fondamentale tra la cosmologia geocentrica di Tolomeo e la cosmologia eliocentrica di Copernico; e lo stesso si potrebbe affermare per quanto riguarda il sistema di Tycho Brahe (Tyge, 1546-1601) e per quello di Johannes Kepler (Keplero, 1571-1630) fra il 1609 e il 1621: tutti questi sistemi di rappresentazione del cosmo erano cinematicamente equivalenti, in grado, più o meno, di «salvare i fenomeni» astronomici, ovvero erano tutti più o meno compatibili con le osservazioni astronomiche.

Questo significa che le osservazioni e le conoscenze astronomiche non erano in grado di discernere quale fosse il vero moto dei corpi celesti, a causa di quel «principio» di relatività del moto che ancora prima di Galilei e in maniera più generale aveva formulato Filippo «Giordano» Bruno (1548-1600). Al più si potevano introdurre, nella comparazione dei sistemi cosmologici, argomenti di semplicità descrittiva oppure di valore estetico o religioso.

Si pensi anche che per principio la fisica di Cartesio, in parte dominante prima della meccanica di Newton, si limitava a una pura descrizione cinematica, puramente «meccanicista», ovvero legata a una riduzione della natura a materia concepita come «estensione spaziale» («*res extensa*») puramente passiva sul modello di funzionamento di una macchina meccanica: a parte la negazione dello specifico modello degli atomi e del vuoto e il postulato di una sostanza pensante («*res cogitans*») negli uomini, distinta e separata dalla natura, si trattava della riproposizione della concezione materialistico-meccanicistica della natura propria dell'atomismo greco antico. Le limitazioni di tale prospettiva erano state rilevate dallo stesso Newton che riteneva insufficiente una teoria cinematico-meccanicistica del moto: secondo Newton, bisognava introdurre dei «principi attivi», le forze, oltre la materia inerte.

È solo quindi con la nascita della dinamica moderna, ovvero con una teoria che spiegava il moto quale effetto di forze (*dynamis*, in greco significa «forza»), che l'equivalenza cinematica sembra potersi infrangere a favore di un sistema cosmologico copernicano o meglio kepleriano indicante il vero moto.

E fu proprio Newton a tentare di dare un fondamento dinamico alla cosmologia copernicana-kepleriana, cercando di derivare le leggi di Keplero come conse-

guenza della sua teoria dinamica della gravitazione: tale teoria era basata sull'idea di forze esterne quali cause dinamiche che determinano le deviazioni dal moto rettilineo-uniforme inerziale. Newton, trattando la gravitazione come una forza che agisce a distanza e non più come una proprietà naturale dei corpi, riprendeva l'idea di un discepolo di Galilei, Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679), che nel moto planetario la forza di gravità equilibrasse quella centrifuga.

È per questo che solitamente si considera l'opera di Newton come «compimento» della «rivoluzione scientifica», perché si ritiene che sia stata la meccanica di Newton a dare un «fondamento» dinamico alla «rivoluzione copernicana»: questo è quanto è accaduto storicamente, quanto è stato recepito dalla comunità degli scienziati.

La connessione tra rivoluzione copernicana e meccanica di Newton è però più complessa di quanto appaia. Innanzitutto, non c'è continuità fra la concezione della natura di Copernico e di Keplero e quella di Newton. Nonostante il tentativo di Newton di superare il meccanicismo cartesiano, la sua meccanica ricadeva in una concezione meccanicistica della natura. Al contrario, sia per Copernico che per Keplero la natura era sempre vivente e animata.

Newton, infatti, introdusse le forze in contrasto con la concezione meccanicistica della natura, ma fondò la sua teoria delle forze sulla statica, riconducendo il problema del moto a quello della quiete. A questo scopo, Newton ridusse le forze agenti fra i corpi a forze che dipendono meramente dalla distanza, e utilizzò il principio di relatività galileiana per ridurre lo stato di moto allo stato di quiete per quanto riguarda l'effetto delle forze. Ma tale riduzione della dinamica alla statica significò ricondurre la dinamica alla teoria delle macchine statiche, ovvero alla meccanica: Newton cioè concepì i principi attivi della sua teoria sulla base dei dispositivi delle macchine statiche e non si rese conto che così facendo la sua teoria non poteva che ricadere all'interno di una concezione meccanicistica della natura che pure voleva combattere. Le sue forze d'attrazione non erano riducibili a un meccanismo di puri urti, agendo a distanza nel vuoto, ma erano comunque comprese in termini di un meccanismo di bilanciamento di pesi inerti in un equilibrio statico: in fondo, si trattava solo di una nuova forma di meccanicismo. D'altra parte, vi era in Newton una concezione della materia come qualcosa di puramente passivo, a parte l'insita «forza d'inerzia» esprimente una sorta di contraddizione in termini, e le forze erano considerate come enti immateriali (manifestazione dell'azione di Dio nella natura e non parte della natura) che agivano dall'esterno sui corpi materiali (non come principi attivi interni ai corpi).

