

L'oggetto della fisica come causa formale.

Realismo ed intelligibilità della natura alla luce dei postulati formali della fisica.

Se la scienza è conoscenza delle cause, la scienza fisica indaga primariamente le cause formali dei fenomeni naturali. Si occupa, certamente, anche delle cause efficienti, ma solo secondariamente: così, ad esempio, prima ancora che a conoscere l'orbita di un certo pianeta, siamo interessati a sapere come si muovono i pianeti in generale; oppure, se ora avvertiamo una scossa di terremoto, siamo certamente interessati a conoscerne l'epicentro, e quale sia la faglia attiva che l'ha prodotto, che è la sua causa efficiente; ma ciò è possibile perché a monte abbiamo una conoscenza formale dei terremoti, senza la quale non potremmo nemmeno indicarne le relative cause efficienti. Chiaramente sotto la definizione generale che abbiamo dato rientrerebbe lo studio di enti fisici di ogni genere, tanto dei non-viventi quanto dei viventi, ed in effetti proprio così era inteso classicamente il campo della scienza fisica. La particolarizzazione attuale delle varie discipline si basa sulla distinzione delle diverse classi di enti di cui si occupa ogni singola disciplina. Così ad esempio possiamo distinguere la fisica e la chimica dal fatto che la prima si occupa di enti che potremmo definire più semplici, ovvero identificabili e descrivibili da un numero ristretto di caratteristiche, un numero ristretto di proprietà, di parametri, di relazioni; ed è proprio per questa "povertà" dell'oggetto, questa *astrazione*, che è possibile ottenere quel rigore descrittivo, fondato sul linguaggio matematico, che è caratteristico della fisica. La chimica invece, occupandosi di oggetti via via più complessi e strutturati, si allontana man mano da questo rigore procedendo fino ad una conoscenza caratterizzata da un alto grado di empiria (si pensi ad esempio alla scienza dei materiali). Chiaramente le due discipline sono inestricabilmente intrecciate, e non è possibile tracciare confini netti (ad esempio: lo studio degli orbitali atomici o molecolari, ossia della struttura elettronica di atomi e molecole, è chimica o è fisica? Ovviamente entrambe, nel senso che su tale questione le due discipline non si distinguono, hanno in questo caso il medesimo oggetto che studiano mediante lo stesso metodo).

Indagare le cause formali in fisica significa cercare degli schemi strutturali e di relazione secondo i quali gli enti si strutturano, si muovono, si sviluppano, interagiscono. Parlo di *schemi* strutturali, e non di strutture per l'appunto perché la fisica non si occupa semplicemente di descrivere strutture date, ma di trovarne lo schema, ovvero un criterio di ordine, secondo il quale tali strutture vengono a costituirsi. Così ad esempio la fisica non si occupa semplicemente di determinare le orbite dei pianeti del sistema solare, ma di trovare dei criteri che permettano di calcolare l'orbita di qualsiasi corpo, a partire da principi e regole ben definiti; o ancora, non si preoccupa soltanto di determinare sperimentalmente attraverso tecniche spettroscopiche la struttura dei livelli energetici degli elettroni di atomi e molecole, ma di trovare le regole di costruzione di queste strutture.

Il procedere della fisica consiste nel ricostruire schemi via via più generali che integrino quelli particolari. Ad esempio, se le leggi di Keplero determinano l'orbita di ogni pianeta, la gravitazione universale di Newton permette tanto di ricostruire le stesse leggi di Keplero, quanto la dinamica di infiniti altri sistemi fisici. È importante comprendere la natura di tali generalizzazioni; non si tratta di astrazione del tipo genere-specie, nelle quali il genere è più povero, per cui dalla specie si può conoscere sì il genere, ma non è possibile il percorso inverso. La fisica mira invece a trovare, per quanto possibile, schemi generali che comprendano sotto di sé quelli più particolari senza però

confonderli, cioè degli schemi generali a partire dai quali quelli particolari si possano ricostruire. Tale è, fondamentalmente, la forma logica di ogni teoria fisica. Per fare un esempio immediato, un'equazione del moto è una forma semplice che contiene in sé infiniti moti possibili senza confonderli: in linea di principio a partire da una semplice equazione, infiniti moti possono essere ricostruiti senza ambiguità. La forma dell'equazione è un'unità semplice, chiusa in sé, compiuta, e costituita da un insieme ben definito di termini. Ma, se analizzata, questa forma si dischiude da sé, si sviluppa e si particularizza in un numero potenzialmente infinito di sistemi concreti.

Tali schemi strutturali e di ordine sono, nella loro forma concettuale ed espressiva, chiaramente delle costruzioni dell'intelletto, ma la fisica fa propria una concezione che potremmo dire ingenuamente realistica, in quanto presuppone e riconosce come tali forme concettuali rimandino ad un ordine oggettivo delle cose, un ordine che possiamo comprendere e decodificare, e che appare a tutti gli effetti come prodotto di una razionalità. Una razionalità che però non è nostra (e su questo poi ritorniamo). Ci si può certamente porre la domanda se tale razionalità *apparente* - e dico apparente nel senso letterale del termine, intendendo una razionalità che appare, che si mostra, e non apparente nel senso di ingannevole, di non vero - ci si può chiedere se e come tale razionalità apparente sia ultimativamente fondata, e questo ci porterebbe naturalmente fuori dall'ambito della fisica. Il punto qui è che la fisica, e le scienze naturali in generale, presuppongono che tale razionalità si presenti come dato di fatto. Diciamo che nella natura c'è un ordine razionale perché *lo vediamo*, perché è un fatto, perché le cose vanno sempre o per lo più in un certo modo (Aristotele) e questo ordine lascia trasparire, fa riconoscere una razionalità. Benché una tale concezione possa esser classificata come realismo ingenuo, e tale effettivamente è, ingenuo, nell'atteggiamento epistemico spontaneo ed inindagato di buona parte dei fisici, essa si dimostra tutt'altro che ingenua se confrontata con prospettive epistemiche di altro genere, idealistiche ed empiristiche, le quali invece, come cercherò di mostrare, non sono state affatto capaci di fornire una comprensione adeguata dell'effettivo cammino di scoperta e concettualizzazione della fisica. Tale cammino invece si comprende, ed è quello che qui intendo sostenere, proprio in una prospettiva realistica. E questo lo vedremo, o almeno tenterò di mostrarlo, nel corso di questo mio intervento; questo è il tema, e spero di riuscire a svilupparlo adeguatamente.

