

MARIO AGENO (Mauro Murzi)

Mario Ageno è stato il più importante biofisico italiano del ventesimo secolo. I suoi contributi spaziano dall'ambito scientifico, nel quale ha condotto ricerche sulle proprietà dei batteri e sull'origine della vita, all'ambito metodologico, ove si è adoperato per chiarire la natura e il ruolo della biofisica, e all'ambito didattico, in cui si è distinto per aver contribuito in maniera determinante a fondare la scuola italiana di biofisica. Nel suoi studi metodologici sulla biofisica, Ageno ha dovuto affrontare problemi tipici della filosofia della scienza, concernenti la struttura logica delle teorie scientifiche, il ruolo della verifica sperimentale, la descrizione matematica della realtà e la diversità tra biologia e fisica. Ageno è stato uno di quei pochi scienziati professionisti impegnati quotidianamente nella ricerca scientifica che sono stati capaci di indagare questioni filosofiche con precisione e competenza. La maggioranza dei filosofi della scienza ignora i risultati conseguiti in campo filosofico da Ageno, sebbene egli abbia esaminato quesiti di grande interesse per il filosofo della scienza. Un esempio delle possibilità offerte dagli studi filosofici di Ageno, scelto tra i tanti che si potrebbero fare, concerne l'approfondita analisi dedicata all'impiego dei modelli matematici nella fisica, che risponde in maniera soddisfacente alla domanda «Perché è possibile usare la matematica nella descrizione fisica della realtà?»; una domanda che Kant si era già posto nella *Critica della ragion pura* quando chiedeva «COME SONO POSSIBILI GIUDIZI SINTETICI A PRIORI?»¹

Negli anni Settanta e Ottanta del ventesimo secolo, Ageno tenne un corso di fisica per filosofi presso l'Istituto di fisica dell'Università di Roma «La Sapienza». Nel 1980 ero iscritto al primo anno di filosofia e frequentai le lezioni di Ageno, dedicate ai principi della meccanica classica e della termodinamica. In quegli anni un corso di fisica per gli studenti di filosofia era pionieristico: all'inizio del corso erano presenti quattro studenti, ma approdarono all'esame finale solo due studenti, me compreso. Ricordo la pazienza con la quale Ageno spiegava i metodi di risoluzione delle equazioni differenziali indispensabili per risolvere, in modo elementare ma matematicamente corretto, i più semplici problemi del moto. Una volta a settimana una lezione era dedicata alla risoluzione di problemi e uno studente scelto a caso era chiamato alla lavagna per svolgere un esercizio. Essendo solo in due a frequentare regolarmente, ebbi la fortuna di portare a termine molti esercizi sotto l'attenta guida di Ageno. Talvolta, nel corso delle lezioni, Ageno illustrò alcune sue riflessioni metodologiche sull'importanza delle procedure operative per la definizione dei concetti fisici e sulla falsificazione delle teorie scientifiche. Cercherò di descrivere le sue idee facendo ogni sforzo per essere obiettivo e per non alterare involontariamente il pensiero del mio maestro, sperando di non essere tradito dalla memoria, dall'affetto e dalla nostalgia che mi coglie quando ricordo gli anni della mia formazione filosofica.

1. Cenni biografici

Mario Ageno, nato a Livorno il 2 marzo 1915, si laureò in fisica a Roma con Enrico Fermi nel 1936. Collaborò alle ricerche di fisica nucleare di Edoardo Amaldi fino allo scoppio della seconda guerra mondiale, quando fu inviato militare in Africa. Entrato, al termine della guerra, come assistente all'Istituto Superiore di Sanità, ne diresse i Laboratori di Fisica dal 1958. Disponendo di uno dei pochi microscopi elettronici presenti in Italia, i Laboratori di Fisica erano in grado di studiare le ultrastrutture, ossia quelle strutture fisiche e biologiche più piccole di quelle osservabili con il microscopio ottico. Gianfranco Donelli, ricercatore e dirigente dell'Istituto Superiore di Sanità, così ricorda il periodo trascorso sotto la guida di Ageno: «Nel 1958, con la nomina del Prof. Mario Ageno alla direzione dei Laboratori di Fisica, iniziò una nuova primavera per le ricerche ultrastrutturali all'Istituto Superiore di Sanità [...] Fu in quel clima di entusiasmo per i nuovi mezzi di indagine ultrastrutturale, di motivazione professionale e di convinto spirito di collaborazione tra ricercatori e tecnici dei Laboratori di Fisica che vennero condotte importanti ricerche sulle proprietà biologiche e chimico-fisiche di batteri, lieviti, virus umani ed animali e batteriofagi.»² Paolo Salvadori, che è stato direttore del Reparto di fisica atomica presso il Laboratorio delle Radiazioni dell'Istituto Superiore di Sanità, così sintetizza le ricerche di base e le innovazioni tecnologiche realizzate dai

¹ I. Kant, *Kritik der reinen Vernunft*, seconda edizione, 1787 (trad. it. di P. Chiodi, *Critica della ragion pura*, UTET, Torino, 2005, p. 86, B19).

² G. Donelli, *Primi passi e successivi sviluppi della microscopia elettronica all'Istituto Superiore di Sanità*, in C. Bedetti-P. De Castro-S. Modigliani (a cura di), *Atti del convegno Storie e memorie dell'Istituto Superiore di Sanità*, Istituto Superiore di Sanità, Roma, 2008, pp. 19-28, p. 23.

