

Indice

Introduzione

1. Forse che gli orologi catturano qualcosa?

- 1.1. La percezione di spazio e di tempo
- 1.2. Il comportamento linguistico
- 1.3. Sul descrivere ciò che non percepiamo
- 1.4. Sul possedere teorie e significati
- 1.5. Che cosa fanno gli orologi?
- 1.6. Parlare di oggetti
- 1.7. Spazio, tempo e moto

2. A proposito di osservatori

- 2.1. Dal *motus* allo spazio fisico
- 2.2. Le regole del gioco
- 2.3. Spazio e relatività galileiana
- 2.4. Conseguenze non intenzionali: la scomparsa dell'osservatore
- 2.5. Altre conseguenze non intenzionali: il tempo uniforme

3. Strani tempi

- 3.1. Le qualità primarie
- 3.2. Oscuri tempi newtoniani
- 3.3. Newton e il tempo matematico
- 3.4. Le proprietà fisiche dello spazio
- 3.5. Il *continuum* come fusione tra spazio e materia
- 3.6. Il *continuum* e la gravitazione
- 3.7. Il tempo nel *continuum*

4. Che cos'è un oggetto rigido?

- 4.1. I fatti non sono necessari: lo spazio e il corpo rigido
- 4.2. Metriche, fisica e filosofia
- 4.3. Un raggio di luce
- 4.4. Rigidità e ottica: un esperimento
- 4.5. Che cos'è un tempo "locale"?

5. Tempi ed eventi

- 5.1. Il segno del tempo
- 5.2. Siamo obbligati a "spiegare" una legge empirica sulla tendenza?
- 5.3. Sul "passato" e il "futuro", e sul tempo immobile
- 5.4. Un aggettivo ingombrante: "assoluto"
- 5.5. Ancora il corpo rigido: la simultaneità

5.6. La parola "evento"

6. Causa e gravità

6.1. L'equivalenza tra coordinate spaziali e temporali

6.2. L'invarianza dell'intervallo

6.3. Le condizioni di causalità

6.4. La gravitazione come anomalia

7. Dove scompare il divenire

7.1. Quando le sfere rotolano sulla nave di Galilei

7.2. La covarianza

7.3. Ancora sull'intervallo

7.4. Variazioni di metrica e gravitazione

7.5. Sul divenire

Bibliografia

Indice analitico

Enrico Bellone

Spazio e tempo nella nuova scienza

La Nuova Italia Scientifica

Introduzione

La vita che dà barlumi
è quella che sola tu scorgi.
A lei ti sporgi da questa
finestra che non s'illumina.

E. Montale, *Le occasioni*, 1939

Il linguaggio è, come tutti sanno, un sistema di segni e di regole. Esso svolge la funzione di trasmettere, fra le persone, un bagaglio di conoscenze. Per i bisogni quotidiani ci occorrono soltanto quelle zone del linguaggio che sono sufficienti al fine di descrivere e comunicare gruppi di esperienze e di plausibili previsioni: esperienze e previsioni che riguardano un insieme relativamente ristretto di eventi già percepiti o che riteniamo siano prossimi a esser percepiti da parte nostra o da altre persone. Una funzione comunicativa, questa, che opera su esperienze di senso comune e con descrizioni di oggetti o fatti d'ogni giorno. Essa mette in gioco regole di comportamento situate, per usare una felice espressione coniata da Quine, nei pressi dell'orlo osservativo del linguaggio.

Esistono poi altre zone del linguaggio che sono state costruite e si sono evolute al fine di interpretare, in forme per così dire specialistiche, esperienze molto sottili, o di elaborare previsioni su eventi molto particolari. La ricerca scientifica vive prevalentemente in queste zone e impiega descrizioni che sono, spesso, estremamente lontane da quelle che occorrono per rappresentare gli oggetti di senso comune.

Le due zone non sono separate da linee doganali ben tracciate. Anzi: si può partire dall'orlo osservativo del linguaggio e viaggiare a lungo, senza mai trovare confini netti, in territori linguistici che gradualmente si spingono nel cuore stesso delle spiegazioni scientifiche di maggiore astrazione.

Questo stato di cose ci deve indurre ad alcune semplici riflessioni preliminari. Moltissime persone dicono che la Terra non è piatta, non è al centro dell'Universo, non è immobile. Lo *dicono* perché ci *credono*. Ma ci credono perché l'hanno imparato. Non possono infatti crederci sulla base delle sole esperienze di senso comune: esse, al contrario, ci inducono a credere che la Terra è piatta, ben messa al centro del mondo visibile e rigorosamente ferma.

La stragrande maggioranza di queste persone sarebbe tuttavia incapace di dimostrare, con gesso e lavagna, che ciò in cui crede è vero o giustificabile.

La dimostrazione presume, infatti, conoscenze che non sono presenti nei dintorni dell'orlo osservativo del linguaggio. Esistono, insomma, moltissimi parlanti che accettano talune credenze senza sapere perché si comportano in questo modo. Ed esistono, soprattutto, moltissime credenze che vengono accettate anche se non sono giustificabili con criteri analoghi a quelli che ci autorizzano a dire che, contro ogni esperienza di senso comune, la Terra è uno sferoide dotato di moti complessi.

Possiamo pertanto capire che sono almeno due le difficoltà presenti a chi desideri cogliere i problemi relativi all'uso giustificato di parole compromettenti e ricche di storia come "spazio" e "tempo".

Una prima serie di difficoltà sta nel fatto che solo nelle zone più remote del linguaggio scientifico sono collocati gli argomenti più adatti alla comprensione di ciò che nel linguaggio comune è indicato con i nomi "spazio" e "tempo". Ma queste sono difficoltà che vanno al di là degli scopi perseguiti nelle pagine che seguono e che sono rivolte a un secondo gruppo di ostacoli. Questi ultimi sono radicati nel linguaggio d'ogni giorno, dipendono da come siamo soliti parlare degli eventi di senso comune e non sono di scarsa importanza. Anzi, nel chiamarli *ostacoli*, vorrei essere inteso alla lettera, e aggiungere qualche commento per indicarne la natura.

È subito opportuno sottolineare che, data l'architettura del linguaggio, è quanto mai difficile entrare nelle zone remote dell'astrazione compiendo un solo balzo che ci porti, di colpo, al loro interno. Sono convinto che s'abbia invece bisogno di percorrere qualche tappa intermedia. E se tale convinzione non mi appartenesse, di sicuro non avrei scritto questo volumetto, che alle tappe intermedie è per l'appunto dedicato.

Sono poi convinto che non sia un tragitto divulgativo quello che ci porta, dall'orlo osservativo del linguaggio, ai luoghi dove s'intravedono, sia pure in lontananza, le primissime strutture di base della teoria della relatività generale, che sono le uniche oggi in grado di chiarire quali faccende siano connesse allo spazio e al tempo.

Non è divulgativo in quanto oscuri problemi giacciono lungo il percorso. Lì si deve un poco illuminare per evitare il rischio che, una volta entrati *nella teoria* vera e propria, si creda di star lavorando su forme puramente tecniche e, quindi, pressoché indifferenti rispetto al mondo di esperienze da cui ci siamo allontanati. La fisica è, infatti, una scienza sperimentale, anche quando le occorrono strategie algoritmiche di notevole raffinatezza e astrazione.

Voglio dire, in altre parole, che la fisica ha il compito di spiegare *anche* ciò che percepiamo nel vivere quotidiano, e non solo gli ammassi di galassie o i nuclei d'azoto.

Il breve tragitto che è raffigurato nelle pagine seguenti non è dunque divulgativo nel senso usuale del termine, anche se chi lo percorre non fa leva su formule più intricate di quelle con cui tutti i giorni traffichiamo nelle scuole preuniversitarie. Ma, ciò nonostante, chi lo percorre deve affrontare questioni circa lo spazio e il tempo che restano quasi sempre irrisolte nell'educazione scolastica normale e che non sono, di per se stesse, di immediata comprensione.

La circostanza per cui tali questioni sono sistematicamente estranee ai cosiddetti manuali causa effetti devastanti nella cultura generale. E la situazione di certo non migliora cedendo in prestito i problemi sullo spazio e sul tempo ai professori di storia della filosofia.

Ciò è particolarmente vero per quanto riguarda il fatto che tutte le persone incontrano ostacoli pesanti se debbono *spiegare* che è successo qualcosa in qualche luogo e in un certo momento. Intendiamoci: non ci sono difficoltà terribili nel *descrivere*, più o meno dettagliatamente, qualcosa che abbiamo avvertito o di cui abbiamo notizia, e nel trasmettere ad altri la nostra descrizione. Le difficoltà sorgono solo se, oltre alla descrizione, si richiede la spiegazione. E sorgono proprio in quanto mancano le regole per tradurre termini come "qualcosa", "luogo" e "momento" in un linguaggio più rigoroso dove si parli correttamente di "evento" e "spaziotempo".

Il linguaggio di partenza non è molto preciso ma ha il vantaggio d'essere condiviso e facile da apprendere. Tutti gli esseri umani dispongono di un corredo abbastanza stabile e uniforme di sensori biologici e, di conseguenza, percepiscono le cose più o meno nello stesso modo: il normale comportamento linguistico che consente di passare dalla percezione alla descrizione consente quindi la comunicazione di dati tra i singoli individui. Impariamo così a *fare* molte cose utili. Impariamo a usare i termometri per controllare uno stato febbrile o gli orologi per meglio determinare l'andamento delle giornate. E non siamo obbligati a studiare la termodinamica o la teoria della relatività generale per imparare a *fare* cose del genere. Un pipistrello, per comportarsi come deve, usa un raffinato sistema di rilevamento degli oggetti, e lo fa benissimo senza studiare taluni settori delle scienze fisiche. Molti vegetali elaborano sofisticate strategie chimiche di difesa da parassiti voraci e dannosi, ma non hanno seguito corsi avanzati di biologia molecolare.

Niente di nuovo, intendiamoci: sto solo dicendo che tutti gli organismi viventi si comportano in modi specifici senza essere costretti a fornire spiegazioni affidabili in proposito. Debbo anche porre in rilievo, però, che la nostra specie ha *comunque* imparato, sia pure a fatica, che non bisogna prendere a cuor leggero i comportamenti basati sulle sole percezioni e sulle sole regole apprese con il linguaggio quotidiano, e che è importante studiare altre regole.

Lo studio è così una forma del lavoro, nella continua interazione fra i nostri corpi e il mondo circostante. Una forma che consente di reinterpretare le percezioni comuni a tutti e di giungere a spiegazioni che, quasi sempre, violano l'apparente naturalezza dei punti di vista conformi ai dati sensoriali e alle descrizioni di senso comune.

Ebbene, la presenza di questa specifica forma del lavoro umano sta al centro del presente libretto, che è dedicato ad alcuni aspetti dell'*uso* di parole come "spazio" e "tempo". Non affoghiamo in un mare di anomalie e di paradossi quando le usiamo al fine di narrare umane faccende d'ogni giorno. Ma, se decidiamo di prendere le distanze dal comportamento animale e pretendiamo di capire che cosa davvero facciamo quando usiamo i nomi "spazio" e "tempo", allora siamo costretti a pensare in modo non abitudinario e ad abbandonare un gran numero di pregiudizi.

L'abbandono di taluni pregiudizi è un'impresa non banale. Ci può allora aiutare il riferimento a come, negli ultimi secoli, siano stati enunciati e parzialmente risolti alcuni aspetti problematici delle nostre descrizioni spaziotemporali.

Una annotazione breve, ora. Il riferimento su accennato è, sotto certi aspetti, di carattere storico: saranno citati Newton e Faraday, Riemann, Maxwell ed Einstein. Il mio intento non è tuttavia immediatamente storico. Penso infatti che questo volumetto avrebbe potuto esser scritto senza mai citare alcuno scienziato e citando, invece, i problemi che siamo abituati a intendere in correlazione con questo o quello studioso. La storia di "spazio" e di "tempo" in fisica è, in primo luogo, storia *della* fisica, non storia *dei* fisici. È semmai d'un qualche interesse osservare come l'evoluzione dei problemi sia caratterizzata da forme interne di necessità, anche se non è sempre agevole reperirle nel mare di credenze e di pregiudizi che sono connaturati all'impresa di grandi uomini.

Ancora un'avvertenza. Non dobbiamo *mai* dimenticare che sulle nostre retine si realizza continuamente una mappa a due dimensioni del mondo esterno, e che la terza dimensione è il risultato di altre mappe che si producono, indipendentemente dalla nostra volontà o consapevolezza, nel cervello. Molti dei nostri problemi nascono infatti non appena abbiamo la tentazione, più che ragionevole, di chiederci quale rapporto esista tra queste mappe e ciò che viene mappato.

Altri, poi, sorgono non appena ci chiediamo come mai collochiamo le cose non solo nello spazio ma anche nel tempo. Per quanto concerne la collocazione di cose nello spazio potremmo essere ad esempio convinti che il mondo esterno ai nostri recettori visivi contenga sorgenti di segnali luminosi che irritano le nostre retine e provocano effetti nel cervello. Possiamo però credere che quelle sorgenti lancino anche dei segnali temporali? E quali organi di senso raccoglierebbero allora tali segnali?

Insomma: dobbiamo proprio fare qualche passo oltre l'orlo osservativo del linguaggio. Non basta infatti avere orecchie per capire una sonata di Beethoven. Nello stesso senso, non basta possedere occhi e mani per collocare le cose in uno spazio a tre dimensioni e per disporre gli eventi in quello stranissimo spazio a una sola dimensione che

chiamiamo "tempo" e al quale attribuiamo la magica proprietà di fluire verso il futuro trascinando con sé tutte le cose. Qualora ci rendessimo conto che davvero *non basta*, avremmo già fatto molti passi nel viaggio che, grazie alla scienza, la nostra specie sta compiendo per differenziarsi gradualmente dalle altre bestie che popolano questo pianeta, così da non esser più costretta a cogliere soltanto, qua e là, gli strani barlumi d'un mondo caotico.

1

Forse che gli orologi catturano qualcosa?

Si può partire dall'orlo osservativo del linguaggio e progredire a poco a poco verso l'interno dove si esprime la scienza.

W, Van Orman Quine,
The Nature of Natural Knowledge, 1975

1.1

La percezione di spazio e di tempo

La prima via d'ingresso alla conoscenza è unica e stretta. Passa infatti per quelle sole zone della nostra superficie corporea che sono il risultato dell'evoluzione biologica e che abbiamo battezzato con l'espressione *recettori sensoriali*. Unica, certo: non possiamo far altro, all'inizio, che percepire il mondo esterno mediante un corredo dato di recettori biologici. All'inizio, certo. E poi? Molte cose sono dovute accadere prima che gli adulti imparassero a fabbricare con le mani quegli oggetti che chiamiamo manufatti, e moltissime altre cose sono poi successe prima che dal mondo dei manufatti emergessero infine quelle strutture materiali che funzionano come amplificatori del nostro comune corredo di recettori sensoriali o come veri e propri sensori artificiali: occhiali e radiotelescopi, termometri e orologi.

Ebbene, dico subito che non ho problemi quando scrivo che gli occhiali sono protesi. Servono per un uso definito e migliorano, quando sono necessari, il rendimento degli occhi. Debbo però ammettere, se ci penso un poco, che non sono certo nel dire che *anche* il mio orologio da tasca è davvero una protesi o un amplificatore: protesi di quale organo di senso, amplificatore di che cosa?

La situazione in cui mi trovo quando penso a una clessidra o a un Omega da taschino è infatti diversa da quella in cui mi colloco quando debbo inforcare gli occhiali per leggere un libro o uso un piccolo telescopio per vedere i crateri della Luna. So già, infatti, che i miei occhi hanno difetti e limiti. E so, anche, che le mie retine sono irritate da segnali e che questi segnali sono radiazioni "luminose". Posso addirittura avere ragioni per credere che i segnali siano emessi da oggetti esterni. Ora non è il caso di sottilizzare sulla natura fisica di queste radiazioni, oppure di sollevare quesiti filosofici sulla realtà degli oggetti esterni. È meglio fare un passo per volta. Il primo passo è che in qualche modo so di che cosa sto parlando quando descrivo gli occhiali o un piccolo telescopio alla stregua di protesi da applicare con successo ai miei sensori visivi

Eppure mi rendo conto che le circostanze relative alla clessidra o all'Omega da taschino sono diverse da quelle relative agli occhiali o al telescopio. E, se non lo so, me ne accorgo subito, non appena qualcuno mi chiede quale sia l'organo di senso che sto cercando di potenziare con la clessidra o con l'orologio. Non solo me ne accorgo subito. Ma, se il mio interlocutore mi chiede addirittura quali segnali siano catturati dalla clessidra o dall'orologio, allora imparo anche che non so dare alcuna risposta soddisfacente. Anzi, avverto che, tutto sommato, la domanda appena fattami è degna di nota.

Perché è degna di nota? Perché *sento*, in un modo o nell'altro, che il tempo passa, e perché so che per stimare questo passaggio sono stati costruiti calendari, clessidre e altre cose del genere. Vivo tutto ciò in modo manifesto, così come so che sto invecchiando e che ci sono le stagioni dell'anno e così via. Eppure non riesco in alcun modo a spiegare, a me stesso o ad altri, che cosa faccia un orologio per catturare segnali a proposito del tempo che passa, anche se sono capace, sia pure in forme approssimative, di spiegare a me stesso e ad altri che cosa fanno le lenti quando catturano una parte della radiazione emessa da un corpo e la inviano sulle mie retine.

Potrei allora sostenere che, mentre ci sono corpi che emettono *luce*, non ci sono corpi che emettono *tempo*. Una buona tesi, direi. Ma non mi serve per capire che cosa precisamente fanno gli orologi, visto che essi, a quanto pare, non raccolgono segnali emessi da qualcosa. Giunto a questa sponda, però, debbo ammettere che non so nemmeno perché uso un orologio per stimare con una certa precisione la mia sensazione del tempo. E, perbacco, io posso anche non saper rispondere alla domanda circa che cosa facciano gli orologi: ma so benissimo che ho la sensazione del tempo.

In poche parole. Possiedo la sensazione del tempo ma non so come mai guardo l'orologio per aiutare me stesso a precisare la mia sensazione del tempo. Forse dovrei studiare un poco di fisica per capire come mai guardo l'orologio.

Se le cose stessero così, la mia situazione non sarebbe poi tanto grave. In fin dei conti, posso benissimo guardare

la televisione senza essere in grado di capire frasi che parlano di elettroni o di fotoni. Mi è sufficiente sapere che, volendo, potrei capire *che cosa faccio* quando guardo la televisione e *che cosa faccio* quando guardo l'orologio.

Le cose, purtroppo, non stanno così. È vero che la fisica può insegnarmi ad avere una buona idea sia di come si comportano elettroni e fotoni, sia di come certe radiazioni emesse dallo schermo eccitano le mie retine. Ed è altrettanto vero che la fisica può aiutarmi inquadrando il problema temporale nell'ambito della teoria della relatività generale. In questo secondo caso, però, la fisica, *da sola*, non mi fornisce direttamente alcuna informazione su come io percepisco il tempo, mentre è invece in grado di darmi informazioni su come io percepisco le radiazioni emesse dallo schermo televisivo.

Siamo dunque d'accordo. Siamo ancora e sempre nella percezione. Sappiamo che esistono certi segnali che irritano certi recettori, e ci hanno insegnato parole come "suono", "odore", "colore", "ruvidezza" o "freddo". Ma non abbiamo la minima idea di quei segnali che dovrebbero irritare quei recettori (quali?) grazie ai quali *senso* la temporalità e descrivo determinate situazioni usando termini come "prima", "ora", "dopo", o coniugando verbi al passato, al presente e al futuro.

Sembra davvero che esista una differenza enigmatica tra sentire un odore o una luce, e sentire un tempo. Dobbiamo insistere, ora, su questa differenza. Potremmo insistere, ad esempio, suggerendo qualcosa a proposito del percepire lo spazio, avendo lo scopo di passare per lo spazio con la speranza di capire meglio il tempo.

Proviamo. Ho scritto all'inizio che la prima via verso la conoscenza è unica e stretta. Avendo già detto dell'unicità, argomentiamo attorno alla strettezza.

I recettori biologici e quelli che riusciamo a costruire sono strutture che non si lasciano irritare da ogni segnale, ma solo da alcuni. E così non sentiamo tutti i suoni, non vediamo tutte le radiazioni. I sensori, naturali o artificiali che siano, sono filtri che lasciano passare certe informazioni e ne bloccano altre. Non sono specchi perfetti che copiano il mondo e trasferiscono la copia al nostro interno, così che la possiamo contemplare con il pensiero.

E questo è un versante della strettezza che caratterizza la prima via verso la conoscenza. D'altra parte questi filtri non accolgono passivamente i segnali che catturano e che provengono da ciò che "sta fuori" rispetto alla nostra superficie corporea. I progressi nelle neuroscienze indicano che ciascuno di noi è, in realtà, un cacciatore di dati. Il cervello, infatti, non si limita a registrare e decodificare gli stati eccitati dei sensori: guida questi ultimi, con una ricerca continua, nell'esplorazione della nicchia. Sotto questo aspetto dobbiamo allora dire che il sistema nervoso è uno scienziato *naturale* che orienta i recettori, così che, muovendosi nella nicchia, l'animale possa adottare certi comportamenti e non altri. Uno scienziato che elabora strategie sulla base di esperienze già avute e al fine di elaborare previsioni circa esperienze non fatte.

1.2

Il comportamento linguistico

Il comportamento linguistico svolge allora una funzione centrale. Gli organismi parlanti, infatti, comunicano tra loro e si scambiano informazioni così che i comportamenti siano in qualche modo regolati in modo da perseguire scopi.

Già: il comportamento linguistico. Stiamo parlando di quel comportamento quotidiano che usa segni scritti o fonemi e che serve per i nostri usuali traffici con gli oggetti di senso comune: gli alberi e le città, la Luna e i manufatti d'impiego giornaliero. Le *cose*, insomma. E nel descriverle il cervello opera, come s'è appena detto, come uno scienziato *naturale*, nel senso che percepisce, impara, memorizza e guida i recettori con lo scopo di fornire spiegazioni e previsioni circa le *cose*.

Perché *naturale*? Perché la maggior parte delle azioni effettuate dal cervello si realizza senza che ce ne accorgiamo. Le intricatissime sequenze di decodificazione di dati che si realizzano *nel* cervello non sono, infatti, processi che sappiamo percepire con i sensori biologici o con le forme usuali dell'introspezione. Sotto questo aspetto il cervello lavora con regole sue, ed è *naturale* come naturali sono i comportamenti del fegato o del sistema immunitario. Abbiamo infatti bisogno di raffinatissimi sensori artificiali per *avere esperienza* di tale naturalezza, e abbiamo anche bisogno di raffinatissime teorie per interpretare questa particolarissima modalità dell'esperienza.

Riflettiamo per un momento sulla circostanza per cui, ora, in qualche anfratto del mio corpo o del corpo di un lettore, un gruppo specializzato di globuli bianchi ha percepito cellule che sono state invase da un nemico e si accinge ad attaccarle per distruggerle. Non possiamo percepire, con i nostri sensori biologici, questa circostanza, anche se, a volte, sentiamo alcuni suoi effetti (un attacco febbrile, ad esempio). Dobbiamo fabbricare sensori appositi per avere esperienza di ciò che accade dentro di noi quando un globulo bianco ha esperienza circa una cellula occupata da nemici, e impiegare teorie complicate se desideriamo capire i dati fornitici dai sensori.

L'esempio non è fuorviante. Il sistema immunitario, infatti, opera in collaborazione con il sistema nervoso centrale. La collaborazione è basata su uno sterminato mondo di recettori grazie ai quali il corpo, nella sua globalità, ha esperienze di varia natura che tuttavia sfuggono sistematicamente a quei sensori che sono presenti sulle nostre superfici e ai cosiddetti metodi dell'introspezione. Esperienze di cui, tuttavia, non abbiamo consapevolezza: non ci *accorgiamo* di queste esperienze. Ciò nonostante il sistema nervoso centrale ha costruito, facendo leva sulle competenze acquisite da gruppi ristretti di parlanti, dei sensori artificiali che hanno esperienza dell'esperienza dei globuli bianchi, o che

consentono, circa il mondo esterno, di progettare esperienze impressionanti quali quelle che consistono nel tentativo di osservare le ipotetiche radiazioni emesse dagli stati rotazionali di molecole di idruro di litio in quelle nubi extragalattiche di gas nelle quali, forse, sta l'origine delle galassie.

È facile, a questo punto, sollevare un'obiezione. Questa: dire che il cervello lavora di per se stesso come uno scienziato è solo *un modo di dire*, perché, sino a ora, s'è parlato di percezioni di vario tipo e, genericamente, di sensori tecnicamente fabbricati, per poi insinuare che, in realtà, abbiamo bisogno di teorie molto raffinate, senza le quali il cervello non può fare ciò che fa. L'obiezione sembra reggersi sul fatto per cui queste teorie non sarebbero prodotti naturali del cervello, ma astrazioni in cui la logica e la matematica hanno un peso crescente.

Ebbene, l'obiezione non è poi così forte come potrebbe a prima vista apparire. Vediamo come mai essa non è *molto forte*.

1.3

Sul descrivere ciò che non percepiamo

Cominciamo con un esempio semplice. Una funzione importante svolta dai recettori e dal cervello è quella che riguarda la percezione e la descrizione del movimento. Usando gli occhi possiamo osservare una straordinaria quantità di movimenti nel mondo esterno, dallo scorrere delle acque di un torrente agli spostamenti di un pianeta nel cielo notturno. Poiché gli esseri umani hanno retine tra loro simili, per secoli i moti dei pianeti sono stati percepiti, da osservatori dotati di un corredo relativamente modesto di istruzioni, in modi tra loro simili. Un osservatore odierno, pur avendo abbandonato le antiche *spiegazioni* di quei movimenti, vede in cielo, a occhio nudo, gli stessi movimenti del pianeta Marte che furono visti e descritti da osservatori vissuti mille anni prima che nascesse Giulio Cesare o nel terzo secolo dell'era cristiana o ai tempi di Copernico.

Sappiamo dunque che esiste una notevole stabilità nelle percezioni visive e nelle *conseguenti* descrizioni linguistiche dei movimenti osservati. Riflettiamo ora sulla circostanza in cui ci troveremmo qualora, basandoci soltanto sul funzionamento delle retine e sulle modeste istruzioni che i parlanti si tramandano con il linguaggio di senso comune, dovessimo dire qualcosa circa il movimento del nostro pianeta. Dovremmo ovviamente sostenere che non abbiamo alcuna percezione di tale movimento, e che, invece, abbiamo una netta percezione del movimento di Marte o delle acque di un torrente.

Com'è allora possibile che crediamo in qualcosa che non percepiamo, ovvero che crediamo di essere in uno stato di moto molto complicato e connesso, per lo meno, alla rotazione della Terra attorno al proprio asse e allo spostamento della Terra stessa attorno alla stella Sole?

Domanda ingenua? Mica tanto. In realtà pensiamo di avere ragioni per credere nel moto della Terra e in moltissime altre cose che sfuggono ai recettori, e, in particolare, di avere ragioni per credere che queste conoscenze siano essenziali proprio per capire come mai percepiamo una situazione di Terra *ferma* e non percepiamo una situazione di Terra *mobile*.

La prima via d'ingresso alla conoscenza, insomma, passa per i recettori sensoriali. E alla fine, però, sui recettori torna. Su di essi torniamo poiché proprio questo dobbiamo capire: come è possibile che elaboriamo teorie astratte a partire dalle poche informazioni che i recettori lasciano passare dall'esterno all'interno di ciascuno di noi, e come è possibile che le nostre astrazioni *funzionino*? Infatti: astratte sono le teorie grazie alle quali intendiamo capire i tentativi che compiamo per individuare, descrivere o modificare la realtà, e, comunque, molti di questi tentativi sono coronati da un accettabile successo, come ad esempio accade quando ci difendiamo da certi nemici che si insediano nelle nostre cellule o mandiamo una sonda nei pressi di Giove.

Si dirà che esiste una differenza radicale tra le operazioni effettuate da un globulo bianco e le operazioni necessarie per progettare e costruire una sonda. E la differenza starebbe in ciò: che noi pensiamo allo scopo di costruire una sonda, mentre il globulo non ha alcuna consapevolezza di ciò che sta facendo quando riconosce una cellula invasa da nemici.

1.4

Sul possedere teorie e significati

In altre parole: noi possediamo teorie, i globuli no. E io così rispondo al lettore scettico: che cosa vuol dire *possedere* una teoria, o un significato, o un'idea? Se vuol dire qualcosa, allora vuol dire che, con qualche sistema, un parlante è in grado di esibire una teoria, un significato o un'idea, esponendo queste cose come entità separate dal linguaggio e pubblicamente controllabili.

Non si tratta di una pretesa ignobile. Anzi. Essa è una seria e immediata conseguenza della tesi di chi sostiene che il linguaggio *trasporta* davvero idee o significati, essendo, le teorie o i significati, entità non linguistiche, ma enti

mentali. Chi difende questa tesi difende il punto di vista secondo cui una stringa di segni linguistici è proprio un nastro trasportatore di cose come i significati, i quali passano, grazie alla comunicazione linguistica, da una mente all'altra. Quindi, chi non ha linguaggi, non ha menti atte alla comunicazione.

Parrebbe dunque trivialmente vero che i globuli bianchi non *riconoscano* cellule invase da nemici, ma facciano altre operazioni - non mentali - per descrivere le quali è errato usare il verbo "riconoscere". I globuli bianchi, pertanto, sarebbero macchine, e (pur dovendo ammettere che si tratta di macchine spaventosamente complicate rispetto alle locomotive) non sarebbero comunque capaci di riconoscere alcunché, se non in senso metaforico. E, soprattutto, non sarebbero in grado di imparare a comportarsi in modi diversi da quelli ai quali sono destinati, visto che, per imparare qualcosa, è necessario avere una mente popolata da idee, significati e teorie.

Questo modo di vedere le cose sta in piedi su un pilastro illusorio. E il pilastro è illusorio in quanto esso è una congettura messa con i piedi per aria e la testa da nessuna parte: la congettura secondo cui le organizzazioni biologiche, di per se stesse, non hanno menti, e che noi, invece, le abbiamo. Come mai è diffusa la credenza che tale congettura sia ovviamente vera? È diffusa perché ci sembra terribile ammettere che non abbiamo bisogno di una mente per passare dalla percezione, che è comune a tutte le organizzazioni biologiche, alla capacità di elaborare inferenze e comportamenti finalizzati. Così siamo addirittura spinti a negare l'evidenza circa le inferenze e i comportamenti finalizzati che pure osserviamo nel gatto di casa e che possiamo imparare a osservare in un globulo bianco.

Non sto cercando di convincere qualcuno ad abbracciare il punto di vista per cui ogni organizzazione biologica è corredata di una mente. Sto invece suggerendo che non ci siano menti in alcun luogo, e che ci siano invece, in moltissimi luoghi, linguaggi. E penso di avere due buone ragioni per sostenere ciò.

Una è questa. Accettiamo pure, in via ipotetica, che un linguaggio sia un trasportatore di significati. Quando mi trovo di fronte a un pezzo di linguaggio - a una proposizione P - posso allora chiedere quale sia il significato S che è trasportato da P . La risposta è sempre del tipo "il significato S di P è *questo e quest'altro*": ovvero, la risposta è una proposizione P' , circa la quale è del tutto ragionevole chiedere quale sia il significato S' . E così via: cioè, da nessuna parte trovo davvero un significato, e dappertutto trovo sempre proposizioni. In nessun gruppo di parlanti ci si scambia significati, idee o teorie, e fra tutti i parlanti, invece, ci si scambia pezzi di linguaggio. Ed è in questo modo di comunicare che si può, volendo, passare dall'orlo osservativo del linguaggio, dove si dice ad esempio «Fa caldo», all'interno di quei linguaggi dove si danno asserti circa la correlazione fra la temperatura segnata da un termometro (e percepibile quando guardiamo un dato numero sulla scala termometrica) e gli stati di moto molecolare (che non percepiamo con i recettori sensoriali di cui siamo dotati).