Tenendo dunque fermo il quadro di riferimento concettuale finora richiamato, che costituisce la struttura logica e ontologica minima della fisica, mi propongo qui di illustrarla con alcuni dei momenti del cammino di scoperta ed elaborazione teorica che, da un lato, esemplificano questa struttura concettuale, e dall'altro permettono invece di confutare quelle forme concettuali alternative che storicamente sono state proposte.

Partiamo da questo secondo aspetto, dalla confutazione di alcune prospettive epistemiche, e voglio allora richiamare adesso la prima di quelle forme concettuali che tenterò di confutare nel loro tentativo di fondare la fisica, nel tentativo cioè di fornire alla fisica i suoi principi, e mi riferisco qui in particolare a quelle di matrice idealistica. Inizio dunque con quella che credo sia la parte più difficile di questo intervento, o quantomeno quella che a me ha richiesto il maggiore sforzo riflessivo. Dovrà infatti ora confrontarmi con Georg Wilhelm Friedrich Hegel, proverbialmente il filosofo più difficile. Mi si potrebbe chiedere perché parlare di Hegel, visto che mi sto occupando di fisica. E io potrei rispondere che Hegel c'entra sempre: c'è forse qualcosa di cui Hegel non si è occupato? Ma la battuta ovviamente non basta, e mi trovo costretto a dire due parole sul suo sistema filosofico in generale per arrivare poi alle questioni specifiche che qui ci interessano. Potrà

sembrare che ora io stia deviando dal tema del mio intervento, ma in tal caso richiamo al fatto che ci stiamo occupando della struttura concettuale e della presa veritativa della fisica, e che il tema di fondo dunque è proprio la verità; ha perfettamente senso pertanto ritornare ai primi principi, per poi ridiscendere al tema specifico. In questo caso parliamo dei primi principi secondo Hegel. E la parte più difficile, dicevo, è proprio questa: dire *due* parole sul suo sistema. Ed è difficile perché quando Hegel ci dice che *il vero è l'intero*, lo dice in tutta serietà, perché dietro questa semplice sentenza, c'è tutto il suo sistema. Come qualunque lettore di Hegel sa benissimo, non si riesce ad estrapolare un solo concetto dal suo sistema - o forse neanche una singola frase - senza che questo, per il suo stesso contenuto, non si muova fluidamente da sé verso altri concetti, riallacciandosi ad ogni altra parte del sistema, costringendoci in qualche a ripercorrerlo interamente. Il vero è l'intero. L'intero è l'Assoluto. L'Assoluto è Soggetto. Quest'ultima affermazione esprime in sintesi tutto il sistema hegeliano. Ma la giustificazione di questa sentenza si può dare, come dice Hegel, unicamente mediante l'esposizione dell'intero sistema.

La realtà è il dispiegarsi dei momenti dell'intero movimento del soggetto assoluto, unità onnicomprensiva che si costruisce da sé restando eternamente immanente a sé. Il soggetto assoluto si struttura secondo le categorie che Hegel espone nella *Scienza della Logica*, nella quale vengono dedotte tutte le categorie che appartengono all'essere in quanto essere. La *Scienza della Logica* culmina nell'idea assoluta, in cui soggetto e oggetto coincidono; l'idea che pensa sé stessa; l'idea assoluta è la totalità dei momenti del proprio sviluppo, cioè di tutte le categorie dedotte nella Logica, e riportate all'unità. Questo riportare all'unità è un superare la mediazione che si è compiuta, e dunque un tornare all'immediatezza, cioè all'essere. L'idea assoluta, per la sua struttura logica, è dunque necessariamente l'idea essente. L'idea essente è la natura. Il razionale sfocia necessariamente nel reale. Passaggio alla *Filosofia della Natura*. Come esposto preliminarmente nella *Fenomenologia dello Spirito*, l'umanità, attraverso la storia, si eleva al sapere assoluto. La prima parte del sapere assoluto è la *Scienza della Logica*. Questa si conclude con l'idea essente, la natura. Nelle *Filosofia della Natura*, la natura viene esposta come l'idea nella forma dell'oggettività. L'idea pone un mondo oggettivo fuori di sé in cui riconoscersi, realizzandosi così come soggetto cosciente di sé, come Spirito. La natura sarà dunque il riflesso dell'idea, e dunque il riflesso della razionalità esposta nella Logica. La natura si svilupperà fino a produrre gli esseri viventi, al vertice dei quali c'è l'uomo, che è soggetto autocosciente. Passaggio alla *Filosofia dello Spirito*. Si può così dedurre di nuovo l'intero cammino già percorso nella Fenomenologia, chiudendo il cerchio. Il soggetto assoluto realizza la propria autocoscienza non attraverso questo o quell'uomo, bensì attraverso l'umanità come totalità storica, la quale prende coscienza del mondo e di sé stessa, e realizza la propria libertà attraverso il cammino descritto nella Fenomenologia, che si conclude con l'approdo al sapere assoluto. L'intero ritorna in sé stesso.