Laboratori di Fisica: «È difficile, in poco spazio, enumerare i risultati importanti che, sotto la guida di Ageno, i Laboratori di Fisica ottennero nella ricerca e nello sviluppo tecnologico: basti pensare alle ricerche sulla scintillazione nei liquidi, sulla diffusione quasi-elastica di elettroni su nucleo, sulla luce di sincrotrone, allo sviluppo della microscopia elettronica e della metrologia delle radiazioni, alla progettazione e realizzazione di catene elettroniche originali»³. Tra le pubblicazioni scritte da Ageno in questo periodo si possono ricordare i fortunati *Elementi di fisica* (1948), più volte ristampati; *Le radiazioni e i loro effetti* (1962); *La costruzione operativa della fisica* (1970), il cui titolo allude alla scuola filosofica dell'operativismo. Ageno lasciò l'Istituto Superiore di Sanità nel 1969 per l'Università di Roma «La Sapienza», dove divenne titolare della prima cattedra italiana di biofisica. Appartengono a questo periodo *L'origine della vita sulla terra: un problema esemplare della ricerca scientifica* (1971); *Punti di contatto tra fisica e biologia* (1974); *Introduzione alla biofisica* (1975); *La comparsa della vita sulla terra e altrove* (1978); *Evoluzione biologica: i fatti e le idee* (1978); i tre volumi delle *Lezioni di biofisica* (1980) (vol. 1: *Le idee fondamentali della biologia*; vol. 2: *Tempi e ambienti della comparsa della vita sulla Terra*; vol. 3: *La formazione dei sistemi viventi dalla materia disorganizzata*). Ageno si ritirò dall'insegnamento nel 1985 continuando la ricerca scientifica. Negli anni seguenti pubblicò *La biofisica* (1987); *Dal non vivente al vivente: nuove ipotesi sull'origine della vita* (1991); *La "macchina" batterica* (1992); *Metodi e problemi della biofisica* (1992); *Le origini della irreversibilità* (1992). Morì il 23 dicembre 1992 dopo un malore che lo aveva colpito nel suo laboratorio. Postumo è stato pubblicato *Che cos'è la vita?: in occasione del cinquantenario di "What is life?", di Erwin Schrödinger* (1994).

2. La struttura logica delle teorie scientifiche

In un libro dedicato agli aspetti metodologici della biofisica, Ageno ha scritto:

La scienza è un discorso, un complesso di asserzioni legate tra loro da relazioni di varia natura [...] che costituiscono una rete, le cui maglie diventano sempre più fitte e resistenti, man mano che la scienza si sviluppa.⁴

Qual è il significato di questa affermazione? La scienza (per essere più precisi, una teoria scientifica) – ci dice Ageno – è un discorso, ossia è un'entità logico-linguistica dotata di una struttura deduttiva. Gli elementi che compongono una teoria scientifica sono le «asserzioni». Le asserzioni non sono logicamente indipendenti, ma hanno tra loro «relazioni di varia natura». Le «relazioni» di cui parla Ageno sono le relazioni logiche tra asserzioni. Alcuni esempi di relazioni logiche che possono sussistere tra due asserzioni *A* e *B* sono i seguenti: la verità di *A* implica quella di *B* (ossia, se *A* è vera allora *B* è vera); *A* e *B* non possono essere entrambe vere (ossia, se *A* è vera allora *B* è falsa e se *B* è vera allora *A* è falsa); *A* e *B* non possono essere entrambe false (ossia, se *A* è falsa allora *B* è vera e se *B* è falsa allora *A* è vera). Queste relazioni logiche, che Ageno raffigura come le maglie di una rete, divengono «sempre più fitte [...] man mano che la scienza si sviluppa». Le relazioni logiche tra le asserzioni di una teoria scientifica tendono a crescere con il progresso della scienza. In un momento della ricerca scientifica due asserzioni *A* e *B* possono essere indipendenti, mentre in un momento successivo, con il progredire della conoscenza scientifica, le medesime asserzioni *A* e *B* possono essere connesse da relazioni logiche. Un esempio è offerto dall'elettromagnetismo e dalla teoria della luce. Fino alla metà circa dell'Ottocento, i fenomeni elettromagnetici e i fenomeni luminosi appartenevano a generi distinti; le asserzioni delle due teorie erano quindi indipendenti tra loro. La formulazione dell'elettromagnetismo dovuta a Maxwell⁵ e i successivi esperimenti di Hertz⁶ dimostrarono che la luce è un fenomeno elettromagnetico; di conseguenza, le asserzioni della teoria della luce sono diventate derivabili dai principi dell'elettromagnetismo.

Il tipo più semplice di asserzione scientifica – sostiene Ageno – è l'asserzione di un fatto. Un fatto e la sua asserzione sono entità distinte: l'asserzione di un fatto è un'entità linguistica concettualmente diversa dal fatto asserito. L'asserzione di un fatto è un'asserzione singolare: ha cioè la forma «Questo determinato oggetto ha questa determinata proprietà». È il resoconto di un «confronto introspettivo»⁷ tra una

³ P. Salvadori, *Ricordo di Mario Ageno*, in «Il Nuovo Saggiatore», 8 (1992), n. 5/6, p. 30.

⁴ M. Ageno, *La biofisica*, Laterza, Bari, 1987, p. 128.

⁵ James Clerk Maxwell (1831-79), fisico e matematico scozzese, formulò le equazioni (note come equazioni di Maxwell) che descrivono il campo elettrico e il campo magnetico, la reciproca influenza tra i due campi e la loro interazione con la materia.

⁶ Heinrich Rudolf Hertz (1857-94), fisico tedesco, ideò l'antenna a dipolo con la quale dimostrò l'esistenza delle onde elettromagnetiche.

⁷ M. Ageno, *La biofisica*, p.129.