Ed ecco la seconda ragione. Un linguaggio è, innanzitutto, una sequenza di oggetti. Anche un mentalista potrebbe accettare questo punto di vista: un mentalista non dirà mai, infatti, che una sequenza di fonemi non è una sequenza di vibrazioni dell'aria nei pressi della cavità orale di chi sta emettendo quei fonemi. Ebbene, se comunicare è scambiarsi segni o fonemi, allora anche i globuli bianchi hanno comportamenti fondati sulla comunicazione intesa come scambio di segni materiali: non a caso gli scienziati osano impunemente scrivere che per capire che cosa fanno i globuli bianchi è necessario decodificare il linguaggio delle interazioni cellulari.

Impariamo, così, che non dobbiamo scegliere se alcuni animali hanno la mente oppure non l'hanno, ma che dobbiamo *invece* capire quali differenze esistono nell'universo dei linguaggi umani e non umani.

1.5

Che cosa fanno gli orologi?

Solo a questo punto dell'argomentazione possiamo tornare alla percezione della temporalità e alla faccenda di che cosa faccia l'orologio, dopo aver appurato che non possediamo sensori irritabili da segnali di tempo e che è stravagante credere che gli orologi o le clessidre siano sensori artificiali aventi lo scopo di sentire i segnali di tempo emessi da sorgenti esterne alla nostra superficie corporea. Una volta appurato tutto questo, chiediamoci se l'enigma circa la percezione del tempo è unico. Esso è unico rispetto alla percezione della luce o degli odori o dei suoni e così via. Ma non è più unico se facciamo attenzione a come parliamo quando parliamo della collocazione spaziale di qualcosa.

I nostri discorsi sulla collocazione spaziale sembrano infatti godere di una naturalezza che è solo pari a quella che caratterizza la collocazione temporale.

Dobbiamo descrivere la collocazione spaziale, e non possiamo fare altrimenti se non vogliamo perdere i canali della comunicazione con gli altri parlanti. Possiamo usare frasi approssimative, del tipo di quelle che usiamo tutti i giorni quando diciamo che una mela è "sopra" il tavolo, che il tavolo è "lungo" un metro e che la parete in fondo alla camera è "lontana" circa tre metri e mezzo rispetto alla mela. E aggiungere se è il caso, che abbiamo visto la mela alle ore quindici di ieri.

Sappiamo anche che, qualora si sia costretti a fornire una descrizione più precisa, esistono manufatti appositi sul cui uso non abbiamo, dopo aver appreso alcune semplici istruzioni, alcuna perplessità: manufatti dove sono state tracciate sequenze di tacche e numeri. Usando un manufatto di questo tipo possiamo essere più precisi nell'uso di parole come "sopra", "lungo" o "lontana". La collezione di manufatti di questo tipo va sotto il nome generale di "regoli".

Ebbene, siamo sicuri che l'uso dei regoli sia più triviale dell'uso degli orologi? Sembra di sì. Abbiamo problemi

con il tempo, ma non li abbiamo con lo spazio, perché un conto è *sentire* la temporalità, e un conto ben diverso è misurare la profondità di una stanza o la lunghezza di un tavolo.

Davvero? Potrei a questo punto dire che i regoli non sentono un bel niente, qualora sentire voglia proprio dire sentire segnali esterni, e che allora i regoli sono problematici come le clessidre. Quando affermo che alle ore quindici di ieri la mela era sopra il tavolo non costruisco un enunciato basandomi su *segnali* raccolti da manufatti come l'orologio e il regolo, pur essendo vero che debbo aver sentito qualcosa se sono in grado di costruire quell'enunciato e di ricorrere a manufatti. Che cosa ho sentito?

Ho indubbiamente sentito qualcosa sul canale visivo, perché ho guardato la mela, il tavolo, la stanza, l'orologio e il regolo. Alcuni oggetti erano fermi: la mela, il tavolo e la stanza. Anche l'orologio. Certo. Ma l'informazione datami dall'orologio non aveva niente a che fare con il fatto che l'orologio fosse fermo o si muovesse insieme a me, mentre magari facevo due passi nella stanza. *Io ho guardato il movimento delle lancette dell'orologio* (e nulla cambia se l'orologio, invece di esibire il moto delle lancette, esibiva un movimento di cifre: ho comunque osservato un movimento). Dopo di che ho stabilito che, essendo la lancetta delle ore sul numero tre e la lancetta dei minuti sul numero dodici, è affidabile, sul piano della comunicazione verbale o scritta, dichiarare qualcosa come «sono le ore quindici».

In realtà, dunque, ho dapprima valutato l'angolo compreso tra le due lancette, e ho poi seguito quelle istruzioni, datemi nell'infanzia, in base alle quali *quell'*angolo tra una coppia di lancette disposte su *quei* due numeri (tre e dodici) denota un tempo. Mi sono comportato in modo analogo quando ho *mosso* il regolo per determinare la lunghezza del tavolo o la distanza tra la mela e la parete di fondo.

Non ho fatto nient'altro che guardare movimenti e usare regole il cui scopo è quello di trasferire nel linguaggio corrente gli stati eccitati delle mie retine. Appunto: guardare movimenti di oggetti e guardare oggetti, come passo iniziale. Ebbene, ora sosterrò che tutta la faccenda ingarbugliata della collocazione spaziale e temporale dipende proprio, in primissima istanza, da che cosa *si fa* nel guardare oggetti e nel guardare oggetti in movimento.

1.6 Parlare di oggetti

Albert Einstein espose in proposito un punto di vista interessante circa la formazione del concetto di "oggetto corporeo". Scrisse che «dalla massa delle nostre esperienze sensoriali noi preleviamo certi complessi di impressioni ricorrenti» e aggiunse che poi «attribuiamo loro un significato, il significato di oggetto corporeo». Bisogna fare molta attenzione a questo punto di vista. Esso afferma che il nostro sistema nervoso effettua una selezione tra i segnali che eccitano i nostri sensori e che, una volta fatta la selezione, il cervello attribuisce l'etichetta di *oggetto corporeo* a ciò che resta. Data dunque l'etichetta, il cervello fa, a parere di Einstein, un'altra operazione: usa l'etichetta come se essa denotasse una cosa pressoché indipendente dalle impressioni sensoriali di partenza. Parliamo, a questo punto, di "esistenza reale" della cosa.

Il lato rilevante di questo punto di vista è che, da una parte, il cervello *costruisce* il concetto di oggetto corporeo mediante una specifica selezione dei dati sensoriali che dipende da come è fatto il cervello, mentre, dall'altra parte, aggancia a questa costruzione uno statuto di realtà intesa come autonomia dai dati sensoriali.

La rilevanza è cospicua, ed Einstein si chiese, infatti, come facciamo a giustificare tutto ciò. Rispose che la giustificazione «riposa esclusivamente sul fatto che, mediante tali concetti e le associazioni tra essi, noi siamo in grado di orientarci nel labirinto delle impressioni sensoriali». Fornire la giustificazione, però, non implica che abbiamo spiegato l'intera questione. Einstein, a questo punto, scrisse infatti che ci trovavamo di fronte a un problema spettacolare: «il fatto stesso che la totalità delle nostre esperienze sensoriali si possa ordinare col pensiero (operazioni con concetti astratti, creazione e uso di relazioni funzionali ben definite fra di essi, e coordinazione delle esperienze sensoriali con tali concetti) ci lascia stupefatti, ed è un qualcosa che non riusciremo mai a spiegarci».

Non dobbiamo tuttavia prendere alla lettera l'apparente pessimismo einsteiniano. Sta di fatto che, al fine di non perdere la bussola nel nostro viaggio introduttivo tra percezione, spazio e tempo, può essere di formidabile aiuto far leva sul punto di vista di Einstein circa gli oggetti corporei. Prendiamo dunque sul serio l'inclinazione a vedere gli oggetti corporei, *così come li descriviamo mediante linguaggi ordinari*, alla stregua di costruzioni che il cervello realizza, *per conto suo*, dopo aver selezionato, *per conto suo*, un certo raggruppamento di segnali emessi da sorgenti esterne.

Se la prendiamo sul serio ci rendiamo conto che, nell'attribuire all'oggetto corporeo la caratteristica di essere indipendente dalle percezioni, affermiamo che esso ha un'*esistenza reale*.

È allora immediato chiederci *dove* tale esistenza sia, e *quando*. Perché ci sembra così naturale il fatto che effettivamente portiamo con noi questo genere di quesiti? Ci sembra naturale perché il nostro cervello, a quanto ne sappiamo, è fatto in modo tale da disporre le esperienze secondo criteri d'ordine che sono endogeni al cervello stesso.

L'ordine con cui disponiamo le arance in un contenitore di legno non rispecchia *in nessun senso* l'ordine con cui le arance stavano sui rami prima d'essere colte. Su ogni retina i segnali esterni sono mappati su due dimensioni, tradotti in sequenze di linguaggi tra loro diversi e, infine, integrati nel cervello, là dove appare la terza dimensione.

Nessuno di noi è cosciente dell'intero processo di traduzioni e decodificazioni che parte da due mappe

bidimensionali e sfocia in una mappa tridimensionale. Ed è proprio per questo motivo che ci sembra del tutto naturale che all'esterno delle retine ci sia proprio qualcosa la cui essenza è a tre dimensioni: un motivo analogo a quello per cui, dopo aver selezionato biologicamente un dato gruppo di impressioni sensoriali e aver così fabbricato un concetto di oggetto corporeo, attribuiamo a quest'ultimo uno status di realtà indipendente dalle percezioni. Sia nel caso dello spazio, sia nel caso dell'oggetto, elaboriamo inferenze e descrizioni di segnali, per poi compiere quel salto enorme che consiste nella reificazione delle nostre inferenze.

Un salto enorme, davvero. Talmente grande da generare una confusione profondissima tra l'oggetto da noi descritto nello spazio e la sorgente di segnali che ci ha indotti alla descrizione.

Aveva dunque ragione Mach quando sosteneva che lo spazio *della* percezione è tridimensionale. È importante tuttavia ricordare *anche* che Mach ironizzava pesantemente sulle inclinazioni, a suo avviso magiche e irrazionali, che spingevano i matematici a costruire spazi diversi da quello della percezione, con lo scopo di illuminare quest'ultimo. L'argomento ironico di Mach era quello secondo cui nessun ostetrico aveva mai eseguito un parto nella quarta dimensione, e che, di conseguenza, la fisica non doveva far altro che basarsi sulle tre dimensioni. Sul fatto che di lì si dovesse partire esisteva un ampio consenso: il dissenso sorgeva non appena si dichiarava che la fisica doveva *restare lì*.

Infatti, le nostre usuali descrizioni di oggetti implicano la rappresentazione nello spazio ma hanno altresì bisogno della rappresentazione temporale. Abbiamo bisogno di quest'ultima in quanto il cervello dispone in ordine i gruppi di percezioni, e l'ordine che caratterizza il lavoro dei neuroni è esso stesso un risultato dell'evoluzione. Per sopravvivere abbiamo imparato, molto tempo fa, a classificare in un certo modo i gruppi di percezioni, memorizzandoli in modo tale da trovarci in grado di elaborare strategie comportamentali.

Abbiamo imparato a memorizzare e a ricordare, dove ricordare non vuole affatto dire *andare indietro nel tempo*, ma vuole invece dire esplorare gli apparati cerebrali della memoria.

1.7

Spazio, tempo e moto

Il concetto prescientifico di tempo nasce da queste esplorazioni. Ed è talmente prescientifico da indurci in paradossi senza via d'uscita. Ecco: sto pensando a un evento che è accaduto nel mio passato personale, e so perfettamente che non posso, ora, effettuare alcuna scelta che lo modifichi, pur essendo magari convinto che gli eventi miei personali nel futuro si realizzeranno anche in funzione delle scelte che sto ora per fare. Ovvero, come spesso si narra, il mio passato è determinato, ma il mio futuro è potenziale. Ecco: le credenze prescientifiche sul tempo finiscono sempre per gettare l'ancora in porti dove regna la perversione linguistica. Una perversione che s'annida proprio nella reificazione indebita di certe nostre descrizioni di segnali: nessuna sorgente ci lancia segnali di tempo *nello stesso senso* in cui *diciamo* che certe sorgenti ci lanciano fotoni o altre ci lanciano complicate molecole che irritano i sensori olfattivi.

Così reifichiamo descrizioni linguistiche che sono frutto di inferenze del cervello, e immaginiamo che il mondo reale non sia un mondo di sorgenti da esplorare come meglio possiamo, ma sia proprio un mondo di oggetti corporei immersi in uno spazio dove fluisce il tempo. Ritengo che quasi tutta la filosofia dei licei sia nata da questa situazione, e che questa situazione debba essere abbandonata dichiarando che è finita la ricerca di una soluzione trascendentale dell'antico problema della realtà.

Abbiamo, infatti, un problema nuovo, molto interessante ed enunciabile solo nella scienza: il problema di come facciamo a tessere correlazioni tra sorgenti di segnali, sensori biologici, sensori artificiali, manufatti, inferenze nel cervello e descrizioni che necessitano, per essere enunciate, di settori sempre più astratti dell'inferenza matematica e della misura. Problema nuovo? Certo. Abbiamo incominciato a intravederne i contorni con Galilei, e cioè quando ci siamo accorti che le nostre usuali descrizioni spaziotemporali delle cose dipendono, in modo straordinario, non dalle comuni percezioni intersoggettive di movimento, ma da inferenze circa lo stato delle nostre percezioni.

Vedremo nel prossimo capitolo un lato affascinante dell'impresa galileiana. Quell'impresa, infatti, fu molto più astratta di quanto a volte credano coloro che pure ammirano Galilei per la sua fiducia nella matematica, e fu anche più astratta di quanto lo stesso Galilei credesse.

A partire da quell'impresa potremo effettivamente cominciare un viaggio lungo un percorso piuttosto intricato e certamente non lineare. Un percorso costellato di problemi e, anche, di uomini. Pochi problemi, in realtà, e pochissimi uomini: problemi la cui soluzione non è più o meno vera in base al consenso o al dissenso delle folle, e che possono, di conseguenza, essere maneggiati da un numero ristretto di parlanti che cercano, invece del consenso, la verità. Un viaggio, dicevo. Un viaggio che terminerà quando, a un certo punto, getteremo l'ancora, e la getteremo proprio nel momento in cui avremo ragioni sufficienti per credere che lo spazio e il tempo non sono i frutti di magiche distillazioni delle esperienze vissute.

2

A proposito di osservatori

Come il geografo non crea il mare, mentre ne traccia le coste e mentre dice, per esempio, "voglio chiamare Mar Giallo la porzione di superficie acquea limitata da queste linee"; così anche il matematico non può, a rigor di termini, creare nulla con le sue definizioni.

G. Frege, *Grundgesetze der Arithmetik*, 1893

2.1

Dal *motus* allo spazio fisico

Quando Galilei era uno svogliato studente nella città di Pisa, gli scienziati e i filosofi, accomunati sotto la dizione professionale "filosofia naturale", discutevano del *motus*, e il nome *motus* denotava un universo di mutamenti. Tutti i processi osservabili in natura erano elementi dell'insieme battezzato *motus* in quanto, per l'appunto, erano processi dominati dal cambiamento: e il cambiamento era immediatamente avvertibile, perché gli osservatori vedevano il generarsi, l'invecchiare e il disfarsi delle piante o degli animali, e le trasformazioni delle nubi o delle sostanze. Per capire il *motus*, quindi, s'aveva bisogno di una teoria globale del mutamento, e, a sua volta, la teoria globale non poteva che partire dalla percezione del mutamento.

Il punto d'avvio stava, insomma, nelle "sensate esperienze". Un punto d'avvio che, per certe scuole di derivazione aristotelica, non escludeva il ricorso alla certezza raggiungibile con la matematica. Così, ad esempio, predicava a Pisa l'aristotelico Buonamici, e così il giovane Galilei apprendeva le prime regole per servirsi, insieme, di "sensate esperienze" e "certe dimostrazioni".

Regole, sia ben chiaro, che erano condivise da molti parlanti e che Galilei ricordò più volte come canoni aurei da contrapporre a quegli studiosi che erano invece propensi a spiegare i fenomeni per mezzo di sole citazioni bibliografiche piuttosto erudite. Nel gioco eterno delle citazioni ben poco spazio restava per il punto di vista che Galilei sosteneva nella quotidiana ricerca pratica. Quest'ultima, infatti, dava un colpo di spada nel *motus*. E il taglio inferto da Galilei tracciava una demarcazione brusca nel corpo tradizionale del *motus* perché estraeva, dal mare dei cambiamenti, una porzione ristretta di eventi che aveva a che fare solamente con i moti *locali*, passibili di sperimentazione mediante l'impiego di manufatti (quali i piani inclinati o gli orologi ad acqua) e l'appello a deduzioni (quali quelle consentite dalla teoria geometrica delle proporzioni fra grandezze omogenee).

Una scelta certamente modesta, se confrontata con le pretese esplicative difese da coloro i quali cercavano invece una spiegazione unica per l'invecchiamento degli uomini, i fenomeni meteorologici, la crescita dei fiori e la caduta delle pietre. Eppure quella modestia, che irritava un numero cospicuo di intellettuali contemporanei di Galilei, si rivelò, a posteriori, vincente.

Può sembrar strano che ci si chieda, oggi, *come mai* fu vincente. Eppure non è realmente strana la domanda, qualora non si creda che la scienza allora vigente fosse una stravagante esercitazione filologica. La scienza del *motus* pregalileiana era, infatti, molto potente, ed era altresì conforme alle percezioni private che ogni individuo aveva circa il movimento dei gravi e ai controlli pubblici che si potevano in proposito realizzare.

2.2

Le regole del gioco

Quella scienza prescriveva varie regole. In particolare, una regola asseriva che il mondo è un *plenum*, e la seconda dichiarava che lo spazio occupato dal *plenum* possiede un punto diverso da tutti gli altri punti del cosmo.

Non esisteva dunque alcuna porzione del mondo di cui si potesse dire che era vuota. E, grazie alla seconda regola, esisteva certamente un punto privilegiato dello spazio. Era sufficiente, per individuarlo, osservare con accuratezza la caduta dei gravi e l'ascesa dei corpi leggeri come il fuoco. I primi tendevano naturalmente verso il centro della Terra. I secondi salivano naturalmente verso l'alto, nella medesima direzione e con senso opposto rispetto ai gravi: il centro era sempre lo stesso.

Questo modo di descrivere il moto generava molti problemi, quali ad esempio quelli relativi al moto di una freccia nell'aria. Non esistono però teorie scientifiche che non abbiano problemi, e, a priori, non esistevano moltissimi dubbi sulla possibilità di risolvere le anomalie di cui, per altro, si era ben consapevoli.

Le due regole erano sistematicamente salvabili. In un mondo privo di tecniche atte a generare un certo livello di vuoto possiamo soltanto fare esperienze su corpi che si muovono in mezzi resistenti. E i corpi si muovono, nei mezzi resistenti come l'aria o l'acqua o altri fluidi più o meno densi o viscosi, secondo modalità conformi all'aspettativa che esista una correlazione tra la velocità e il peso. Così accadeva che la prima regola fosse sistematicamente messa al sicuro.

Anche la seconda regola era messa al sicuro. I gravi cadevano lungo la verticale anche quando erano collocati in un sistema di riferimento in moto: un pietra cade al piede della perpendicolare sia quando cade dalla torre di Pisa, sia quando cade da una certa altezza dell'albero maestro di una nave in moto con velocità costante. E tutte le perpendicolari convergono nel centro della Terra.

Se davvero teniamo conto dell'affidabilità di queste due regole rispetto all'osservazione, allora cominciamo a comprendere quali giganteschi ostacoli si ergessero di fronte a Galilei. Trascuriamo, per il momento, la prima regola, e lasciamo in disparte, provvisoriamente, le difficoltà incontrate da Galilei nell'enunciare leggi rigorosamente valide *solo* per oggetti geometrici mobili nel vuoto e nel pretendere che tali leggi fossero approssimativamente vere anche per oggetti reali che si spostano in mezzi resistenti. Concentriamoci sulla seconda regola e sulle questioni connesse all'esistenza di un punto privilegiato dello spazio.

Chiediamoci, pertanto, se la determinazione di tale punto caratterizza lo spazio *in qualche modo*. Se ci pensiamo un poco, ci accorgiamo facilmente che *quello* spazio ha proprio una caratteristica singolare. Esso, infatti, non è isotropo: tutte le direzioni immaginabili in esso sono descritte rispetto al centro, e tutte le posizioni immaginabili in esso sono individuate rispetto al centro. *E ciò vuol dire che le posizioni e le direzioni non sono equivalenti, e che tale mancanza di equivalenza è necessaria.*

Tra i contemporanei di Galilei era vivace e intelligente la discussione su che cosa diavolo fosse lo spazio. E, come sempre accade nelle discussioni vivaci, esistevano rimarchevoli divergenze tra i parlanti. Era tuttavia difficile enunciare forme credibili di dissenso a proposito della seconda regola. Quei parlanti, insomma, stavano analizzando temi circa la natura dello spazio, e tutte le loro analisi, in forme esplicite o implicite, avevano a che fare con il problema di uno spazio intrinsecamente non isotropo.

Interessante, questo lato della storia. Soprattutto perché, in uno spazio non isotropo, è del tutto ragionevole pensare che esistano stati osservabili dei corpi che tra loro differiscano in forma radicale. In uno spazio non isotropo, infatti, devono esistere stati di quiete assoluta rispetto al centro e stati di moto assoluto rispetto al centro. Così *debbono* stare le cose. E così stanno quando guardiamo i corpi, poiché davvero vediamo corpi in quiete e altri corpi che, invece, in quiete non sono. Come mai vediamo corpi che non sono in quiete? Li vediamo perché nel mondo esistono forze che mettono in moto i corpi fermi e agiscono poi su questi ultimi in modo tale che essi si comportino come *devono* comportarsi in presenza di resistenze dovute ai mezzi.

Ecco il motivo per cui ho preferito parlar subito della seconda regola. La prima è sul moto nei mezzi resistenti, ed è meno importante di quella che definisce lo spazio come non isotropo, anche se, in era galileiana, è molto probabile che la prima regola fosse capita come fondamentale dalla stragrande maggioranza dei curiosi di cose naturali.

2.3

Spazio e relatività galileiana

La posizione assunta da Galilei nel *Dialogo* fu l'esito di anni e anni di ricerche locali, ovvero di ricerche che, anziché tentare di risolvere l'impossibile problema globale del *motus*, affrontarono problemi quanto mai ristretti o parziali: il pendolo, i piani inclinati, il moto dei proiettili. Dovrebbe ora essere del tutto chiaro come fossero tenaci le difficoltà da superare per approdare al punto di vista esposto nel *Dialogo* a proposito dello spazio.

Galilei *dovette infatti dichiarare che lo spazio è omogeneo e isotropo*, e che, di conseguenza, *non sono realizzabili esperimenti di meccanica grazie ai quali distinguere uno stato di quiete da uno stato di moto rettilineo e uniforme*, anche se tutta la conoscenza allora disponibile sui moti *doveva* negare proprio queste cose e *riusciva a negarle* proprio con l'appello all'esperienza. Siamo attenti: sto dicendo che la base empirica era contraria allo spazio galileiano, e che Galilei, pur avendo capito moltissime cose grazie all'esperienza, dovette alla fine sostenere che la verità sul moto dipendeva dall'impossibilità di fare esperimenti atti a distinguere la quiete dal moto. Anzi: sto dicendo che la base empirica è contraria ancora oggi allo spazio galileiano, anche se ci facciamo caso solo quando ci rendiamo conto dell'impressionante fatto per cui la fisica di senso comune è, per così dire, aristotelica.

Sotto questo profilo è sbagliato dichiarare che gli ostacoli principali che Galilei dovette affrontare riguardavano questa o quella legge galileiana sul moto. Ed è sbagliato perché le leggi galileiane sul moto, così come appaiono nei *Discorsi e dimostrazioni*, si riducono a quelle sul moto rettilineo uniforme e naturalmente accelerato, e a qualche teorema sulle traiettorie dei proiettili.

La spettacolare grandezza della fisica galileiana è collocata, invece, nel principio di relatività, il quale garantisce

l'invarianza delle leggi del movimento sotto condizioni precise circa la natura stessa dello spazio.

Al cuore di quella concezione del moto è in tal modo disposta un'argomentazione che attribuisce, a certe porzioni dello spazio, precise caratteristiche fisiche. Voglio insomma dire che Galilei introduce, nelle descrizioni spaziali, la fisica: e che la introduce in forme tali da *cambiare la nozione di spazio usualmente inferibile dalle percezioni intersoggettive degli osservatori*.

Questo versante della rivoluzione galileiana è manifesto nel famosissimo passo del *Dialogo* dove si discute il problema della nave. Famosissimo: se non altro perché viene ormai letto nelle scuole medie secondarie. Ma problematico in modo profondo: perché getta luce sulla *necessità di abbandonare lo spazio come mero ente di percezione e sulla conseguente necessità di reinterpretare le osservazioni sul moto in base a un principio astrattissimo*.

L'avvio stesso della versione galileiana del problema della nave - ch'era, di per se stesso, un luogo comune nel dibattito sui moti osservabili e sulle loro cause - è difficile. Galilei sostiene infatti di poter dimostrare «la nullità di tutte le esperienze addotte» da coloro che negano l'esistenza di moti non osservabili come quelli del nostro pianeta. E, per esibire la nullità di *quelle* esperienze, suggerisce di realizzare *altre* esperienze. Vediamole con calma. Le nuove osservazioni riguardano situazioni percepibili in un ambiente chiuso all'interno di un vascello: il movimento *in tutte le direzioni* di mosche e farfalle in aria o di pesci in un vaso colmo d'acqua; la caduta di gocce d'acqua *lungo la verticale* o la salita di un filo di fumo *verso l'alto*; le traiettorie di oggetti lanciati *in qualsiasi direzione* o la misura delle lunghezze relative a balzi di un osservatore *in qualsiasi direzione*.

Abbiamo dunque due gruppi di osservazioni. Un gruppo concerne il moto lungo una direzione fissata, l'altro il moto lungo direzioni qualsiasi. Galilei giustamente sostiene che i risultati di entrambi i gruppi di osservazioni sono indipendenti dallo stato di moto della nave e, quindi, dell'osservatore, sotto la precisa condizione che la nave sia o in quiete o in moto non accelerato.

Galilei ritiene che questo modo di sperimentare sui movimenti sia tale da annullare tutte le pressoché infinite osservazioni che i critici adducono per dimostrare, ad esempio, che la Terra non è in moto. La ragione per cui Galilei pensa *così* non è facile da capire, anche se Galilei, volendo essere capito, ha parlato di mosche e farfalle e salti sul pavimento e gocce che cadono. Anzi: il punto di vista galileiano è spaventosamente difficile per chi davvero creda che l'esperienza sia la sola fonte delle nostre conoscenze.

La difficoltà sta in ciò: che l'argomento di Galilei dice che si possono realizzare *alcune* esperienze al fine di concludere che *tutte* le esperienze possibili nulla dicono sulla distinzione fra stato di quiete e stato di moto non accelerato. Questo argomento dichiara che le leggi del moto sono invarianti per osservatori in quiete o in moto non accelerato. E la cosa più incredibile, allora, è che l'argomento di Galilei *nega che esistano osservatori nel senso normale del termine*: non esistono infatti osservatori che, con esperimenti di meccanica, possano capire se stanno in un sistema di riferimento o in un altro.

L'argomento della nave elimina di fatto il ruolo degli osservatori, svuota del suo tradizionale contenuto una classe enorme di esperienze e invita i parlanti a riclassificare tutta la base empirica in nome dell'invarianza delle leggi di natura: il che giustifica l'atteggiamento di chi *oggi* battezza il punto di vista galileiano con l'espressione "principio di relatività di Galilei".

2.4

Conseguenze non intenzionali: la scomparsa dell'osservatore

Ma l'intera tematica della nave ha altre implicazioni. Prima di parlarne, occorre tuttavia una scarna digressione circa quelle cose che sono le implicazioni e circa i nostri usuali atteggiamenti nei loro confronti. Può infatti accadere - anzi, accade con una frequenza impressionante - che certe implicazioni siano necessarie dal punto di vista delle inferenze, e che tuttavia siano psicologicamente inquietanti o sorprendenti per chi le scova ragionando. Facciamo un esempio. Abbiamo una certa teoria e, al suo interno, un ricercatore, che chiameremo *A*, trova che, se è vero un enunciato, che chiameremo *e*, allora è anche vero un altro enunciato *f*, nel senso che *e* implica *f* in base a certe strategie deduttive. Succede poi che un secondo ricercatore, chiamato *B*, esplora la *medesima* teoria e trova che, ammettendo *e* ed *f* dobbiamo altresì ammettere che *e* ed *f* implicano un enunciato *g*, e che *g* sia molto controintuitivo, o imprevisto, o non intenzionale, o comunque differente da ciò che *B* intendeva cercare e trovare.

È del tutto naturale che *B* sia stupefatto. Ma è altrettanto naturale che *g* sia *davvero* una implicazione necessaria della teoria in questione e che, prima di *B*, nessuno se ne sia mai accorto. Voglio dire che la sequenza delle scoperte effettuate da *A* e da *B* nella teoria è una circostanza del tutto secondaria - e, al limite, priva di grandissimo interesse - di fronte alla circostanza per cui quella teoria conteneva *g* anche se nessuno se n'era accorto prima che *B* facesse in

proposito una scoperta.

Detto questo, possiamo allora chiederci che cosa Galilei abbia scoperto ragionando sulla nave. Se la nostra domanda riguarda ciò di cui Galilei fu consapevole, allora la risposta è che Galilei scoprì l'invarianza delle leggi della meccanica rispetto a osservatori collocati in sistemi di riferimento particolari. Scoprì inoltre che non esiste alcuna differenza qualitativa tra stato di quiete e stato di moto non accelerato. Scoprì anche che, *stando così le cose*, qualora lanciassimo un oggetto lungo una data direzione e in assenza di gravità, l'oggetto continuerebbe a muoversi in quella direzione e con velocità costante: scoprì, in altre parole, che un corpo si muove di moto inerziale in assenza di forze applicate. Una cosa questa, che ben poche persone potevano allora cogliere, in quanto credevano che le forze fossero cose molto speciali la cui funzione era quella di muovere i corpi.

Galilei, infine, si rese conto del fatto che l'uomo non era la misura del mondo. Se c'è invarianza delle leggi di natura rispetto a osservatori in sistemi di riferimento galileiani, allora gli osservatori sono sostanzialmente superflui.

Nessun osservatore, infatti, potrà mai descrivere un moto in violazione del principio di relatività, se non nel caso in cui egli enunci una descrizione errata. Ritengo che questa conclusione fosse, allora, altamente indesiderabile, e che essa rimanga indesiderabile anche oggi, poiché elimina la smodata pretesa di alcuni intellettuali che insistono nel vedere l'uomo come misura d'ogni cosa.

Costoro, infatti, non possono ammettere la validità della scomoda tesi esposta nel *Dialogo*, là dove Galilei scrive:

Estrema temerità mi è parsa sempre quella di coloro che vogliono far la capacità umana misura di quanto possa e sappia operar la natura, dove che, all'incontro, e' non è effetto alcuno in natura, per minimo che e' sia, all'intera cognizione del quale possano arrivare i più specolativi ingegni. Questa così vana presunzione d'intendere il tutto non può aver principio da altro che dal non avere inteso mai nulla.

Galilei, in poche parole, fu consapevole d'aver scoperto alcuni aspetti *universali* della teoria del moto. La sua teoria, però, conteneva implicazioni delle quali Galilei non fu consapevole e che furono scoperte da altri.