La circolarità è la cifra dei grandi sistemi idealistici. Se è possibile esporre interamente la totalità - che in quanto tale comprende anche il soggetto conoscente - fino a tornare al punto da cui si era partiti, il sistema è compiuto, è perfettamente chiuso e fondato in sé stesso. Ma se la circolarità è il criterio della verità, allora è anche il criterio della sua eventuale confutazione: se possiamo mostrare che il circolo in qualche punto si interrompe ed il cammino di ritorno non può essere interamente compiuto, il sistema crolla. Gli interpreti di Hegel ripetono spesso come la *Filosofia della Natura* sia la parte meno riuscita del suo sistema, e questo non è un dettaglio trascurabile. Se il circolo si interrompe infatti, vuoi nella Filosofia della Natura, o vuoi in qualsiasi altro punto del sistema, tutto quanto crolla, non si tratta di un semplice dettaglio. Si potrebbe rilevare come il circolo del sistema

hegeliano si spezza in realtà in diversi punti. Per dire, nella filosofia della storia, sul tentativo di Hegel di inquadrare tutta la storia dell'umanità, di tutti i popoli e civiltà, all'interno del suo sistema filosofico, sul suo tentativo di leggere tutta la storia come autosviluppo del soggetto assoluto, ci sarebbe sicuramente molto da obiettare. Ma dal momento che io non mi occupo di né di storia né di filosofia della storia, bensì di fisica, allora mi concentrerò sulla filosofia della natura, perché questo è il terreno a me più congeniale, e cercherò di mostrare dove in essa il circolo si interrompa, e come ciò vada invece a riprova di quella concezione ingenuamente realistica, che allora forse si dimostrerà non essere poi così ingenua.

Il movimento dell'autocoscienza del soggetto assoluto si compie nel cammino dell'umanità fino alla piena coscienza di sé. Il movimento dell'autocoscienza comporta che il soggetto assoluto si faccia oggetto a sé stesso, ponendosi dunque fuori di sé. Il mondo è lo spirito nella forma dell'esteriorità. La natura è la soggettività posta in forma oggettiva. La natura non è il soggetto, non è autocosciente, ma è necessariamente tanto il prodotto quanto il presupposto della realizzazione del soggetto assoluto, che nella natura appare nella forma dell'oggettività. Ogni aspetto della natura dovrà essere riconosciuto a priori come prodotto del movimento dell'autocoscienza. Diamone subito, semplificando, un'illustrazione, con la quale torniamo alla fisica. Del resto la *Filosofia della Natura*, dopo una breve premessa, parte subito con la trattazione dei concetti fondamentali della fisica. Hegel chiama la prima parte meccanica, ma per noi è fisica a tutti gli effetti. Il soggetto assoluto è immanente a sé, e dunque anche la natura dovrà apparire come un tutto in cui tutte le parti sono tenute insieme. Nella natura quindi dovrà apparire un'attrazione universale: ecco spiegata l'origine della gravità. E poiché l'autocoscienza è il movimento infinito del ritornare in sé, a questo movimento corrispondono in natura le orbite dei pianeti intorno al Sole. Tutta la filosofia della natura si sviluppa in questo modo. Tali corrispondenze non sono per Hegel solamente evocative, delle semplici metafore. Per Hegel queste sono le autentiche dimostrazioni a priori della verità dei principi della fisica, che la fisica, in sé stessa, non può dimostrare, ma solo assumere e constatare come fatto.

Ora, la dottrina secondo cui si potrebbe dedurre il mondo dalla pura forma della soggettività, una forma che sviluppa interamente da sé il proprio contenuto identificandosi con esso al termine del processo, questa concezione Hegel la mutuò direttamente dai suoi due illustri predecessori filosofici, Fichte e Schelling. Tutto parte da Fichte, che già aveva posto come principio supremo l'Io che pone il Non-Io nell'Io stesso, posizione da cui si innesca un movimento necessario che conduce fino alla realizzazione della coscienza oggettiva, e dunque di un mondo oggettivo che per l'Io è condizione del suo realizzarsi come libertà. Fichte però si ferma qui, non procede *concretamente* nella deduzione del mondo dalla forma della soggettività, ed infatti Hegel accuserà la filosofia di Fichte di essere un vuoto soggettivismo. Schelling accetta il principio di Fichte, ma comprende la necessità di dover dedurre da esso la natura. Nel *Sistema dell'idealismo trascendentale* tenterà proprio questa deduzione, ma con risultati deludenti. Vi si trovano argomentazioni del tipo: poiché l'Io pone il Non-Io nell'Io, nell'Io c'è uno sdoppiamento immanente all'unità, dunque una polarità, e a tale polarità corrisponde in natura lo schema del magnetismo. Quando poi si giunge alla realizzazione della coscienza oggettiva, alla separazione tra soggetto e oggetto, a questo sdoppiamento dell'unità corrisponde in natura lo schema dell'elettricità, con la carica positiva e negativa. Chiaramente queste deduzioni non stanno in piedi, sono fantasie; ad esempio, parlare genericamente di polarità è solo una vuota astrazione, mentre il magnetismo ha un contenuto concreto, ricco e ben definito,

del tutto indeducibile dal generico concetto di polarità. Hegel dirà che Schelling è come un pittore con due soli colori a disposizione, uno per tutti gli affreschi storici, e l'altro per tutti i paesaggi.

