

Come già accennammo nel paragrafo II, le ricerche di fisica del Settecento furono intimamente collegate alla costruzione di nuovi strumenti scientifici, onde i progressi conseguiti in un campo risultano inscindibili da quelli conseguiti nell'altro.

Ciò va detto ad esempio per la termologia ove la scoperta fondamentale del secolo — consistente nella distinzione fra temperatura e calore — si sviluppò e consolidò parallelamente alla costruzione di termometri sempre più perfetti e di calorimetri.

Lo stesso si può ripetere per l'ottica, ove la scoperta dell'inesattezza dei risultati osservati da Newton circa il fenomeno della dispersione provocò i primi tentativi di costruire un obiettivo acromatico e la riuscita di questi tentativi valse da efficace conferma alla scoperta anzidetta. Anche l'importante distinzione fra la « chiarezza » della luce dalla sorgente luminosa e l'intensità di illuminazione dei corpi colpiti dalla luce fu parallela alla costruzione e ai successivi perfezionamenti dei fotometri: l'opera principale sull'argomento, *Photometria sive de mensura et gradibus colorum et umbrarum (Fotometria, ovvero della misura e dei gradi dei colori e dell'ombra)* fu scritta nel 1760 dal matematico e logico Lambert di cui si è parlato nei capitoli precedenti.

Mentre la parte sperimentale compiva sicuri progressi, la spiegazione teorica dei fenomeni osservati incontrava non di rado forti difficoltà e dava luogo a vive discussioni. Queste furono particolarmente accese intorno al problema della natura dei raggi luminosi: parecchi erano infatti i fisici che non osando ribellarsi all'autorità di Newton continuavano a restare fedeli alla concezione corpuscolare della luce sia pure introducendovi ingegnose modificazioni per adeguarla ai nuovi dati dell'esperienza; mentre altri, come ad esempio Eulero, tentavano di contrapporre la vecchia concezione ondulatoria di Huygens. Le critiche sollevate da Eulero contro « il sistema dell'emanazione » di Newton erano certo calzanti, ma la teoria che intendeva sostituire a tale sistema (basata sull'asserto che « la luce altro non è se non un'agitazione o vibrazione prodottasi nelle particelle dell'etere ») andava essa pure incontro a gravissime difficoltà, connesse alla definizione stessa di quella singolare sostanza « estremamente sottile » e « perfettamente elastica » — l'etere — che secondo lui avrebbe dovuto « riempire tutti gli spazi dei cieli compresi fra i corpi celesti » senza opporre alcuna « sensibile resistenza » ai loro moti. I dibattiti fra i sostenitori delle due antitetiche interpretazioni si protrassero a lungo, finché nell'Ottocento la teoria ondulatoria finì per ottenere — come vedremo nel volume IV — una vittoria che parve definitiva.

Molti studi vennero pure compiuti intorno alla natura del calore, che la gran maggioranza dei fisici settecenteschi concepì come un'autentica sostanza:

il calorico.¹ Non mancò tuttavia chi ebbe il coraggio di sostenere — come Danièle Bernoulli nella sua *Hydrodynamica* del 1738 e l'anno successivo Eulero in una memoria sulla natura del calore — che i fenomeni termici potevano invece venire spiegati quali effetti di moti molecolari. Questa teoria verrà ripresa nell'Ottocento in seguito alla dimostrata insostenibilità dell'interpretazione sostanzialistica del calore.

Dal punto di vista metodologico che qui particolarmente interessa, gli accesi dibattiti testé accennati sono soprattutto importanti perché fecero sorgere i primi dubbi circa la funzione dei modelli nell'elaborazione scientifica dei fenomeni. Dovremo ritornare varie volte, nel seguito della nostra esposizione, non a tale problema, dato che modelli antitetici si presentarono alla scienza, non solo nel Settecento, ma anche in fasi assai più recenti della sua storia. Vedremo che non mancheranno alcuni studiosi i quali — richiamandosi al canone newtoniano dell'hypotheses non fingo — vorranno respingerli completamente dalla fisica; altri però — richiamandosi invece all'esempio dato dal medesimo Newton con la sua teoria corpuscolare della luce — sosterranno tenacemente che solo la scoperta di un modello soddisfacente può fornirci la « vera » spiegazione dei fenomeni. Bisognerà giungere a tempi molto recenti per comprendere che nella scienza i modelli possono tutt'al più avere un valore strumentale, e che comun-que essi vanno usati con la massima cautela tenendo ben presente che un qualsiasi modello, anche quando sembra spiegare in modo soddisfacente un gruppo di fenomeni, non ne rappresenta affatto la realtà.²