Il mondo-macchina-orologio di Newton, non essendo basata la sua dinamica su alcun principio di conservazione della forza, aveva bisogno di una ricarica continua da parte di Dio fornitore providente di forza motrice. Questa debolezza del sistema di Newton era stata evidenziata e ridicolizzata da Leibniz nella sua corrispondenza con il portavoce di Newton, Samuel Clarke, mostrando quale bassa idea di Dio e del mondo avesse Newton per concepire un mondo tanto imperfetto da dover essere sempre ricaricato da Dio. Newton stesso pensava che il sistema solare fosse instabile e che Dio sarebbe dovuto un giorno intervenire per evitare il collasso e la distruzione del nostro mondo con una distribuzione uniforme di «stelle fisse» nello spazio.

Così, in seguito, come afferma lo storico Alexandre Koyré, l'idea di forza esterna d'attrazione «che era per Newton una prova dell'insufficienza del meccanicismo puro, una dimostrazione dell'esistenza dei poteri non meccanici più alti, la manifestazione della presenza e dell'azione di Dio nel mondo, cessò di giocare questo ruolo e divenne una forza puramente naturale, proprietà della materia, che arricchiva il meccanicismo invece di soppiantarlo». Così, Pierre Simon de Laplace (1749-1827), che cent'anni dopo Newton porterà la meccanica celeste newtoniana alla sua massima perfezione, a Napoleone che gli chiedeva di Dio a proposito del problema del moto, risponderà: «Signore, non ho avuto bisogno di questa ipotesi». E il concetto di forza newtoniana si ridusse via via a un semplice strumento di calcolo matematico.

Inoltre, Newton aveva cercato di dimostrare che dalle tre leggi di Keplero sul moto dei pianeti seguisse la sua teoria della gravitazione universale e viceversa dalla sua teoria della gravitazione come forza agente a distanza fosse possibile ricavare le leggi di Keplero. Tuttavia, nonostante l'enfasi di Newton su tale dimostrazione, egli non fu in grado di dimostrare, partendo dalla sua teoria della gravitazione, che il moto dei pianeti proceda su orbite ellittiche intorno al sole (prima legge di Keplero).

Ma non è tutto, per il terzo principio della meccanica di Newton, a ogni forzazione di un corpo su un altro corrisponde una forza-azione da parte del secondo sul primo, uguale in intensità e direzione ma contraria in verso: ne segue che, quando si considera il problema dei due corpi come un pianeta e il sole, allora ci sarà una forza del pianeta sul sole che provocherà un moto del sole. Il sole non potrà più essere considerato come fisso e al centro del mondo, ma si muoverà anch'esso, insieme al pianeta, intorno a un punto fisso che viene chiamato «centro di massa» del sistema: la prima legge di Keplero non è valida se non approssimativamente.

Quando poi si considera il problema dei tre corpi nella teoria della gravitazione di Newton, ovvero il problema dell'interazione fra il sole e due pianeti, in generale non è più possibile nemmeno determinare le traiettorie dei pianeti.

Newton aveva derivato la forma della sua forza gravitazionale ($\mathbf{F} = GmM\mathbf{r}/r^3$) a partire dalla terza legge di Keplero che afferma che il rapporto fra il cubo dei semiassemi maggiori delle orbite ellittiche dei pianeti intorno al sole e il quadrato dei periodi di tale moto dei pianeti è identico per tutti i pianeti e non dipende dalla massa dei pianeti; questa caratteristica era stata collegata da Newton all'indipendenza dell'accelerazione di caduta dei gravi sulla terra dalla massa dei gravi rilevata da Galilei per derivare da ciò la proprietà di *universalità* della gravitazione. Per il sistema tolemaico non sembrava possibile derivare una coerente teoria della gravitazione. Tuttavia, la considerazione del problema dei due corpi, ovvero di un pianeta e del sole, mostra però che la terza legge di Keplero non è più valida perché il rapporto non è costante ma dipende dalla massa dei pianeti (e così anche per la legge di caduta dei gravi di Galilei, bisogna introdurre una dipendenza dalla massa dei gravi).