Va certamente riconosciuto che il sistema hegeliano e la sua costruzione della filosofia della natura è più solido di quello di Schelling; nondimeno, ed è ciò che intendo mostrare, cade in errori simili, e se le sue tesi vengono confrontate con i risultati della fisica, sorgono due distinti ordini di problemi: o i principi della natura che Hegel deduce a priori si rivelano delle vuote astrazioni, troppo povere rispetto ai contenuti concreti delle teorie fisiche che dovrebbero fondare; oppure, quando ritiene di aver dedotto a priori un qualche contenuto concreto, il risultato che ottiene è errato, ossia in contrasto con i contenuti della fisica.

Vediamo ad esempio, in modo molto rapido, come Hegel deduce i concetti di spazio, tempo, movimento, materia e corpo. Tutto viene dedotto dalla forma della soggettività, che Hegel definisce *unità negativa*, relazione a sé mediante la negazione dell'esser altro. Ovvero: l'autocoscienza si costituisce solo in rapporto all'altro, dunque mediante la negazione di sé, e al termine del proprio sviluppo riconosce sé stessa nell'altro e l'altro come sé stessa, negando dunque la prima negazione e ritornando all'unità. Questo è lo schema dell'intero processo, ed è quello che Hegel chiama la *potenza del negativo*. Poiché la natura è l'idea fuori di sé, l'idea che si pone come altro oggettivo, la prima forma che compare in natura è dunque la forma dell'estrinsecità in quanto tale, ossia lo spazio, che consiste nell'estrinsecità ed indifferenza reciproca delle sue varie parti. Il punto, in quanto determinazione dello spazio, è a sua volta negazione di quell'indifferenza. Ma tanto lo spazio quanto le sue determinazioni sono la negatività meramente posta, mentre la negatività per sé, la negazione come atto, in natura è la forma del tempo, per il quale è posta una determinazione, che poi viene negata ponendo una nuova determinazione, che a sua volta verrà negata e superata, ecc. L'unità dell'indifferenza reciproca e del superarsi dell'una nell'altra delle determinazioni, è la materia quale sostrato dei contrari. L'unità della materia e della determinazione spaziale è il corpo. A questo punto Hegel ha in mano i concetti fondamentali della meccanica, che sono stati dedotti a priori.

E andiamo ora ad indagare quei due distinti ordini di criticità di cui parlavamo. Qui si vede subito un esempio del primo tipo di criticità del sistema hegeliano, la vuota astrazione dei concetti appena ottenuti. Poiché, ad esempio, lo spazio è molto di più che la mera forma dell'estrinsecità. Non si vede come i principi dedotti nella filosofia della natura possano fondare le diverse discipline scientifiche che si occupano dello spazio, sia esso lo spazio geometrico astratto o lo spazio fisico. Da taluni interpreti Hegel è stato salutato come precursore della teoria della relatività generale, avendo egli trovato come i concetti di spazio, tempo, movimento e materia sono strettamente interconnessi e non definibili separatamente. Ma in realtà, da un lato le considerazioni che condussero Albert Einstein alla formulazione della teoria della relatività - e le illustrerò in breve più oltre - non hanno niente a che fare con l'argomentazione hegeliana, e dall'altro lato, dai postulati formali della relatività formulati da Einstein, si possono dedurre una teoria che fa previsioni sul comportamento di sistemi fisici reali, e dei contenuti concreti sulla natura dello spazio, del tempo, del movimento e della materia, che sono indeducibili dalla formulazione hegeliana. Quindi, ribadiamo, questa è la prima criticità, l'eccessiva astrazione, il vuoto di contenuto.

Poi c'è il secondo tipo di criticità, ossia l'errata determinazione dei contenuti concreti, quando si tenta di dedurli muovendo dalle forme generali. E questo è ben esemplificato dal tentativo hegeliano di deduzione della legge della caduta dei gravi come moto uniformemente accelerato, in

cui gli spazi percorsi stanno tra loro come i quadrati dei rispettivi tempi. La dimostrazione hegeliana procede così: il tempo è la negazione per sé, e quando è posto quantitativamente è la misura del moto. Il movimento è una determinazione spaziale (dunque una negazione, perché *omnis determinatio est negatio*) che esce da sé stessa (negazione della negazione) verso una nuova determinazione. Poiché la caduta è un moto libero in cui non intervengono altri fattori esterni, nel moto di caduta lo spazio è misurato da quella doppia negazione, ossia dal quadrato del tempo. Questa è la dimostrazione hegeliana, a priori, della legge della caduta dei gravi. Qual è il problema in questa dimostrazione? Innanzitutto il fatto che i concetti vengono chiaramente definiti e manipolati in funzione del risultato che si vuole ottenere. Ma se anche volessimo prendere sul serio questa dimostrazione a priori prodotta da Hegel, allora avremmo la prova che il suo metodo porta a risultati errati; infatti sappiamo, come ci insegna Newton, che nel moto di caduta l'accelerazione non è costante, bensì inversamente proporzionale al quadrato della distanza dal centro di gravità, e che essa è costante solo approssimativamente per brevi distanze. La dimostrazione a priori che muove dall'idea assoluta, avrebbe dovuto cogliere questa verità, se il sistema hegeliano fosse davvero perfettamente fondato.

Ma le maggiori criticità si ritrovano quando Hegel perviene a trattare la gravitazione e le orbite dei pianeti, ovvero del movimento che ritorna in sé stesso, la realizzazione oggettiva dell'idea assoluta che si sviluppa da sé. Come già fatto per il moto di caduta, Hegel propone un'oscura dimostrazione - sulla quale non mi soffermo - mediante la quale dichiara di dedurre a priori le leggi di Keplero, dalle quali si potrebbe poi ricavare la gravitazione universale di Newton, invertendo così l'approccio della fisica che invece deduce le leggi di Keplero dalla gravitazione universale.