L'implicazione che qui ci interessa è quella relativa allo spazio e al tempo. Abbiamo visto che l'invarianza delle leggi della meccanica galileiana comporta, di necessità, che lo spazio non sia quello della percezione di senso comune, ma sia invece una struttura *ovunque* isotropa e omogenea. E, sulla base dei testi galileiani, dobbiamo concludere che Galilei capì di aver scoperto questa struttura controintuitiva e si rese conto di doverla comunicare ad altri facendo leva su esempi intuitivi e facili come quelli concernenti il volo delle mosche in ogni direzione.

2.5

Altre conseguenze non intenzionali: il tempo uniforme

L'invarianza galileiana, però, comporta anche che il tempo sia, in modo assai poco intuitivo, uniforme. Se pretendiamo che nello spazio debba valere l'equivalenza circa le posizioni e le direzioni, dobbiamo anche pretendere che siano tra loro equivalenti gli istanti in cui un oggetto è in certe posizioni.

Ma il tempo della percezione soggettiva non ha equivalenza rispetto agli istanti, anche se, spesso, diciamo che esso sembra scorrere in modo uniforme. Un istante del *mio* passato contrassegna un evento del mio passato, e quell'evento è determinato e non dipende dalle mie scelte attuali. Un istante del *mio* futuro, al contrario, contrassegnerà un evento potenziale che in qualche modo dovrebbe dipendere dalle mie scelte attuali.

Si faccia attenzione a questo punto. Io posso ammettere che l'insieme di questi istanti sia ordinato in modo uniforme: mi basterà credere che tra ogni istante dato e l'istante successivo vi sia un intervallo costante di tempo, così da poter ragionare in termini di un tempo che si muove con velocità costante nello spazio (anche se, in realtà, questo è un ragionamento folle, come vedremo più avanti). Anche in questo modo, però, esiste una separazione non cronologica ma qualitativa tra istanti del passato e istanti del futuro: questi ultimi, infatti, dovrebbero contrassegnare eventi potenziali, e, quindi, dovrebbero spingermi a fare previsioni, mentre, a proposito degli istanti del passato, i quali ovviamente dovrebbero contrassegnare eventi determinati e non potenziali, è semplicemente stupido pensare in chiave di previsione a partire da ciò che so *adesso*. Tutti gli eventi che io classifico come appartenenti al passato fanno parte di un mondo di eventi che *è* e che non diviene. Il passato non diviene, *è tutto lì*. Già: e il futuro?

Da un punto di vista oggettivo, quindi, la meccanica di Galilei presuppone un tempo uniforme, dove uniforme vuol dire che tutti gli istanti sono tra loro equivalenti: il che implica la

totale separazione fra *questo* tempo e i tempi di cui si discute in rapporto agli eventi del cosiddetto futuro potenziale o, peggio ancora, a quelli che sarebbero connessi a fantomatiche frecce temporali.

La comprensione di questa implicazione profondissima del principio di relatività galileiano è stata un processo lungo. È infatti difficile attribuire allo spazio proprietà fisiche, ma è incomparabilmente più difficile attribuire proprietà fisiche al tempo, anche se oggi sappiamo che dobbiamo fare cose del genere se davvero vogliamo garantire l'invarianza delle leggi di natura rispetto a osservatori galileiani o la covarianza delle leggi rispetto a osservatori *qualsiasi*.

È comunque abbastanza assodato, a questo punto, che, quando parliamo tra noi restando nei pressi dell'orlo osservativo del linguaggio, non scoviamo buoni argomenti per ritenere che lo spazio sia isotropo e omogeneo, così da accertare l'equivalenza tra posizioni e direzioni, e che anche i cosiddetti istanti (qualunque cosa essi siano) debbano essere tra loro equivalenti. È assodato, per lo meno, che, se abbandoniamo l'orlo osservativo e penetriamo nel linguaggio inferenziale di Galilei, scopriamo subito che lo spazio della percezione soggettiva deve essere corretto in modo drastico, così da fondare il principio di relatività galileiano e il principio d'inerzia galileiano.

Fu quindi molto difficile fare altri passi verso l'interno del linguaggio scientifico. Lo spazio galileiano e il tempo galileiano, pur essendo ormai problematici rispetto allo spazio e al tempo consegnatici dal linguaggio quotidiano, avevano in comune con questi ultimi la caratteristica di essere raffigurabili come cose esterne ai recettori sensoriali: cose che stanno nel mondo dove si muovono gli oggetti corporei.

La struttura di queste cose che stavano nel mondo era pur sempre enigmatica. Essa doveva ad esempio costituire lo scenario dove erano disposte le qualità primarie degli oggetti corporei - il numero, la figura e il moto - che, secondo Galilei e altri studiosi, erano l'obiettivo centrale da cogliere.

La penetrazione nel linguaggio scientifico incontrò ostacoli formidabili. Basti ricordare alcune fasi che nel seguito tratteremo meglio. Prima fase: che vuol dire, *precisamente*, osservare un tempo in modo da misurarne l'estensione? Seconda fase: siamo costretti a fissare l'equivalenza tra coordinate spaziali e coordinate temporali, dopo aver fissato, *separatamente*, l'equivalenza tra gli istanti e l'equivalenza tra posizioni e direzioni? Terza fase: dobbiamo eliminare addirittura, in nome della covarianza delle leggi di natura, la nozione stessa di *divenire*?

Un percorso molto lungo. E costoso in termini di credenze circa la percezione. In quel processo, una imprevedibile tappa fu percorsa da Newton e Faraday, come si vedrà nel prossimo capitolo.

3

Strani tempi

Non possiamo descrivere il tempo di un evento se non riferendolo a un altro evento, o il luogo di un corpo se non riferendolo a qualche altro corpo. Ogni nostra conoscenza, sia di tempo che di spazio, è essenzialmente relativa.

J. C. Maxwell, *Matter and Motion*, 1876

3.1

Le qualità primarie

Mentre Newton rifletteva su Galilei, Keplero e Cartesio, il filosofo John Locke rifletteva su molti aspetti della conoscenza acquisita dagli uomini. In entrambi i casi il tempo era pesantemente coinvolto. Ma, nel caso di Newton, il protagonista del coinvolgimento fu la matematica applicata all'enigma del movimento, e il risultato della riflessione ebbe due volti separati: l'uno, pubblico, nei *Principia*, e l'altro, privato, in alcuni manoscritti matematici.

Locke, invece, cercò di trarre alcune conclusioni filosofiche da un punto di vista sulle qualità dei corpi che derivava da una antica tradizione culturale concernente il progetto di Dio, che Galilei aveva nel 1623 espresso in alcune pagine de *Il Saggiatore* e che suscitava, giustamente, un forte interesse.

Il punto di vista era quello per cui Dio, ente razionale per eccellenza, avrebbe fabbricato il mondo secondo misura, numero e peso. Un mondo siffatto era dunque passibile in chiave di lettura formale, poiché le misure, i numeri e i pesi erano oggetti tipici di calcolo. Galilei non era certamente scettico a questo proposito. Egli era tuttavia convinto, insieme ad altri pensatori, che non bastasse *accettare* questo punto di vista, poiché c'erano molti problemi da risolvere. C'era, in particolare, il problema della percezione dei fenomeni e delle descrizioni linguistiche di quanto era percettibile.

Galilei aveva allora classificato i nomi in due gruppi. Il linguaggio conteneva nomi per denotare stati percettivi che potevano essere comunicati *dicendo* che un corpo è caldo, che un suono è debole o che un odore è intenso. Quando i parlanti usavano questi nomi, però, non parlavano di qualità intrinseche degli oggetti esterni. Parlavano invece di qualità che avevano «lor residenza nel corpo sensitivo», ovvero nell'osservatore. Sì che, «rimosso l'animale», le qualità indicate con nomi del primo gruppo svanivano: si trattava, a parere di Galilei, di qualità battezzate con nomi "puri".

Diversa era la situazione che, secondo Galilei, si sarebbe presentata a un osservatore ideale al quale fossero stati strappati gli organi di senso senza tuttavia ledere quelli che Galilei a volte chiamava «gli occhi della mente». L'osservatore ideale non avrebbe percepito suoni o profumi, ma avrebbe comunque inteso che nei corpi esterni esistevano qualità agenti come cause delle percezioni e battezzabili con nomi di un secondo gruppo: nomi quali "figura", "numero" e "moto". La scienza, allora, era conoscenza vera poiché afferrava *queste* qualità alla luce di un principio di causa operante nel mondo esterno.

Non è possibile cadere in equivoci su questo punto di vista galileiano:

Che ne' corpi esterni, per eccitare in noi i sapori, gli odori e i suoni, si richiegga altro che grandezze, figure, moltitudini e movimenti tardi o veloci, io non lo credo; e stimo che, tolti via gli orecchi le lingue e i nasi, restino bene le figure i numeri e i moti, ma non già gli odori né i sapori né i suoni, li quali fuor dell'animal vivente non credo che siano altro che nomi, come a punto altro che nome non è il solletico e la titillazione, rimosse l'ascelle e la pelle intorno al naso.

In modo esplicito, ad esempio, le qualità afferrate dalla scienza grazie al principio di causa spiegavano le nostre percezioni di calore. Esse erano *causate* dal movimento e dal numero di particelle ignee che colpivano i sensori: ragion per cui Galilei asseriva la verità della tesi dichiarante «il moto esser causa di calore».

Il legame causale, d'altra parte, costituiva le condizioni di necessità in natura. I fenomeni osservabili, come si legge nel *Dialogo*, sono effetti che seguono «con necessità, sì che impossibil sia il succedere in altra maniera; ché tale è la proprietà e condizione delle cose naturali e vere».

Nomi quali figura, numero e moto facevano parte, come già ho detto, di una tradizione culturale che investiva pensatori laici e commentatori delle scritture sacre. Ne *Il Saggiatore* le qualità intrinseche ai corpi esterni e il loro rapporto di causalità rispetto alle qualità percepibili con i sensori biologici trovavano tuttavia una collocazione nuovissima. Nel 1623, infatti, Galilei già conosceva i tratti essenziali della fisica esposta nel *Dialogo* del 1632 e nei

Discorsi del 1638: i tratti in questione erano stati individuati tra il 1600 e il 1609. Le qualità intrinseche ai corpi sembravano perfettamente inserite in un principio di relatività che sanciva l'invarianza delle leggi del moto per osservatori "galileiani" che effettuavano osservazioni in uno spazio isotropo e omogeneo e in un tempo uniforme.

3.2 Oscuri tempi newtoniani

Restava tuttavia aperto il problema di come disporre le qualità intrinseche del moto e della figura in una teoria relativistica circa l'invarianza delle leggi del moto, poiché la teoria stessa si fondava su uno spazio con caratteristiche di isotropia e omogeneità. E restava altresì aperta la questione su come inserire, in tutto ciò, il numero. È credibile che Galilei avesse pensato d'aver risolto quest'ultima questione sostenendo, proprio ne *Il Saggiatore*, che «il libro della natura» era un testo fabbricato mediante un linguaggio formalizzato: una «lingua matematica» i cui segni erano costituiti da «triangoli, cerchi, e altre figure geometriche». La soluzione comportava che Dio conoscesse *tutte* le verità matematiche e che i matematici, così come appaiono nel *Dialogo*, fossero in grado di afferrarne *alcune* attraverso le dimostrazioni di teoremi.

In questa sede non abbiamo tuttavia il compito di accertare se questa soluzione è credibile. La questione è semmai un'altra, e riguarda la domanda se Galilei avesse bene argomentato attorno alla situazione che si veniva a creare non appena si diceva che il moto e la figura di un corpo erano qualità intrinseche per una teoria del moto che si reggeva, a sua volta, su una visione particolarissima dello spazio. Quest'ultima, infatti, esprimeva di per se stessa il moto e la figura, poiché asseriva sia l'equivalenza delle direzioni e delle posizioni, sia l'equivalenza tra quiete e moto non accelerato. Non c'era dunque il rischio di argomentare in modo assurdo o circolare, o comunque vizioso?

Un problema spinoso. Al suo interno circolavano punti di vista che coinvolgevano, a vari livelli d'argomentazione, credenze e conoscenze, aspettative e misure, teoremi e pregiudizi. La tematica galileiana era pertanto traducibile in ambiti linguistici molto generali. Un esempio classico di traduzione siffatta è proprio fornito da alcuni passi del *Saggio sull'intelletto umano* dove John Locke espone sia la questione delle qualità primarie e secondarie, sia la questione spaziotemporale.

Locke, come Galilei, scrive perseguendo il fine di farsi capire. Così scrive:

Fate che gli occhi non vedano la luce o i colori, né le orecchie odano i suoni; fate che il palato non gusti e il naso non odori; e tutti i colori, i gusti, gli odori e i suoni, perché non sono altro che queste idee particolari, svaniranno e cesseranno di essere, e saranno ridotti alle loro cause, cioè la massa, la figura e il movimento delle parti.

Anche Locke, ovviamente, deve affrontare il tema spaziotemporale. Egli giustamente ritiene che l'*idea* dello spazio provenga dal funzionamento dei sensori visivi e tattili, e commenta questa presa di posizione sostenendo che la lunghezza o la distanza o la figura sono *modi* dello spazio così inteso. Pensa che anche la "durata" sia una sorta di distanza, dove però non si parla di distanza fra punti dello spazio, ma di distanza tra "parti che fluiscono" in successione. Come la figura o la lunghezza sono modi dello spazio, così le ore o gli anni sono modi della durata.

Locke, com'è noto, sta scavando con intelligenza. La durata, infatti, è, in una prima fase, il frutto di una specie di introspezione che ci rende propensi a parlare di flusso soggettivo di stati di coscienza, e, in una seconda fase, *diventa* una proprietà delle cose esterne, poiché i parlanti descrivono le cose del mondo dicendo che esse durano qualche anno o che svaniscono dopo tre ore o altre cose del genere.

È utile ora istituire un breve confronto tra la posizione di Locke e quella, assai più enigmatica, assunta da Newton. Tutti sanno che Newton era una persona quanto mai singolare, e che la sua scrittura non era affatto dotata di quella trasparenza che sembra invece caratterizzare le pagine di un Galilei o di un Locke. Vorrei ora mostrare come la trasparenza, nel linguaggio di Newton, sia inversamente proporzionale all'apparente chiarezza di alcuni luoghi newtoniani che, in varie forme, fanno ormai parte della cultura diffusa, poiché appaiono nelle prime pagine dei *Principia* e discorrono di spazi e tempi assoluti e relativi.

Parlo di chiarezza apparente: in effetti Newton non è in alcun modo chiaro, come del resto risulta dal fatto che, da secoli, ci si chiede con insistenza che cosa egli avesse voluto dire.

Tutti sanno che i *Principia* prendono le mosse da alcune definizioni circa le forze e le quantità di materia e di moto. Non tutti sanno (o ricordano) che i *Principia* non danno alcuna *definizione* di spazio e di tempo. Anzi, Newton addirittura sostiene che non v'è alcuna necessità di *definire* «tempo, spazio, luogo e moto», perché si tratta di termini «notissimi a tutti».

Questo modo di ragionare è, in realtà, problematico. Ed è proprio Newton a concedere ciò. Egli infatti tiene

subito a precisare che, pur non essendovi alcun bisogno di introdurre definizioni, sono tuttavia opportuni alcuni commenti finalizzati a eliminare quei pregiudizi che sorgono in quanto le persone pensano lo spazio, il tempo, il luogo e il moto «in relazione a cose sensibili».

Insomma: i sensi ingannano e l'inganno genera pregiudizi, ma ciò non implica l'opportunità di definire le quantità a proposito delle quali coltiviamo punti di vista errati.

Perché, allora, *definire* la quantità di materia e *non definire* il tempo, visto che entrambe le "quantità" sono in relazione a cose sensibili? Non riesco a trovare, nei *Principia*, una risposta a tale quesito. Trovo, invece, una descrizione di due modi del tempo. Rileggiamola:

Il tempo assoluto, vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente, e con altro nome è chiamato durata; quello relativo, apparente e volgare, è una misura (esatta o inesatta) sensibile ed esterna della durata per mezzo del moto, che comunemente viene impiegata al posto del vero tempo: tali sono l'ora, il giorno, il mese, l'anno.

Parrebbe, insomma, che abbiamo a che fare con un tempo assoluto e con un tempo relativo. Il primo è vero e matematico, il secondo è apparente e volgare. Il primo è la durata, il secondo è la misura sensibile della durata *per mezzo del moto*, e, usualmente, è utilizzato in luogo del tempo vero ed è espresso in ore o anni.

Ora, di per se stesse, queste asserzioni non dicono molto, e, se dicono qualcosa, lo dicono in modo sfuggente. Basta pensare a che cosa precisamente Newton volesse dirci quando scriveva che il tempo *vero* non ha relazione ad alcunché di esterno e scorre uniformemente. Dato il linguaggio impiegato nella scrittura dei *Principia*, e data la pignoleria newtoniana nell'uso del linguaggio, dovremmo intendere che il tempo *vero* è qualcosa che si muove con accelerazione nulla. Va bene. Rispetto a che cosa, però, quella cosa speciale che è il tempo *vero* ha una velocità costante, visto che il tempo *vero* è qualcosa che non ha relazione con alcunché di esterno? Una discreta interpretazione potrebbe essere questa: Newton ritiene che il nome "tempo assoluto" denoti una *cosa* che esiste nel mondo e che è indipendente da ogni altra cosa. Una interpretazione del genere diventa plausibile quando, come alcuni storici hanno fatto, si esplora il dibattito sul tempo nella tradizione culturale da cui Newton ha tratto certamente ispirazione per credere, o per voler far credere ad altri, che il tempo *vero* dei *Principia* abbia a che fare con Dio. Questa interpretazione non è tuttavia in grado di spiegare davvero come mai il tempo assoluto scorre con accelerazione nulla.

Sembra più facile capire come mai, parlando dello spazio assoluto, Newton sostenga che esso, *come il tempo assoluto*, è «per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno», ma, *a differenza del tempo assoluto*, «rimane sempre uguale e immobile». A proposito: Newton è uno dei pochi ad aver capito, nel Seicento, il principio di relatività e il principio di inerzia galileiani. Di conseguenza, che cosa diavolo significa, *per lui*, dire che il tempo assoluto si muove con velocità costante? Quale velocità? Una velocità nulla o diversa da zero? Dovremmo dire: *ogni velocità va bene*, purché sia costante. Perbacco, stiamo dicendo che il tempo assoluto è immune rispetto alle forze? E ancora: è anomalo porre queste ultime domande, visto che esse non stanno nei *Principia*?

Risponderò che nei *Principia* mancano parecchie cose, mentre altre si trovano qua e là con giustificazioni deboli. Manca, come s'è appena visto, una giustificazione affidabile delle ragioni per cui è necessario definire la quantità di materia o la quantità di moto, ma non è necessario definire la durata, o il tempo, o il moto. Se è vero, infatti, che i pregiudizi e gli inganni dei sensi inquinano il nome "tempo", allora è altrettanto vero che ciò vale per il nome "quantità di materia" (e non solo sul finire del Seicento). È invece presente un luogo classico per la cultura diffusa nelle università e nelle scuole preuniversitarie, anche se in *questo* luogo, che è poi il famosissimo Scolio Generale posto in chiusura della seconda edizione dei *Principia*, Newton predica affinché gli altri seguano regole che egli stesso ha tenacemente e sempre violato. Deve scrivere lo Scolio perché è stato duramente attaccato per non avere esposto la causa della gravitazione. Egli, d'altra parte, ha fabbricato, per anni e anni, ipotesi su eteri la cui fisica spiegasse appunto la gravitazione come effetto di cause esplorabili, e non ha mai trovato la soluzione cercata. Di qui la mossa filosofica difensiva che sta al centro dello Scolio. Una mossa che si iscrive - e dove mai metterla? - in una ferrea regola metodologica: non bisogna fare ipotesi.

Eppure sappiamo che Newton era un infaticabile costruttore di ipotesi. Sappiamo anche, a differenza dei lettori che per generazioni si sono affaticati attorno al senso da attribuire alle *non definizioni* newtoniane di spazio e di tempo, che Newton lavorò a lungo attorno a una ipotesi controintuitiva ma molto intelligente che, a suo avviso, era proprio un'ottima definizione di tempo assoluto o vero. Lo sappiamo per il semplice motivo che solo da pochi anni è disponibile una monumentale edizione critica di quei manoscritti sulla matematica che Newton compilò nei decenni per se stesso e senza farne pubbliche scritture.

Newton e il tempo matematico

Dai manoscritti apprendiamo che Newton aveva, prima e dopo i *Principia*, un pesante problema matematico circa il tempo, e che tale problema, insieme alla sua soluzione, non appare nei *Principia*. Una versione attendibile di *quel* problema privato di Newton è la seguente.

A differenza di Galilei, che utilizzava come sistema formale la teoria delle proporzioni euclidee tra grandezze omogenee, Newton possedeva i primi elementi del calcolo infinitesimale. Per Galilei, ragionare su un termine come velocità era molto difficile, in quanto una velocità è un rapporto tra spazio e tempo. La difficoltà galileiana stava nell'impossibilità di pensare un rapporto tra grandezze non omogenee: spazi e tempi non sono affatto omogenei, e un rapporto tra spazi e tempi ha lo stesso senso di un rapporto tra fagioli e odori. Galilei era conseguentemente costretto a ragionare su rapporti tra velocità, e a esprimerli con un algoritmo che potrebbe avere una forma come questa:

$$V_1/V_2 = (S_1/S_2) \cdot (T_2/T_1)$$

Questo modo di pensare la velocità genera problemi che complicano la vita a ogni piè sospinto, come ha messo in evidenza Enrico Giusti nella sua recente edizione critica dei *Discorsi* galileiani. Newton, invece, ha in mano il concetto di funzione. Egli, pertanto, può pensare la posizione di un punto nello spazio, e può anche pensare il moto come *variazione di posizione*, in quanto la variazione di posizione è misurabile. Ma la variazione di posizione nello spazio coinvolge una variazione temporale. Se un punto passa da una posizione *A* a una posizione *B*, allora quel punto sta *prima* in *A* e *poi* finisce per stare in *B*.

Che cos'è la differenza tra *prima* e *poi*? Si può rispondere in forma triviale: la differenza è una durata, un intervallo temporale. Newton non credette che la risposta fosse innocua, e ritenne, invece, che la domanda fosse terribile. Infatti: per descrivere il moto, so che devo misurare una variazione spaziale e che devo anche misurare una variazione temporale, ma so, soprattutto, che quando misuro una variazione temporale, non posso fare altro che misurare un movimento. Quale movimento? Il movimento osservabile in un manufatto che mi hanno insegnato a usare per valutare numericamente i tempi. Una clessidra, ad esempio. In una clessidra ci sono granelli di sabbia che si muovono. *E non c'è proprio nient'altro*. E non c'è nient'altro che moto anche se getto via la clessidra e osservo i moti ciclici della Luna.

In poche parole: non posso esprimere la dipendenza dei moti dal tempo, e posso soltanto esprimere la dipendenza dei moti da altri moti. Che cosa fare? Newton decide, a questo punto, di fare un'inferenza audace. *Prende tutte le possibili funzioni che descrivono matematicamente i moti possibili nello spazio, ne sceglie una a caso, ipotizza ad hoc che abbia velocità costante e la battezza con il nome "tempo"*. Diciassette anni prima di pubblicare i *Principia*, Newton in un manoscritto dichiara che il tempo è misurato mediante movimenti, e così commenta la situazione: «Io non tengo conto del tempo così formalmente considerato, ma, a partire da quantità proposte che sono dello stesso genere, io suppongo che una di esse cresca con flusso equabile: a questa tutte le altre possono essere riferite come se essa stessa fosse tempo, e così per analogia, il nome "tempo" le potrebbe essere conferito». Ventisette anni dopo la prima edizione dei *Principia* Newton ribadirà la necessità di esporre «il tempo per mezzo di una qualsiasi quantità fluente in modo uniforme».

Dobbiamo quindi concludere che Newton, nella sua prassi matematica circa la teoria meccanica, non tratta mai il tempo della percezione soggettiva e della misura, ma tratta solamente una classe di funzioni che descrivono spostamenti spaziali, dopo aver estratto un elemento della classe e averlo chiamato tempo. Una mossa, quest'ultima, che gli permette di introdurre le nozioni centrali di velocità e accelerazione in uno spazio galileiano.

Ebbene, resto persuaso che proprio la difficoltà relativa alla giustificazione di tale mossa abbia indotto Newton a sostenere nei *Principia* tesi poco chiare su spazio e tempo assoluti, e a rendere singolarmente opaca la questione spaziotemporale sino alla formulazione delle teorie relativistiche del ventesimo secolo.

L'opacità di cui sto ora parlando deriva, come si vede, dalla necessità di qualificare il tempo in ambito matematico, e dalle successive credenze secondo cui alcuni passi dei *Principia* erano da interpretare alla stregua di meditazioni metafisiche su spazi e tempi assoluti e relativi. E l'opacità divenne ancor più torbida quando, nell'Ottocento, cominciarono a emergere necessità di qualificare spazio e tempo non solo in ambito algoritmico, ma anche in ambito elettromagnetico. Galilei compì un passo decisivo nello specificare che lo spazio fisico deve essere omogeneo e isotropo al fine di garantire l'invarianza delle leggi del moto. Newton fece un altro passo nello specificare una prima struttura matematica del tempo fisico. Michael Faraday gettò sul tappeto il problema delle caratteristiche elettromagnetiche dello spazio e del tempo. Si parlerà ora di quest'ultimo problema, se non altro perché è a partire da esso che cominceremo a meglio capire come mai, da sempre, gli esseri umani piazzano gli eventi - tutti gli eventi - in un continuo a quattro dimensioni, e come mai, ciò nonostante, gli esseri umani, a maggioranza, non abbiano familiarità con la descrizione del continuo a quattro dimensioni.

3.4

Le proprietà fisiche dello spazio

Nulla vi è di elettromagnetico nello spazio e nel tempo della percezione. Eppure, già a livello di argomenti semplici, è ragionevole attribuire, almeno allo spazio, qualità elettromagnetiche, se non altro per capire come mai accade che alcune sostanze si comportino in un certo modo e non in un altro. Dico che si tratta di argomenti semplici. È vero, a patto di accettare una clausola non eccessiva sulla semplicità. Per esempio è facile argomentare su faccende relative ai piani inclinati. La facilità apparente è, tuttavia, una conseguenza di problemi piuttosto intricati, quali quelli che riguardano il fatto che, per spiegare il comportamento di una pallina in moto su un piano inclinato, è necessario abbandonare lo spazio così come è percepito usualmente e usare il principio d'inerzia: un principio che non deriva dall'esperienza comune ma la viola apertamente, e che, inoltre, è connesso al principio di relatività e a uno spazio galileiano-newtoniano.

In che senso è allora semplice parlare di qualità elettromagnetiche dello spazio galileiano-newtoniano? In linea di massima possiamo far leva su un argomento *semplice* che venne impiegato, nella prima metà dell'Ottocento, da Michael Faraday. Supponiamo, come è ragionevole fare, che lo spazio sia galileiano-newtoniano. Supponiamo anche, come molti fenomeni ci spingono ad ammettere, che in questo spazio siano collocate particelle materiali estese. Ebbene, un gruppo molto numeroso di particelle materiali è da vedere come un oggetto corporeo, e gli oggetti corporei si comportano come buoni o cattivi conduttori di elettricità. Sappiamo, nei primi decenni dell'Ottocento, che esistono corpi conduttori e corpi isolanti.

Bene. Osserviamo allora un pezzo di rame e proviamo a raffigurarlo come un raggruppamento di particelle di rame immerse, con un certo ordine, nello spazio di Galilei e di Newton. Stiamo allora parlando di particelle separate, l'una dalle altre, da porzioni di spazio. E stiamo altresì parlando di particelle materiali che, essendo particelle di rame, sono da pensare alla stregua di particelle conduttrici, perché il rame è un buon conduttore.

Nessuno sa che cosa precisamente sia l'elettricità, ma abbiamo imparato che essa, qualunque cosa sia, attraversa senza gravi problemi un pezzo di rame. Quindi essa attraversa ogni particella di rame. Come fa, però, a passare da una particella all'altra? Dovrà infatti percorrere una porzione intermedia di spazio, e tale porzione non sarà certo una porzione di rame, ma dovrà essere una porzione di spazio che si comporta come un buon conduttore. In caso contrario, il rame non sarebbe un buon conduttore.

Siamo così giunti a una conclusione che rispetta la logica elementare e che è conforme ai dati sperimentali: lo spazio è un buon conduttore. E così siamo in trappola. Basta infatti applicare la medesima sequenza di inferenze a un corpo isolante per giungere alla conclusione che lo spazio in cui sono immerse le particelle di isolante deve essere, esso stesso, un isolante, non un conduttore. In caso contrario - e cioè se lo spazio fosse un buon conduttore - l'elettricità non attraverserebbe le particelle isolanti ma sarebbe perfettamente in grado di evitarle passando attraverso lo spazio. Quindi non ci sarebbero, nel mondo osservabile, sostanze isolanti. Invece, ci sono.

Il paradosso è inevitabile, secondo Faraday, come conseguenza necessaria delle descrizioni di oggetti formati da particelle *nello* spazio. Per annullare il paradosso occorre eliminare il substrato stesso delle descrizioni, ovvero le ipotesi che parlano sia dell'esistenza di corpuscoli dotati di un raggio finito, sia di uno spazio come entità neutra.

Nella costruzione delle nuove descrizioni le particelle svaniscono e sono sostituite da punti inestesi, o singolarità, che non stanno *nello* spazio tradizionale. Stanno, invece, in un *continuum* dove tutte le interazioni si propagano da punto a punto, senza che tra i punti esista qualcosa di inerte rispetto alla propagazione.

3.5

Il *continuum* come fusione tra spazio e materia

In ciò consiste, tutto sommato, il tragitto dalla cosiddetta azione istantanea a distanza in uno spazio talmente vuoto da essere semplicemente un costruito geometrico (e che i newtoniani, per generazioni: *attribuiscono* a Newton) alla cosiddetta azione per contatto che si propaga con velocità finita in un mezzo dotato di proprietà fisiche.

Se accettiamo di effettuare il tragitto che Faraday traccia dobbiamo allora abituarci a porre, sul mondo, domande che sembrano talmente inusitate da offrire, addirittura, un certo margine di giustificazione per quei contemporanei di Faraday che giudicavano "oscuro" il programma faradayano, e che non accettavano la replica dello stesso Faraday secondo cui è meglio avere idee oscure che non avere idee.

Ce ne rendiamo subito conto se formuliamo una domanda dotata di senso nel linguaggio delle particelle. Se ci chiediamo, cioè, quale valore numerico abbia il loro raggio. Fatta la domanda, siamo nelle condizioni di non poter offrire alcuna risposta: il raggio *deve* avere un valore numerico, ma non siamo capaci di dedurlo da una teoria o di misurarlo con una macchina. Faraday, invece, risponde alla domanda trasferendola nella nuova descrizione. La risposta si realizza con una sequenza di mosse. Prima mossa: la parola "raggio" denota la distanza tra il centro della particella e il luogo dove è disposto un manufatto in grado di registrare il punto preciso in cui non si avverte più alcuna traccia della particella stessa. Seconda mossa: la registrazione può essere concettualmente eseguita in casi specifici come quelli in cui la particella porti con sé una carica elettrica. Terza mossa: possiamo benissimo *pensare* un manufatto che senta la carica; il manufatto in questione è, semplicemente, un'altra carica, visto che già conosciamo le leggi dell'interazione tra cariche in funzione della distanza. Quarta mossa: il manufatto - la carica esplorante - sente tracce della carica esplorata

anche a distanze enormi. Benissimo. Impariamo così che, se davvero misuriamo il "raggio" di una particella dotata di carica, allora traiamo la conclusione che questo "raggio" è numericamente pari, *per lo meno*, al raggio dell'intero sistema solare.