Il sistema cosmologico newtoniano non è quindi né geocentrico né eliocentrico o eliostatico, e non coincide quindi né con il sistema copernicano né con il sistema kepleriano, né coincidono, come già detto, le concezioni della natura: la meccanica di Newton comporta quindi un ulteriore cambiamento rispetto a quelli introdotti dai sistemi di Copernico e di Keplero.

5. La meccanica di Newton e la relatività di Galilei

C'è poi un altro problema in relazione alle connessioni fra il sistema di Copernico o di Keplero e la meccanica di Newton, e coinvolge i rapporti di questa con la fisica di Galilei e in particolare con il suo «principio di relatività».

Newton si proponeva quale continuatore della fisica di Galilei, al quale attribuiva la scoperta dei due primi principi della sua meccanica: la legge d'inerzia e la legge della forza e dell'accelerazione. In effetti, solo la concezione meccanicistica della natura (che Newton invece credeva illusoriamente di aver superato) era comune a Galilei e Newton, ma nessuna delle due leggi si poteva ritrovare in Galilei. La legge d'inerzia nella forma che stabilisce che un corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme fin quando non intervenga una forza è da attribuirsi a Cartesio, anche se questi rifiutava il concetto di forza distinta dal movimento: Galilei invece, anche se non c'è accordo fra gli storici su questo punto, la riferiva a un qualunque moto uniforme senza la restrizione al caso rettilineo. La legge di proporzionalità tra forza e variazione di velocità non è proprio presente in Galilei, non avendo questi un concetto di forza come quello newtoniano.

Inoltre, la fisica di Newton si distaccava da quella di Galilei anche per il rilievo secondario che la relatività della quiete e dei moti rettilinei uniformi assumeva, come corollario delle leggi, nella meccanica, non più quindi quale «principio» nella fisica non sistematica di Galilei. Fra l'altro, il «principio» di Galilei, come la legge d'inerzia, non ha la restrizione al caso rettilineo che si ritrova in Newton (nel caso di Bruno, invece, dal quale Galilei la riprendeva, la relatività valeva per tutti i tipi di moto).

La stessa «assolutezza» del moto, sottostante alle apparenze cinematiche, comune alla concezione di Galilei e a quella successiva di Newton (come anche all'antico atomismo democriteo), è propria di un moto ridotto a differenza di posizione: il moto non ha una realtà propria; assoluta e reale è solo una differenza di posizione. Per Galilei, però, non costituiva un problema la relatività cinematica del moto in relazione alla sua reale «assolutezza» o alla verità del sistema di Copernico. La meccanica di Newton, da un lato, conteneva come corollario un principio di relatività, dall'altro, invece, contraddittoriamente, postulava la possibilità di dimostrare l'assolutezza del moto con la sua teoria delle forze.

In particolare, per Newton erano le forze centrifughe, che, comparando nei moti rotatori, permettevano di rivelare una rotazione assoluta, quindi un moto assoluto e uno spazio e un tempo assoluti, esistenti indipendentemente dai fenomeni fisici. È la negazione della relatività del moto su un piano *dinamico* che sembrava determinare l'affermazione della cosmologia copernicano-kepleriana. Ed è la sua teoria della forza gravitazionale che sembrava escludere il sistema tolemaico anche se, come già rilevato, il sistema cosmologico di Newton non coincide né con quello di Copernico né con quello di Keplero.

Ed è lo spazio newtoniano assoluto, coincidente con lo spazio infinito della geometria euclidea, che si impose definitivamente sulla concezione del cosmo spazialmente finito aristotelico-tolemaico.

Tuttavia, per lo stesso motivo per il quale nel sistema di Newton anche il sole si muoveva insieme alla terra e agli altri pianeti attorno a un comune «centro di mas-

sa», Newton era costretto a considerare come effettivo solo il moto relativo fra sole e pianeti, a considerare soltanto la loro relativa accelerazione. Da questo punto di vista, sembra allora del tutto senza esito il proposito di Newton di fondare sulla assolutezza del moto la verità del sistema di Keplero, sia rispetto alla premessa sia rispetto alla conclusione: eppure, questo è quanto è stato creduto fino a tempi recenti.