Un primo problema è che le leggi di Keplero in realtà sono valide se si considera soltanto l'attrazione gravitazionale tra i pianeti ed il sole, ma se si introduce anche l'attrazione reciproca tra i vari pianeti, allora le leggi di Keplero, benché restino approssimativamente valide, a rigore non lo sono. Hegel riconosce su questo punto il merito di Newton di aver introdotto le perturbazioni delle orbite, ma allora avrebbe dovuto anche riconoscere che non possono essere le leggi di Keplero il concetto vero da cui dedurre la gravitazione universale, e che quest'ultima sia invece il vero concetto. Hegel difende il proprio approccio sostenendo che con esso le leggi di Keplero verrebbero dedotte a priori, mentre la gravitazione universale, lo sappiamo, predice delle orbite sia chiuse che aperte, a seconda delle condizioni iniziali delle equazioni differenziali, legando dunque la deduzione delle leggi di Keplero ad un dato empirico contingente, e dunque non a priori. Hegel argomenta dunque in favore di una deduzione a priori.

Se la gravitazione universale prevede diversi tipi di orbite, e non solo quelle ellittiche, ciò implica la necessità di riconoscere ad essa una portata più generale delle leggi di Keplero. Oltre a non riconoscere questo semplice aspetto, l'argomentazione hegeliana riflette anche un'ambiguità di fondo del proprio sistema riguardo la contingenza. Da un lato, essendo la natura l'idea fuori di sé, dunque la contraddizione dell'idea, si manifesterebbe allora in natura la contraddizione tra la necessità razionale e la contingenza delle sue infinite realizzazioni e particolarizzazioni. La contingenza sarebbe quindi prevista nel sistema di Hegel. Ma al tempo stesso, la famosa risposta di Hegel al professor Krug che gli chiedeva provocatoriamente di dedurre a priori la penna con la quale stava scrivendo, sembra confermare come Hegel pensasse che tutto potesse e dovesse esser deducibile a priori, senza alcuna contingenza. Hegel rispose ironicamente a Krug che gli avrebbe fatto l'onore di dedurre a priori la sua penna, ma solo dopo aver terminato di dedurre le cose

importanti. Questa magari è solo una battuta, ma nella sua critica a Newton, Hegel rifiuta la dimostrazione - che si fa in fisica - delle leggi di Keplero muovendo dalla gravitazione universale, proprio perché in questa dimostrazione resterebbe un residuo di contingenza che Hegel rigetta in favore della sua dimostrazione a priori. Non aveva detto che la contingenza trova spazio nel suo sistema? Allora su che basi rifiuta la dimostrazione newtoniana in quanto contingente? È un'incoerenza. Ma perché Hegel in questo caso rifiuta la contingenza pur avendo affermato poco prima che anche questa ha un fondamento nel suo sistema? Perché se la ammettesse in questo caso, gli si aprirebbero problemi più gravi.

Hegel qui trascura, a mio avviso questo è un punto chiave, che se pur si volesse ammettere che la contingenza in quanto tale nel suo sistema risulti fondata, il contenuto di questa contingenza resterebbe comunque indeducibile a priori. Che senso avrebbe allora la pretesa di voler fondare a priori ogni sapere scientifico sull'automovimento dell'idea assoluta? Che la forza di gravità sia inversamente proporzionale proprio al quadrato della distanza, è un fatto contingente, un fatto trovato. È un fatto trovato che la stessa relazione alla distanza valga anche per la forza elettrostatica. È un fatto trovato che l'elettromagnetismo sia descrivibile mediante un gruppo di simmetria abeliano, mentre le forze nucleari da gruppi di simmetria non abeliani (questo giusto per citare degli esempi meno elementari). Ma Hegel non può ammettere tutto ciò come fatto nel suo sistema. Ammettere nel sistema l'indeducibilità a priori del contingente, significa ammettere che la natura ha una sua oggettività per sé, irriducibile al soggetto, significa riprodurre una scissione inconciliabile tra soggetto e oggetto, che invece è pretesa essere riconciliata e superata nel sistema idealistico. Ecco allora che appare con chiarezza come l'approccio idealistico non riesca davvero a comprendere e fondare il procedere del sapere scientifico, il quale invece fa proprio quel realismo ingenuo che, per contrasto alle vuote pretese dell'idealismo, dà prova di non essere poi così ingenuo. Quell'approccio realistico che è ben descritto dalla metafora attribuita a Newton, che cito: «Non so come io appaia al mondo, ma per quel che mi riguarda mi sembra di essere stato solo come un fanciullo sulla spiaggia che si diverte nel trovare qua e là una pietra più liscia delle altre o una conchiglia più graziosa, mentre il grande oceano della verità giace del tutto inesplorato davanti a me». Scriveva Stanley Jaki: «Può darsi che Copernico, Galileo e Newton siano stati sfortunati a nascere prima di Hegel, ma il fatto storico è che compiendo le loro scoperte non vedevano nella nuova legalità della natura che si manifestava le tracce delle proprie menti ma i segni di quella del Creatore; per loro il mondo era un'entità oggettiva, avrebbero provato solo sdegno per l'interpretazione hegeliana che vedeva nelle loro imprese il trionfo dell'autorità indipendente della Soggettività».