rappresentazione attuale e un complesso di rappresentazioni apprese attraverso le cure parentali. Per esempio, quando affermo «Questo libro è rosso» comunico l'esito di un confronto introspettivo tra le mie rappresentazioni attuali e le mie rappresentazioni standard dei libri e dei colori che ho appreso in famiglia, a scuola e nella società. Quando asserisco un fatto non parlo delle cose fuori di me, ma dell'esito di un confronto introspettivo tra mie rappresentazioni interne; un confronto, dunque, che coinvolge solo me stesso. L'obiettività, l'affidabilità e la riproducibilità dell'asserzione di un fatto dipendono dalla possibilità che persone diverse, poste di fronte al medesimo fatto, concordino sull'esito dei rispettivi confronti introspettivi. Una tale concordanza di giudizio dipende dall'efficacia delle cure parentali, che permettono di apprendere rappresentazioni standard condivise tra i membri di una medesima società, e dal grado di condivisione del codice linguistico. I membri di una stessa società umana sono in grado di controllare l'asserzione di un fatto perché condividono sia le regole linguistiche sia i metodi e i contenuti dell'apprendimento familiare e scolastico. Le sorgenti di confusione ed errore sono molte; tuttavia, l'esistenza stessa delle società umane assicura la possibilità di controllare, in modo obiettivo e riproducibile, le asserzioni dei fatti enunciate dalle persone che fanno parte della medesima società. La scienza, partendo dalle asserzioni dei fatti – che, come abbiamo detto, sono asserzioni singolari –, cerca di costruire asserzioni generalizzate, le leggi scientifiche, la cui forma tipica è «Tutti gli oggetti che hanno la proprietà P hanno anche la proprietà Q» (ossia, «Tutti i P sono Q»). Le asserzioni generalizzate consentono di formalizzare le relazioni logiche tra le asserzioni singolari e costituiscono l'intelaiatura delle teorie scientifiche. Una teoria scientifica è «un'ipotesi relativa al mondo dei fatti, non alla realtà»⁸. Essa si propone di individuare le corrette asserzioni dei fatti, anticipando l'esito dei corrispondenti confronti introspettivi.

Una teoria scientifica è un'entità logico-linguistica dotata di una struttura deduttiva e composta da asserzioni. Alcune asserzioni sono assunte come principi della teoria. Nel gergo logico questi principi sono chiamati assiomi. Dagli assiomi si deducono altre asserzioni, i teoremi. Nella deduzione di un teorema dagli assiomi si usano sia le regole logiche sia i teoremi matematici. La matematica è il principale strumento di deduzione utilizzato nelle teorie scientifiche. La dimostrabilità di un teorema in una teoria scientifica si riduce alla possibilità di derivare l'asserzione del teorema dagli assiomi della teoria mediante una successione finita di passi matematicamente corretti. Spesso, la deduzione di un teorema dagli assiomi della teoria non è possibile se non si introducono alcune ulteriori ipotesi ausiliarie, estranee alla teoria, che fungono da premesse aggiuntive. Le ipotesi ausiliarie sono di varia natura. Tra di esse vi sono i principi e i teoremi di altre teorie scientifiche, le asserzioni sulle condizioni iniziali che descrivono le condizioni fisiche rilevanti del sistema studiato in un dato istante e le asserzioni sulle condizioni al contorno che descrivono l'influenza esercitata dall'esterno sul sistema studiato. Una caratteristica tipica delle ipotesi ausiliarie è che la responsabilità di un'eventuale incongruenza tra quanto previsto dalla teoria e la realtà fisica non è di solito attribuita alle ipotesi ausiliarie, ma è a carico dei principi della teoria in esame. Un esempio può essere di aiuto. Nella dimostrazione delle leggi di Keplero per i pianeti del sistema solare, le asserzioni sulle condizioni iniziali riguardano la massa, l'orbita e la posizione del Sole e dei pianeti; le asserzioni sulle condizioni al contorno descrivono l'influenza che i corpi esterni esercitano sul sistema solare (influenza che, nel caso in esame e in prima approssimazione, è nulla); i principi e i teoremi di altre teorie scientifiche sono quelli della dinamica classica.

3. Il ruolo della verifica sperimentale

In esplicita opposizione alle più note scuole di filosofia della scienza, quali il neopositivismo logico (la principale scuola di filosofia della scienza della prima metà del Novecento) e il falsificazionismo (di cui Karl Raimund Popper è stato l'iniziatore e il principale esponente), secondo le quali le teorie scientifiche aspirano a una validità universale e sono prive di riferimenti a contesti spazio-temporali limitati, Ageno ha sostenuto che le teorie scientifiche non aspirano ad alcuna validità universale e hanno un campo di validità limitato a un contesto spazio-temporale ben definito. Ogni teoria scientifica ha un proprio campo di validità, che può anche essere nullo senza che ciò diminuisca la sua significatività e utilità. Uno scienziato userà una teoria tanto più tranquillamente quanto più conosce i limiti del suo campo di validità, perché la teoria è applicabile con relativa sicurezza all'interno del proprio campo di validità. In questa prospettiva cambia il ruolo assunto dalla verifica sperimentale della teoria. Ageno si oppone sia al neopositivismo logico, secondo cui l'obiettivo della verifica sperimentale è la conferma della teoria, sia al falsificazionismo, per il quale l'obiettivo della verifica sperimentale è la falsificazione della teoria. Per il neopositivismo logico la teoria che supera la

⁸ *ivi*, p.131.

verifica sperimentale deve essere provvisoriamente accettata; per il falsificazionismo la teoria che non supera la verifica sperimentale deve essere definitivamente abbandonata. Ageno afferma che l'obiettivo della verifica sperimentale è quello di delimitare il campo di validità della teoria: se la verifica riesce, le condizioni iniziali e al contorno definiscono un ambito all'interno del campo di validità della teoria; altrimenti, definiscono un ambito al di fuori del campo di validità. Un eventuale esito negativo di una verifica sperimentale non impone dunque l'abbandono della teoria ma permette di delineare con maggiore precisione il campo di validità della teoria.

Posso ricordare un esempio esposto da Ageno durante le lezioni di fisica per filosofi che ho seguito. Il campo di validità della meccanica classica è così ben noto (in termini semplici, la meccanica classica conserva la sua validità per i fenomeni che coinvolgono oggetti macroscopici non troppo grandi che si muovono a piccola velocità e sono soggetti a un'energia macroscopica limitata) che questa teoria è applicata tranquillamente, nel suo campo di validità, senza ricorrere a teorie alternative. È solo al di fuori del campo di validità della meccanica classica che si dovranno usare la teoria della relatività, le geometrie non euclidee e la meccanica dei quanti. La meccanica classica ha dunque un proprio campo di validità nel quale non è stata sostituita da teorie più recenti. L'opposizione di Ageno alle più note scuole di filosofia della scienza, motivata dalla consapevolezza che tutte le teorie scientifiche hanno un campo di validità limitato e quindi incorreranno inevitabilmente in qualche falsificazione, è espressa chiaramente in questi termini:

Le generalizzazioni, le cosiddette leggi naturali, le teorie scientifiche, non sono dunque né vere né false. Verificazionismo e falsificazionismo, valutazioni del grado di conferma, o di verisimilitudine, o di corroborazione... rappresentano vie senza uscita, discorsi privi di senso. Ogni generalizzazione ha un suo *campo di validità* più o meno ampio: in molti casi, si può anche dimostrare che tale campo è nullo. È essenziale determinare per ogni importante teoria scientifica i limiti del suo campo di validità: solo quando questi limiti sono perfettamente conosciuti (solo quando, in altre parole, la teoria è stata sufficientemente «falsificata»), una teoria può essere usata con sicurezza, come strumento di pensiero e di indagine, per prevedere e agire in vista di scopi. [...] È dunque soprattutto ingenuo parlare di rivoluzioni scientifiche, di falsificazione e rigetto di grandi teorie scientifiche per sostituirle con altre.⁹

Il compito della verifica sperimentale è quello di aiutare lo scienziato a determinare, con la maggiore precisione possibile, il campo di validità di una teoria scientifica. Al contrario di quanto sostenuto dalle principali correnti di filosofia della scienza, secondo le quali il compito della verifica sperimentale sarebbe quello di verificare o falsificare la teoria per indurci ad adottarla in via provvisoria o a respingerla definitivamente, il compito che Ageno affida alla verifica sperimentale è quello di tracciare i limiti del campo di validità della teoria. Per individuare i limiti del campo di validità, lo scienziato deduce dagli assiomi della teoria in esame e dalle ipotesi ausiliarie (costituite, come si è visto, dagli assiomi e dai teoremi di altre teorie scientifiche e dalle asserzioni sulle condizioni iniziali e al contorno) talune asserzioni di fatti, che sono controllate in un contesto nel quale si suppone che le ipotesi ausiliarie e le condizioni iniziali e al contorno siano vere. Se la verifica sperimentale ha un esito positivo, allora le ipotesi ausiliarie definiscono un campo nel quale la teoria è valida. Altrimenti, le ipotesi ausiliarie definiscono un campo esterno ai limiti del campo di validità della teoria. Sul ruolo della verifica sperimentale Ageno si è espresso in modo categorico:

È da ribadire esplicitamente, con forza, che la prova non consiste nel determinare se la teoria è vera, e quindi da accettare, o falsa e quindi da rifiutare e sostituire con un'altra, ma nel trovare i limiti del suo campo di validità.¹⁰

Il procedimento descritto è incentrato sulle ipotesi ausiliarie, in particolare sulle condizioni iniziali e al contorno: lo scienziato è interessato a sapere se questo insieme di asserzioni definisce un campo nel quale la teoria è valida. Modificando le condizioni iniziali e al contorno, si tracciano i confini del campo di validità della teoria. Questo procedimento è soggetto a errori: le condizioni iniziali o al contorno potrebbero essere diverse da quelle supposte; alcune ipotesi ausiliarie potrebbero essere applicate al di fuori del loro stesso campo di validità; fattori che non sono stati presi in considerazione potrebbero influire sull'esito della verifica sperimentale. Una parte della corretta metodologia scientifica consiste nel controllare l'eventuale presenza di errori nelle ipotesi ausiliarie. I filosofi della scienza – sostiene Ageno – equivocano su questo aspetto della metodologia scientifica: gli scienziati, quando cercano di verificare la bontà delle ipotesi ausiliarie, svolgono un'attività che può essere confusa, specie per chi non ha familiarità con la reale metodologia scientifica, con la creazione di ipotesi *ad hoc* per ripristinare la validità di una teoria falsificata. Per questo motivo, tra i filosofi della scienza si è diffusa l'opinione che gli scienziati costruiscano spesso

⁹ *ivi*, pp. 131-132.

¹⁰ *ivi*, p. 133.

ipotesi *ad hoc* per difendere a oltranza teorie falsificate che invece dovrebbero abbandonare. Al contrario – argomenta Ageno – una teoria scientifica sottoposta a una verifica sperimentale con esito negativo è utilizzabile per scopi pratici e teorici in tutta tranquillità, purché si operi all'interno del campo di validità, i cui confini sono stati tracciati anche grazie all'esito negativo della verifica sperimentale. È evidente che, se si accetta il punto di vista di Ageno, cadono molte delle critiche che filosofi come Imre Lakatos e Paul Feyerabend hanno mosso alla metodologia scientifica: l'ostinarsi degli scienziati nell'usare teorie falsificate non è sintomo né di irrazionalità né del prevalere di interessi economici di parte nella ricerca scientifica, ma è la logica e naturale conseguenza del corretto utilizzo del metodo scientifico.

4. La descrizione matematica della realtà

In uno degli ultimi scritti pubblicati prima della morte, dedicato al significato del secondo principio della termodinamica, Ageno ha condotto un'attenta analisi del modo in cui lo scienziato usa la matematica per descrivere la realtà. Nelle teorie scientifiche – scrive Ageno – si incontrano tre diversi tipi di «sistemi»:

i sistemi concreti «reali» (nel senso della realtà dell'uomo della strada), che attraggono l'attenzione dello scienziato, i sistemi idealizzati che lo scienziato pone a base delle proprie teorie e i sistemi schematizzati che egli usa effettivamente per poter procedere facilmente nei successivi sviluppi deduttivi.¹¹