La risposta è irritante per quei parlanti che insistono nel vedere i corpi macroscopici come aggregati di particelle microscopiche e che, pertanto, faticano ad accettare che le loro ipotetiche particelle microscopiche abbiano dimensioni su scala astronomica. Ma tutto lo sgomento che colpisce quei parlanti non è altro che un sintomo di malessere linguistico di fronte alla caduta di una ipotesi metafisica. Non v'è alcun lato paradossale nella risposta di Faraday. Vi è, semmai, un inquinamento nel linguaggio con cui formuliamo domande sulle dimensioni delle particelle.

Nessun dubbio, comunque, che la fisica faradayana contenga versanti poco illuminati. Oggi ci rendiamo conto che la critica faradayana alla nozione di particella, in quanto scaturisce da una fisica del *continuum* dove le interazioni agiscono da punto a punto, è un lunghissimo balzo verso quelle zone, molto lontane dall'orlo osservativo del linguaggio, in cui *oggi* viviamo quando elaboriamo teorie di campo che rendono evanescenti le vecchie pitture di particelle

Quando invece restiamo accanto all'orlo osservativo, non riusciamo a far altro se non immaginare che le parti molto piccole di una cosa - quelle che non sentiamo con i recettori visivi e tattili - siano copie, nel piccolo, degli oggetti corporei di senso comune. Abbiamo imparato a non porre domande sull'odore di un neutrone o sul sapore degli elettroni, ma non è facile smettere di immaginare che neutroni o elettroni siano palline.

Figuriamoci come era difficile, nel secondo quarto di secolo dell'Ottocento, imparare qualcosa del genere a proposito di atomi e molecole e ioni. Faraday fece un'operazione linguistica abissale. Nell'effettuarla non aveva a disposizione le strutture teoriche di campo che, nel seguito, avrebbero consentito ad altri di cominciare a capire quegli aspetti profondissimi della fisica del *continuum* che egli stava appena intravedendo.

3.6

Il *continuum* e la gravitazione

Ma torniamo alla faccenda controintuitiva del raggio di una particella. Torniamoci per mettere in evidenza come la soluzione del problema del raggio sia affidabile nel linguaggio che usa parole come *continuum* e "punto". E soprattutto, per trovare che la nuova soluzione genera altri interrogativi. Passare dallo spazio geometrico del *Dialogo* e dei *Principia* al *continuum* non coincide, infatti, con una puntuale operazione di traduzione da un linguaggio a un altro.

Il nome *continuum* non è un sinonimo del nome "spazio" in un'altra lingua. Non stiamo scrivendo "Mary" in luogo di "Maria". Stiamo invece affermando che non possiamo più discutere di un ente dove si svolgono fenomeni e che rimane integro al variare degli eventi o della disposizione delle cose, e che dobbiamo al contrario analizzare un ente diverso.

La diversità maggiore tra i due deriva dal fatto che il *continuum* è una struttura *fisica* che partecipa agli eventi fisicamente caratterizzabili. Stiamo addirittura affermando che nessun fenomeno sarebbe osservabile qualora il *continuum* non fosse organizzato fisicamente.

Il versante più cospicuo di tale caratterizzazione è dato dalla natura universale dell'interazione elettromagnetica che opera nel *continuum* e che di quest'ultimo organizza l'architettura. Se diciamo che dobbiamo passare dall'azione a distanza all'azione per contatto, allora diciamo che il mezzo in cui sono posti gli oggetti è un mezzo *attivo*, e che l'attività ha la forma di una interazione la cui universalità è solo pari a quella dell'interazione gravitazionale, anche se tra le due interazioni c'è una barriera spessa e alta. Un conto è parlare di corpi come gruppi di singolarità puntiformi che operano come pozzi o come sorgenti del campo elettromagnetico. Un altro conto è discutere di masse che si sentono istantaneamente a distanza. Un conto è pensare il *continuum* nei pressi di un magnete o di una carica, così da descriverlo come dotato di caratteristiche elettromagnetiche. Un altro conto è pensare il vuoto tra la Terra e il Sole, e descriverlo come privo di alcunché, se non dell'incredibile qualità di costituire un niente in cui l'interazione gravitazionale agisce istantaneamente.

Potremmo dire così: prima di Faraday abbiamo le quantità di materia e gli oggetti corporei *in* uno spazio inerte, dopo Faraday abbiamo le singolarità puntiformi *di* un mezzo che agisce. Nel passare da "in" a "di" succede il finimondo. O, meglio, ci si rende conto che è in atto una rivoluzione scientifica di portata ancor maggiore di quella realizzatasi, nel Seicento, con la scoperta di come debbano essere lo spazio e il tempo affinché valgano i principi di relatività e d'inerzia.

Infatti, prima di Faraday, era abbastanza ragionevole pensare lo spazio e il tempo indipendentemente dagli oggetti corporei. Ora, invece, non possiamo affatto pensare il *continuum* senza le sue singolarità: non c'è, da una parte, il *continuum*, e, dall'altra, le singolarità, perché non c'è più, da una parte, lo spaziotempo e, dall'altro, la materia. Il che non vuol dire che non ci siano più le fragole e la Luna. Vuol dire, al contrario, che la parola "materia" è *in via di traduzione* in linguaggi sempre più lontani da quelli che ci consentono, senza generare spasmi epistemologici o fraintendimenti mortali, di scambiarcì informazioni sulle fragole o sulla Luna, o di credere che una particella carica sia una Luna talmente piccola da sfuggire alle retine.

Alcuni frammenti della *traduzione in atto* grazie alle scoperte di Faraday riguardano anche la credenza per cui le azioni fisiche viaggiano su linee rette. Le singolarità del *continuum* non sono ordinate nei vertici di un reticolo, in analogia con la collocazione di particelle nei vertici di strutture cristalline dove, tra due vertici vicini, immaginiamo esista un segmento di retta.

Tra le singolarità c'è un agglomerato di linee di forza variamente incurvate da punto a punto, come ad esempio osserviamo quando, sulla superficie di un foglio di carta che si trovi nei pressi di un magnete a ferro di cavallo, disperdiamo un poco di limatura di ferro. Non solo: le linee incurvate, pur essendo soltanto un'immagine visiva dell'architettura non percepibile del *continuum*, ci inducono a ragionare sulle modalità per cui il *continuum* veicola azioni per contatto e ci aiutano a cogliere il punto di vista reale di Newton sulla gravitazione.

Andiamo per ordine, per evitare il rischio di confondere il termine *continuum* con l'espressione "spazio continuo". Faraday sostenne, in isolamento pressoché totale, che, data la struttura elettromagnetica del *continuum*, non si poteva far altro che cercare una teoria unificata delle interazioni. Egli sapeva perfettamente - nel senso che chiaramente ne parlava per iscritto - che l'interazione gravitazionale sfuggiva a quella fisica del *continuum* che pure apriva orizzonti conoscitivi sull'interazione elettromagnetica.

Tuttavia, parlando da "filosofo consapevole", asseriva il bisogno di abbandonare un punto di vista consolidato sullo spazio come "unica entità continua" che penetra in tutti gli "aggregati di materia da ogni direzione" e forma una rete contenente "celle isolanti ciascun atomo dagli atomi vicini". *Questo spazio conserva unicamente «per sé la proprietà della continuità» e si dissolve nel paradosso sullo spazio conduttore e isolante. Se invece ammettiamo l'inesistenza di particelle materiali estese, allora, anziché ritenere che le "azioni" risiedano in esse, diremo che le "azioni" stanno attorno ai punti.*

Cambiamo, così facendo, ciò di cui vorremmo parlare quando pronunciamo il nome "materia" (o "sostanza"). La sostanza di una "particella" di potassio non è la particella; è l'"azione" esercitata da un punto inesteso e disposta attorno a quest'ultimo. L'esplorazione fisica dei fenomeni naturali, annota Faraday, è tale che in nessun fenomeno possiamo «cogliere la materia come concetto astratto; perché dobbiamo allora assumere l'esistenza di qualcosa che non conosciamo, che non possiamo concepire, e di cui non c'è necessità filosofica?».

Conclusione: il nome *continuum*, per chi legge Faraday, non è un sinonimo di "spazio continuo", ma denota invece la "materia continua". Ne segue, per Faraday, che non c'è da una parte la materia e dall'altra lo spazio. Dobbiamo al contrario asserire che «la materia riempie tutto lo spazio o, perlomeno, tutto quello spazio su cui si esercita la gravitazione (includendovi il Sole e il suo sistema); infatti la gravitazione è una proprietà della materia che dipende da una certa forza, ed è proprio questa forza che costituisce la materia».

Una volta assodato che il *continuum* è la fusione di materia e spazio, analizziamo la questione dell'azione a distanza e dell'azione per contatto. *Faraday non ha la minima intenzione di negare a priori che esistano forze agenti a distanza.* Sa, tuttavia, che la loro natura fisica «è per noi incomprensibile», e che possiamo soltanto «sapere qualcosa sulla condizione dello spazio che si trova tra il corpo agente e il corpo che subisce l'azione o tra due corpi agenti mutuamente».

Si noti bene: *sulla condizione dello spazio* sappiamo raccogliere informazioni, non *sullo spazio*, perché sullo spazio usualmente inteso non c'è altro da dire se non che è continuo e che porta a contraddizioni insanabili.

È allora questa la situazione circa l'interazione gravitazionale: sappiamo che è *a distanza* ma non sappiamo quale condizione dello spazio e della materia la spieghi, anche se molti credono che la spiegazione già sia stata data e consista di una formula. Difficile sostenere, attorno alla metà dell'Ottocento (e anche dopo), che la formula d'ispirazione newtoniana non fosse sufficiente per determinare la gravitazione. Certo che era difficile.

3.7

Il tempo nel *continuum*

Era difficile perché Faraday aveva ormai eliminato le nozioni separate di materia e di spazio, e s'addentrava sul terreno ancor più accidentato della nozione di tempo. Constatava, sin dal principio, che «il tempo cresce di giorno in giorno d'importanza in quanto elemento nell'esercizio della forza». Come si vede, il tempo di Faraday non è il tempo visto come qualcosa di distinto dalle interazioni, ma è proprio *elemento nell'esercizio della forza*, nel senso che «la luce si muove nel tempo». Da questa prospettiva, allora, «non vi è nulla di metafisico nell'indagare se la potenza, agendo a distanze sensibili, agisce o non agisce sempre nel *tempo*».

Non lasciamoci fuorviare dal fatto che nel linguaggio che stiamo esplorando operano termini non ancora ben definiti, quali "forza" o "potenza". Non stanno qui i problemi che apparvero mal posti a molti parlanti di quegli anni. I problemi stanno invece nella congettura faradayana secondo cui la nuova visione del mondo fisico come *continuum*, in quanto punta all'unificazione delle due interazioni universali allora note, può essere «estremamente influenzata da conclusioni che possono essere fornite da esperimenti e da osservazioni sul tempo, essendo essa, forse, totalmente determinabile solo da tali esperimenti e osservazioni».

Poggiando tutta l'argomentazione sul *continuum* e sulla conseguente spinta a una teoria unificata s'arriva, da un lato, alla fusione tra materia e spazio, e, dall'altro, al bisogno di esplorare il tempo non in sede metafisica, ma in ambito sperimentale: «L'indagare sul tempo possibile durante il quale si esercitano la forza gravitazionale, quella magnetica o quella elettrica, non è più metafisico che il segnare i tempi indicati dalle lancette di un orologio nel loro movimento».

Ebbene, i *tempi possibili* per la propagazione della "forza" elettromagnetica non sono certamente metafisici, e in alcuni luoghi Faraday tenta di riferirli alla velocità di propagazione della luce. Ma tutti sanno, in quegli anni, che ben diversa è la questione circa la gravità. Il sommo Laplace aveva fatto calcoli in proposito ed era giunto alla conclusione che, pur ammettendo che l'interazione gravitazionale non fosse istantanea ma richiedesse tempo per passare da un luogo

all'altro, avrebbe comunque viaggiato a velocità talmente superiori a quella della luce da poter essere trattate come quasi infinite. E Faraday lo sa, così come sa di aver fatto tentativi falliti per porre in evidenza, sperimentalmente, qualche legame osservabile tra forza gravitazionale e forza elettromagnetica.

Faraday, però, sa anche di essere un vero newtoniano, e, in quanto tale, di essere isolato da una maggioranza che crede, a torto, d'essere ispirata da norme newtoniane. Faraday infatti scrive che l'usuale punto di vista sull'azione a distanza *sembra* «presentare ben poche difficoltà, eccezion fatta per Newton e per poche persone, tra le quali figuro io stesso». Le difficoltà, dunque, esistono. Già Newton aveva sostenuto, in una famosa lettera a Bentley, che solo un ignorante poteva credere che la gravità fosse inerente ai corpi e non avesse necessità di un mezzo. E Faraday dichiara che porre una formula non coincide con il determinare la causa da cui procedono gli effetti gravitazionali che quella formula descrive. S'ha bisogno di ben altro.

S'ha bisogno, in primo luogo, di ammettere che la causa della gravità «non risieda semplicemente nelle particelle della materia, ma che sia costantemente in esse e in tutto lo spazio». Il che significa, poiché siamo in una fisica che ha già unificato particelle e spazio nel *continuum*, che deve esistere una analogia profonda tra interazioni gravitazionali ed elettromagnetiche, e che tale analogia deve esser leggibile attraverso il principio universale di conservazione dell'energia.

In caso contrario, sottolinea Faraday, non possiamo affermare di sapere che cosa ad esempio sia l'inerzia. L'inerzia, di sicuro, dipende dalla gravitazione. Ma è anche in "stretto rapporto" con l'elettromagnetismo. Non dobbiamo, dunque, rinunciare a priori a ricercare una spiegazione dell'inerzia, ma insistere sulla tesi che, dato il *continuum*, «tutti i fenomeni della natura ci portano a credere che è unica la grande legge che tutto governa».

Pochi parlanti furono in grado di cogliere la *teoria di Faraday*. Anche perché quella teoria non era sorretta da una strategia algoritmica. Un'eccezione, però, c'era: si chiamava James Clerk Maxwell. Spettò a Maxwell il compito di edificare gli algoritmi per la teoria di Faraday, così da individuare, grazie agli algoritmi, diversi aspetti del *continuum* che lo stesso Faraday non aveva potuto determinare, e, soprattutto, da mostrare che la via della grande unificazione gravitazionale ed elettromagnetica incontrava una muraglia insormontabile.

Maxwell prende in considerazione, attorno al 1864, la circostanza per cui entrambe le interazioni dipendono dall'inverso del quadrato della distanza ma differiscono tra di loro in quanto tra due "corpi densi" si esercita un'attrazione non una repulsione, anche se le linee di "forza gravitante" nei pressi dei due corpi coincidono con quelle di «forza magnetica nei pressi di due poli dello stesso nome».

Un facile calcolo mostra come l'energia E del campo gravitazionale, in un punto del *continuum* dove la forza gravitazionale è R , sia pari alla differenza tra una costante e un termine del tipo R^2 . Ne segue che, nei punti in cui $R = 0$, l'energia E è massima. Ne segue, anche, che in *quei* punti, in cui il mezzo che causa la gravitazione non è perturbato, s'accumula una energia enorme, e che tale energia *diminuisce* in ogni altro punto in cui, essendo R diverso da zero, si manifesta la presenza di "corpi densi". La conclusione è inevitabile: «Poiché io sono incapace di capire in qual modo un mezzo possa possedere tali proprietà, non posso perseguire, in questa direzione, nella ricerca della causa della gravitazione».

Ci si era comunque allontanati di molto dall'orlo osservativo e s'era ormai giunti là dove anche lo spaziotempo galileiano e newtoniano urtavano contro le nuove conoscenze sulla seconda interazione universale. Spazio e materia s'erano fusi in quel campo di cui il *continuum* faradayano era stato l'archetipo, e il tempo, insieme alla gravitazione e all'inerzia, restava ancora isolato dal resto.

Che cos'è un oggetto rigido?

Domandiamoci, se non potrebbe darsi che noi considerassimo, come variazioni fisiche, degli effetti realmente dovuti a cambiamenti della curvatura del nostro spazio; in altre parole, se alcune delle cause, che chiamiamo fisiche, e forse tutte, non fossero per avventura dovute alla costruzione geometrica del nostro spazio.

W. K. Clifford, *The Common Sense of Exact Sciences*, 1885

4.1

I fatti non sono necessari: lo spazio e il corpo rigido

In precedenza s'è fatto qualche cenno a posizioni filosofiche sulla percezione, o sullo spazio e sul tempo, assunte da Galilei o da Locke. Dovremmo altresì ricordare altre importanti asserzioni filosofiche. Ricordare, ad esempio, Kant. Kant è un gigante, e solo un gigante, infatti, può, sul finire del Settecento, arrivare a concludere che, «se prescindiamo dalla condizione soggettiva», allora «la rappresentazione dello spazio non significa più nulla» e «il tempo è nient'altro che la forma del senso interno».

Questi enunciati non stanno certo in quella periferia del linguaggio che, seguendo la dizione di Quine, in queste pagine è sempre indicata come l'orlo osservativo del nostro dire. E qui sta il punto. Sulla nave della conoscenza, come osservava Neurath, trafficano davvero molti marinai: scienziati e filosofi che, come Hume, Berkeley o Kant, si cibano di scienza. E, tutti insieme, modificano la nave mentre la nave viaggia.

La modificazione, però, è descrivibile soltanto dall'interno della scienza, non dall'esterno. Al timone della nave metaforica di Neurath non stanno i sacerdoti di una filosofia prima che sia depositaria delle regole di una *scientia scientiarum*. Sono dunque inaffidabili i giudici che emettono sentenze letterarie standosene a riva, e a riva non stavano di certo quei matematici che, nell'Ottocento, già vivevano in zone linguistiche remote rispetto a quelle che s'usano per rappresentare gli eventi di senso comune.

Basti allora ricordare Riemann. È Riemann a rilevare, nel 1854, che l'intero edificio della geometria è stato costruito, nei secoli, sulla base dell'assunzione che esista "qualcosa di dato". Che cosa? Addirittura il concetto di spazio, insieme ai concetti di cui abbiamo bisogno «per effettuare delle costruzioni di base». E così accade che restino in ombra questioni profondissime circa i presupposti che tacitamente accogliamo. In particolare accade che non riusciamo a capire che cosa facciamo quando, partendo da sistemi tra loro diversi di "fatti" semplici, approdiamo alla determinazione di "relazioni metriche dello spazio". E accade anche che, *per gli scopi attuali*, appaia, come più importante di ogni altro, il sistema scelto da Euclide.

Ma, osserva Riemann, i fatti euclidei, «come tutti i fatti», non sono di per sé necessari. Hanno «una certezza soltanto empirica». Non *fatti*, allora, ma *ipotesi*. «Si può quindi studiarne la probabilità, che entro i limiti dell'osservazione è estremamente elevata, e decidere poi se è lecito estenderli al di là dei limiti dell'osservazione, sia verso l'incommensurabilmente grande che verso l'incommensurabilmente piccolo».

Riemann era giustamente convinto che solo viaggiando verso i livelli più astratti dell'argomentazione i parlanti riuscissero a determinare il concreto mondo d'esperienza. È l'astratto che spiega il concreto, non viceversa. E proprio Riemann fu accusato, da un filosofo che stava a riva e che si chiamava Stallo, di essere un ignorante e di non aver quindi capito la lezione kantiana. Anche Mach, pochi anni dopo, avrebbe posto condizioni pesanti sulle nuove geometrie. Mach apprezzava Stallo ma non sostenne che Riemann era un ignorante pasticcione. Anzi, riconobbe la portata dell'opera riemanniana. Con una clausola, però: che non si confondessero gli spazi non euclidei, ch'erano "enti mentali", con lo spazio della sensazione.

Riemann aveva messo il dito sulla piaga. Tutte le misure spaziali presuppongono punti di vista dotati di una base empirica. In particolare presuppongono una universalità indiscutibile di quei punti di vista centrali che Riemann individua, in modo impressionante, citando «i concetti di corpo solido e di raggio luminoso». *E dice, però, che non è più ammissibile quella universalità*. Non abbiamo infatti alcuna ragione per *credere* che i nostri punti di vista sul corpo rigido e sul raggio di luce siano ad esempio validi nell'infinitamente piccolo.

Di conseguenza non abbiamo alcuna ragione per *credere* che non esistano problemi pesanti circa le relazioni metriche dello spazio nell'infinitamente piccolo. In generale: problemi circa lo spazio che sono enunciabili e solubili per mezzo di ricerche *formali* sulle relazioni metriche, che formano il nucleo vero della filosofia dello spazio e ai quali possiamo giungere prendendo le mosse "dall'organizzazione dei fenomeni". E non si tratta di mosse fenomenologiche

nel senso filosofico del termine, ma di quella specifica organizzazione di cui Newton ha posto le basi, che ha avuto il conforto di moltissime esperienze e che è suscettibile di modificazioni «sotto la spinta di fatti che essa non può spiegare».

L'esplorazione delle relazioni metriche e l'analisi critica di entità quali il corpo rigido e il raggio di luce, quindi, ci spingono a uscire dai confini della pura indagine geometrica e a cercare correlazioni fra quest'ultima e la fisica.

4.2

Metriche, fisica e filosofia

Il messaggio riemanniano lasciò segni netti. Pensiamo, per esempio, a Helmholtz. Nel 1870 Helmholtz invita il mondo scientifico a riflettere su che cosa diciamo quando parliamo, a volte con eccessiva tranquillità, di rappresentazione di strutture spaziali che siano in qualche modo connesse a sequenze di "impressioni sensibili".

Immaginiamo allora che alcuni esseri bidimensionali, dotati di ragione e di apparati sensoriali, popolino la superficie di un corpo solido. Queste creature, fondandosi sulle proprie percezioni, costruirebbero una geometria secondo cui lo spazio ha, di per sé, due dimensioni: direbbero che un punto in moto descrive una linea e che una linea in moto descrive una superficie. Non sarebbero in grado, facendo leva sulle sole percezioni, di rappresentarsi una superficie che si muova abbandonando lo spazio superficiale dove giace. E così noi non possiamo *rappresentarci* una situazione in cui un solido abbandona lo spazio tridimensionale e comincia a muoversi fuori di esso. Nessun dato sensoriale ci fornisce infatti informazioni circa il moto in una quarta dimensione, così come un cieco dalla nascita, pur potendo assumere informazioni teoriche su che cosa siano i colori, non ha percezioni di colori.

Ma torniamo alle nostre immaginarie creature piatte: poniamole in un mondo fatto alla stregua di un piano. Esse diranno che, dati due punti nel loro mondo, è individuata la retta che per quei due punti passa. Diranno poi che, dato un terzo punto esterno a quella retta, esso individua una sola parallela alla retta appena tracciata.

Se il loro mondo fosse invece la superficie di una sfera, allora si manifesterebbero specifiche peculiarità già a livello dei postulati e dei primissimi teoremi. Dati due punti sulla sfera che giacciono alle estremità di uno stesso diametro, i nostri esseri bidimensionali giungeranno alla conclusione che per quei due punti passano infinite linee tra di loro eguali. Avrebbero, inoltre, gravi problemi sul parallelismo, poiché due linee qualsiasi, ma per loro "rettissime", s'incontrerebbero sempre in due punti, e non in uno solo. E sosterrebbero che la somma degli angoli interni di un triangolo ha un valore che non è costante ma dipende dall'estensione del triangolo.

L'obiettivo che Helmholtz voleva colpire è molto semplice. Le creature piatte che vivono su un piano o su una sfera condividono, per definizione, facoltà deduttive tra loro identiche e identiche alle nostre. Ciò nonostante, come mostra l'esempio in discussione, ci troviamo di fronte a tre geometrie tra loro dissimili.

Quale di esse è la rappresentazione *vera* di ciò che chiamiamo spazio? Che cosa precisamente accade quando andiamo oltre lo spazio a tre dimensioni, ovvero là dove «la nostra facoltà rappresentativa è ostacolata dalla struttura dei nostri organi e da quelle esperienze a essa collegate»?

Queste e altre domande sono legittime in quanto traffichiamo sempre con misure spaziali: «tutti i concetti di grandezze applicati allo spazio, presuppongono la possibilità del moto di enti spaziali, la cui forma e le cui dimensioni possano essere considerate immutabili nonostante il movimento». La geometria, in quanto studia enti spaziali siffatti, li depura di ogni proprietà fisica *eccetto una*, e cioè quella proprietà fisica cui ci si riferisce quando si parla di rigidità e si deve pertanto parlare di meccanica. Orbene, non siamo allora *costretti* a mutare «tutto il sistema dei nostri principii meccanici» quando passiamo a metriche distinte da quelle tradizionalmente inserite in un programma euclideo?

Se raffiguriamo il mondo in uno specchio pseudosferico siamo addirittura *obbligati* a ripensare il principio meccanico secondo cui un corpo non soggetto a forze percorre lo spazio spostandosi in linea retta con accelerazione nulla: quel corpo, infatti, avrebbe ora una velocità dipendente dal luogo.

La questione riemanniana, insomma, diventa sempre più manifesta. Ogni asserto geometrico su rapporti spaziali è *anche* un asserto sul comportamento fisico di corpi rigidi, e, proprio per questo, solleva quesiti sulla razionalità di ammettere che le proprietà fisiche dei corpi non dipendono dal luogo.

Ed ecco, allora, riemergere la tematica kantiana. Riemerge, per Helmholtz, in una forma che taluni filosofi possono tuttavia ritenere impropria. Essa, infatti, *ora* concerne non tanto lo spazio e il tempo, quanto il corpo rigido. In che senso possiamo infatti discutere di corpi rigidi? Non è affatto chiaro. Qualcuno, scrive Helmholtz, sarebbe forse propenso a suggerire che *possiamo* parlare di corpo rigido in quanto *possediamo* un concetto trascendentale di corpo rigido, costituitosi «indipendentemente dalle esperienze reali». Sotto questo profilo un seguace di Kant sarebbe nelle condizioni di pensare che gli assiomi geometrici esprimano «proporzioni date a *priori* attraverso l'intuizione trascendentale». E tali proporzioni non sarebbero passibili di controllo empirico per la semplice circostanza che avrebbero proprio il compito di aiutarci a *decidere* «se un corpo naturale è o non è un corpo rigido».

Eppure le cose non possono stare *così*. Il principio d'inerzia e il principio secondo cui il comportamento meccanico di un corpo non dipende dal luogo, *uniti di fatto* ad assiomi geometrici, formano un sistema teorico al quale compete "un contenuto reale". Pertanto trattasi d'un sistema suscettibile di controllo empirico. Nelle zone alte dell'assiomatica, allora, la parola "intuizione" non può essere sinonima dell'espressione «forma trascendentale dell'intuizione», anche se spesso, nella

ricerca filosofica, succede che la constatazione dell'esistenza di comportamenti regolari a livello empirico, accoppiata a una non chiara modalità di spiegazione, rende inclini a parlare di «principii dati a priori».

Sembra, tutto sommato, che molti enigmi sullo spazio derivino dal fatto di non ammettere che l'intuizione, se descrive qualcosa, descrive soltanto «una conoscenza empirica, che la nostra memoria acquisisce mediante accumulo e rafforzamento di successive impressioni omogenee».

È il caso di ricordare che le prese di posizione alla Riemann o alla Helmholtz, in quanto erano correlate - in modo esplicito o implicito - alla grande questione kantiana, davano la stura anche a critiche ingenerose o smodate. Il già citato Stallo, ad esempio, esprimeva la propria incredulità scrivendo che era *sorprendente* l'idea che lo spazio ordinario fosse solo una delle forme possibili dello spazio geometrico. E la esprimeva sostenendo che Riemann:

era del tutto estraneo alle discussioni sulla natura dello spazio che con tanto vigore si sono sviluppate grazie ai migliori pensatori del nostro tempo sin dagli anni di Kant, e aveva così scarsa conoscenza della storia della logica da non possedere il più debole sospetto a proposito della molteplice ambiguità di termini come "concetto" e "quantità", nonché a proposito della necessità di definirli esattamente prima ancora di avviare una ricerca sui fondamenti del sapere umano.

Anche il nostro mondo attuale è densamente popolato da intellettuali che sono riproduzioni fedeli di Stallo: convinti che, *prima di esplorare la natura*, occorre aver definito che cosa diavolo voglia dire la parola "concetto". Quasi che, avendo catturato il significato del nome "concetto", fosse agevole individuare la natura e la funzione dei corpi rigidi e dei raggi di luce.

L'equivoco filosofico sta appunto nel credere che sia trivialmente vero che solo la ricerca filosofica sa analizzare i fondamenti delle scienze della natura. È al contrario vero che solo gli scienziati sanno quali sono i fondamenti, anche se, spesso, non se ne occupano. Riemann e Helmholtz, comunque, lo sanno e se ne occupano. Essi sanno che in realtà è difficilissimo parlare di corpo rigido e di raggio di luce, e che le difficoltà sono indipendenti dal fatto che si possa filosofare di significati. Circa l'espressione "raggio di luce" infatti, ci sono molti problemi che dipendono dagli ostacoli che incontriamo nel chiarire i rapporti tra raggio di luce, corpo rigido e metriche.

Probabilmente Stallo conosceva i testi kantiani meglio di Riemann o di Helmholtz. Riemann e Helmholtz avevano tuttavia colto il problema di Kant assai meglio di Stallo. Anche Clifford aveva capito molte cose attorno a *quel* problema. Egli infatti riteneva che i fatti fisici - quale che fosse il senso da attribuire alla parola "fatti" - si manifestassero in quanto effetti la cui causa andava cercata in curvature spaziali e in metriche variabili nel tempo. Occorreva pertanto, a suo avviso, respingere la "credenza volgare" secondo cui gli assiomi geometrici euclidei fossero "universalmente veri"

4.3

Un raggio di luce

Ma torniamo a quel corno della questione che giace nell'uso dell'espressione "raggio di luce". In prima approssimazione sembra che l'espressione sia innocua, anche se nessuno sapeva bene che cosa volesse dire, sia nel caso che parlasse di luce dal punto di vista fisico, sia che ne discutesse come modello di segmento di retta.

Maxwell, da sottile erede di Faraday, osserva che l'argomentare su raggi luminosi implica sempre l'argomentare su corpi che li emettono, su corpi che li assorbono e su un'altra faccenda di natura fisica: «Durante l'intervallo di tempo dopo che la luce ha lasciato il primo corpo e prima che raggiunga il secondo, essa deve essere esistita come energia nello spazio fra loro interposto». A questo punto siamo però a un bivio. La trasmissione di energia è raffigurabile in un modello secondo cui si ha un trasferimento di "corpuscoli di luce" tra un corpo e l'altro, oppure in un modello per cui la trasmissione si realizza "per l'azione di parti contigue" d'un mezzo dove i corpi giacciono. In una teoria di campo, però, il primo modello evapora e resta solo il secondo. Che cosa allora intendiamo asserire quando sosteniamo che la trasmissione della luce è caratterizzata da una velocità c di cui dobbiamo misurare il valore?

Maxwell pone l'accento su una circostanza apparentemente poco interessante: egli infatti sottolinea come non sia realizzabile una misura di c quando la luce si propaga in un solo senso tra due punti fissi. È invece necessario che la propagazione compia un viaggio di andata e ritorno rispetto a due traguardi collocati in un laboratorio.

Tutto qui? Esatto. Basta pensarci su e trarre alcune conseguenze. Il laboratorio, nota Maxwell, è solidale con la Terra, e la Terra si sposta con una data velocità v nel mezzo che permette appunto la propagazione della luce. Sorge, quindi, un punto interrogativo. Se infatti sottoponiamo al calcolo il nostro problema su c , allora troviamo che il tempo necessario al raggio di luce per effettuare il viaggio di andata e ritorno dipende da una quantità precisa e pari a v^2/c^2 . Quantità precisa, come s'è appena detto. Ma, soprattutto, una quantità il cui valore numerico è estremamente piccolo. Così piccolo da indurre Maxwell a ritenerlo non misurabile: «è un valore troppo piccolo per potere essere osservato».