Chiudo qui il "capitolo" idealismo, e passo direttamente ad analizzare una diversa concezione, quella empiristica. Per questa parte ho scelto di analizzare le idee di Ernst Mach, fisico-filosofo che ha dato contributi importanti alla fisica, liberandola da alcuni concetti mal fondati e riportandola sulla giusta carreggiata; ma il cui approccio empiristico mantiene evidenti limiti quando si tratta di fondare una teoria e di formulare leggi fisiche. Uno dei principali meriti di Mach è sicuramente la sua revisione critica della meccanica newtoniana, che egli liberò da alcuni concetti mal formulati e da quelle che egli talvolta chiamava oscurità metafisiche, quali i concetti di tempo e spazio assoluti. La sua critica era interamente basata sulla premessa di non dover introdurre nella teoria alcun concetto che non avesse un solido riferimento empirico. Ad esempio trovava insensata la definizione newtoniana della massa come quantità di materia. Una tale definizione ha infatti senso solo se si considera un corpo omogeneo, per il quale si può stabilire una relazione di diretta proporzionalità tra la sua

estensione geometrica e la sua massa. Ma per i corpi non omogenei la definizione è inutilizzabile. Come si introduce allora il concetto di massa? Ad esempio consideriamo un corpo A che urta a velocità fissata un corpo B inizialmente fermo, e che dopo l'urto acquisisca una certa velocità; e consideriamo poi un corpo C, che subendo il medesimo urto da parte di A, acquisisca una velocità pari alla metà di quella di B. Allora attribuiremo al corpo C una massa doppia rispetto a quella di B. Scegliendo un corpo come riferimento di massa, potremmo determinare la massa di tutti gli altri corpi con esperimenti di questo genere. Ma chi ci dice che ogni corpo sia caratterizzato da un solo parametro di massa? Potrebbe magari darsi il caso di un corpo A che abbia una certa massa in rapporto ad un insieme di corpi B1, B2, B3, etc., e che abbia una massa diversa in rapporto ad un diverso insieme di corpi C1, C2, C3, etc. Che ad ogni corpo si possa attribuire un'unica massa, è niente più che un dato di fatto verificato in tutti i numerosi esperimenti di meccanica succedutisi nei secoli. Questa era la critica di Mach al concetto newtoniano di massa, e che oggi è universalmente accettata.

La critica più significativa è però sicuramente quella applicata ai sistemi di riferimento inerziali. Un sistema di riferimento è detto inerziale se rispetto ad esso un corpo non soggetto a forze persevera in uno stato di quiete o di moto rettilineo uniforme; e sono inerziali anche tutti gli altri sistemi di riferimento che si muovono di moto rettilineo uniforme rispetto ad un sistema inerziale dato. Tutte le leggi della dinamica e le loro conseguenze ricavate da Newton sono valide nei sistemi di riferimento inerziali. Però Mach fa notare che non è possibile fissare a priori un sistema di riferimento inerziale, perché solo l'osservazione ci permette di stabilire se un certo sistema di riferimento sia inerziale o meno, e tale osservazione deve consistere nella verifica sperimentale delle leggi della dinamica e delle loro conseguenze, le quali però, per l'appunto, sono valide, e perciò verificabili, solo se il sistema di riferimento scelto è inerziale. Dunque, in buona sostanza, tanto la scelta del sistema di riferimento, quanto le leggi della dinamica, sono tra loro inscindibili, e risultano essere la somma e la generalizzazione coerente di fatti sperimentali. Si abbandonino dunque, richiede Mach, tutte le oscurità metafisiche introdotte da Newton su spazio e tempo assoluti, e ci si limiti a sperimentare e a generalizzare dai dati sperimentali.

Il contributo di Mach alla questione - illustrato ora in maniera certamente molto semplificata - termina qui. Avremmo allora dovuto continuare a fare soltanto esperimenti? Fortunatamente, dopo Mach è arrivato Einstein, che empirista non era. E che cosa fa Einstein? Prima di tutto riconosce l'importanza dei risultati di Mach, la sua profonda comprensione della struttura concettuale della meccanica newtoniana, dei suoi limiti e delle sue incoerenze. Poi però Einstein aggiunge un'osservazione di importanza capitale: poiché non è possibile scegliere a priori un sistema di riferimento privilegiato, l'oggettività della natura richiede allora che le leggi fisiche debbano essere formulate in modo da essere le stesse in tutti i sistemi di riferimento, comunque essi siano fissati - è questo il postulato di relatività generale. Il calcolo tensoriale fornisce ad Einstein gli strumenti matematici che gli permettono di realizzare questa richiesta. Ed ecco il limite dell'empirismo di Mach, in quanto il postulato formale di Einstein non è derivato in alcun modo da fatti osservativi, ma fondato a priori. E da tale postulato formale derivano le leggi della nuova meccanica relativistica ed una nuova teoria della gravitazione. Niente di tutto questo sarebbe stato possibile mediante un approccio meramente empiristico. Dai postulati della relatività generale - ce ne sono anche altri, ma qui non li vedremo - si deduce l'equazione della geodetica. Non posso spiegarla qui ovviamente. Questa è l'equazione del moto di un punto materiale in un campo gravitazionale descritto dai simboli di Christoffel. L'aspetto che qui ci interessa è che questa equazione è interamente deducibile

dai postulati della relatività, e che essa mantiene la stessa forma comunque si scelga il sistema di coordinate. Ma con solamente questa equazione la teoria non può essere completa. L'equazione della geodetica ci dice come si muove una massa in un campo gravitazionale, ma chi ci dice come è fatto questo campo gravitazionale? Abbiamo bisogno di una cosiddetta equazione di campo. E l'equazione che cerchiamo è l'equazione di Einstein. Anche questa equazione è interamente deducibile dai postulati della relatività? No, non lo è. Lo è solo in parte, e per determinarla completamente si impone la condizione che, in prima approssimazione, essa restituisca gli stessi risultati della teoria newtoniana, laddove questa è sperimentalmente verificata. Ovvero: la forma di una delle equazioni fondamentali della teoria dipende necessariamente anche da dati osservativi.