6. Conclusioni

La storia della «meccanica classica» è la storia di un intreccio molto complesso di varie teorie. Ma anche la storia della sola meccanica di Newton è di grande complessità. Per molto tempo si è creduto di potere inquadrare tale storia in un «grande racconto» della «rivoluzione scientifica» che vedeva un'evoluzione continua e senza fratture dalla fisica di Galilei e dalla cosmologia di Copernico e Keplero alla meccanica di Newton. Questo «grande racconto» aveva affascinato fin dall'epoca di Newton sia i fisici che gli storici della scienza.

In queste brevi note si è cercato di mostrare quali fratture più evidenti caratterizzino il passaggio dalla fisica di Galilei alla meccanica di Newton quanto quello dal sistema cosmologico di Copernico e di Keplero al sistema di Newton. La meccanica di Newton non compie in effetti una «grande sintesi» di tale fisica e tale cosmologia, ma, pur partendo da tale eredità scientifica e sotto le apparenze di una mera rifondazione teorica di tale sapere della nuova tradizione moderna di Galilei, Copernico e Keplero, propone una nuova fisica e un nuovo sistema cosmologico in cui non risultano più validi né il quadro cosmologico di Copernico né le leggi di Galilei e di Keplero.

La meccanica di Newton, ancora sotto le false apparenze di un punto di vista anti-meccanicistico, determina l'imporsi della concezione meccanicistica della natura che caratterizza non solo la «rivoluzione scientifica», ma anche, insieme alla nuova immagine di Dio della teologia della Riforma Protestante e alla nascita del capitalismo, l'epoca «moderna».

Accanto alla meccanica di Newton e in contrapposizione a essa si era sviluppata la dinamica di Leibniz, altrettanto coerente e rigorosa dal punto di vista matematico e che però si fondava sull'arcaico senso di appartenenza a una natura vivente e animata. La meccanica di Newton si affermò sulle altre fisiche che le si opponevano e divenne, insieme alla concezione meccanicistica della natura, il paradigma dominante nella scienza per circa due secoli. La fisica del Novecento ha però abbattuto definitivamente tale paradigma aprendo nuove prospettive per la comprensione dell'uomo nella natura.

Bibliografia

- R. Dugas, *Histoire de la mécanique*, Griffon, Neuchatel 1955.
F. Enriques, *Problemi della Scienza*, Zanichelli, Bologna 1906, 1909, soprattutto pp. 202-318.
G. Galilei, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano* (1632), a cura di L. Sosio, Einaudi, Torino 1970, pp. 227-229.

- E. Giannetto, *Note sulla complessità: Max Born e la nascita della nuova fisica del caos*, in C. Cellucci, M.C. Di Maio e G. Roncaglia (a cura di), *Atti del Congresso «Logica e filosofia della scienza: problemi e prospettive»*, ETS, Pisa 1994, pp. 317-330.
- E. Giannetto, *Note sul tempo e sul moto attraverso la storia della fisica e le critiche filosofiche*, in A. Rossi (a cura di), *Atti del XIII Congresso Nazionale di Storia della Fisica*, Conte, Lecce 1995, pp. 9-43.
- E. Giannetto e G. Bonera, *Scienza, Cristianesimo e incanto del mondo. Per un'interpretazione del «Tractatus de sex dierum operibus» di Teodorico di Chartres (1997)*, in L. Valle (a cura di), *Cultura e spiritualità*, Nardini, Firenze 1999, pp. 201-241.
- A. Koyré, *Les philosophes et la machine. Du monde de l'«à-peu-près» à l'univers de la précision*, in *Études d'histoire de la pensée philosophique*, A. Colin, Paris 1961; trad. it. di P. Zambelli, *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, Einaudi, Torino 1967.
- I. Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687), terza edizione (1726) con le varianti, a cura di A. Koyré e I. B. Cohen, Harvard University Press, Cambridge (Mass.) 1972; trad. it. di A. Pala, *Principi matematici della filosofia naturale*, Utet, Torino 1965.
- H. Poincaré, *Note sur le principes de la mécanique dans Descartes et dans Leibniz*, in G.W. Leibniz, *La Monadologie*, a cura di E. Boutroux, Delagrave, Paris 1880, pp. 225-231.