Saremmo pertanto nella seguente condizione di fatto. Abbiamo ragioni per affermare che una misura di c lungo una distanza *rigida* implica una misura di *intervallo di tempo* che dipende da un fattore così piccolo da non poter essere misurato. Una situazione molto brutta, ammettiamolo. È brutta perché c non è una grandezza fisica come tante altre.

Essa gioca, nella teoria di campo, un ruolo centralissimo.

E la situazione peggiora rapidamente perché Maxwell si è posto un *altro* problema che coinvolge il ruolo di c e ne ha però fornito una soluzione quanto mai discutibile. Trattasi di un problema fisico particolarmente velenoso. La teoria maxwelliana di campo è un gruppo di equazioni che consente di determinare la propagazione di una perturbazione elettromagnetica in un mezzo. Il mezzo, a sua volta, è inteso come uniforme e in quiete, e la quiete del mezzo va presa alla lettera: il mezzo è «privo di movimento ad eccezione di quello implicato dalle perturbazioni elettromagnetiche», come evidenzia Maxwell nel XX capitolo del secondo volume del *Trattato* del 1873. Determinare la propagazione vuol dire trovare il valore di c , e scoprire che c è intimamente correlato sia con misure astronomiche sulla velocità della luce, sia con misure su rapporti tra "quantità di elettricità" espresse in unità elettrostatiche ed elettromagnetiche. Insomma, c è *davvero* importante, nel senso che è una grandezza universale come la costante di Newton per l'interazione gravitazionale.

D'altra parte Maxwell *deve* verificare un'implicazione matematica della teoria. L'implicazione riguarda la *forma* delle equazioni di campo: *questa forma subisce variazioni quando è scritta da un osservatore collocato in un sistema di riferimento in moto nello spazio?*

Nell'VIII capitolo del secondo volume del *Trattato* Maxwell esamina l'implicazione nel caso specifico delle equazioni sull'intensità elettromotrice. E la esamina in modo molto generale poiché usa un sistema di riferimento che, rispetto a un sistema *fisso*, si sposta per traslazione e per rotazione. Il risultato cui perviene è questo:

L'intensità elettromotrice è espressa da una formula dello stesso tipo, sia che i movimenti dei conduttori siano riferiti ad assi fissi, sia che lo siano ad assi mobili nello spazio [...]. In tutti i fenomeni, perciò, relativi a circuiti chiusi e alle correnti che li percorrono, è indifferente che gli assi a cui si riferisce il sistema siano in quiete o in movimento.

Il tema è ripreso nel XII capitolo, là dove Maxwell studia il fenomeno delle correnti elettriche indotte in un disco metallico che ruota entro un campo magnetico. Un fenomeno *molto* delicato da studiare, perché non si manifesta quando il disco è in quiete nel campo magnetico e, pertanto, coinvolge il tema dell'induzione elettromagnetica scoperta da Faraday nelle situazioni in cui si ha *moto relativo* tra un conduttore e un magnete. Maxwell, però, ritiene di poterlo studiare in modo ottimale, in quanto, come egli stesso scrive, è utilizzabile il metodo già verificato «per trattare le equazioni elettromagnetiche quando sono riferite a un sistema di assi mobile».

Quest'ultima generalizzazione è davvero tranquillizzante. La teoria del campo elettromagnetico e della luce, infatti, sembra proprio contenere equazioni invarianti per un gruppo quanto mai esteso di sistemi di riferimento. In ciò è universale come la teoria dei corpi mobili e privi di carica, che, alla luce del principio galileiano di relatività, viene rappresentata da equazioni invarianti per un gruppo quanto mai esteso di sistemi di riferimento: anche se le equazioni di campo contengono c , che non appare necessariamente nelle equazioni della meccanica analitica e che si scontra con l'ostacolo di una quantità non osservabile come v^2/c^2 .

Poiché sappiamo come è andata a finire, dovremmo a questo punto ammettere che le equazioni sono più intelligenti di chi le scopre e tenta di coglierne i contenuti oggettivi. Basta infatti osservare che cosa succede quando, seguendo Lorentz, fabbrichiamo una sequenza di ragionamenti *formali* circa il quesito maxwelliano sull'invarianza delle equazioni di campo.

Sappiamo che c'è qualche enigma attorno all'osservabilità di v^2/c^2 e, quindi, attorno alla misura dell'intervallo di tempo durante il quale un raggio di luce fa un viaggio di andata e ritorno. Sappiamo anche che esistono ragionamenti *formali* grazie ai quali ci troviamo nella situazione di rispondere a domande circa la forma che assumono le equazioni di campo quando passiamo da un sistema di riferimento *fisso* a uno *mobile*. Sappiamo, infine, che raggi di luce e corpi rigidi hanno una curiosa collocazione di frontiera tra geometria e fisica.

4.4

Rigidità e ottica: un esperimento

Lo sappiamo *noi*, ben s'intende. Lo sappiamo *oggi*. Sul finire dell'Ottocento, invece, alcuni parlanti sapevano certe cose e altri ne sapevano altre: nessuno aveva ancora scoperto i legami tra le une e le altre. Quasi tutti, però, erano a conoscenza del fatto che Maxwell aveva commesso almeno un errore di valutazione. (Apriamo una breve parentesi. Pochissimi scienziati credevano, in quegli anni, che Maxwell fosse un genio di statura pari a quella di Archimede, Galilei, Newton o Eulero. Penso che la maggioranza dei fisici fosse convinta che la teoria di campo fosse, come acidamente asseriva lord Kelvin, una "teoria di carta", in quanto era priva di una interpretazione fisica soddisfacente. I giudizi positivi sulla teoria maxwelliana erano emessi da una minoranza che tale restava pur annoverando studiosi del calibro di Hertz o di Boltzmann.)

Un errore, dicevo. Quello di credere che il valore di v^2/c^2 non fosse osservabile in laboratorio. Pochi mesi dopo l'enunciazione di tale credenza ci si accorse, invece, che quel valore poteva essere osservato con tecniche di interferometria portate al limite. Già nel 1881 era stata realizzata, da Michelson, una strategia interferometrica sul fattore di Maxwell che aveva portato a un risultato negativo. Michelson, tuttavia, aveva commesso un banale errore algebrico nell'interpretazione dei dati. Nel 1887 l'esperienza fu ripetuta con procedure più raffinate e, ancora una volta, il risultato fu negativo.

D'altra parte era impossibile che il risultato fosse negativo poiché le teorie disponibili sulla propagazione della luce erano in grado di fare previsioni precise su grandezze misurabili con tecniche opportune. Entro gli errori di misura, quell'esperimento non forniva dati ambigui, anche se forniva dati sconcertanti. La misura dipendeva infatti dalla velocità della Terra rispetto al mezzo in quiete dove si propagava la luce, e il risultato era interpretabile solo a patto di ammettere che la velocità della Terra nel mezzo in quiete fosse troppo piccola rispetto a quella che era invece necessaria per spiegare i fenomeni di aberrazione. Il che era decisamente impressionante, poiché generava anomalie in cascata su quasi tutta la fisica allora nota e richiedeva, quindi, rimedi urgenti e forti.

In linea di massima dovrei onestamente scrivere che è tutto sommato noioso riassumere, sia pure in poche righe, lo schema organizzativo dell'esperimento di Michelson e Morley: uno schema che è ormai riportato in un numero cospicuo di testi. Desidero tuttavia riassumerlo ancora una volta, e lo desidero per una ragione abbastanza precisa.

L'esito *non positivo* delle misure fu, senza dubbio alcuno, sorprendente. Esso, per usare una felice espressione enunciata da lord Kelvin nel 1900, funzionò come una nube atta a oscurare l'intero settore della fisica che aveva a che fare con la propagazione della luce. Eppure esso non esercitò quell'influenza decisiva che, come spesso si narra, avrebbe costretto Albert Einstein, nel 1905, a ristrutturare i fondamenti della cinematica e, quindi, a proporre una imprevedibile traduzione dei nomi "spazio" e "tempo" in linguaggio relativistico. Il dato inatteso che Michelson e Morley estrassero dalle misure fu invece influente sulle ricerche teoriche che Lorentz stava già conducendo sulla teoria di campo, nel senso che Lorentz fu costretto a proporre una traduzione parziale e incompleta, in un linguaggio allora nuovo e non del tutto chiaro, del nome "tempo"

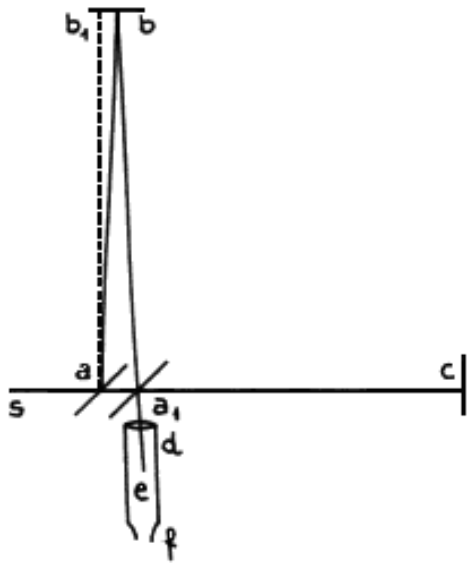
L'obiettivo che Michelson e Morley intendevano consapevolmente perseguire dipendeva dall'argomento di Maxwell circa quel valore numerico di v^2/c^2 che *doveva* influire su ogni misura possibile circa l'intervallo di tempo necessario affinché un raggio di luce (qualunque *cosa* fosse la luce) effettuasse un viaggio di *andata e ritorno* fra due punti separati da una distanza *rigida*: rigida in quanto indipendente sia dal luogo, sia dal moto che i due punti eseguivano nel mezzo in quiete al cui interno la luce si propagava.

La rigidità era essenziale perché era ovviamente vero che la coppia di punti si muoveva nel mezzo con una velocità v . Era necessario dunque che la rigidità si conservasse durante il movimento perché, in caso contrario, la misura non sarebbe stata interpretabile. Questo lato singolare e non manifesto della strategia seguita da Michelson e Morley diventa evidente se riflettiamo un poco sulla disposizione dei due punti tra cui la luce viaggia. Non si tratta, infatti, proprio di due punti, ma di un particolarissimo insieme di punti che è reso obbligatorio dalla tecnica impiegata nella misura. Il solito schema (riportato in FIG. 1) fa subito vedere che un raggio di luce, emesso lungo il tratto sa , si separa in due. Una parte viaggia verso l'alto, è riflessa da uno specchio in b , ritorna lungo ba_1 , e, infine, cade in uno strumento che è l'apparato ottico di osservazione e che è schematizzato nella sezione inferiore della figura.

È necessario che il viaggio di ritorno passi per a_1 , in quanto la Terra (e quindi anche il punto a) si sposta nel mezzo che, per conto suo, trasporta la luce. Nell'intervallo di tempo durante il quale la luce viaggia con velocità c nel mezzo, in modo tale da salire verso lo specchio in b e poi discendere verso a , la Terra e il punto a si spostano nel mezzo con una velocità v che, nel caso qui raffigurato, è diretta verso la destra del lettore: l'appuntamento con la luce che ritorna verso il basso si sposta quindi di un tratto aa_1 . L'altra parte del raggio originario viaggia invece lungo la distanza orizzontale sc : viaggia, insomma, lungo una direzione parallela a quella dello spostamento della Terra nel mezzo in quiete.

Il problema consiste nel determinare la differenza tra i cammini aba_1 e aca_1 . Lo strumento ottico di misura fa leva sull'interferometria e può rendere osservabili spostamenti di frange causati dalle differenze che ci interessano. Siccome conosciamo le distanze in gioco e non possiamo avere dubbi sulla loro indipendenza dallo stato di moto dell'intero manufatto, la determinazione desiderata dipende dal calcolo dei tempi necessari affinché i nostri raggi di luce facciano tutto ciò che devono fare prima di ricadere nel fuoco dell'apparato ottico di osservazione.

FIGURA 1



Se chiamiamo D la distanza ac , gli intervalli T e T_1 di tempo durante i quali la luce va e torna lungo ac sono facilissimi da ricavare:

$$T = D/(c - v)$$

$$T_1 = D/(c + v)$$

È altrettanto facile ricavare il tempo totale:

$$T + T_1 = 2D c/(c^2 - v^2)$$

e la distanza percorsa in tale tempo:

$$2D c^2/(c^2 - v^2) \cong 2D v^2/c^2$$

Un calcolo più o meno analogo va ora effettuato per l'altro cammino, così da ricavare la sua lunghezza:

Ci interessa, come già s'è detto, la differenza tra i due cammini, ovvero:

$$2D \sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}} \cong 2D \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right)$$

$$D v^2/c^2$$

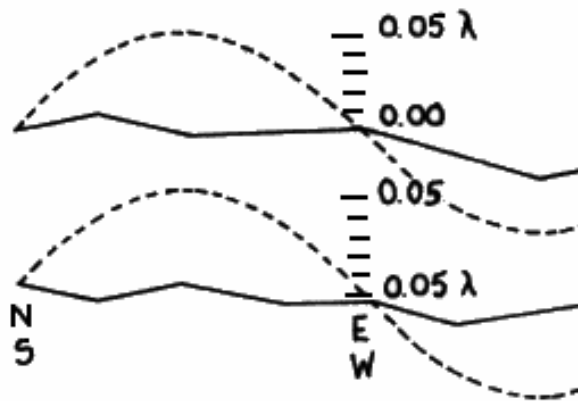
Possiamo amplificare di un fattore due questa differenza. È sufficiente far ruotare l'intero apparato di 90 gradi. Bene: questo è il valore che vogliamo misurare. Esso dipende, in particolare, dal valore di v . Che cosa vuol dire che esso dipende dal valore di v ? Vuol dire che possiamo ad esempio tener «conto solamente della velocità orbitale della Terra», come scrivono Michelson e Morley. *In tal caso sappiamo già che dobbiamo misurare qualcosa che è pari a $2D \cdot 10^{-8}$.* Possiamo migliorarci la vita lavorando un poco su D . Possiamo così arrivare a una lunghezza D di undici metri, che corrisponde a $2 \cdot 10^7$ lunghezze d'onda di luce gialla. Non riusciamo a far di meglio ma siamo già a buon punto. Il fattore da misurare, ora, implica l'osservabilità di uno spostamento prevedibile di 0,4 frange.

Che cos'è un tempo "locale"?

La strategia di questo esperimento non ha smagliature. Non abbiamo alternative plausibili: se facciamo l'esperimento, allora dobbiamo vedere un effetto non lontano da quello previsto. Fatte le misure, Michelson e Morley sono invece obbligati a scrivere una sentenza molto dura: «Lo spostamento reale era certamente inferiore alla ventesima parte di tale spostamento previsto, e probabilmente inferiore alla sua quarantesima parte».

Prima conseguenza. Perché continuiamo oggi a raccontare quell'esperimento raffigurandolo alla stregua di un esperimento totalmente negativo? Michelson e Morley hanno osservato *qualcosa*: un effetto fantasticamente inferiore a quello che tutti si aspettavano. Nella memoria un cui sono esposti i risultati delle misure effettuate appare una figura sintomatica (FIG. 2).

FIGURA 2



I tratti pieni rappresentano l'effetto *osservato*. Le curve tratteggiate descrivono invece l'effetto *previsto*.

È interessante che Michelson e Morley abbiano dato alle stampe *questa* figura, avvertendo i lettori del fatto che le scale sono tra di loro diverse in quanto le curve degli effetti previsti denotano solo un ottavo degli spostamenti teorici calcolabili. Hanno visto *qualcosa* e agiscono in modo da non trascurarlo.

Ricavano comunque le dovute implicazioni. Poiché l'effetto osservato è proporzionale a v , si ha subito che la velocità della Terra rispetto al mezzo dove la luce si propaga «è probabilmente inferiore a un sesto della velocità orbitale terrestre, e certamente inferiore a un quarto di quest'ultima». Allora non possiamo più accettare la spiegazione data da Fresnel a proposito dell'aberrazione. Tale spiegazione presuppone che il mezzo in cui si propaga la luce riempia tutti i mezzi ottici e condivida con essi il loro stato di moto in un modo molto preciso, e cioè in un modo che dipende dagli indici di rifrazione.

A questo punto, l'effetto *osservato* semina il panico: si sta d'improvviso incrinando tutta la fisica ondulatoria. Né le crepe scompaiono se accettiamo la congettura di Stokes secondo cui il mezzo che trasporta la luce è, nei pressi della superficie terrestre, in quiete rispetto al nostro pianeta. È vero, purtroppo, che Lorentz ha già dimostrato che l'ipotesi appena citata sfocia in paradossi. Ed è altrettanto vero che il suggerimento fornito proprio da Lorentz, e cioè quello di fondere insieme i punti di vista di Fresnel e di Stokes, sfocia in asseriti teorici insostenibili.

In poche parole: l'esperimento non è negativo in quanto non si è osservato alcunché, ma è devastante in quanto si è osservato un effetto troppo piccolo rispetto alle più legittime aspettative.

Si presenta, a quanto pare, *una sola via d'uscita*: abbandonare il punto di vista che sancisce la rigidità della lunghezza ed eliminare *così* la contraddizione tra l'esperimento e l'ottica di Fresnel.

Lorentz prese posizione in modo molto forte. Sostenne che i piccoli effetti osservati da Michelson e Morley non erano effetti reali poiché rientravano nell'ambito dei presumibili errori di osservazione. Con questa clausola l'esperimento del 1887 diventava un esperimento completamente *negativo*: non si vedeva niente perché non c'era niente da vedere.

Per «rimuovere la contraddizione» con l'ottica, che ora diventava ancor più pressante, Lorentz suggeriva - e il suggerimento era stato anche dato da Fitzgerald - che la lunghezza del braccio dell'interferometro che si spostava nel mezzo con velocità v non fosse rigida ma dipendesse dallo stato di moto. Non solo: la dipendenza doveva essere tale che «le differenze di fase», ovvero il cuore della misura, fossero esattamente compensate da «variazioni contrarie delle dimensioni» reali degli oggetti. Fatto ciò, l'esperimento *non era più negativo* ed era «completamente spiegato» senza richiedere alcuna demolizione dell'ottica di Fresnel.

L'ipotesi della contrazione era "sorprendente". Non era tuttavia assurda. Essa, semmai, era spiccatamente euristica. Non si potevano infatti avere dubbi sul fatto che la forma e le dimensioni dei corpi fossero «in ultima istanza condizionate dall'intensità delle forze molecolari». Si trattava, allora, di approfondire le ricerche sulle interazioni tra atomi e molecole tenendo conto delle interazioni tra particelle cariche.

La negatività delle misure del 1887 non segnalava alcuna crisi patologica della fisica e apriva invece nuove finestre sul mondo fisico. A una di quelle finestre si affacciò proprio Lorentz quando collocò il problema maxwelliano dell'invarianza delle equazioni del campo elettromagnetico nell'ambito di una teoria degli elettroni, ossia nel quadro di una teoria sul moto di oggetti carichi.

La finestra è tuttavia diversa da quella che Maxwell aveva tentato di spalancare. Lorentz, infatti, può lavorare su quella forma molto compatta delle equazioni di campo che Maxwell non conosceva e che era stata predisposta da Hertz e da altri. Data *questa* forma delle equazioni, e dato il punto di vista circa le attendibili dipendenze delle dimensioni dallo stato di moto, è sufficiente scrivere le equazioni di campo in un sistema *fisso* di coordinate e riscriverle in un sistema *mobile* che, rispetto all'altro, si sposta con velocità v lungo l'asse delle x .

Appaiono differenze di forma. Esse tuttavia svaniscono se si trasformano le equazioni scritte per il sistema mobile. La trasformazione si realizza introducendo due quantità. Una prima quantità è la seguente:

$$\beta^2 = c^2 / (c^2 - v^2)$$

Una seconda quantità, battezzata l , resta provvisoriamente non determinata. Le usuali variabili spaziotemporali x , y , z , t sono ora sostituite con nuove variabili:

$$\begin{aligned} x' &= \beta l x \\ y' &= l y \\ z' &= l z \\ t' &= (l/\beta)t - \beta l (v/c^2) x \end{aligned}$$

e queste ultime vengono inserite nella scrittura delle equazioni di campo per il sistema mobile.

Se si ammette che la quantità l dipende dalla velocità v in modo da assumere il valore 1 quando v ha il valore 0, e da differire di pochissimo dall'unità per velocità v molto basse, allora si approda all'invarianza delle equazioni sotto esame.

Tutto a posto, dunque, e secondo una direttrice di analisi formale che differisce da quella esplorata da Maxwell.

Non tutto, però, torna come prima. Anzi, è successo qualcosa che non collima con molte aspettative: qual è infatti il significato *fisico* di quell'oggetto stranissimo che è indicato con il simbolo t' e che Lorentz aveva battezzato "tempo locale"?

Il tempo locale, come risulta immediatamente dando una semplice occhiata alla sua forma, dipende dal *solito* tempo t , che è il tempo nel sistema di riferimento fisso. Dipende tuttavia da altre cose: dalla velocità della luce, da quella del sistema di riferimento in moto e dal luogo, ovvero dal valore che x ha nel sistema fisso.

Ciò che Lorentz sta esplorando non è esattamente ciò che Maxwell aveva esplorato. Lorentz, infatti, sta trafficando con le equazioni che dovrebbero esprimere una "teoria degli elettroni", ovvero una teoria circa il movimento di corpi dotati di carica elettrica.

Nel momento stesso in cui si garantisce l'invarianza e si risolve quindi un problema di fondo, escono problemi inaspettati: escono da ogni parte e investono zone critiche della fisica. Il sottile Poincaré ne individua (nel 1905) alcuni nella struttura stessa della fisica dell'elettrone. In particolare si rende conto che è sbagliata l'enunciazione di molti quesiti sul moto e sulla quiete, perché le misure di Michelson e Morley, *a questo punto*, corroborano il punto di vista per cui l'impossibilità di evidenziare un moto assoluto è, addirittura, «una legge generale della natura». Secondo Poincaré è proprio questo che Lorentz ha sancito. Lorentz, scrive Poincaré, «ha cercato di completare e di modificare la sua ipotesi in modo tale da metterla in accordo con il postulato della *completa* impossibilità di determinare il moto assoluto».

Muovendosi in questa direzione Poincaré battezza l'operazione matematica realizzata da Lorentz con l'espressione *trasformazione di Lorentz*, e la generalizza mostrando che l'insieme di tutte le trasformazioni siffatte, unito all'insieme delle rotazioni, «deve formare un gruppo». Poincaré parla di una «folla di problemi». È vero. Accanto al carattere grupitale delle trasformazioni che lasciano inalterate le equazioni del campo elettromagnetico e al postulato sulla impossibilità completa del moto assoluto, si dispongono in realtà altre questioni nuovissime.

In primo luogo urge capire che cosa sia il tempo locale e che cosa effettivamente facciamo quando ragioniamo su un intervallo di spazio per mezzo di misure relative all'intervallo di tempo impiegato dalla luce per percorrere *quell'*intervallo spaziale. In secondo luogo non possiamo porre fra parentesi che, seguendo la direttrice aperta da Lorentz, dobbiamo aspettarci che «tutte le forze, quale ne sia l'origine», abbiano comportamenti trasformativi conformi a quelli già scoperti per le forze elettromagnetiche. L'aspettativa è più che legittima. Allora dobbiamo pensare che anche la gravitazione si propaghi con la velocità della luce e che esistano *onde gravitazionali* che viaggiano tra corpi densi.

Molti tasselli venivano dunque illuminati dal convergere, in punti focali della ricerca, di programmi che si erano sviluppati in condizioni storicamente determinate di relativa indipendenza reciproca: argomentazioni geometriche sulle metriche e sulla nozione centrale di corpo rigido, strategie formali sulla fisica del campo elettromagnetico, scoperta di tempi locali e di una legge di natura affermare l'impossibilità del moto assoluto, individuazione di un gruppo di

trasformazioni che rendeva invarianti le equazioni di Maxwell per sistemi di riferimento inerziali.

L'emersione inattesa dei tasselli, però, non consentiva ad alcuno di unirli fra loro in modo tale da ricavare una visione unitaria al cui interno risistemare la velocità della luce, lo spaziotempo, il corpo rigido e il gruppo di Lorentz. Nel 1879, però, nasceva Albert Einstein.

Tempi ed eventi

Da che cosa dipendiamo noi esseri umani? Dipendiamo delle nostre parole. Siamo sospesi nel linguaggio. Il nostro compito consiste nel comunicare agli altri esperienze e idee. Dobbiamo sforzarci in continuazione di estendere l'ambito delle nostre descrizioni, ma in modo tale che i nostri messaggi non perdano il loro carattere di obiettività e di mancanza di ambiguità.

N. Bohr, citazione in A. Pais,
Il danese tranquillo, 1993

5.1

Il segno del tempo

Una delle parole più diffuse nelle asserzioni circa la natura del tempo è di sicuro la parola "irreversibilità". Nel linguaggio corrente chi usa questo termine descrive insieme di percezioni estremamente comuni. Queste ultime sono comuni perché, tutto sommato, non differiscono, in modi interessanti, da quelle cui si faceva riferimento quando, prima di Galilei, si parlava diffusamente di processi osservabili durante i quali mutavano talune qualità o proprietà dei corpi; mutavano processualmente nel tempo, come ognuno vedeva, le nuvole e gli animali, il colore dei capelli e le comete.

Un universo di fenomeni che, per un verso, segnava il fluire del tempo, e che, per l'altro, appariva come non passibile di analisi geometrica.

La matematica era impiegabile per raffigurare i moti celesti, poiché i corpi celesti, incorruttibili e perfetti, non avevano alcuna qualità intrinseca definibile in termini processuali. Non era invece applicabile alle corruzioni e imperfezioni del mondo sublunare.

Si tenga inoltre presente che termini come "irreversibilità" e *motus* si qualificano come rilevanti nel linguaggio comune perché i parlanti li usano per comunicare dati a proposito di sensazioni intersoggettive: tutti vedono i sassi cadere al suolo e nessuno vede un vaso, spezzatosi a causa di una caduta, risalire sul tavolo e ricomporsi.

Occorre tener presente questa circostanza ogni qual volta pensiamo che l'opera di Galilei fu rivoluzionaria. Se pensiamo così, allora sosteniamo il punto di vista galileiano, esposto sin dall'inizio del *Dialogo*, per cui la matematica *deve* guidarci nel determinare le leggi *anche* nel mondo sublunare, ovvero in quel pezzetto di cosmo dove si muovono i pendoli e i gravi cadono al suolo.

Nel sostenere questo punto di vista dobbiamo tuttavia ammettere la verità di alcune sue conseguenze controintuitive, e, soprattutto, quelle particolari conseguenze che furono individuate negli sviluppi settecenteschi della teoria del moto fondata da Galilei e da Newton, e che assunsero aspetti inquietanti solo nella seconda metà dell'Ottocento. Il punto di vista galileiano portò infatti a una matematizzazione generale delle leggi del moto e tale matematizzazione era (ed è) strutturalmente indifferente rispetto al *segno* del tempo. Una soluzione delle equazioni del moto resta una soluzione se opero la trasformazione da $+t$ a $-t$. Questa trasformazione è semplicissima sotto il profilo formale: basta farla e controllarne l'esito. Diventa tuttavia misteriosissima se ne tentiamo una interpretazione riferita al linguaggio del senso comune. Nel linguaggio comune, infatti, la trasformazione $+t \leftrightarrow -t$ si traduce in espressioni del tipo «se cambio il segno del tempo, allora...», oppure «se passo dal futuro al passato, allora...».

Perbacco: come si fa a cambiare *davvero* il segno del tempo, oppure a viaggiare dal futuro al passato? Orbene, la traduzione di un algoritmo in un linguaggio non appropriato genera spesso anomalie linguistiche e pseudoproblemi anche in situazioni più neutrali. Tutti sanno, ad esempio, che cosa succede quando cerchiamo di tradurre l'algoritmo $f=ma$ in un linguaggio dove la parola "forza" sta a indicare uno sforzo muscolare o una sensazione di affaticamento. Il che giustifica, ad esempio, gli ostacoli che debbono essere superati quando si tenta di capire l'algoritmo $f=ma$. Le percezioni di fatica non giovano affatto, così come le percezioni quotidiane non giovano a capire che la Terra si muove.

Nel caso del tempo, poi, le difficoltà possono assumere contorni squisitamente salottieri: basta leggere Bergson o Prigogine per rendersene conto e provare un sano impulso a tornare verso la fisica con senso di sollievo.

D'altra parte non possiamo negare che la trasformazione $+t \leftrightarrow -t$ sia valida in meccanica analitica. La validità di un algoritmo in meccanica analitica, infatti, non dipende dai gusti personali o dalle inclinazioni filosofiche degli individui. Chi sostiene che quella trasformazione è indesiderabile in quanto tutti percepiscono una mancanza di simmetria tra futuro e passato deve *anche* esibire una nuova meccanica analitica dove sia vera una trasformazione diversa, oppure deve dichiarare che la meccanica analitica è malvagia. In entrambi i casi, ci si limita a rendere esplicito

uno stato d'animo, e uno stato d'animo non è un argomento accettabile in fisica. E la situazione diventa pesante poiché la simmetria in t non si regge solo in meccanica analitica, ma si regge anche in teoria del campo elettromagnetico o nell'equazione di Schroedinger.

Il fisico inglese lord Kelvin aveva fatto alcuni tentativi per cogliere il nocciolo del problema.

Egli scriveva, nel 1874, che la simmetria era indubbiamente valida in meccanica analitica, ma non era più valida quando si affrontavano fenomeni dominati da attriti e regolati da un principio universale di dissipazione dell'energia meccanica. L'asimmetria regnava soltanto nei processi irreversibili.

Lo si poteva capire, secondo lord Kelvin, immaginando un rovesciamento del moto che istantaneamente coinvolgesse tutte le particelle che costituivano un corpo. Avremmo allora osservato una sequenza di eventi rovesciata nel tempo. Una sorta di viaggio nel passato. E se l'esperimento ideale fosse stato realizzato su un osservatore umano, allora l'osservatore avrebbe dovuto avere memoria del futuro e sarebbe stato costretto a fare previsioni sul passato. Se ricordiamo che lord Kelvin era così intelligente da indurre molti suoi contemporanei a valutarlo alla stregua di un secondo Newton (una valutazione, questa, francamente eccessiva) ci rendiamo allora conto di quale confusione possa generare un problema mal posto.

La severità circa la confusione, in questo caso, è tuttavia esagerata. Lord Kelvin, infatti, non stava formulando quesiti impropri o paradossi triviali su una espressione - *processi irreversibili* - interamente affogata nel senso comune e nella intersoggettività sensoriale.

Non stava, insomma, parlando da fisico attorno al tradizionale tema filosofico del *divenire* (anche se, più avanti, avremo a che fare con alcune considerazioni di Einstein a proposito di come il tema del *divenire* sia analizzabile in relatività ristretta e in relatività generale). Lord Kelvin era convinto che la scienza potesse aiutarci, e molto, nella comprensione dell'esperienza quotidiana. Ma, nello stesso tempo, sapeva molto bene che l'irreversibilità era un problema fisico che coinvolgeva la simmetria temporale della meccanica analitica, il principio di conservazione dell'energia, la tendenza naturale verso la dissipazione dell'energia meccanica e le inferenze probabilistiche che, da alcuni anni ormai, entravano pesantemente in gioco nello sviluppo di quelle interpretazioni della termodinamica che richiedevano l'uso di modelli cinetici dei moti e delle collisioni tra le particelle costituenti i gas.

Era a conoscenza di tutto ciò in quanto aveva posto le basi della termodinamica e aveva riletto le idee di Sadi Carnot in funzione dei lavori di Clausius e di Joule. Era, in poche parole, una persona molto competente. Occorre pertanto che ci interroghiamo sulle ragioni professionali per cui lord Kelvin era propenso a distinguere tra la meccanica analitica e quelle forme specifiche del divenire che si riassumevano nella seconda legge della termodinamica.

5.2

Siamo obbligati a "spiegare" una legge empirica sulla tendenza?