Abbiamo dunque da un lato dei postulati formali che non hanno un fondamento empirico e dai quali si deduce in parte il contenuto della teoria, con buona pace di Mach, ma, d'altro canto, non è possibile dedurre da essi il contenuto completo della teoria interamente a priori, con buona pace di Hegel. Questa via di mezzo è il solito realismo ingenuo, che ad ogni passo che facciamo risulta però sempre riconfermato. Si ripresenta sempre, resta sempre in piedi nonostante la sua, a questo punto solamente presunta, ingenuità.

Con questo chiudo tutta questa lunga parte del mio intervento caratterizzata da una considerevole componente di riflessione filosofica, che si intreccia con la fisica, per procedere ora verso la fine del mio intervento illustrando con una serie di esempi concreti il ruolo che i postulati formali hanno avuto nella fisica dell'ultimo secolo. Non c'è un particolare criterio nella scelta di questi esempi, avrei potuto anche sceglierne altri. Lo scopo è semplicemente quello di sostanziare con alcuni esempi i concetti che ho provato ad illustrare, per facilitarne l'assimilazione.

Abbiamo parlato di relatività generale, ora vediamo invece uno dei più importanti sviluppi dei postulati della relatività ristretta nell'ambito della meccanica quantistica. I postulati della relatività ristretta richiedono che tutte le leggi fisiche siano invarianti in ogni sistema di riferimento inerziale, e che la velocità della luce sia la stessa in tutti i sistemi inerziali. In meccanica quantistica, questi postulati conducono all'equazione di Dirac. Il lavoro di Dirac muove dall'equazione di Schroedinger:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi$$

In meccanica quantistica, lo stato di un sistema fisico è descritto da una funzione d'onda ψ , o più genericamente da un vettore di stato. Si tratta di oggetti matematici, formali, che in qualche modo descrivono e caratterizzano un sistema fisico. Non è possibile chiaramente entrare qui nei dettagli. L'equazione di Schroedinger, nella sua forma più generale ci dice che la dinamica di questi stati, la loro evoluzione temporale, dipende da un operatore H , detto operatore di Hamilton, o hamiltoniano. Dirac si pose allora il problema di determinare la struttura di tale operatore in una teoria relativistica, ovvero in una teoria in cui valessero i postulati della relatività ristretta. Dai postulati dunque Dirac deduce che l'equazione di Schroedinger debba avere questa forma:

$$i\hbar \left(\gamma^0 \frac{\partial}{\partial x^0} + \gamma^1 \frac{\partial}{\partial x^1} + \gamma^2 \frac{\partial}{\partial x^2} + \gamma^3 \frac{\partial}{\partial x^3} \right) \psi - mc\psi = 0$$

che con una notazione un po' più compatta, si può scrivere così:

$$(i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu - mc)\psi = 0$$

o così:

$$(i\hbar\partial - mc)\psi = 0$$

Questa è l'equazione di Dirac per una particella libera, e probabilmente a qualcuno sarà già capitato di vederla, in questa forma, girare per i social network con il titolo "l'equazione dell'amore" e accompagnata da qualche pseudo-spiegazione un po' melensa da non prendere assolutamente sul serio. Vediamo invece alcune delle conseguenze più importanti di questa equazione. Il primo fra tutti è che Dirac si accorse che per ogni soluzione dell'equazione, esisteva anche una corrispondente soluzione detta coniugata. La soluzione coniugata corrisponde a quella che chiamiamo antimateria. Dunque Dirac ipotizzò, sulla base di un risultato formale, l'esistenza dell'antimateria. Ma poi l'antimateria è stata osservata? Sì, certamente, lo sappiamo bene, venne osservata nel 1932 da Carl David Anderson. Ma c'è un aspetto che per il nostro tema è ancora più interessante, ed è il fatto che in realtà l'antimateria era stata già osservata nel 1923, cioè prima dell'ipotesi di Dirac, formulata nel 1928. Ad osservarla fu un fisico sovietico, Dmitrij Skobelcyn, che tra l'altro, curiosamente, proprio nel 1928 presentò i suoi risultati a Cambridge, dove Dirac lavorava, durante una conferenza alla quale probabilmente Dirac non assistette. Dunque Skobelcyn osservò l'antimateria cinque anni prima dell'ipotesi di Dirac, solo che non la riconobbe come tale, non comprese di trovarsi di fronte a qualcosa di veramente nuovo. E non lo capì perché gli mancava il concetto adeguato. Si capisce ora l'importanza della struttura formale e concettuale della teoria? Con l'empirismo puro non si sarebbe raggiunto questo risultato. E così, grazie alla teoria di Dirac, nel 1932 Anderson vinse il Nobel per la fisica insieme allo stesso Dirac. Skobelcyn invece non vinse mai il Nobel, però nel 1950 in compenso gli venne assegnato il premio Stalin, successivamente rinominato Premio di Stato dell'Unione Sovietica, ed oggi Premio di Stato della Federazione Russa.