Lo scienziato si interessa di un determinato sistema reale: per esempio, un gas racchiuso in un contenitore il cui volume può variare tramite un pistone. Nella teoria scientifica, il sistema reale è sostituito con un sistema ideale. Nell'esempio del gas, il sistema ideale è costituito da piccole sfere solide che si urtano tra loro e rimbalzano sulle pareti del contenitore nel modo previsto dalla meccanica classica. Spesso, il sistema ideale non è trattabile con metodi matematici: gli elementi del modello potrebbero essere troppi; i calcoli potrebbero essere troppo complessi; il sistema di equazioni potrebbe non ammettere soluzioni note. In tal caso, lo scienziato sostituisce il sistema ideale con un sistema schematizzato, introducendo ulteriori ipotesi che riducono la complessità matematica, con l'obiettivo di giungere a un sistema che soddisfi gli assiomi di un'opportuna teoria matematica. Se ciò riesce, il sistema schematizzato è un modello logico di una teoria matematica, della quale si potranno utilizzare sia i procedimenti deduttivi sia i teoremi. Tra il sistema ideale originariamente proposto dallo scienziato e il sistema schematizzato che rende possibile la trattazione matematica esistono differenze essenziali: il sistema ideale non è isomorfo a quello schematizzato, altrimenti sarebbero entrambi un modello logico della medesima teoria matematica e non sarebbe né necessario né utile sostituire il sistema ideale con quello schematizzato. Il sistema ideale e quello schematizzato hanno dunque una differente struttura logica: qualche aspetto essenziale è diverso nei due sistemi. Compito dello scienziato, spesso trascurato – osserva Ageno –, è quello di verificare che la sostituzione del sistema ideale con quello schematizzato non introduca alterazioni significative nell'ambito del problema che si vuole risolvere¹². Ad esempio, nel corso degli studi sull'entropia dei gas, Boltzmann¹³ sostituì il sistema ideale a sfere solide da lui stesso proposto, che soddisfa il principio di conservazione dell'energia ma è troppo complesso dal punto di vista matematico, con un sistema schematizzato che viola il principio di conservazione dell'energia ma è matematicamente trattabile. Boltzmann dimostrò il celebre teorema H nel sistema schematizzato¹⁴. Tuttavia, il teorema H non è una conseguenza logica degli assiomi del sistema ideale, perché la sua dimostrazione richiede in maniera essenziale la violazione del principio di conservazione dell'energia. Quindi, il teorema H non vale nel sistema ideale e, se il sistema ideale fosse un buon modello dei gas reali, non dovrebbe valere neanche per i gas reali. Ma il teorema H è valido per i gas reali. Dunque, deve esistere un qualche fatto fisico trascurato che spieghi la validità del teorema H. Questo fatto fisico è – secondo Ageno – «l'impossibilità di

¹¹ M. Ageno, *Le origini della irreversibilità*, Torino, Bollati Boringhieri, 1992, p. 9.

¹² La sostituzione del sistema ideale con quello schematizzato introduce *sempre* alterazioni significative, perché i due modelli non sono isomorfi. Lo scienziato deve controllare che le alterazioni non abbiano riflesso significativo sul problema specifico che sta cercando di risolvere.

¹³ Ludwig Boltzmann (1844-1906), fisico austriaco, condusse fondamentali ricerche nei campi della meccanica statistica e della termodinamica; diede un'interpretazione statistica della seconda legge della termodinamica.

¹⁴ Il teorema H afferma l'esistenza di una grandezza fisica, indicata da Boltzmann con la lettera *H*, tale che: (i) *H* non può mai aumentare; (ii) esiste un valore minimo stazionario di *H*. Boltzmann propose di porre l'entropia di un gas uguale a $-H$. Quindi, (i) l'entropia non può mai diminuire; (ii) esiste un valore massimo dell'entropia dal quale il gas non si può allontanare.

realizzare fisicamente un sistema limitato, che sia anche completamente isolato»¹⁵. Questo – sostiene Ageno – è il vero significato fisico del secondo principio della termodinamica.

Come già detto, lo scienziato sostituisce il sistema ideale con quello schematizzato. Quest'ultimo è scelto tra i modelli logici di una opportuna teoria matematica. La struttura logica del sistema schematizzato è necessariamente diversa da quella del sistema ideale (se non fosse così, non avrebbe senso effettuare la sostituzione). Quindi, i teoremi dimostrati nel sistema schematizzato potrebbero non essere validi nel sistema ideale. È perciò necessario verificare sempre la legittimità della sostituzione del sistema ideale con quello schematizzato, nei limiti del problema specifico studiato dallo scienziato. Nella pratica scientifica, questa verifica è spesso trascurata ed è lasciata all'intuizione, causando frequentemente una

scarsa rispondenza tra la concreta realtà dei fatti empirici e le rappresentazioni matematiche, faticosamente e un po' goffamente schematizzate, che riusciamo a darne.¹⁶

Questa scarsa rispondenza tra la realtà e la sua descrizione matematica può essere illustrata con alcuni esempi, il primo dei quali riguarda le funzioni matematiche usate per rappresentare le grandezze fisiche. Benché i risultati delle misurazioni fisiche siano sempre numeri razionali – osserva Ageno –, lo scienziato assume che le grandezze fisiche siano continue nel campo dei numeri reali. In particolare, per consentire l'applicazione del calcolo infinitesimale, lo scienziato suppone esplicitamente che le funzioni matematiche rappresentative di grandezze fisiche siano continue e derivabili: tale supposizione non ha tuttavia alcun senso dal punto di vista operativo. Per esempio, la velocità istantanea è di solito definita come il limite della velocità media quando l'intervallo di tempo nel quale si misura la velocità media tende a zero. Si tenta così di giustificare l'introduzione della velocità istantanea come il risultato del passaggio al limite di un'operazione fisicamente possibile. Ma questa presunta giustificazione è errata:

se ci si riferisce a intervallini di tempo via via sempre più brevi, i valori che si ottengono per il rapporto incrementale non tendono affatto a un limite ben definito, ma al contrario variano erraticamente tra limiti sempre più ampi.¹⁷

La velocità istantanea è un'astrazione che non corrisponde ad alcuna operazione fisicamente possibile; anzi, è fisicamente priva di senso. A proposito della continuità delle funzioni matematiche che rappresentano grandezze fisiche, Ageno scrive:

l'ipotesi della continuità non ha alcun senso, dal punto di vista fisico-operativo [...] L'ipotesi della continuità appartiene alla metafisica scientifica, e serve solo a rendere possibile l'uso di teorie matematiche semplici e potenti. È un'ipotesi di schematizzazione, generalmente (ma non sempre) innocua.¹⁸