Le ragioni professionali ruotavano attorno a un solo ma delicato perno concettuale. Esistevano leggi sperimentali sul comportamento della materia nello stato gassoso. Quelle leggi erano anche soddisfacenti poiché, in linea di massima, permettevano di fare buone previsioni sul comportamento dei gas rarefatti.

Orbene, era proprio necessario dedurre quelle leggi da modelli sulla costituzione corpuscolare dei gas? Una domanda, questa, non peregrina. Facciamo subito un esempio. Tutti sanno che un gas è elastico. Alcuni credono, però, che si abbia bisogno di una deduzione dell'elasticità a partire da ipotesi sulle collisioni tra particelle elastiche. Ammettiamo ora che tali deduzioni siano ineccepibili. Siamo forse approdati a una spiegazione dell'elasticità macroscopica? Non abbiamo, invece, *spostato il problema* dal macroscopico al microscopico, suggerendo che i corpuscoli non osservabili siano intrinsecamente elastici?

E poi, anche chiudendo un occhio su questo aspetto della faccenda, le teorie cinetiche dei gas erano forse in grado di spiegare la seconda legge della termodinamica? Le teorie cinetiche presupponevano che l'unica interazione importante tra corpuscoli fosse quella che reggeva le collisioni tra coppie di particelle elastiche e che era ottimamente trattata in meccanica analitica. Da quest'ultima era noto che ogni collisione di quel tipo era governata da algoritmi che non distinguevano in alcun modo tra $+t$ e $-t$.

D'altra parte la seconda legge della termodinamica prendeva invece atto di situazioni dove la simmetria rispetto al tempo era spezzata: se un vaso di cristallo era, *prima*, intero su un tavolo, e *poi* era invece a pezzi sul pavimento, occorre una pazienza infinita per guardare i cocci, dispersi qua e là, con la speranza che il vaso ritornasse spontaneamente nella condizione fisica di *prima*.

La seconda legge esprimeva una *tendenza naturale* nel tempo ed era illogica la pretesa di fornirne una interpretazione in chiave di pura meccanica analitica applicata a enti non osservabili come gli atomi o le molecole. Enti, precisava lord Kelvin, che potevano affascinare soltanto quei chimici che si lasciavano ostinatamente sedurre dalle "mostruose" congetture di Lucrezio.

Obiezioni serie e ben poste. Con il passare degli anni la massa delle critiche contro la teoria cinetica dei gas divenne ancor più rilevante. Grazie soprattutto a Poincaré e a Zermelo, si chiarì come fosse sbagliato dire che la seconda legge esprimeva una tendenza da stati poco probabili a stati molto probabili, con la clausola che gli stati in questione fossero *stati nel senso della meccanica analitica*.

Sotto condizioni rigorosamente espresse, infatti, tutti gli stati in meccanica analitica sono equiprobabili. Non

solo. Poincaré, in una classica monografia sul problema dei tre corpi e sulle equazioni della dinamica, dimostrò, sul finire dell'Ottocento, che i sistemi fisici impiegati da Clausius, Maxwell e Boltzmann erano, per così dire, *ricorrenti*: se si assegnava loro uno stato "iniziale", essi, dopo intervalli di tempo sufficientemente lunghi, ripassavano in stati infinitamente vicini a quello di partenza.

Da questo punto di vista era difficilissimo, da parte di Boltzmann, accettare i teoremi di Poincaré e, ciò nonostante, insistere nell'affermare che i sistemi isolati tendevano, nel tempo, verso stati molto probabili e *finali* nel senso della seconda legge. Come avrebbe notato Zermelo, allora assistente di Max Planck, questo argomento era inquinato poiché non si capiva quale precisa connessione logica potesse mai esistere tra la parola "tempo" e la parola "probabilità". A giudizio di Zermelo, la fisica boltzmanniana era accettabile quando trattava sistemi in equilibrio: il passaggio alle *tendenze verso* stati di equilibrio restava invece incomprensibile, a meno che Boltzmann non enunciasse una apposita *congettura di tipo fisico*.

5.3

Sul "passato" e il "futuro", e sul tempo immobile

Una parte almeno dei vivaci dibattiti di quegli ultimi anni dell'Ottocento sull'irreversibilità come tendenza verso stati finali era spesso caratterizzata da reciproche incomprensioni sul significato dei termini usati. Un'altra parte, tuttavia, era genuinamente interessante. Boltzmann stava effettivamente chiarendo, sotto il fuoco delle critiche, un tema fondamentale. Era vero che, in un sistema a molti corpi come un gas rarefatto, tutti gli stati meccanici compatibili con i requisiti matematici del caso erano tra loro equiprobabili. Era altrettanto dicibile, però, che il numero di certi stati era molto più grande del numero di altri stati. Dal che si poteva trarre la conclusione che il sistema tendeva spontaneamente a collocarsi proprio in quegli stati che erano numericamente favoriti, nel senso che la probabilità di cadere in questi ultimi era molto più grande di quella di cadere in altri.

In tal modo cadevano molte obiezioni. Non cadeva però quella di Zermelo sulla necessità di introdurre una ipotesi fisica circa la tendenza, non essendo chiaro il rapporto fra tempo e probabilità.

Messo alle strette, Boltzmann suggerì che, di fronte alla questione della separazione assoluta fra "passato" e "futuro", gli esseri umani si trovassero in una situazione analoga a quella che si ha quando qualcuno guarda una cosa e dice che essa è "sopra" o "sotto" rispetto a un'altra. Se il nostro parlante *crede* che l'universo abbia un centro e che tutte le direzioni finiscano in quel centro, allora egli attribuirà alle cose una collocazione *assoluta* rispetto a quel centro. Ma, se togliamo il centro - come è giusto fare -, il senso spaziale dei nostri discorsi cambia.

Ebbene, poniamo a questo punto un assioma cosmologico. Dichiariamo che non è contrario alla scienza il punto di vista secondo cui l'universo, su scala globale, è in equilibrio termodinamico. In un sistema all'equilibrio non succede niente. Il tempo, quindi, non va da nessuna parte: non scorre ed è, per così dire, un tempo fermo o congelato. Questo per quanto concerne la scala cosmologica. Ma, qua e là nel sistema in equilibrio, possono esistere perturbazioni locali che occupano porzioni d'universo ampie come la nostra Galassia. Noi ci troviamo accidentalmente in una di esse, e quella che ci è toccata è caratterizzata in modo specifico. Se prendiamo da essa un sistema più piccolo e lo isoliamo dal resto, allora osserviamo che esso *tende* all'equilibrio e descriviamo tale tendenza *come se* ci fosse qualcosa - il "tempo" - che va dal "passato" al "futuro".

Siccome descriviamo i processi osservabili con un linguaggio dove figurano termini come "ora", "prima" e "dopo", ci comportiamo analogamente a come ci comporteremmo qualora fossimo davvero convinti che esista un punto privilegiato nello spazio rispetto al quale è vero affermare che un corpo è "sopra" o "sotto".

L'invito di Zermelo era chiaro: hai bisogno di una ipotesi fisica. La risposta di Boltzmann è chiara: ecco un assioma sul tempo grazie al quale interpreto il fatto per cui, quando vedo un sistema fisico isolato cadere spontaneamente da certi stati verso altri, sostengo che "prima" esso aveva uno stato iniziale e che, "dopo", esso è molto vicino a uno stato "finale", e che la probabilità della caduta dipende da quanti stati erano compatibili con quello iniziale e da quanti sono invece compatibili con quello finale.

La presa di posizione boltzmanniana sul nome "tempo" era difficile da inserire in fisica per almeno due motivi. Il primo giaceva in quella zona incerta di quasi confine tra scienza e filosofia dove, spesso, è qualche filosofia a dettar legge: e, nella zona dove s'aggrumavano le forme del consenso di base in cui si articolava l'ambiente culturale tipico di un Boltzmann, era dominante, anche tra filosofie tra loro distinte, la posizione secondo cui impariamo *soltanto* dall'esperienza. Le regole del gioco - condivise da filosofi che volevano vigilare affinché la fisica non tralignasse e da fisici che detestavano i filosofi - poggiavano spesso sulla norma secondo cui il linguaggio contiene parole che denotano raggruppamenti intersoggettivi di sensazioni e che sono fondamentali per la ricerca scientifica. La teoria, in tal caso, si ridurrebbe a un compattamento formale di regolarità già note sul terreno delle sensazioni e delle esperienze.

In questa coloritura generale della cultura diffusa non erano certamente ampi gli orizzonti cui affacciarsi per

sollevare dubbi su "spazio" e "tempo". S'era facilmente accusati di non esser cauti rispetto a possibili invasioni metafisiche sul terreno della scienza. Non aveva forse Mach insegnato, a tutti, quali perversioni sorgessero da visioni newtoniane di spazio e di tempo assoluti, o da confusioni perniciose tra esperienza ed "enti mentali" quali gli spazi non euclidei o gli atomi o le molecole?

Non era dunque ammissibile che, contro ogni esperienza, si narrasse di un tempo cosmologico e congelato in sistemi in equilibrio. Un tempo privo di freccia intrinseca, fermo: non fluiva da alcuna parte e non andava verso un'altra. Ancor meno ammissibile, allora, far leva su *quel* tempo immobile con la pretesa di gettar luce sia sulle forme soggettive della consapevolezza del divenire, sia sulle tendenze osservabili in natura e codificate dalla seconda legge della termodinamica.

Il *divenire* non era forse *nei* fenomeni stessi, così come tutti li avvertivano con i sensi? Che valore fisico poteva allora avere la tesi di Boltzmann secondo cui tutti noi, dotati di sensi e di ragione, stavamo per caso in una gigantesca fluttuazione dove i sistemi fisici, una volta isolati, cadevano da insiemi poco popolati di stati in modo da stabilizzarsi su insiemi molto popolati di stati possibili? La tesi boltzmanniana rendeva conto, *in qualche modo*, del fatto che i parlanti osservavano quelle tendenze spontanee e le raffiguravano con strategie linguistiche che facevano leva su parole come "prima" e "poi", "passato" e "futuro". Ma quella tesi non era suffragata da fatti. Essa appariva, agli occhi di molte persone, alla stregua di un tentativo metafisico di salvare la teoria dei gas.

Se l'esperienza è la sola fonte della conoscenza, e se le teorie sono solo modalità economiche di rappresentazione di quanto conosciamo per via empirica, allora nessuno può impunemente trastullarsi con elucubrazioni inutili. Boltzmann fu addirittura accusato d'essere un terrorista algebrico: per gli accusatori non toccava all'astrazione matematica la funzione di spiegare il concreto mondo dell'esperienza. Per gli accusatori - tra i quali lord Kelvin - la matematica era una finta astrazione, poiché, in realtà, gli algoritmi erano estrapolazioni del senso comune, e il senso comune era organizzato nell'esperienza quotidiana.

Comprendiamo, così, come mai Boltzmann avesse condotto una dura e isolata battaglia filosofica in favore dell'astratto e del potere conoscitivo delle mosse teoriche. Come mai, in particolare, egli scriva che solo *una metà della nostra esperienza è sempre esperienza*: ogni esperienza, infatti, è sempre intrisa di teorie. Anche le esperienze più comuni. Le strategie teoriche sono, di conseguenza, basilari. Ma come far capire tutto ciò a intellettuali che trattavano le teorie come se una teoria, commentava amaramente Boltzmann, fosse una mucca da latte?

L'isolamento culturale riservato a Boltzmann (e corroborato da fisici e da filosofi) era parallelo all'indifferenza degli intellettuali nei confronti del tempo raffigurato da Boltzmann. Nessuno prendeva molto sul serio lo straordinario punto di vista boltzmanniano secondo cui un parlante dice "prima", "ora" e "dopo" perché è dotato di sensori biologici che null'altro possono fare quando raccolgono segnali esterni da sistemi che si spostano da insiemi poco popolati di stati a insiemi molto popolati.

Le maggioranze colte amavano invece i litigi sulla morte termica dell'universo che sarebbe stata inevitabile se la seconda legge della termodinamica avesse davvero avuto una validità universale. Come prestare allora orecchio a chi, al contrario, asseriva che il cosmo, a scala globale, era già in equilibrio e che il tempo, su quella scala, non fluiva, e che, pertanto, era fittizia la distinzione *assoluta* fra "passato" e "futuro"? Chi poteva seriamente meditare sulla possibilità che, di conseguenza, non *accadesse* proprio alcunché a livello cosmologico? Che, per usare parole diverse (che incontreremo più avanti) si dovesse dire che *il mondo è*, non che *il mondo diviene*?

5.4

Un aggettivo ingombrante: "assoluto"

Albert Einstein non credeva che gli algoritmi fossero mucche da latte, ed era altresì convinto che spettasse agli algoritmi il compito di decidere che cosa fosse un'esperienza. Conosceva molto bene la fisica di Boltzmann. Tra il 1902 e il 1904 aveva fatto uso della teoria cinetica per scoprire teoremi in meccanica statistica e per individuare la natura matematica delle fluttuazioni e, negli stessi incredibili mesi dell'anno 1905 in cui generalizzò l'elettrodinamica, riuscì anche, estendendo procedure alla Boltzmann, a trattare probabilisticamente i moti browniani e la radiazione.

Il tempo, però, fu da Einstein analizzato secondo una direttrice distinta da quella boltzmanniana (anche se, per tutta la vita, Einstein ribadì la sostanziale stupidità delle più diffuse credenze sulla direzionalità del flusso temporale, che erano a suo avviso causate dalla non comprensione della seconda legge della termodinamica e della relatività generale). La direttrice einsteiniana fu quella connessa all'elettrodinamica dei corpi in movimento.

Nel classico saggio del 1905 in cui si trovano le basi per la teoria della relatività ristretta leggiamo, sin dalle prime righe, che l'enigma centrale da risolvere è costituito da *asimmetrie* connesse all'induzione elettromagnetica di Faraday, e non leggiamo, da alcuna parte, che l'enigma da risolvere è l'esito negativo delle misure di Michelson e Morley.

È presente solo un accenno all'intera classe dei «tentativi falliti di individuare un qualche movimento della Terra relativamente al "mezzo luminifero"». Una classe di fallimenti che, a quanto pare, riguarda solo gli effetti al primo ordine e che, *comunque*, non sta al centro del problema *di* Einstein. Il problema del 1905 riguarda invece le forme usuali dell'interpretazione della teoria di Maxwell nella sua applicazione standard alle «interazioni elettrodinamiche tra un magnete e un conduttore».

Un problema, questo, che diventa *semplice* solo se lo leggiamo nella traduzione che di esso Einstein offre. Sembra infatti, al di fuori di tale traduzione, che non esista alcun problema: tutti conoscono l'affidabilità degli esperimenti di Faraday, tutti sanno scrivere le equazioni di Maxwell e tutti vivono felici. Solo che la felicità è solo illusione.

Guardiamo un magnete che si muove rispetto a un conduttore stazionario. Osserviamo una corrente nel conduttore e diciamo che essa è causata dall'energia del campo elettrico circostante il magnete in moto. E, aggiungiamo, la stessa cosa accade quando osserviamo un conduttore in moto rispetto a un magnete stazionario. Certo: accade che osserviamo una corrente. Solo che, questa volta, attorno al magnete stazionario non c'è un campo elettrico, e non possiamo quindi spiegare come mai si formi la corrente.

Tutto qui? Tutto qui. Appunto: non possiamo proprio spiegare una osservazione elementare, e non la possiamo spiegare perché abbiamo capito l'elettrodinamica di Maxwell in modo errato, e l'abbiamo capita in modo errato perché l'abbiamo appoggiata sul presupposto che nel mondo ci siano magneti e conduttori che, a volte, sono in moto rispetto a qualcosa, mentre, altre volte, sono "in quiete assoluta". E, così mal facendo, abbiamo *anche* i tentativi "falliti" di evidenziare gli spostamenti della Terra rispetto al mezzo che consente di propagare la luce.

Il nodo sta dunque nell'asimmetria su citata. Eliminiamola, allora, *invece di lasciare ombre sulla teoria di Maxwell*. La possiamo eliminare di colpo: ci basta dichiarare che «i fenomeni elettrodinamici, al pari di quelli meccanici, non possiedono proprietà corrispondenti all'idea di quiete assoluta».

L'eliminazione non è una mossa *ad hoc*. Essa ci è suggerita proprio dai fenomeni, e il suggerimento è valido già «in un'approssimazione al primo ordine». Esso dice, *semplicemente*, che «per tutti i sistemi di coordinate per i quali valgono le equazioni della meccanica varranno anche le stesse leggi elettrodinamiche e ottiche». Se diciamo così, allora emettiamo una congettura. Dichiariamo ora che essa è un postulato, chiamiamolo "principio di relatività" e proponiamoci di giungere a «una teoria elettrodinamica dei corpi in movimento, semplice e coerente, fondata sulla teoria di Maxwell per i corpi stazionari», là dove, però, non si abbia più alcun bisogno di eteri luminiferi in quanto non si ha più alcun bisogno di spazi assolutamente stazionari.

Ebbene, un solo postulato non è sufficiente. Ne occorre un altro che, a prima vista, è incompatibile con il primo. Esso afferma che la luce si propaga *nel vuoto* con una velocità che non dipende dallo stato di moto del corpo che la emette.

5.5

Ancora il corpo rigido: la simultaneità

Ai due postulati va tuttavia connessa una tesi molto generale che non è mai stata seriamente presa in considerazione e che «è la radice delle difficoltà» in elettrodinamica. La tesi sottolinea infatti che l'elettrodinamica è in realtà basata sulla "cinematica del corpo rigido". Quale che sia *la forma* di una teoria elettrodinamica, gli enunciati della teoria parlano di «rapporti fra corpi rigidi (sistemi di coordinate), orologi e processi elettromagnetici».

Di qui, allora, si deve ripartire. Un punto di partenza che, come ormai sappiamo, era già stato individuato, prima che Einstein nascesse, da quegli studiosi che, come Riemann, erano convinti che solo salendo verso l'astrazione fossero reperibili gli argomenti con i quali interpretare l'esperienza.

Ripartire dalla cinematica e dal corpo rigido, dunque. Che cos'è *un sistema di riferimento stazionario*? È un oggetto per il quale sono valide, in prima approssimazione, le equazioni del moto newtoniano. Punto e basta. Se desidero determinare la posizione di un punto che sia in quiete in tale sistema ho necessità di utilizzare un regolo rigido. Nessun problema. Il problema viene fuori quando desidero determinare lo spostamento del punto in funzione del tempo: e il problema sta nella circostanza che, se ci penso un poco, m'accorgo di non possedere, nella trattazione matematica del moto del punto, una definizione di "tempo".

È il tema dei manoscritti newtoniani. Siamo in grado di determinare la posizione x di un punto nello spazio, ma non siamo in grado di specificare il moto del punto in termini di x funzione di t , perché, al fine di determinare t , non posso far altro che riferirmi ad altri moti.

La soluzione *privata* che Newton propone a se stesso dice che, nella classe degli infiniti moti possibili, scelgo un moto qualsiasi, gli impongo la condizione di avere accelerazione nulla e lo chiamo "tempo". La soluzione *pubblica* fornita da Einstein è altrettanto radicale ma più potente: «Noi dobbiamo considerare che tutti i nostri giudizi in cui interviene il tempo sono sempre giudizi su *eventi simultanei*».

Non è dunque vero che Einstein sia partito, come troppo di frequente si narra, da una critica filosofica dei concetti di spazio e di tempo assoluti. Egli ha invece operato secondo una sequenza *tecnica* di mosse che inizia con l'accettazione della teoria di campo maxwelliana, passa per la fondazione cinematica di ogni teoria elettrodinamica, giunge sino alla questione del corpo rigido e approda, infine, alla *simultaneità*. *Einstein non critica le nozioni di tempo e di spazio, ma analizza quella, ben più profonda, di simultaneità*.

In particolare, poi, Einstein non si limita affatto a introdurre una definizione *solo* operativa del "tempo". Una operazione del genere sarebbe quella per cui la parola "tempo" è sostituita con una espressione che riferisce il "posizionamento della lancetta del mio orologio". Orbene, questo tipo di sostituzione è proprio quello che Einstein respinge come insoddisfacente. Esso va bene se voglio *definire* il tempo in un luogo che contiene il mio orologio, ma

non va bene se voglio *definire* il tempo per eventi che stanno in luoghi differenti e lontani dal mio orologio. *Occorre infatti evitare di stabilire ordinamenti che dipendano dall'osservatore e che siano quindi relativi, in senso banale, a chi guarda l'orologio.*

Questa forma errata di riferire il tempo alla posizione dell'osservatore si realizza davvero: e lo sappiamo sulla base di quell'esperienza rispetto alla quale dobbiamo andar *oltre* se vogliamo eliminare la nostra incapacità di chiarire che cosa si intende per "tempo" nella descrizione del moto di un punto materiale.

Andare oltre vuol dire *rileggere l'esperienza* dopo aver scovato un modo per confrontare fra loro i tempi di eventi che si realizzano in luoghi tra loro lontani: senza cedere di fronte alle abitudinarie tentazioni di risolvere subito la questione ammettendo, con la guida delle comuni esperienze, che si realizzano qua e là eventi tra loro simultanei.

Come facciamo propriamente a dire che esiste la simultaneità? Lo diciamo perché immaginiamo due parlanti, collocati in luoghi tra loro lontani, che guardano i loro rispettivi orologi e vedono le lancette in posizioni precise *mentre* rispettivamente si realizzano un evento *A* nei pressi del primo parlante e un evento *B* nei pressi del secondo. I nostri parlanti hanno così misurato il tempo dei due eventi; un tempo di eventi nell'immediato intorno di *A* e un tempo di eventi nell'immediato intorno di *B*. Un "tempo *A*" e un "tempo *B*". Solo questo possiamo dire, poiché non possediamo alcuna definizione di un "tempo comune ad *A* e *B*".

In queste condizioni è rischioso ammettere la simultaneità. Ciò che dobbiamo invece fare è *definire il sincronismo degli orologi*. Lo possiamo fare stabilendo che «il "tempo" che la luce impiega nel percorso da *A* a *B* è uguale al "tempo" che essa impiega nel percorso da *B* ad *A*».

Succede allora che la luce parte da *A* a un "tempo *A*" indicato con t_A , giunge in *B* e viene riflesso verso *A* al "tempo *B*" indicato con t_B , arriva infine su *A* al "tempo *A*" indicato con t'_A . I due orologi sono sincronizzati se e solo se è vero che:

$$t_B - t_A = t'_A - t_B$$

Ora abbiamo un sistema di orologi stazionari e sincronizzati. Abbiamo anche una definizione di simultaneità e di tempo: «Il "tempo" di un evento è quello indicato, simultaneamente al prodursi dell'evento stesso, da un orologio stazionario situato nel luogo dell'evento e sincronizzato, per ogni determinazione temporale, con un ben preciso orologio stazionario».

Abbiamo cioè *definito*, per mezzo di esperimenti fisici ideali con raggi di luce e orologi strutturalmente fra loro identici, «il tempo del sistema stazionario», in correlazione con il punto di vista per cui la velocità della luce *c* nel vuoto è una costante universale tale che, conformemente all'esperienza, si abbia:

$$c = 2 AB / (t'_A - t_A)$$

Abbiamo soprattutto definito la quantità "intervallo di tempo", poiché, *nel sistema stazionario*, si postula la costanza di *c*:

$$\text{velocità} = \text{percorso della luce} / \text{intervallo di tempo}$$

Ebbene, che cosa in realtà riusciamo ad asserire circa la simultaneità? Esiste una simultaneità assoluta? Qual è l'ampiezza di un intervallo di tempo? In che senso i nostri ragionamenti ci hanno spinti oltre a ciò che tutti già sapevamo a proposito della buona consuetudine di sincronizzare gli orologi?

Parrebbe invero che Einstein si sia limitato, con una pignoleria non del tutto giustificata, a fissare l'idea che i raggi di luce sono ideali per mettere a posto un numero grandissimo di orologi. E tutta la pignoleria è servita, tutto sommato, per scrivere due formulette che non dicono alcunché di nuovo o interessante.

La situazione tuttavia cambia in modo drammatico non appena ci accorgiamo che la strategia einsteiniana punta a farci vedere che abbiamo bisogno di orologi pignoli per misurare quegli intervalli spaziali che di solito chiamiamo *lunghezze*.

Nessuno ha problemi quando desidera stimare la lunghezza *l* di un'asta collocata, ad esempio, sull'asse *x* di un sistema di coordinate. Se l'asta si muove con una data velocità *v* lungo l'asse *x*, abbiamo facoltà di scegliere come agire. Siamo liberi di muoverci insieme all'asta maneggiando un regolo e compiendo le medesime mosse che di solito compiamo quando l'asta è ferma sotto i nostri occhi. Oppure, possiamo decidere di restarcene fermi. Nel secondo caso dovremo allora accertare, per mezzo dei soliti orologi pignoli, in quali punti si trovano, a un istante dato, le estremità dell'asta, per poi usare il regolo al fine di stimare la distanza fra i due punti.

Problemi? Dovremmo, almeno a prima vista, dire di no. Le due scelte possibili danno il medesimo risultato perché un corpo rigido in moto al tempo *t* è geometricamente rappresentato dal medesimo corpo rigido in quiete. Non stiamo trafficando su un corpo *rigido*?

Proviamo, allora, a essere ancor più pignoli. Mettiamo, in ciascuna estremità *A* e *B* dell'asta mobile lungo l'asse *x*, un orologio sincronizzato nel sistema stazionario. Collochiamo poi, accanto a ciascun orologio, un osservatore solidale con il proprio orologio, e mettiamo in moto il nostro raggio di luce, così che esso si comporti esattamente come prima e faccia un viaggio di andata e ritorno.

Indichiamo con r_{AB} la lunghezza dell'asta mobile *misurata nel sistema stazionario*. Usiamo la solita formula e il postulato sulla costanza di c , e troviamo immediatamente quanto segue:

$$t_B - t_A = r_{AB} / (c - v)$$

$$t'_A - t_B = r_{AB} / (c + v)$$

Accidenti: *gli osservatori che si muovono insieme all'asta si accorgono che i loro orologi non sono sincronizzati, anche se tutti gli osservatori collocati nel sistema stazionario affermano, al contrario, che gli orologi sono sincronizzati.*

5.6 La parola "evento"

Non era pignoleria, dunque, ma rigore e precisione nel ragionare. Abbiamo infatti scoperto, ragionando in modo preciso attorno a faccende che davamo per scontate, un lato sorprendente e controintuitivo e incredibile in seno all'esperienza di tutti i giorni, e paradossale se ne parliamo restando nei dintorni dell'orlo osservativo del linguaggio. Abbiamo scoperto che «al concetto di simultaneità non possiamo attribuire alcun significato *assoluto*, e che eventi giudicati simultanei in un certo sistema di coordinate, in un altro sistema che sia in moto rispetto a esso non sono più da considerare tali». Non solo: abbiamo fatto questa scoperta adoperando un'algebra del tutto usuale, com'è appunto quella di cui ci siamo serviti per scrivere le formule precedenti.

Dobbiamo forse chiarire che cosa diavolo sia un corpo rigido e per quale ragione esso sia *così* importante nelle poche mosse che abbiamo realizzato per demolire la simultaneità assoluta? Forse: ma è poca cosa, ormai. Basti ricordare che abbiamo argomentato attorno a sistemi di riferimento, e che un sistema di riferimento è, per definizione, un insieme di "tre linee materiali rigide". Prendiamo, adesso, due di questi insiemi di oggetti rigidi, in modo che gli assi e le origini coincidano, e indichiamoli rispettivamente con K e k . Mettiamo poi in moto k con una velocità v nel senso delle x crescenti.

Misuriamo spazi nell'uno e nell'altro sistema adoperando regoli solidali con ciascun sistema. Troveremo delle coordinate: x, y, z in K e x', y', z' in k . Troveremo anche delle coordinate "temporali" t e t' utilizzando segnali luminosi e orologi sincronizzati e rispettivamente in quiete in K e k .

Abbiamo tra le mani due quaterne di numeri: x, y, z, t e x', y', z', t' . Ciascuna quaterna determina *completamente* il luogo e il tempo di un evento in K e in k . Chiediamoci quale sia il sistema di equazioni che stabilisce una correlazione fra le due quaterne.

Per rispondere occorre esplicitare qualche caratteristica di base per spazio e tempo. Occorre subito dichiarare che *continuiamo* ad attribuire, a spazio e tempo, quella caratteristica dell'*omogeneità* che ben conosciamo dal Seicento. Di conseguenza abbiamo il compito di scrivere un sistema di equazioni *lineari* e il compito si risolve scrivendo proprio le trasformazioni di Lorentz.

Dal che ricaviamo alcune conclusioni. Torniamo all'istante in cui K e k erano coincidenti. Nell'origine comune si abbia l'emissione di un'onda sferica propagantesi con velocità c . Quando l'onda arriva in un punto x, y, z , allora è vero che:

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2$$

Ebbene, se adoperiamo le trasformazioni di Lorentz, otteniamo che nel punto x', y', z' è vero che:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2$$

Abbiamo *ancora* un'onda sferica che si propaga in k con velocità c . Se invece ragioniamo su un corpo rigido che, osservato in k , ci si presenta come un oggetto sferico di raggio R , la situazione si modifica. Non abbiamo dubbi che, in k , il nostro corpo rigido sia delimitato da una superficie:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = R^2$$

L'equazione della superficie, riscritta in K con le trasformazioni di Lorentz, è però *diversa* dalla precedente:

$$x^2 / \left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)^2 + y^2 + z^2 =$$

$$1/\sqrt{1-v^2/c^2}$$

La dimensione in x è più corta per un fattore γ , e questo fattore cresce al crescere di v . Ne segue che, qualora $v = c$, i corpi rigidi in moto risultano, se osservati nel sistema stazionario K , come figure piane. E ne segue anche che i nostri ragionamenti evaporano nei casi in cui v sia maggiore di c .

Einstein, inoltre, invita a riflettere su una «conseguenza singolare». Abbiamo due orologi sincronizzati e stazionari nel sistema stazionario K . L'uno si trova in un punto A , e l'altro è in B . Spostiamo il primo orologio in modo che si muova da A verso B con una certa velocità v , così che raggiunga B dopo un certo tempo t . Data l'impostazione teorica che stiamo seguendo accade allora che i due orologi in B *non siano più tra loro sincronizzati*: l'orologio che si è spostato esibisce infatti un ritardo pari a $(tv^2/c^2)/2$.

Si dovrebbe ora passare all'elettrodinamica vera e propria, così da mostrare che, data la forma invariante delle equazioni di Maxwell-Hertz per il vuoto, scompare l'asimmetria sull'induzione elettromagnetica da cui Einstein è partito. Ma, data la natura di questo libro, è sufficiente fermarsi alla parte cinematica e alle implicazioni concernenti la simultaneità e, quindi, lo spazio e il tempo.

Fermarsi *qui* è buona cosa. Dobbiamo solo riassumere il senso del viaggio appena compiuto. In fin dei conti, s'è visto che la parola "evento" è analizzabile con rigore solo quando le nostre descrizioni manipolano quaterne del tipo x, y, z, t . Molte conclusioni sono indubbiamente sconcertanti rispetto alle più radicate aspettative suggerite dall'esperienza. Eppure è restata invariata, rispetto alla visione abitudinaria dei fenomeni, l'inclinazione a parlare di eventi che si producono in un luogo x, y, z a un tempo t .

Abbiamo di certo modificato, in senso forte, le nostre concezioni di luogo e di istante. Ma, alla fin fine, ci troviamo ancora fra le mani uno spazio e un tempo. Utilizziamo ancora, tutto sommato, una raffigurazione classica dei fenomeni: pensiamo ancora i fenomeni *come se* esistesse, da una parte, una sezione puramente spaziale del mondo che indichiamo con terne del tipo x, y, z, e , dall'altra, un fluire puramente temporale di ciascuna sezione. E continuiamo a ragionare *così* anche se il gruppo di Lorentz - senza il quale non ragioneremmo in alcun modo - contiene strane dipendenze fra sezioni spaziali e coordinate temporali.