Abbiamo illustrato l'equazione di Dirac per la particella libera. Vediamo ora come si introduce l'interazione elettromagnetica nel caso in cui abbiamo a che fare con una particella carica. Lo si fa mediante un postulato di simmetria, e qui ci sarebbe tutto in capitolo a sé sulle simmetrie in fisica. Innanzitutto che cos'è una simmetria? La simmetria è, astrattamente parlando, un'invarianza sotto determinate trasformazioni. Ho un certo oggetto, applico una trasformazione, e alla fine riottengo il medesimo oggetto. Questo concetto è ampiamente utilizzato in tutte le moderne teorie fisiche. Lo stesso postulato di relatività è un postulato di simmetria. Nel caso dell'equazione di Dirac, l'idea è quella di postulare una simmetria per una determinata classe di trasformazioni della funzione d'onda, dette trasformazioni di fase. Si parte di una funzione d'onda data, e la si trasforma moltiplicandola per una fase:

$$\psi(\mathbf{x}, t) \rightarrow e^{iq\chi(\mathbf{x}, t)}\psi(\mathbf{x}, t)$$

Queste trasformazioni vengono comunemente dette trasformazioni di *gauge* – gauge in inglese è un termine plurivoco, che significa calibro, o più genericamente misura o scala, o nello specifico significa lo scartamento dei binari; in realtà il termine è improprio, non ha un significato preciso nel nostro contesto, e lo si utilizza solo per tradizione. Quando si applica questa trasformazione di fase alla funzione d'onda, è necessario introdurre ulteriori termini che si trasformino a loro volta in modo da mantenere complessivamente invariata l'intera equazione. Il risultato è questo:

$$\left[\gamma^\mu \left(i\hbar\partial_\mu - \frac{q}{c}A_\mu \right) - mc \right] \psi = 0$$

Questa è l'equazione di Dirac gauge-invariante (sarebbe in realtà invariante per trasformazioni del gruppo U(1), ma lasciamo stare i dettagli tecnici). Si dimostra che il campo A deve avere le stesse

proprietà formali dei potenziali elettromagnetici della teoria di Maxwell, e dunque tale campo A , introdotto in maniera puramente formale, viene identificato con i campi fisici che conoscevamo già da Maxwell. Questa equazione è la base dell'elettrodinamica quantistica, uno dei più grandi successi della fisica del XX secolo, un capolavoro teorico che ha delle conferme sperimentali sorprendenti quanto ad accuratezza.

Un approccio simile a quello appena visto per introdurre l'interazione elettromagnetica, viene utilizzato per introdurre anche le altre interazioni fondamentali, l'interazione forte e l'interazione debole, che si ottengono appunto postulando l'invarianza per altre classi di trasformazioni di gauge, per certi aspetti simili a quelle che abbiamo visto, diverse per altri aspetti – ma queste sono questioni tecniche. Il modello standard delle particelle elementari si fonda su questi postulati di simmetria, e il successo di questa teoria sta lì a dimostrare tutta la valenza dei postulati formali, contro ogni tentativo di riduzione empiristica della fisica. In particolare vorrei ricordare un punto fondamentale, ovvero che i postulati di simmetria implicano, per ragioni tecniche che non posso qui spiegare, che tutte le particelle abbiano massa nulla, la qual cosa chiaramente non consta. Eppure questa evidente, vistosissima contraddizione con il dato empirico non è stato motivo sufficiente per abbandonare immediatamente la teoria. Questa teoria, per altri aspetti funzionava fin troppo bene per pensare di sbarazzarcene. Bisognava allora trovare il modo di spiegare la massa delle particelle senza violare i postulati di simmetria. È stato così introdotto il famoso bosone di Higgs, di cui tanto si è parlato anche a livello mediatico negli ultimi anni, la cui interazione con le altre particelle dà origine alle loro rispettive masse, conservando al tempo stesso la validità dei postulati di simmetria. Questo è esattamente quell'approccio che Feyerabend chiamava contro-induzione, e che consiste nell'ignorare sistematicamente i dati e gli argomenti che confuterebbero una teoria per altri aspetti promettente, per continuare a svilupparla e ad ampliarla fino a trovare il modo di spiegare in essa anche quegli aspetti che in prima battuta la contraddicevano. Feyerabend illustrava questo approccio nell'opera di Galilei; noi oggi lo ritroviamo nelle moderne teorie quantistiche dei campi.

Molto ancora si potrebbe dire, il tema delle simmetrie in fisica è vastissimo, ma il tempo a disposizione è limitato, e io credo di essere stato abbastanza esaustivo nel sostanziare la portata dei postulati formali nella fisica. Concludo dunque qui il mio intervento, e ringrazio tutti quanti per l'attenzione.

Francesco Santoni

Bibliografia

- [1] Ernst Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico critico*, Bollati Boringhieri, Torino 1977.
- [2] Albert Einstein, *I fondamenti della teoria della relatività generale*, in *Come io vedo il mondo. La teoria della relatività*, Newton Compton Editori, 2010.
- [3] James D. Bjorken, Sidney D. Drell, *Relativistic Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, 1998
- [4] Ian J.R. Aitchison, Anthony J.G. Hey, *Gauge Theories in Particle Physics*, quarta edizione, volumi 1 e 2, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013
- [5] Stanley L. Jaki, *La strada della scienza e le vie verso Dio*, Jaca Book, Milano 1988.
- [6] Georg Wilhelm Friedrich Hegel, *Enciclopedia delle scienze filosofiche in compendio*, con le aggiunte a cura di Leopold von Henning, Karl Ludwig Michelet e Ludwig Boumann, *Parte seconda: filosofia della natura*, a cura di Valerio Verra, UTET, Torino 2002.
- [7] Georg Wilhelm Friedrich Hegel, *Le orbite dei pianeti*, a cura di Antimo Negri, Laterza, Bari 1984.
- [8] Alexandre Kojève, *Introduzione alla lettura di Hegel*, Adelphi Edizioni, Milano 1996.