Un secondo esempio della discrepanza tra la realtà e la sua descrizione matematica è offerto – sostiene Ageno – dal fatto che le formule matematiche sono risolvibili rispetto a una grandezza qualsiasi, mentre dal punto di vista operativo le grandezze indipendenti e quelle dipendenti sono sempre ben distinte. Ageno discute l'esempio della formula che collega il periodo di oscillazione T di un pendolo alla sua lunghezza l : $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, ove g è l'accelerazione di gravità. È matematicamente possibile risolvere tale formula rispetto a una qualsiasi variabile, per esempio rispetto alla lunghezza l , facendo quindi dipendere matematicamente la lunghezza l dal periodo T . Da un punto di vista fisico, ciò non ha senso. Il periodo T dipende dalla lunghezza l (se lo scienziato modifica la lunghezza l , per esempio accorciando il filo, il periodo T cambia) mentre la lunghezza l è fisicamente indipendente dal periodo T (se lo scienziato modifica il periodo T , per esempio spostando il pendolo a una diversa altezza dal suolo, la lunghezza l del pendolo non cambia). Un terzo esempio della discrepanza tra la matematica e la realtà fisica è rintracciabile – secondo Ageno – nella sostituzione delle frequenze effettivamente osservate nel sistema studiato con le equivalenti probabilità. In questo caso, lo scienziato sostituisce implicitamente un singolo sistema fisico con una famiglia astratta, potenzialmente infinita, di sistemi fisici analoghi. Se lo scienziato non tiene costantemente presente questa sostituzione, rischia di incorrere in una situazione di grande confusione, ad esempio attribuendo una probabilità a eventi singoli.

L'analisi condotta da Ageno sull'utilizzo della matematica nella descrizione dei sistemi fisici permette di rispondere alla domanda «Perché è possibile usare la matematica nella descrizione della realtà?» Lo scienziato può usare la matematica nella descrizione della realtà perché egli sostituisce il sistema ideale con

¹⁵ M. Ageno, *Le origini della irreversibilità*, p. 185.

¹⁶ *ivi*, p. 66.

¹⁷ *ivi*, p. 15.

¹⁸ *ibidem*.

un sistema schematizzato scelto tra i modelli logici di una teoria matematica. La possibilità di descrivere matematicamente la realtà fisica non dipende né da conoscenze sintetiche a priori, come sosteneva la filosofia Kantiana, né da particolari proprietà della natura, che sarebbe intrinsecamente matematica, come pensava Galileo quando affermava che il libro della natura è scritto in lingua matematica. L'attenta riflessione di Ageno sull'uso dei modelli matematici nella fisica smentisce sia le verità sintetiche a priori di Kant sia il platonismo matematico.

5. Fisica e biologia

Silvio Bergia, docente di teoria della relatività e filosofia della fisica all'Università di Bologna, osserva: «Per cercare di tracciare una frontiera fra fisica e biologia verrebbe probabilmente fatto di partire dal dominio dei fenomeni indagati. Ageno arriva a definire una linea di demarcazione indagando su aspetti della teorizzazione con finalità predittive caratteristici delle due discipline.»¹⁹ Le previsioni della fisica classica sono deterministiche: se lo scienziato conoscesse lo stato iniziale e le forze che agiscono in un sistema fisico (le già citate condizioni iniziali e al contorno) potrebbe prevedere lo stato esatto in cui si troverà il sistema in un qualsiasi istante. Le previsioni della fisica dei quanti sono probabilistiche: se lo scienziato conoscesse lo stato iniziale e le forze che agiscono in un sistema fisico potrebbe prevedere la probabilità esatta che il sistema, in un qualsiasi istante, si trovi in un certo stato. È una caratteristica fondamentale sia della fisica classica sia di quella quantica – nota Ageno – che la probabilità dei diversi stati in cui si potrebbe trovare un sistema fisico non è evanescente: per la fisica classica è possibile un solo stato, univocamente determinato dalle condizioni iniziali e al contorno, che ha quindi una probabilità necessariamente uguale a uno; per la fisica dei quanti sono possibili diversi stati, ciascuno dei quali ha una probabilità significativamente maggiore di zero. Nel caso della biologia si verifica una ben diversa situazione: i possibili stati in cui si può trovare un sistema vivente hanno ciascuno una probabilità evanescente, cioè prossima a zero. Di conseguenza, la maggior parte dei possibili stati di un sistema vivente non si realizzerà mai. Ageno spiega questa proprietà dei sistemi viventi con un semplice esempio²⁰. Un batterio ha circa 4000 geni. Si supponga che ogni gene possa subire una sola mutazione. Il numero dei possibili genotipi sarebbe $2^{4000} \approx 10^{1200}$. Ciascun genotipo avrebbe dunque una probabilità a priori $p = 10^{-1200}$. Il numero N di individui in una popolazione non può essere maggiore di 10^{80} (è questo il numero stimato di nucleoni esistenti nell'universo). La frequenza f di un certo genotipo in una data popolazione di N individui sarebbe $f = p \cdot N = 10^{-1200} \cdot 10^{80} = 10^{-1120}$. La frequenza f è straordinariamente piccola: la maggior parte dei genotipi non comparirà mai in natura. Questo esempio è applicabile a ogni organismo vivente. Il fatto che il numero di genotipi possibili sia estremamente maggiore del numero degli individui di una qualsiasi popolazione spiega perché l'evoluzione biologica sia imprevedibile: in ogni istante compaiono nuovi genotipi in maniera casuale. È in linea di principio impossibile prevedere l'evoluzione genetica di una popolazione, perché le probabilità corrispondenti a ciascun genotipo sono così piccole che ogni tentativo di conferma sperimentale sarebbe vano. Questa è l'origine della differenza tra fisica e biologia: la leggi della fisica prevedono probabilità non evanescenti e quindi consentono previsioni sperimentalmente controllabili; le leggi della biologia, che in nessun punto sono in contrasto con quelle della fisica, prevedono probabilità evanescenti e quindi non consentono previsioni sperimentalmente controllabili. La fisica – conclude Ageno – è caratterizzata dalla legalità; cioè, dal fatto che i sistemi fisici sono descrivibili mediante leggi probabilistiche che consentono previsioni controllabili. La biologia è caratterizzata dalla storicità: non essendo possibile descrivere i sistemi viventi mediante leggi probabilistiche, la biologia è la descrizione storica di ciò che è accaduto nel corso dell'evoluzione.