Siamo troppo affascinati da inaspettate conseguenze circa orologi che rallentano o corpi sferici che tendono ad appiattirsi, e non vediamo ancora che, in realtà, le nostre forme private di consapevolezza sono incapaci di afferrare *tutto* ciò che discende dall'impostazione einsteiniana. Un passo per volta. Anche Einstein fece un passo per volta. Fu ad esempio Minkowski, nel 1908, a capire una profondissima implicazione di quella impostazione.

6

Causa e gravità

Nessuno sa meglio di te, saggio Kublai, che non si deve mai confondere la città col discorso che la descrive. Eppure tra l'una e l'altro c'è un rapporto.

I. Calvino, *Le città invisibili*, 1972

6.1

L'equivalenza tra coordinate spaziali e temporali

La presa di posizione einsteiniana sulla simultaneità è la base di una teoria *classica* che porta a una potente generalizzazione o estensione dell'elettrodinamica. La nuova teoria possiede però aspetti che vengono alla luce solo gradualmente. Uno dei più rilevanti riguarda proprio lo stato dei rapporti tra coordinate spaziali e temporali. Supponiamo che sia ormai chiaro che la descrizione di un *evento* concernente un oggetto è determinata dall'assegnazione del *luogo* dell'oggetto e del relativo *istante*, e che l'assegnazione consiste nella scrittura di quattro valori x, y, z, t sotto le condizioni dettate dalle trasformazioni di Lorentz. Non è immediatamente chiaro, ciò nonostante, se esiste davvero una differenza cospicua tra la scrittura (x, y, z, t) e la solita stringa *doppia* di segni che adoperiamo sempre e che è data da (x, y, z) e da (t) .

Restiamo allora, sia pur per poco, nell'ambito della abitudinaria stringa doppia. Essa ci tranquillizza. Ma, come annotò Hermann Minkowski nel 1908, è pur sempre vero che «gli oggetti della nostra percezione invariabilmente includono luoghi e tempi fra loro combinati. Nessuno ha mai avvertito un luogo se non in un certo tempo, o un tempo se non in un certo luogo». È proprio così, *sempre e per tutti*.

Esistono tuttavia ragioni molto precise per ripensare questa faccenda che sembra valida *sempre e per tutti*. Il ripensamento è agevole qualora si parta dalle equazioni della meccanica. Esse possiedono, come scrive Minkowski, una *doppia* invarianza. Non cambiano forma quando introduciamo un mutamento arbitrario di posizione del sistema di riferimento *e* non cambiano forma quando impartiamo al sistema di riferimento un moto uniforme di traslazione. Tutto ciò accade, inoltre, senza che alcun ruolo sia attribuito alle nostre scelte circa "il punto zero del tempo": sotto questo profilo ha senso dire che il tempo è *assoluto*.

A ciascuno dei due mutamenti corrisponde un gruppo specifico di trasformazioni e, per consuetudine, questi due gruppi sono intesi come tra loro distinti e separati. Siamo propensi a capire il primo come rappresentazione di una caratteristica intrinseca dello spazio, e il secondo come rappresentazione dell'impossibilità di decidere, sulla base di fenomeni meccanici, se uno spazio è in quiete o in moto rettilineo uniforme. Perché lasciare che questi due gruppi restino tra loro separati? In fin dei conti dobbiamo trafficare con eventi (x, y, z, t) , anche se siamo abituati a raffigurare i nostri traffici servendoci di (x, y, z) e di (t) .

Qualora, per convenienza, parlassimo di un mondo semplicissimo, dove per determinare un evento è sufficiente determinare (x, t) , potremmo disegnare l'evento su un foglio di carta. L'evento sarebbe un punto. Ora non è semplicissimo disegnare un evento (x, y, z, t) su un foglio di carta o su un altro supporto. Ma non ha alcuna importanza. In fin dei conti non ci siamo messi in testa di disegnare o di dipingere o di scolpire, ma ci siamo messi in testa di approdare a una specificazione *fisica* della questione spaziotemporale.

Possiamo *infatti* pensarci su, e giungere alla conclusione che, se in qualche improbabile modo facessimo il disegno di (x, y, z, t) , ci troveremmo pur sempre di fronte a un punto. Orbene, il mondo fisico è la collezione degli eventi fisici. Allora il nome "universo" sarà dato a questa collezione di punti. Perbacco, e la fisica? Ovvero: e la "materia", e l'"elettricità", e così via? Se camminiamo con Minkowski non troviamo ostico accontentarci di un termine piuttosto generico: "sostanza". Fatto questo, mettiamoci allora a parlare non di un "punto" ma di un "punto sostanziale" che continua tuttavia a essere un (x, y, z, t) .

Immaginiamo ora di cercare questo stesso punto sostanziale in un altro tempo non lontano. Possiamo farlo suggerendo che le coordinate siano variate per piccole quantità dx, dy, dz, dt , e che siamo finiti altrove nel mondo, sia pur di poco. Così facendo non stiamo più guardando un punto. Guardiamo tanti punti che formano una "linea d'universo" e che sono la storia del nostro punto sostanziale.

Il mondo si costituisce dunque in linee siffatte e, scrive Minkowski, possiamo ritenere che *le leggi fisiche siano correlazioni fra tali linee*. Detto questo, torniamo ai due gruppi su ricordati, grazie ai quali le leggi della meccanica possiedono una *doppia* invarianza per mutamento di posizione e per traslazione uniforme.

Il primo gruppo dice soltanto che, pur salvaguardando l'invarianza delle leggi di Newton, siamo liberi di ruotare gli assi x, y, z attorno all'origine, mentre il secondo specifica che cosa deve accadere per traslazioni uniformi del sistema di riferimento. Abbiamo sempre creduto che i due gruppi fossero tra loro eterogenei. Eppure, grazie alla matematica, siamo in grado di riunificarli in un solo gruppo di trasformazioni che lascia inalterate "le leggi di natura".

Facendo leva su tale gruppo scopriamo che, in ciò che chiamiamo "mondo", non esiste più ciò che avevamo

imparato a chiamare "spazio". Esistono invece infiniti spazi *che vanno bene* per far fisica, così come, in geometria, si hanno infiniti piani in un normale spazio a tre dimensioni. Che cosa è successo?

È successo che abbiamo scoperto una conseguenza non intenzionale - non legata ad aspettative o credenze di vario genere - della teoria einsteiniana. Abbiamo cioè scoperto che, quando affermiamo a ragion veduta l'impossibilità di velocità superiori a c , affermiamo *anche* qualcosa a proposito di una espressione del tipo:

$$c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

Un'espressione, cioè, che lega fra loro gli incrementi dx, dy, dz, dt e il valore di c : li lega nel senso che stabilisce una basilare equivalenza tra coordinate spaziali (x, y, z) e temporali (t) . Comprendiamo allora come mai Minkowski, sin dalle prime righe del suo saggio del 1908, avesse assunto un atteggiamento drastico:

I punti di vista su spazio e tempo che intendo esporvi sono gemmati dal terreno della fisica sperimentale e in esso giace la loro forza. Sono punti di vista radicali. Pertanto lo spazio in sé e il tempo in sé sono destinati a svanire come pure ombre, poiché solo un genere di unione tra i due conserverà una realtà indipendente.

6.2

L'invarianza dell'intervallo

Non è subito chiaro che cosa tutto ciò significhi. Ci aiuta a far chiarezza, almeno in parte, la presa di posizione che a suo tempo fu manifestata da Faraday. Ricorderete infatti che Faraday aveva esplicitamente difeso la necessità di sottoporre a misura la velocità di propagazione delle interazioni, e che la sua difesa era fondata sulla critica dell'azione *istantanea* a distanza. È impressionante che Faraday fosse riuscito a pensare in questo modo sulla base di ciò che conosceva. È ancor più impressionante, tuttavia, la circostanza che egli non potesse dire se non ciò che disse. Egli, infatti, non aveva scelta, poiché aveva imboccato la via di una descrizione a campo che, come spesso si narra, privilegiava le azioni per contatto e *doveva* quindi respingere quelle a distanza. Ma l'aspetto veramente centrale della questione non stava nell'azione per contatto o nell'azione a distanza, ma nella velocità di propagazione dell'azione. E qui la ragione s'arrestava. S'arrestava perché, come Faraday aveva *comunque capito*, s'entrava su quel terreno dell'inerzia e della gravitazione che avrebbe sconfitto anche Maxwell e che restava assente anche nella teoria della relatività ristretta.

La crescita delle conoscenze dovuta a Einstein e Minkowski mette ora in evidenza altri aspetti di *quel* problema. In modo particolare, dopo la scoperta circa l'equivalenza tra le coordinate spaziali e temporali, l'attenzione cade sulle insolite proprietà d'una espressione talmente semplice da essere fondata su quel vecchio teorema di Pitagora che, già nelle scuole elementari e medie, ci dà informazioni sulla nozione antichissima di *intervallo*. Ed ecco come.

Meditiamo su due eventi che si realizzano in un sistema di riferimento che chiameremo, con un gran lavoro di fantasia creatrice, K . Primo evento: un segnale parte da x_1, y_1, z_1 , al tempo t_1 e si propaga con velocità c . Secondo evento: il segnale giunge in x_2, y_2, z_2 al tempo t_2 . Per esprimere il cammino percorso dal segnale siamo in grado di scrivere, ovviamente, che esso è dato da:

$$c(t_2 - t_1)$$

Possiamo anche scrivere, però, che il cammino è dato da:

$$[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]^{1/2}$$

È ovvio che queste due espressioni rappresentano il medesimo cammino percorso dal segnale in K . Ovvero:

$$(x_2 - x_1)^2 + \dots - c^2(t_2 - t_1)^2 = 0$$

La stessa situazione si verifica in un K' , dove supporteremo di scrivere le stesse cose cambiando x in x' e così via. Abbiamo in tal modo ricavato una conseguenza profondissima. Definiamo il significato della parola "intervallo" affermando che l'intervallo s_{12} tra due eventi è:

$$s_{12} = [c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - \dots]^{1/2}$$

Ebbene, avendo ammesso che c è una costante, impariamo subito che se l'intervallo fra due eventi è nullo in un sistema di riferimento K , allora è altresì nullo in ogni altro sistema K' : e ciò accade precisamente a causa della costanza di c .

In generale, dunque, arriviamo a una conclusione molto forte. Arriviamo cioè ad afferrare il punto di vista per

cui, *in generale*, il postulato fisico su c ammette una traduzione in linguaggio matematico che asserisce l'*invarianza dell'intervallo* nel gruppo di trasformazioni cui ci stiamo abituando.

Scriviamo allora che:

$$ds^2 = ds'^2$$

e che:

$$s^2 = s'^2$$

Stiamo lavorando su descrizioni del genere quadridimensionale ed è opportuno rapportarle costantemente a ciò che facciamo quando effettuiamo un'osservazione utilizzando regoli e orologi. Se avessimo già studiato lo splendido manuale di teoria dei campi scritto da Landau e Lifchitz faremmo come segue. Qualcuno chiede se, dato il solito K , esiste un K' in cui due eventi coincidono nello spazio. Semplifichiamo la notazione sin qui usata:

$$t_2 - t_1 = t_{12}$$

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 = l_{12}^2$$

L'intervallo in K e in K' diventa:

$$s_{12}^2 = c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2$$

$$s'^2_{12} = c^2 t'^2_{12} - l'^2_{12}$$

Ma l'intervallo è invariante. Quindi:

$$c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2 = c^2 t'^2_{12} - l'^2_{12}$$

Chiedere che in K' i due eventi si producano nello stesso luogo è come imporre che in K' si abbia $l'_{12} = 0$. Si vede subito che:

$$s^2_{12} = c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2 = c^2 t'^2_{12} > 0$$

La posizione $s^2_{12} > 0$ comporta che l'intervallo tra due eventi sia *reale*. Questo modo dell'intervallo è battezzabile affermando che esso riguarda intervalli reali di *genere tempo*. Esistono, dunque, intervalli di *genere tempo*. Se gli eventi presi in esame sono relativi a un medesimo corpo, allora gli intervalli sono proprio di questo genere. Il cammino percorso dal corpo non può essere maggiore di quello che avrebbe percorso la luce, ct_{12} , e il tempo trascorso fra due eventi in K' è dato da:

Cerchiamo a questo punto di verificare se esiste un sistema K' in cui due eventi siano *simultanei*.

$$t'_{12} = (1/c) \cdot \sqrt{c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2} = s_{12}$$

Prendiamo nuovamente lo spunto dall'invarianza degli intervalli:

$$c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2 = c^2 t'^2_{12} - l'^2_{12}$$

imponiamo la condizione di simultaneità in K' :

$$t'_{12} = 0$$

e otteniamo che:

$$s^2_{12} = -l'^2_{12} < 0$$

La condizione di simultaneità in K' comporta che l'intervallo s_{12} sia non reale, ma immaginario. Questi intervalli immaginari sono detti di *genere spazio* e la distanza fra i luoghi dove gli eventi si producono è data da:

Leggiamo il commento di Landau e Lifchitz:

$$l'_{12} = \sqrt{l_{12}^2 - c^2 t_{12}^2} = i \cdot l$$

La classificazione in intervalli di genere tempo e spazio è, a causa della loro invarianza, una nozione assoluta. Ciò significa che la proprietà d'un intervallo d'essere di genere tempo o spazio è indipendente dal sistema di riferimento.

A queste precise condizioni riusciamo a ristabilire l'uso di termini come "prima" e "dopo", "futuro" e "passato", e a vedere come tale uso sia correlato a condizioni di causalità ben formulate nel continuo quadridimensionale.

6.3 Le condizioni di causalità

Ancora una volta si ricorra al trucco di pensare in x, y, z, t mediante una raffigurazione ipersemplicata in x, t . E ancora seguiamo Landau e Lifchitz. Collochiamo un evento O nell'origine di un sistema di riferimento. O è un punto d'universo alla Minkowski, con coordinate (O, O) (FIG. 3).

Abbiamo il compito di cogliere le relazioni tra O e altri eventi. Intendiamo ad esempio raffigurare il moto

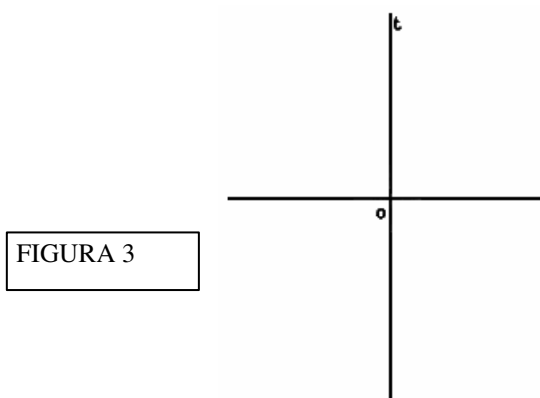


FIGURA 3

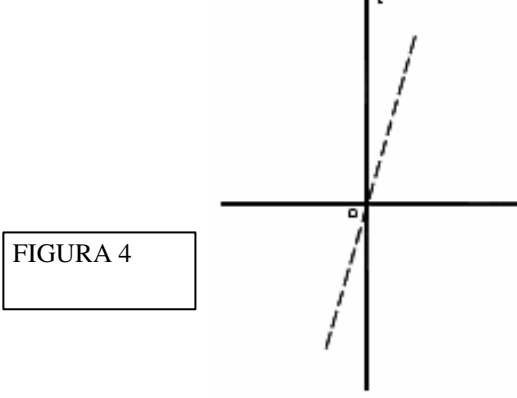
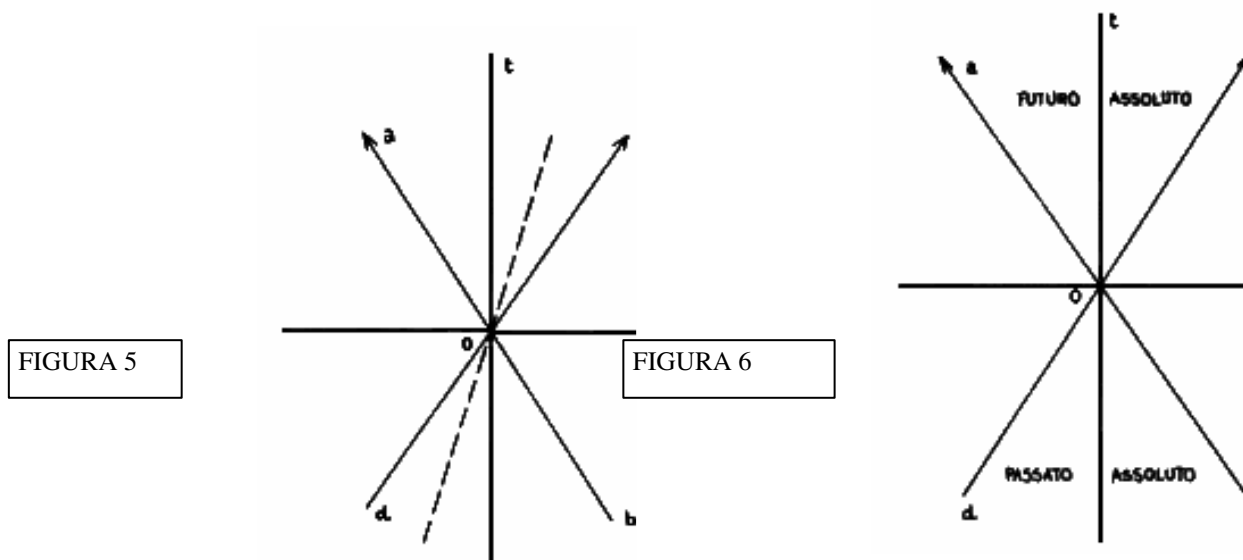


FIGURA 4

rettilineo uniforme di un corpo che passa per O con una velocità inferiore a c e che, come sempre succede nelle parti più elementari della fisica del moto, coinvolge l'angolo fra l'asse t e la linea retta che rappresenta il moto in questione (FIG. 4).

Per chiarirci le idee è utile disegnare anche due rette che rappresentano il moto di *due* segnali luminosi che passano per O e che viaggiano lungo direzioni opposte. Dato il postulato su c , l'angolo tra ciascuna di queste rette e l'asse t è l'angolo limite di tutti gli angoli possibili per tutti i moti ammessi (FIG. 5).

Il disegno, in questa fase della sua costruzione, ci permette di vedere che i moti possibili sono costretti a restare



all'interno delle zone aOc e dOb , e che, lungo ab e cd , abbiamo sempre $x = \pm ct$. (Ci si può immaginare di introdurre nei disegni altre coordinate spaziali oltre a x . In tal caso le zone di cui si sta discutendo sono pensabili come coni: coni di luce). Ebbene, tutti i punti interni alla regione aOc sono tali da soddisfare la condizione:

$$c^2t^2 - x^2 > 0$$

Ma tutto questo equivale a sostenere, in base a quanto s'è detto poc'anzi, che gli intervalli tra O e gli eventi ammessi sono sempre di genere tempo, e che in aOc si ha sempre $t > O$. Nel linguaggio comune tale circostanza si esprime affermando appunto che, in aOc , tutti gli eventi si producono "dopo" O . Siamo addirittura autorizzati a dire che, *rispetto a O* , la zona aOc è la zona del "futuro assoluto", e che, grazie a ragionamenti della stessa natura, la zona dOb è quella del "passato assoluto" (FIG. 6).

Passiamo ora a eventi collocati nelle regioni dOa e cOb . Qui le cose cambiano: gli intervalli tra questi eventi e l'evento O sono, infatti, di genere spazio, non di genere tempo. La complicazione che immediatamente si crea sotto i nostri occhi è provocata dal fatto che, dati l'evento O e un altro evento in una di tali regioni, siamo sempre in grado di individuare un sistema di riferimento in cui i nostri due eventi sono simultanei, così come siamo sempre in grado di trovare altri sistemi di riferimento in cui la simultaneità cade e un evento si realizza "prima" o "dopo" l'altro.

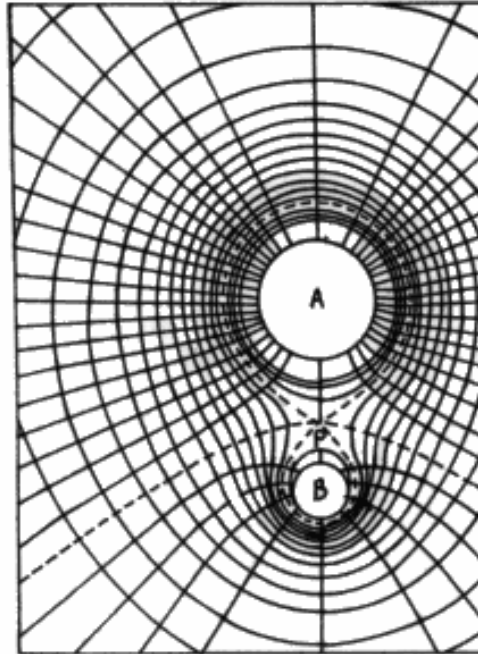
E così ci accorgiamo della verità di un argomento che, qualora venisse enunciato nei pressi dell'orlo osservativo del linguaggio, sarebbe fonte di una sterminata folla di problemi apparentemente profondi.

Voglio dire che ci accorgiamo di come gli eventi per i quali l'intervallo è di genere spazio non ammettano una determinazione in funzione di passato e futuro "assoluti": non possiamo allora dire che un evento realizzatosi *prima* di un altro è da intendere come *causa* dell'altro. Solo all'interno dei coni di luce, e come conseguenza dell'impossibilità di interazioni propagantisi con velocità maggiori di c , si danno intervalli di genere tempo.

Solo nei coni, quindi, si producono eventi tali che l'uno sia causa e l'altro sia effetto: ovvero, solo nei coni siamo legittimati a usare sensatamente termini quali "prima" e "dopo".

Riassumiamo. Nell'ambito della fisica di Galilei e di Newton si verifica un insieme di mutamenti nelle descrizioni spaziotemporali. Trattasi, come s'è visto, di mutamenti cospicui, e che non sono tuttavia comprensibili facendo solo riferimento alle enigmatiche e ambigue tesi newtoniane su spazi e tempi relativi e assoluti espone nei *Principia*. L'intervento di Faraday e Maxwell complica ulteriormente le cose: la teoria della luce e dell'elettromagnetismo è un capolavoro, ma resta in una collocazione anomala rispetto alla teoria dell'interazione gravitazionale in quanto presuppone forme di propagazione dell'interazione stessa che non sono istantanee e che,

FIGURA 7



«Si può assumere questo diagramma - scriveva Maxwell - anche per rappresentare le linee di forza e le superfici equipotenziali appartenenti a due sfere di materia soggetta a gravitazione, le cui masse stiano nel rapporto di 4 a 1».

Linee di forza e superfici equipotenziali. $A = 20$; $B = 5$; P , punto di equilibrio; $AP = 2/3 AB$.

pertanto, differiscono *troppo* da quelle comunemente ammesse per l'interazione gravitazionale. Maxwell è al corrente della differenza. Anche se, nel *Trattato*, ribadisce l'analogia tra le linee di forza del campo elettromagnetico e le linee di forza del campo gravitazionale, come risulta da disegni come quello di FIG. 7 in cui l'analogia è enunciata in modo esplicito.

6.4

La gravitazione come anomalia

Ma la differenza resiste agli sforzi teorici. Anzi, acquista progressivamente un contenuto inquietante perché, malgrado certi tentativi maxwelliani, le leggi del campo elettromagnetico non sono invarianti per quelle trasformazioni che lasciano invece invariate le leggi della meccanica. Al fine di ottenere l'invarianza s'ha bisogno di altre trasformazioni che, a loro volta, incidono sulla cinematica e sulla nozione di simultaneità.

Ne segue, alla Minkowski, l'evaporazione dei referenti che per secoli s'è creduto di poter indicare con i nomi "spazio" e "tempo". Ne segue, anche e soprattutto, l'evaporazione di quelle credenze grazie alle quali si sono compiuti grandi tentativi aventi lo scopo di capire, in termini di linguaggio comune, proprio lo spaziotempo della gravitazione newtoniana: Faraday aveva ragione quando sosteneva che Newton era assai meno newtoniano dei suoi seguaci settecenteschi e ottocenteschi, che era fondamentale riflettere sulla non istantaneità della propagazione della gravità e che doveva esistere una via unificatrice percorrendo la quale sarebbe apparsa la correlazione fra campo e inerzia.

La soluzione di Einstein e Minkowski sfocia nella traduzione dei nostri discorsi su (x, y, z) e (t) in un linguaggio astratto dove si analizza un *continuum* del tipo (x, y, z, t) . L'analisi si regge sull'assioma sulla costanza di c , che ribadisce la non istantaneità della propagazione delle interazioni e che dà senso all'uso sia delle condizioni di causalità, sia all'uso di parole del genere "prima", "ora" e "dopo".

Dobbiamo tuttavia fare moltissima attenzione al fatto che l'assioma su c non è enunciato per *sistemi qualsiasi di riferimento*, ma solo per sistemi inerziali. In tale campo di validità sappiamo scrivere le equazioni di Maxwell e le equazioni di Newton in modo invariante rispetto al gruppo delle trasformazioni individuato da Poincaré. Un enorme passo in avanti. Ci allontaniamo decisamente dall'orlo osservativo del linguaggio. *Ma che cosa precisamente abbiamo fatto per quanto riguarda le leggi di natura sul moto, visto che, in esse, dobbiamo pur sempre parlare con un linguaggio in cui diciamo che la propagazione dell'interazione gravitazionale è istantanea?*

Domanda più che naturale. Abbiamo infatti costruito un *continuum* spaziotemporale dove regna l'equivalenza tra coordinate spaziali e temporali, abbiamo immerso nel suo raffinato edificio formale il punto di vista maxwelliano sul campo e ci rendiamo subito conto che questo balzo verso l'astrazione non è sufficiente per capire che cosa diavolo sia la gravità.

Fine del riassunto: abbiamo fra le mani la teoria della relatività ristretta. Essa descrive ottimamente l'interconnessione tra ciò che credevamo fosse lo spazio e ciò che credevamo fosse il tempo. Descrive, anche, le modalità d'esistenza della materia in un *continuum* alla Minkowski. Un *continuum* che, lasciando a parte i necessari algoritmi, non è poi stravagante come taluni credono: tutti, anche gli antichi, hanno sempre adoperato quattro numeri per determinare un evento, pur non sapendo che il *continuum* aveva proprietà oggettive piuttosto insolite.

Di tali proprietà insolite nessuno si era mai accorto solo perché nessuno era costretto a spiegare fenomeni che coinvolgevano velocità molto elevate rispetto a quelle che si osservano tutti i giorni: le trasformate di Lorentz non sono obbligatorie per scambiarsi informazioni sulle mele o sui pianeti. *C'è tuttavia qualcosa che questa splendida teoria non riesce assolutamente a fare: non riesce a prendere in considerazione il rapporto fra la geometria dello spaziotempo e la distribuzione della materia in movimento. Non ci può riuscire, infatti, poiché la geometria dello spaziotempo alla Minkowski non dipende dalla distribuzione e dal moto della materia.*

Il viaggio che abbiamo intrapreso per individuare i pregiudizi e le nozioni prescientifiche che ostacolano la comprensione di che cosa siano lo spazio e il tempo è stato indubbiamente lungo: dalla contemplazione delle clessidre allo spaziotempo di Minkowski. Nel viaggio siamo stati obbligati a modificare molti punti di vista consolidati e a porre nel dimenticatoio, sia pure implicitamente, moltissimi travagli filosofici.

Ma siamo solo all'inizio, in realtà, perché il *continuum* di Minkowski è splendido ma vale solo a certe condizioni. Condizioni strettissime: se non tiene conto della gravitazione, allora è valido soltanto *localmente*, e cioè là dove possiamo trascurare gli effetti gravitazionali. Potremmo addirittura dire che il *continuum* alla Minkowski assomiglia troppo allo spazio assoluto dei newtoniani ortodossi. Gli assomiglia perché è immune rispetto ai fenomeni fisici di tipo gravitazionale e non subisce alterazioni causate dalla materia in moto.

Strano? No. Non è forse vero che il continuo quadridimensionale della relatività ristretta è *piatto e resta piatto* qualunque cosa succeda nel vasto mondo? Per convincersene è sufficiente rivedere le figurine di questo capitolo e pensarci sopra. Quando infatti volessimo disegnare in esse il percorso di una particella (o di un orologio), dovremmo disegnare una linea d'universo sotto certe condizioni. Perbacco, nulla veramente accade *nella* geometria dello spaziotempo quadridimensionale mentre nell'universo accadono varie cose: quella geometria resta impassibile, così come impassibile restava, nello svolgersi dei fenomeni, quella dello spazio tridimensionale.

7

Dove scompare il divenire

Dunque: c'è una finestra che s'affaccia sul mondo. Di là c'è il mondo; e di qua? Sempre il mondo: cos'altro volete che ci sia? [...] Dato che c'è mondo di qua e mondo di là della finestra, forse l'io non è altro che la finestra attraverso la quale il mondo guarda il mondo. Per guardare se stesso il mondo ha bisogno degli occhi (e degli occhiali) del signor Palomar.

I. Calvino, *Palomar*, 1983

7.1

Quando le sfere rotolano sulla nave di Galilei

Abbiamo dunque gettato le ancore in un *continuum piatto* a quattro dimensioni. Qui, le leggi di natura sono indipendenti dallo stato di moto degli osservatori inerziali e l'intera architettura metrica è indipendente dalla distribuzione e dal moto della materia. Possediamo tuttavia un'informazione precisa e poco allegra: l'invarianza delle leggi di natura, così come si esprime nella teoria della relatività ristretta, è garantita dalla velocità finita di propagazione della luce, ma la sola teoria esistente sull'interazione gravitazionale implica che quest'ultima si propaghi con velocità infinita.

Dobbiamo ammetterlo: la teoria newtoniana della gravitazione non è consistente con la teoria della relatività ristretta. Una inconsistenza enorme. Tutti sanno, infatti, che su larga scala abbiamo a che fare con masse grandissime, e che, su tale scala, l'interazione gravitazionale è quella che stabilisce le regole del gioco. Possediamo però una traccia, un'indicazione di massima. Una sorta di principio euristico che *forse* è il filo d'Arianna seguendo il quale saremo nelle condizioni di penetrare in zone ancora più astratte del linguaggio.

Talmente astratte da fornire le ragioni per cui, ad esempio, le pietre cadono al suolo. Soffermiamoci un attimo su questo fenomeno. Esso è noto da secoli e secoli. Non solo è noto. Ha anche trovato, con Galilei, una descrizione affidabile. In tutte le scuole, infatti, sin da bambini impariamo che esiste una legge galileiana sulla caduta dei gravi in moto naturalmente accelerato. Impariamo che la caduta dell'elefante e della piuma nel vuoto avvengono *così e così*. Siamo inoltre rassicurati dal fatto che quella legge galileiana ha una base empirica d'impressionante estensione. Si tratta, probabilmente, della legge di natura più confermata dall'esperienza.

Eppure, non tutto va bene. Rinserriamoci di nuovo nella nave galileiana e mettiamoci a lavorare per predisporre quei semplici esperimenti di meccanica grazie ai quali, come mostra il *Dialogo*, otteniamo due risultati graditi. Il primo: vanificare l'interpretazione abitudinaria di tutte le osservazioni che negano il moto della Terra. Il secondo: dimostrare che nessun esperimento in meccanica ci pone nelle condizioni di decidere se siamo in quiete o in moto rettilineo non accelerato.

Immaginiamo adesso di aver l'intenzione di fare un'osservazione per effettuare la quale ci occorrono sfere materiali. Appoggiamo allora, sul tavolato della cabina che abbiamo adottato come laboratorio, alcune sfere di legno, di pietra e di ferro, e mettiamoci a discutere con alcuni interlocutori al fine di precisare che cosa abbiamo in animo di fare. A un certo punto succede che le sfere si mettono in moto e si spostano lungo una certa direzione sull'assito del pavimento.