6. La biofisica

Secondo il punto di vista adottato da Ageno, la biofisica è una disciplina che fa parte della fisica e che occupa una posizione intermedia tra la biologia e le altre discipline fisiche. La biofisica – afferma Ageno – si è sviluppata intorno a due quesiti fondamentali: è possibile spiegare le proprietà degli organismi viventi, che sono l'oggetto di studio della biologia, mediante l'utilizzo di un opportuno modello *fisico* di organismo vivente? in quali condizioni e in che modo la vita può sorgere spontaneamente in un ambiente inizialmente sterile? In conformità con questa prospettiva, Ageno ha preso posizione contro due diffuse interpretazioni della biofisica, da lui chiamate l'interpretazione tecnico-strumentale e l'interpretazione a indirizzo

¹⁹ S. Bergia, *Mario Ageno, filosofo della fisica*, in «Il Nuovo Saggiatore», 16 (2000), n. 1/2, pp. 23-28, p. 24.

²⁰ M. Ageno, *La biofisica*, p. 105.

strutturale. L'interpretazione tecnico-strumentale sostiene che la biofisica sia un settore subalterno della biologia nel quale lo scienziato impiega tecniche strumentali che richiedono la competenza specialistica dello studioso di fisica. L'interpretazione a indirizzo strutturale ritiene che la biofisica sia un ramo di quella disciplina fisica nota come struttura della materia; la biofisica avrebbe come proprio specifico oggetto di studio la materia vivente, come se oltre ai noti stati della materia, gassoso, liquido e solido, esistesse un altro stato particolare chiamato materia vivente. In base alla corretta interpretazione – sostiene Ageno – la biofisica è quella parte della fisica che studia la «fisica dei sistemi viventi»²¹. Quando Ageno collaborò alla redazione dell'*Enciclopedia delle scienze fisiche* edita da Treccani, con la responsabilità dell'area dedicata alla biofisica, formulò la seguente definizione:

biofisica. Parte della fisica che s'occupa dello studio degli organismi viventi quali sistemi fisici complessi, con un'impostazione concettuale che consenta di evidenziare il collegamento logico tra il mondo biologico e i principi generali e fondamentali della fisica.²²

Per comprendere il ruolo della biofisica – afferma Ageno – si devono affrontare tre quesiti preliminari. In primo luogo, è necessario conoscere quali siano i principi che la biofisica assume come dati e utilizza per spiegare e descrivere la realtà dei sistemi viventi. In secondo luogo, è necessario capire quale sia il tipo di fenomeni che la biofisica si propone di spiegare e quali siano i problemi che intende risolvere: entrambi determinano il campo di indagine proprio della biofisica. In terzo luogo, si devono comprendere gli esatti rapporti che intercorrono tra la fisica e la biologia, poiché la biofisica si pone come un ponte tra queste due scienze. Vediamo come Ageno risponde a questi tre quesiti.

Il primo quesito è relativo ai principi che la biofisica assume come dati. Questi principi sono – secondo Ageno – i principi della fisica e tutte le loro conseguenze: il dato di partenza è costituito dall'intera conoscenza della fisica. Questi principi dati non sono essi stessi oggetto di ricerca o di discussione nell'ambito della biofisica. Fanno parte del patrimonio delle conoscenze scientifiche di sfondo: sono quelle ipotesi ausiliarie, di cui abbiamo parlato, impiegate come premesse aggiuntive nella deduzione dei teoremi. La biofisica si limita ad applicarli ai suoi problemi, ma non li discute.

Il secondo quesito riguarda il tipo di fenomeni che la biofisica vuole spiegare e i problemi che intende risolvere. Il tipo di fenomeni che la biofisica vuole spiegare sono i fenomeni viventi. I problemi fondamentali ai quali la biofisica intende rispondere, ai quali deve dare una soluzione adeguata per poter spiegare i fenomeni viventi, sono due: «proporre un *modello fisico di organismo* che riesca a dar conto [...] di tutti quegli aspetti del vivente che la biologia funzionale e la biologia evolutiva descrivono»²³ e, una volta che sia stato ideato un opportuno modello fisico di organismo, «spiegare il suo spontaneo formarsi, in appropriate condizioni, in un sistema complesso inizialmente sterile.»²⁴ Un modello fisico di un organismo vivente è un sistema schematizzato che utilizza soltanto i principi ammessi dalla fisica (quindi, non utilizza principi che ricadono nel campo della biologia vera e propria) per descrivere un sistema fisico che abbia le medesime caratteristiche di un sistema vivente. Il più semplice modello fisico di un organismo che la biofisica sia a tutt'oggi riuscita a sviluppare in maniera soddisfacente è il modello della cellula procariotica, descritto da Ageno come un «*sistema chimico coerente, dotato di programma*»²⁵. È opportuno ricordare che la cellula procariotica è il tipo più semplice di cellula vivente, priva di un nucleo ben definito e dei tipici organelli presenti nelle cellule più complesse, dette eucariotiche; i batteri sono di solito formati da un'unica cellula procariotica, mentre gli organismi pluricellulari sono di solito formati da cellule eucariotiche. Il secondo problema al quale la biofisica intende rispondere è – come già detto – quello di spiegare come, e in quali condizioni, la prima cellula procariotica si sia formata in assenza di una vita preesistente. È questo il problema dell'origine della vita, che può essere risolto solo individuando un percorso fisicamente possibile e ragionevolmente probabile che porti alla formazione della cellula procariotica in un ambiente privo di vita. La soluzione di questo problema appare a prima vista impossibile, a causa di due difficoltà apparentemente insuperabili. La prima difficoltà nasce dal fatto che nessuno è stato testimone della comparsa della vita, né sulla Terra né altrove: quindi, ciò che al più si potrebbe sperare di ottenere dalla ricerca scientifica sarebbe una storia romanzata della vita sulla Terra, senza la possibilità effettiva di controllarne sperimentalmente la

²¹ *ivi*, p. 5.

²² M. Ageno, *Biofisica*, in *Enciclopedia delle scienze fisiche*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, 1992-96, vol. 1, pp. 350-352, p. 350. La pubblicazione dell'*Enciclopedia* è terminata quattro anni dopo la morte di Ageno.