Uno dei nostri interlocutori nota che la circostanza è rilevante: le sfere erano *libere* sul pavimento e, senza che qualcuno le abbia spinte, si stanno ora spostando *così e così*. Perché? Un bel problema. Dovremmo infatti spiegare quel moto osservabile facendolo dipendere da una causa, ossia da una forza alla cui azione attribuire l'accelerazione di cui vediamo l'effetto.

Quante risposte siamo in grado di fornire? Due, direi. Potremmo *subito* sostenere che la nave con cui siamo solidali ha subito una accelerazione o una decelerazione: mentre la velocità della nave subisce una variazione, le sfere materiali si comportano come detta il principio di inerzia. Tutto a posto?

Non è detto. Supponiamo, infatti, che il nostro interlocutore sia di spirito tagliente come un rasoio e abbia una certa cattiva inclinazione a mettere in dubbio le nostre idee galileiane. In tal caso egli potrebbe impunemente avanzare una congettura che, pur essendo difficile da sostenere, creerebbe una situazione imbarazzante. Egli potrebbe ad esempio suggerire una risposta diversa dalla nostra e sfidarci a demolirla sulla base delle osservazioni. Potrebbe sostenere che l'accelerazione subita dalle sfere è l'effetto di una causa precisa: una causa identificabile con la comparsa, nei pressi della nave, di una massa sufficientemente grande da attirare le sfere che erano, prima, libere sul tavolato, e che ora, invece, sentono la nuova fonte di gravità.

Certo: è una congettura squisitamente *ad hoc*. Eppure essa spiega lo spostamento delle sfere. Siamo capaci di mostrare che si tratta di una falsa spiegazione? Non saremmo molto convincenti qualora dichiarassimo che *ci siamo*

accorti della variazione di velocità della nave. Il nostro interlocutore, infatti, avrebbe tutte le ragioni del mondo qualora facesse spallucce e replicasse che *ci siamo accorti* di qualcosa in quanto *ci siamo accorti* che le sfere si mettevano in moto.

L'anomalia della situazione venutasi a creare sta nella oggettiva difficoltà in cui ci dibattiamo quando diventiamo consapevoli di non poter scegliere *bene* tra le due spiegazioni possibili di uno stesso fenomeno. Comprendiamo, in tal modo, che un conto è ragionare con sistemi di riferimento galileiani, e un altro conto è, invece, affrontare questioni che coinvolgono sistemi di riferimento con accelerazione non nulla. Non è leale mettere a tacere il nostro animoso interlocutore dichiarando che la sua ipotesi non è conforme ai fatti osservabili. Egli, nella sostanza, è stato leale con noi, poiché ha accettato esattamente la clausola centrale delle nostre dimostrazioni. La clausola secondo cui ogni punto di vista sullo stato "reale" di moto della nave deve essere ricavato da esperimenti realizzati nell'ambiente chiuso del laboratorio. Non dobbiamo guardare da un oblò per controllare se la nave è in quiete o in moto rettilineo uniforme rispetto alla costa. E, di conseguenza, non dobbiamo neppure guardare da un oblò per controllare se, nei pressi della nave, è apparsa una massa che prima non c'era.

I fenomeni gravitazionali, insomma, sono gelidi. Non basta, per spiegarli, dire che c'è la gravità. E Galilei era al corrente di tale insufficienza, ed era anche al corrente di non sapere che cosa si dovesse fare per superarla.

Sfogliamo di nuovo il vecchio *Dialogo* galileiano. Nella seconda giornata si pone la questione della causa di un gruppo di fenomeni osservabili: i moti dei gravi che cadono e i moti della Terra e dei pianeti. La risposta tradizionale sostiene che la "gravità" è la causa di quell'effetto che vediamo nel cadere dei gravi. Ma, come si insinua da parte galileiana, *una conoscenza di che cosa effettivamente faccia cadere i gravi verso la superficie della Terra non sarà tale da farci capire anche il moto della Terra nello spazio?* E siamo poi certi di *capire* che cosa diciamo quando affermiamo che la "gravità" è la causa?

Leggiamo meglio. Circa questa *causa*:

ciaschedun sa ch'ella si chiama gravità. Ma io non vi domando del nome, ma dell'essenza della cosa: della quale essenza voi non sapete punto più di quello che voi sappiate dell'essenza del movente le stelle in giro, eccettuatone il nome, che a questa è stato posto e fatto familiare e domestico per la frequente esperienza che mille volte al giorno ne veggiamo; ma non è che realmente noi intendiamo di più, che principio o che virtù sia quella che muove la pietra in giù, di quel che noi sappiamo chi la muova in sù, separata dal proiciente, o chi muova la Luna in giro, eccettoché (come ho detto), il nome, che più singolare e proprio gli abbiamo assegnato di *gravità*.

Un ottimo problema, come si vede, e che non è certo nato in conseguenza del nostro peregrinare dall'esperienza usuale dei sassi che cadono sino allo spaziotempo *piatto* di Minkowski. Tanto più che la galileiana conversazione sulla gravità che è stata or ora riferita è il seguito di un'altra che, sempre nella giornata seconda del *Dialogo*, tenta d'esplorare i fondamenti stessi della nozione di movimento.

È assodato, per Galilei, il difficilissimo punto per cui «il moto il quale sia comune a molti mobili, è ozioso e come nullo in quanto alla relazione di essi mobili tra di loro, perché tra di essi niente si muta, e solamente è operativo nella relazione che hanno essi mobili con altri che manchino di quel moto».

Succede allora che ci s'imbatta in un ragionamento curioso. Ciò che davvero conta, circa il moto della Terra, è «nella relazione che cade fra i corpi celesti e la Terra, la qual sola relazione è quella che conta». Ne segue che, al fine di ottenere «il medesimo effetto», «tanto fa se la sola Terra si muova, cessando tutto il resto dell'universo, che se, restando ferma la Terra sola, tutto il resto dell'universo si muove di un istesso moto».

7.2

La covarianza

Non interessa, *qui*, che l'intero ragionamento sul «medesimo effetto» sia, nel *Dialogo*, spostato verso la conclusione che la natura opera con criteri di economia, e che, pertanto, essa ha scelto di muover la Terra piuttosto che spostare «un numero immenso di corpi vastissimi, e con una velocità inestimabile». L'interesse, per noi che leggiamo *oggi* il *Dialogo*, sorge perché scopriamo, in questi argomenti, un contenuto oggettivo: il medesimo che, attraverso traduzioni sempre più raffinate, riappare nei *Principia* newtoniani, nel principio di Mach e, infine, nelle prime pagine della monografia einsteiniana del 1916 sulla teoria della gravitazione. Un forte interesse, dovuto al fatto che la soluzione einsteiniana del problema di Galilei, di Newton e di Mach ci obbliga a rivedere molti risultati acquisiti in relatività ristretta a proposito di spazio e di tempo.

Einstein sottolinea, nella monografia del 1916, che la relatività ristretta ha tratto vantaggi dalla scoperta di Minkowski sull'equivalenza tra le coordinate spaziali e quella temporale. Precisa che la differenza tra la teoria della relatività ristretta e la meccanica classica non è dovuta al postulato di relatività ma a quello sulla costanza di *c*. Mette in evidenza come la nuova teoria abbia introdotto modificazioni ampie circa spazio e tempo. Ma, in particolare, rileva che la nuova teoria è, per l'appunto, caratterizzabile come *ristretta*. È ristretta in quanto analizza sistemi di riferimento

galileiani e non si estende a sistemi di riferimento animati da moto non uniforme.

Nella teoria ristretta la distanza fra due punti di un corpo rigido fisso assume un valore indipendente dal luogo, dall'orientamento e dal tempo. Ciò implica una interpretazione fisica dello spazio e del tempo da classificare come "semplice". La teoria della relatività generale, vista come «la massima generalizzazione immaginabile» della teoria della relatività, dovrà abbandonare questa semplicità.

Un primo passo verso la generalizzazione massima si esegue non appena ci si rende conto che i privilegi accordati agli spazi galileiani sono puramente fittizi. E ce ne accorgiamo subito: è infatti sufficiente esigere che si abbia effettiva aderenza tra la legge di causalità e il mondo dell'esperienza *in ogni circostanza*, così che *sempre* si sia in grado di determinare, come cause ed effetti, fatti osservabili.

Prendiamo allora in esame due sistemi fisici (due masse molto lontane tra di loro e da ogni altra massa esistente) che stanno liberamente volteggiando nello spazio e che siano tra di loro connessi da un moto relativo: una massa, rispetto a un osservatore solidale con l'altra, ruota con una data velocità angolare attorno alla retta che la congiunge con la seconda. I due sistemi esibiscono notevoli differenze. Ad esempio, dopo misure fatte con regoli fissi rispetto a ciascuna massa, veniamo a sapere che la prima è delimitata da una superficie sferica e che la seconda è invece delimitata da un ellissoide di rotazione.

Come mai c'è questa differenza? Non siamo in grado di fornire una spiegazione in termini di spazi galileiani. E ciò vuol dire che quando i sistemi sotto osservazione si comportano in modi tra loro difformi, non *sempre* riusciamo a far valere la causalità con il solo appello a spazi privilegiati di tipo galileiano, nel senso che questi ultimi operano, nelle spiegazioni sulla difformità osservata, non come fatti osservabili, ma, appunto, come cause fittizie. E ciò accade sia in meccanica classica, sia in teoria della relatività ristretta.

Il passo in questione, però, ci fa *soltanto* cogliere un "innato difetto epistemologico" che è comune a entrambe le teorie e che fu precisato, "forse per la prima volta", da Mach nella meccanica classica. In seno alle teorie esistenti, scrive Einstein, non è disponibile alcuna ragione che sia "epistemologicamente soddisfacente" e che porti a una spiegazione delle difformità di comportamento su citate.

Siamo allora obbligati a cercare una ragione precisa, ovvero una risposta ai quesiti emergenti attorno al "difetto epistemologico". Una risposta soddisfacente deve essere conforme a vincoli. E, non certo a caso, Einstein così commenta in una brevissima nota: «Ovviamente una risposta può essere soddisfacente dal punto di vista epistemologico, e tuttavia falsa dal punto di vista *fisico*, se è in contraddizione con altre esperienze».

Dovendo *comunque* ridurre al silenzio il difetto epistemologico, abbiamo i mezzi per farlo: riconoscerne il peso come dovuto ai privilegi accordati agli spazi galileiani, e annullarne la portata estendendo la richiesta d'invarianza a tutti gli spazi possibili:

Di tutti gli spazi immaginabili [...], comunque in moto relativo gli uni rispetto agli altri, non ve ne è alcuno che si possa considerare come privilegiato a priori senza far risorgere l'obiezione epistemologica sopra citata. *Le leggi della fisica debbono essere di natura tale che le si possa applicare a sistemi di riferimento comunque in moto.*

Accanto a questa presa di posizione, che Einstein definisce «di notevole peso per la teoria della conoscenza», è tuttavia collocato un *fatto fisico*. Esso è "ben noto" *nel senso* che è pensabile in ambito di relatività ristretta.

Abbiamo un sistema di riferimento galileiano K rispetto al quale una massa, situata a grande distanza da ogni altra massa, esegue un moto rettilineo uniforme. Abbiamo poi un K' che, rispetto a K , effettua un moto di traslazione uniformemente accelerato. Rispetto a K' esaminiamo una massa, molto lontana da ogni altra, che esegue un moto caratterizzato da una accelerazione e da una direzione che non dipendono dalla "natura materiale" e dallo "stato fisico" della massa in questione.

Non è difficile pensare una situazione di questo tipo: ci sentiamo assai simili all'osservatore in K' che vede cadere sassi e sfere di legno e prende atto di fenomeni in cui l'accelerazione è una costante che non dipende dalla natura materiale e dallo stato fisico degli oggetti sotto osservazione. *La situazione è diversa solo se, in quanto osservatori in K' tentiamo di sapere se ci troviamo in un sistema "realmente" accelerato.*

Non possiamo saperlo perché abbiamo un'ottima alternativa. Essa consiste nel dire che ci troviamo in un K' non "realmente" accelerato, e che attorno a noi *esiste* invece un campo gravitazionale grazie al quale i sassi e le sfere di legno si muovono *così e così*. L'alternativa è ottima nel senso letterale del termine: non è forse vero che l'esperienza ci insegna come si muovono le masse nel campo gravitazionale? Già. Proprio così facciamo noi sulla Terra. Adesso, però, abbiamo un'informazione in più a proposito di K' , poiché abbiamo capito che, osservando le masse liberamente mobili, non possiamo dedurre che K' sia accelerato, e possiamo invece descrivere il comportamento delle stesse masse dichiarando che K' è in un campo gravitazionale.

E allora? E allora la ragione ci impone i suoi diritti. Se siamo arrivati sino a questo punto, allora dobbiamo anche arrivare al punto successivo, e cioè dichiarare che K e K' sono entrambi degni d'essere impiegati allo scopo di descrivere i fenomeni fisici. Il che vuol dire che un cambiamento di sistema di riferimento equivale a "produrre" un campo gravitazionale (per strano che possa sembrare, non era completamente fuori strada l'immaginario interlocutore che suggeriva a Galilei una ipotesi *ad hoc* al fine di spiegare l'improvvisa osservabilità di accelerazioni in masse più o meno liberamente mobili).

Dovremmo allora dichiarare che l'intera fisica, così come l'abbiamo studiata in meccanica classica e in teoria della relatività ristretta, non penetra nell'enigma della gravitazione, anche se sappiamo benissimo come si comportano i gravi nel campo gravitazionale terrestre e i pianeti o le comete nel campo gravitazionale della stella Sole.

Un'ammissione scomoda, certo. Ma non è immediatamente chiaro il motivo per cui ne stiamo discutendo, visto che il nostro obiettivo è quello di costruirci un buon punto di vista sullo spaziotempo, e la teoria di Einstein e Minkowski lo ha già risolto.

Sì, lo ha però risolto basandosi su un postulato classico di relatività e su un postulato non classico sulla costanza di c . Ora ci troviamo invece in uno stato di cose che ci obbliga ad abbandonare il postulato su c : come facciamo, infatti, a essere certi che un raggio di luce, propagantesi in linea retta con c costante rispetto al solito K , non percorra, rispetto al nuovo K' , una traiettoria curvilinea con variazioni in c ? Ma, se perdiamo la certezza sulla costanza di c , allora non siamo più nelle condizioni di analizzare la nozione di simultaneità sotto le clausole einsteiniane del 1905 e, quindi, di proseguire nel parlare di spaziotempo secondo le regole con cui, nel 1905, è stata fabbricata quella critica della simultaneità.

Einstein, nella memoria del 1916, sostiene appunto che occorre abbandonare quel significato fisico delle coordinate spaziali e temporali che è tipico sia della meccanica classica, sia della teoria della relatività ristretta. L'abbandono è reso indispensabile dal fatto che la geometria euclidea, valida per i K galileiani puri (e per i K alla Minkowski), non è più necessariamente valida per i K' . Poiché dobbiamo richiedere la covarianza delle leggi generali della natura imponendo loro di essere espresse da equazioni che valgano per tutti i sistemi di coordinate, dobbiamo altresì eliminare «dallo spazio e dal tempo l'ultimo avanzo di obiettività fisica».

Vale la pena di rileggere la giustificazione einsteiniana circa la natura obbligatoria dell'eliminazione appena citata:

Tutte le nostre verifiche spaziotemporali si riducono invariabilmente a una determinazione di coincidenze spaziotemporali. Se, ad esempio, i fenomeni naturali consistono esclusivamente nel moto di punti materiali, allora in definitiva nulla si potrà osservare tranne l'incontro di due o più di questi punti. Inoltre i risultati delle nostre misurazioni non sono nient'altro che verifiche di certi incontri di punti materiali di nostri strumenti di misura con altri punti materiali.

Stando così le cose «l'introduzione di un sistema di riferimento non serve ad altro scopo che a facilitare la descrizione della totalità di tali coincidenze». Pertanto,

se, al posto delle variabili x^1, \dots, x^4 , introduciamo quattro funzioni delle stesse, x'^1, \dots, x'^4 , come nuovo sistema di coordinate, in modo che tra i due sistemi vi sia corrispondenza biunivoca senza ambiguità, l'eguaglianza di tutte le quattro coordinate servirà anch'essa come espressione della coincidenza di due punti-evento nello spaziotempo. E poiché tutta la nostra esperienza fisica può in definitiva ridursi a tali coincidenze, non vi è alcuna ragione immediata per preferire certi sistemi di coordinate ad altri: vale a dire giungiamo al postulato della covarianza generale.

7.3

Ancora sull'intervallo

Analizziamo, a questo punto, il senso da attribuire a tutte le precedenti considerazioni sull'obbligo di lasciarci alle spalle quanto avevamo appreso in relatività ristretta sia a proposito della propagazione della luce nel vuoto secondo linee rette e con velocità costante, sia a proposito del significato fisico di spazio e tempo: un obbligo che dovrebbe essere correlato all'impotenza della relatività ristretta nei confronti della gravitazione e alla struttura piatta della geometria di Minkowski.

Ci eravamo convinti della necessità di introdurre la nozione di intervallo nel continuo quadridimensionale. La nostra convinzione si esprimeva con un'espressione dove l'intervallo ds appariva in una forma tipica:

$$ds^2 = -dX_1^2 - dX_2^2 - dX_3^2 + c^2 dt^2$$

Lo straordinario pregio di questa forma è che essa non dipende dall'orientamento del sistema di coordinate e si presta immediatamente a interpretazioni in termini di misure di spazio e di tempo.

Prendiamo ora in considerazione due eventi tra loro *molto vicini*, ovvero due punti del continuo a proposito dei quali abbia senso determinare i differenziali dx^1, \dots, dx^4 delle coordinate nel sistema adottato di riferimento. Senza complicarci eccessivamente la vita siamo in grado di esprimere il ds in modo leggermente diverso da quello solito, ovvero nella forma:

$$ds^2 = \sum g_{\sigma\tau} \cdot dx^\sigma$$

Un rapido esame della situazione mostra che, apparentemente almeno, le cose non sono cambiate in modo drastico. È infatti sufficiente, per ricadere nel caso al quale ci siamo abituati con Minkowski, scegliere i vari $g_{\sigma\tau}$ in *un certo modo*: imponiamo che essi siano tutti eguali a zero, eccezion fatta per g_{11}, g_{22} e g_{33} , per i quali scegliamo il valore -1, e per g_{44} , che decidiamo sia pari a +1. *Con questa specifica scelta siamo ancora in relatività ristretta e non abbiamo campi gravitazionali.*

Si dirà: ma questo è un caso particolare. Esatto. Poiché gli indici in basso dei $g_{\sigma\tau}$ sono due e ciascun indice varia tra 1 e 4, abbiamo, complessivamente 12 valori: $g_{11}, g_{12}, \dots, g_{44}$. Ebbene, a volte possiamo scegliere quella particolarissima sequenza di valori -1, -1, -1, +1 che ci lascia tranquillamente in relatività ristretta. Quando possiamo scegliere *così*, allora, di fatto, ci troviamo proprio in una regione quadridimensionale alla Minkowski dove un punto materiale *libero* si muove di moto rettilineo uniforme rispetto al sistema di coordinate scelto.

Ma, se passiamo a nuove coordinate x^1, \dots, x^4 *comunque scelte*, le componenti $g_{\sigma\tau}$ nel nuovo sistema di riferimento, non saranno più necessariamente costanti e saranno invece *funzioni dello spazio e del tempo*. Nelle nuove coordinate, quindi, il moto di un punto materiale *libero* potrà benissimo assumere l'aspetto di un moto curvilineo non uniforme, *indipendentemente dalla natura fisica dell'oggetto sotto osservazione*. Appunto: potremmo affermare che *questo* moto è tipico del comportamento di un oggetto materiale che si sposta in un campo gravitazionale. «In tal modo - scrive infatti Einstein - constatiamo l'apparizione di un campo gravitazionale».

7.4

Variazioni di metrica e gravitazione

Che cos'è successo? È successo che i campi gravitazionali sono descritti dai $g_{\sigma\tau}$. Ma è anche successo che, data la nuova definizione di intervallo fra due eventi vicini, i $g_{\sigma\tau}$ determinano «le proprietà metriche dello spazio quadridimensionale». Abbiamo così impostato la soluzione del grave problema che ci era apparso non appena avevamo afferrato la situazione per cui lo spazio piatto di Minkowski non era in alcun modo sensibile alla distribuzione e al moto della materia. Nella nuova generalizzazione, infatti, la metrica e i campi gravitazionali sono determinati dai $g_{\sigma\tau}$ e la variazione dei $g_{\sigma\tau}$ determina la variazione della metrica.

Abbiamo dunque fra le mani la massima generalizzazione possibile della teoria della relatività e si apre, di fronte a noi, la strada per interpretare la gravità in un continuo non piatto. E, tuttavia, comprendiamo altresì che l'interazione gravitazionale ha davvero uno status eccezionale rispetto all'interazione elettromagnetica *e a tutte le altre*. Einstein sostiene, a titolo programmatico, che abbiamo il dovere di distinguere tra campo gravitazionale e materia, «nel senso che denominiamo "materia" tutto ciò che non è campo gravitazionale; in altri termini, la parola "materia" comprende non solamente la materia nel significato ordinario, ma anche il campo elettromagnetico».

Il quadro offertoci da tale generalizzazione è effettivamente maestoso. Stiamo contemplando la più grandiosa costruzione scientifica che sia mai stata fabbricata. Non è sorprendente che la nostra ammirazione, per meglio concretizzarsi, abbia allora bisogno di una strategia matematica molto potente, ovvero tale da far tesoro dell'approccio riemanniano alle varietà non euclidee e del calcolo differenziale assoluto. Siamo così arrivati a zone del linguaggio assai remote rispetto a quelle che ogni giorno frequentiamo per stabilire, con i nostri simili, un flusso di comunicazione attorno a esperienze di senso comune o a credenze intersoggettive.

7.5

Sul divenire

In queste zone remote vive una rappresentazione razionale dello spaziotempo e degli eventi che ben poco ha a che fare con quella che è indispensabile allo scopo di rendere stabile il flusso di comunicazione or ora ricordato. Eppure, proprio in queste zone giace la chiave grazie alla quale possiamo, se vogliamo, capire come mai quel flusso di comunicazione è operativo e come mai, attorno alla sua natura, abbiamo filosofato per secoli.

La teoria einsteiniana della gravitazione ha una generalità enorme. Essa, con una specifica scelta dei $g_{\sigma\tau}$, contiene in sé, come caso particolare, la teoria della relatività ristretta. Se poi ammettiamo che i valori di $g_{\sigma\tau}$ differiscano *di poco* rispetto a quelli che si riducono alla sequenza -1, -1, -1, +1, allora essa contiene in sé, come altro caso particolare, la teoria newtoniana della gravitazione.

Non è questa la sede in cui mostrare che, ad esempio, i raggi luminosi sono incurvati rispetto al sistema di coordinate quando i $g_{\sigma\tau}$ non sono costanti, ovvero nei pressi di una massa sufficientemente grande, o come si debbano avere effetti osservabili di spostamento spettrale verso il rosso nella luce che ci raggiunge dopo essere stata emessa dalle stelle. La base empirica della teoria einsteiniana della gravitazione, nel 1916, era già sterminata: essa, infatti, già nel 1916 comprendeva in se stessa tutte le prove sperimentali allora esistenti e conformi alla teoria newtoniana e alla teoria della relatività ristretta. La stessa curvatura dello spaziotempo, che ancor oggi appare a molti intellettuali come una nozione eccessivamente controintuitiva, è diventata ormai un tema assodato su base sperimentale, insieme ad altri che solo dopo la morte di Einstein poterono essere assoggettati a controllo empirico e che sono stati piacevolmente esposti da Clifford Will in un recente libro apparso nel 1989.

Le nozioni di spaziotempo e di evento che tale teoria ci consegna hanno una conseguenza che deve essere ricordata nel momento stesso in cui questo volumetto giunge a concludersi. Abbiamo accertato, in precedenza, che la geometrizzazione alla Minkowski determina l'equivalenza tra coordinate spaziali e temporali, e che tale equivalenza è profondamente classica.

Il mondo di Einstein e Minkowski, ovvero il mondo fisico della teoria della relatività ristretta, è un mondo percorso dal divenire: potremmo dire, usando il linguaggio d'ogni giorno, che un evento in quel mondo è un punto dotato di storia, e che la storia in questione è raffigurabile disegnando una linea d'universo.

La situazione è *completamente diversa* nell'ambito della teoria della gravitazione, e la natura di questa differenza va ora un poco precisata lungo la direttrice su cui ci siamo mossi nelle pagine precedenti, così da renderci conto della portata propriamente filosofica e non puramente tecnica dell'opera di Einstein.

Desidero qui essere inteso alla lettera. Adopero infatti l'espressione "portata filosofica" nello stesso senso in cui essa è legittimamente usata, nella ricerca filosofica vera e propria, quando si fa riferimento alla "portata filosofica" degli studi compiuti da Hume o da Kant. E la adopero al fine di sostenere che Einstein è uno dei più grandi *filosofi* che mai siano vissuti, poiché non ha più alcun senso filosofare su spazio, tempo e materia *senza partire* dalla teoria della relatività e dai suoi ulteriori sviluppi in sede di cosmologia e di teoria dei campi quantorelativistici.

S'è visto quanta strada è stata faticosamente percorsa prendendo l'avvio dalle *intersoggettive* e diffuse credenze quotidiane sullo spazio e il tempo e approdando alle *oggettive* e non diffuse conoscenze sullo spaziotempo non euclideo. Alla fine del viaggio resta ancora una difficoltà da superare. Essa riguarda la tematica del divenire. Che senso viene ad assumere nel quadro della teoria della gravitazione?

Una buona risposta è stata data in proposito dallo stesso Einstein nel 1950. Egli ricorda che le nozioni di spazio e di tempo hanno subito notevoli modificazioni grazie alla teoria della relatività ristretta. Ricorda anche che, accanto alle modificazioni, esistono tuttavia aspetti dello spazio e del tempo che quella teoria aveva ereditato dal passato. In modo particolare è rimasta integra quella qualità dello spazio classico secondo la quale lo spazio stesso è una componente autonoma nella rappresentazione della realtà fisica: nulla vieta infatti di rimuovere, con il pensiero, la materia e il campo, e di continuare a pensare lo spazio inerziale insieme al tempo. La metrica alla Minkowski, detto in altre parole, resta come il «veicolo della materia e del campo».

Svanisce certamente la legittimità di pensare *qualcosa* da interpretare alla stregua di una sezione di mondo cui assegnare il ruolo di contenitore oggettivo dell'"adesso". Ma non svanisce la possibilità di meditare sull'*accadere* o sul *divenire*. Questi concetti, ai quali siamo avvezzi sin dall'infanzia e che ci appaiono come radicati nell'esperienza in forme profondissime, non sono stati annullati dalla teoria della relatività ristretta. Sono ancora vivi in essa ogni qual volta svolgiamo argomenti sul mondo fisico e parliamo come se il continuo quadridimensionale fosse «il divenire di un essere tridimensionale».

Con la fondazione della teoria della relatività generale, invece, Einstein riteneva che fosse indispensabile far svanire questa modalità della rappresentazione e accettare una nuova visione della realtà. Una visione che, eliminando la nozione di divenire, si limitasse ad affermare che la realtà fisica è un essere quadridimensionale. Il mondo, insomma, non diviene: *il mondo è, e basta*.

La conclusione è controintuitiva. È vero. Ma è una conclusione *argomentata*. E resta vera sino a prova contraria. Abbiamo allora bisogno di una filosofia che a tale verità sappia accostarsi. Una filosofia nuova. Che ci aiuti a relegare, tra le anticaglie del passato, la nota pessimistica di cui si fece testimone Gaston Bachelard quando scrisse, pochi anni or sono, che «la scienza non ha la filosofia che si merita». La scuola, come si vede, ha molti e difficili compiti da assolvere.

Bibliografia

Questo volumetto ha una natura introduttiva alla lettura di testi originali e allo studio di manuali. Ho pertanto scelto alcuni libri d'appoggio. Essi sono citati nei vari capitoli in modo esplicito o implicito) e sono facilmente reperibili.

- BACHELARD G., *Il materialismo razionale*, Dedalo, Bari 1975.
BELLONE E. (a cura di), *La relatività da Faraday a Einstein*, Loescher, Torino 1981.
ID., *I nomi del tempo*, Bollati Boringhieri, Torino 1989.
ID., *Saggio naturalistico sulla conoscenza*, Bollati Boringhieri, Torino 1992.
DRAKE S., *Galileo Galilei pioniere della scienza*, Muzzio, Padova 1992.
EINSTEIN A., *Fisica e realtà*, in *Opere scelte*, Bollati Boringhieri, Torino 1988.
ID., *I fondamenti della teoria della relatività generale*, in *Opere scelte*, cit.
ID., *La relatività e il problema dello spazio*, in *Opere scelte*, cit.
ID., *L'elettrodinamica dei corpi in movimento*, in *Opere scelte*, cit.
GALILEI G., *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, Einaudi, Torino 1970.
ID., *Il Saggiatore*, Feltrinelli, Milano 1979.
ID., *Discorsi e dimostrazioni matematiche*, a cura di E. Giusti, Einaudi, Torino 1990.
KELVIN W. T., *Opere scelte*, UTET, Torino 1972.
LA FORGIA M. (a cura di), *Elettricità, materia e campo nella fisica dell'Ottocento*, Loescher, Torino 1982.
LANDAU L., LIFCHITZ E., *Théorie des champs*, Mir, Mosca 1970.
LOCKE J., *Saggio sull'intelletto umano*, UTET, Torino 1982.
MACH E., *La meccanica nel suo sviluppo storico critico*, Einaudi, Torino 1968.
MAXWELL J. C., *Trattato di elettricità e magnetismo*, UTET, Torino 1973.
NEWTON I., *Principi matematici della filosofia naturale*, UTET, Torino 1977.
PAIS A., *Il danese tranquillo. N. Bohr, un fisico e il suo tempo*, Bollati Boringhieri, Torino 1993.
PARRINI P. (a cura di), *Fisica e geometria dall'Ottocento a oggi*, Loescher, Torino 1979.
VAN ORMAN QUINE W., *Saggi filosofici 1970- 81*, Armando Armando, Roma 1982.
WILL C., *Einstein aveva ragione?*, Bollati Boringhieri, Torino 1992.

Indice analitico

Dati la struttura di questo libro e i fini che esso persegue, l'indice analitico assume una forma particolarmente semplice. I numeri non indicano infatti le singole pagine dove un nome appare, ma i singoli capitoli (o l'*Introduzione*) dove esso figura in una collocazione specifica o introduttiva a usi particolari.

- Asimmetria, 5
- causalità, 6
- clessidra, 1
- comportamento linguistico, 7
- continuum*
 - di Faraday, 3
 - di Minkowski, 6
- covarianza, 7
- credere, *Introduzione*
- difetto epistemologico, 7
- direzione, 2
- divenire, 7
- equivalenza, 6
- filosofia, 7
- futuro, 6
- gravità, energia classica, 3
- inerzia
 - secondo Faraday, 3
 - secondo Galilei, 2
- interferometro, 4
- intervallo, 6, 7
- irreversibilità, 5
- linguaggio
 - orlo osservativo, *Introduzione*
 - zone remote, *Introduzione*
- magnete, 5
- mente, 1
- metrica, 4, 7
- motus*, 2
- oggetto, 2
 - rigido, 4
- onde gravitazionali, 4
- orologio, 1
- osservatore galileiano, 2
- passato, 6
- percezione, 1
- qualità, 3
- raggio di luce, 4
- recettori, cfr. sensori
- relatività, di Galilei, 2
- sensori, 1
- significati, 1
- simultaneità, 5
- spiegazioni, 5
- storia, *Introduzione*
- studio, come forma del lavoro, *Introduzione*
- tempo
 - immobile, 5
 - locale, 4
 - matematico, 3
 - proprietà fisiche, 3
 - segno del, 5
 - uniformità, 2
- tendenza, 5