²³ *ivi*, p. 351.

²⁴ *ibidem*.

²⁵ *ibidem*.

validità. La seconda difficoltà è dovuta alla probabilità evanescente degli eventi che formano una catena ragionevole che possa portare alla comparsa della vita. La probabilità complessiva della catena di eventi è infinitesima, tale da far apparire la comparsa della vita una specie di miracolo talmente improbabile da non poter essere descritto dalla fisica che – come si è detto – è una scienza che descrive sistemi i cui possibili stati hanno una probabilità non evanescente. La realtà della biofisica è – secondo Ageno – completamente differente. Circa la prima difficoltà, legata all'apparente impossibilità di controllare sperimentalmente una qualsiasi ipotesi sull'origine della vita, Ageno osserva:

ciò che il biofisico si propone di fare, discutendo il problema detto dell'origine della vita, è *costruire una teoria scientifica* [...] che spieghi, collocandoli in un unico quadro, una massa ingente di dati osservativi e sperimentali, esistenti tutti *qui ed ora* [...] Ciò che ne risulta è una costruzione ideale [...] che si ricollega al mondo dell'esperienza solo attraverso tutti quei dati esistenti, ripetiamo, *qui ed ora*, e che sarebbe ingenuo interpretare come narrazione o cronaca di ciò che è realmente avvenuto sulla Terra.²⁶

Non dunque una narrazione pseudo storica, romanzata, priva di testimoni, della nascita della vita, ma una teoria scientifica che deve rispettare le leggi della fisica e che si deve confrontare con dati osservativi e sperimentali presenti ora sulla Terra sotto forma di fossili, sedimenti e abbondanze relative di isotopi. Una teoria scientifica, parte integrante della fisica, la cui validità è controllabile esattamente come quella di ogni altra teoria fisica, mediante il confronto con dati esistenti di fronte a noi. Quanto alla seconda difficoltà, il problema delle probabilità evanescenti può essere risolto considerando gli eventi richiesti per la formazione della prima cellula non isolatamente, come se ciascuno di essi fosse indipendente dagli altri, bensì nel contesto di una catena in cui ogni evento influenza gli altri in senso positivo. Se i singoli eventi necessari a formare una cellula capace di riprodursi sono considerati isolatamente, la probabilità di ciascuno è così piccola da rendere praticamente impossibile la nascita della vita; sarebbe quindi vano ogni tentativo di spiegazione basato sulle leggi della fisica. Tuttavia, questi eventi potrebbero non essere tra di loro indipendenti. Il verificarsi di un evento renderebbe altamente probabile il verificarsi dell'evento successivo. Una volta innescato il primo passo (questo sì caratterizzato da una bassa probabilità a priori) gli altri seguirebbero quasi necessariamente. Si dovrà individuare – spiega Ageno – una lunga catena di eventi tale che ciascun evento condizioni fortemente l'evento successivo rendendolo molto più probabile di quanto ci si poteva aspettare: la probabilità di un evento nella successione, dati gli eventi precedenti, è estremamente più grande della sua probabilità a priori. Solo così si elimina la difficoltà dovuta alle probabilità evanescenti e si rende possibile una descrizione fisica della nascita della vita.

Il terzo e ultimo quesito a cui rispondere riguarda i rapporti tra la fisica e la biologia. La biologia è una scienza fenomenologica, che descrive (ma non spiega) i fenomeni del vivente, mentre la fisica spiega i fenomeni del vivente, in quanto fornisce i principi fondamentali impiegati dalla biofisica per dedurre, tramite l'uso di appropriati modelli, i fenomeni della vita. Potrebbe sembrare a prima vista che l'obiettivo della biofisica sia quello di ridurre la biologia alla fisica. Ciò è in linea di principio impossibile perché – come si è già visto – la biologia studia sistemi i cui stati hanno una probabilità evanescente, mentre la fisica studia sistemi i cui stati hanno una probabilità non evanescente. I sistemi che la fisica può studiare e spiegare sono dunque diversi dai sistemi oggetto di studio della biologia. Per questo, anche se la biofisica getta un ponte tra la fisica e la biologia, cercando di recuperare tutti i risultati delle scienze biologiche partendo dai principi della fisica, la fisica e la biologia sono due discipline indipendenti. La riduzione della biologia alla fisica non è possibile in linea di principio.

7. Bibliografia

- AA.VV., *Enciclopedia delle scienze fisiche*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, 1992-96, 7 voll.
 M. Ageno, *La biofisica*, Laterza, Bari, 1987.
 M. Ageno, *Dalla legalità della fisica alla storicità della biologia*, in «Il Nuovo Saggiatore», 1 (1985), n. 6, pp. 62-66.
 M. Ageno, *Le origini della irreversibilità*, Bollati Boringhieri, Torino, 1992.
 L. Boltzmann, *Vorlesungen über Gastheorie*, G. A. Barth, Lipsia, 1896-98.
 S. Bergia, *Mario Ageno, filosofo della fisica*, in «Il Nuovo Saggiatore», 16 (2000), n. 1/2, pp. 23-28.
 G. Donelli, *La microscopia elettronica all'Istituto Superiore di Sanità dal 1942 al 1992*, Istituto Superiore di Sanità, Roma, 2008.

²⁶ M. Ageno, *La biofisica*, pp. 108-109.

- G. Donelli, *Primi passi e successivi sviluppi della microscopia elettronica all'Istituto Superiore di Sanità: dai Laboratori di Fisica al Laboratorio di Ultrastrutture*, in C. Bedetti-P. De Castro-S. Modigliani (a cura di), *Atti del Convegno Storie e memorie dell'Istituto Superiore di Sanità*, Istituto Superiore di Sanità, Roma, 2008, pp. 19-28.
- I. Kant, *Kritik der reinen Vernunft*, seconda edizione, 1787 (trad. it. P. Chiodi, *Critica della ragion pura*, UTET, Torino, 2005).
- P. Salvadori, *Ricordo di Mario Agno*, in «Il Nuovo Saggiatore», 8 (1992), n. 5/6, p. 30.

Mauro MURZI
mauro@murzim.net