Un discorso alquanto più diffuso va fatto per le indagini di elettrologia. Anche qui, naturalmente, l'impulso determinante per la ricerca di nuove concezioni provenne senza dubbio dalla maggiore ricchezza dei dati sperimentali. Basti per ora ricordarne alcuni: la scoperta dovuta all'inglese Stephen Gray (1670-1736) che certi corpi sono buoni conduttori dell'elettricità mentre altri non lo sono, e quella, dovuta al medesimo Gray, dell'induzione elettrostatica; la dimostrazione pratica, compiuta dal francese Charles Du Fay de Cisternay (1698-1759) che esistono due specie di elettricità, da lui chiamate *vitrea* e *resinosa*, e che tutti i corpi ad eccezione — così almeno egli credeva — dei metalli e dei corpi umidi sono elettrizzabili per strofinio (sull'elettrizzazione per strofinio è fondato il funzionamento delle prime macchine elettrostatiche); le numerose

1 Chi diede il maggiore impulso alla diffusione di questa teoria fu Joseph Black: il calorimetro, cui si è fatto cenno nel paragrafo II, da lui ingegnosamente costruito verso il 1766, doveva appunto servire alla misura del calorico necessario per aumentare di un grado la temperatura delle varie sostanze. Chi fornì una esposizione completa della teoria fu, nel 1780, Jean Paul Marat (1743-93) che assumerà poi una posizione di primo piano nella rivoluzione francese.

2 Scrive sull'argomento R.B. Braithwaite, riferendosi a uno dei più noti modelli introdotti dalla fisica del nostro secolo: « Gli atomi di idrogeno si comportano, sotto certi aspetti, come se fossero sistemi solari, ciascuno con un elettrone come pianeta che compie delle rivoluzioni attorno a un protone come sole. Ma gli atomi di idrogeno non sono sistemi solari; sarà utile pensarli come se fossero sistemi affatti soltanto se ci si ricorda continuamente che non lo sono. »

osservazioni eseguite con la così detta bottiglia di Leyda, costruita — indipendentemente uno dall'altro — dal tedesco Ewald Jürgen von Kleisi (1700-48) e dall'olandese Peter van Musschenbroek (1691-1761); la scoperta dovuta all'americano Benjamin Franklin (1706-90)¹ del « potere delle punte » che lo condusse alla dimostrazione dell'identità di natura fra il fenomeno della scintilla elettrica e quello del fulmine; le osservazioni assai precise del tedesco Franz Ulrich Theodor Aepinus (1724-1802) sull'induzione elettrostatica da lui eseguite mediante i suoi famosi « due piatti »; gli esperimenti dell'italiano padre Giambattista Beccaria (1716-81) sulla resistenza elettrica di vari corpi e sull'elettricità atmosferica; le esperienze dell'inglese Henry Cavendish (1731-1810) e poi del francese Charles Coulomb (1736-1806) sull'azione esercitata da due cariche una sull'altra (servendosi delle proprie ricerche sulla tensione dei fili Coulomb riuscì a stabilire, in alcune fondamentali memorie pubblicate fra il 1784 e il 1789, le famose leggi ancora oggi note col suo nome).

Una messe così ampia di dati sperimentali non poteva non provocare alcuni ingegnosi tentativi di spiegazione del nuovo campo di fenomeni, che stava assumendo un'importanza sempre maggiore. Le teorie a tal fine ideate furono essenzialmente di due tipi: teorie che ammettevano due specie diverse di fluido elettrico, e teorie che ne ammettevano invece una sola, presente in giusta misura in ogni corpo (l'aggiunta o la sottrazione di quest'unico fluido ad un corpo produrrebbe i fenomeni che ce lo fanno apparire carico di un segno o dell'altro). Il primo sostenitore di una teoria dualistica fu Du Fay, seguito poi dall'abate francese Jean Antoine Nollet (1700-70), e più tardi dall'inglese Robert Symmer (m. 1763), mentre l'iniziatore delle teorie unitarie fu Franklin, seguito da Aepinus, Beccaria, ecc. Non è qui il caso di analizzare i ritocchi, le correzioni, le trasformazioni a volte anche profonde, che sia l'una sia l'altra concezione subirono lungo i decenni per effetto delle critiche della controparte e soprattutto per riuscire a dar ragione dei nuovi risultati sperimentali via via scoperti. Né è il caso di esporre i tentativi qua e là abbozzati di stabilire una qualche connessione fra questo nascente ramo della fisica e il grande tronco della meccanica razionale; malgrado gli sforzi di introdurre una certa esattezza nelle nozioni usate e nella descrizione dei fenomeni, si era ancora ben lungi dal poter elaborare matematicamente la nuova disciplina, sicché essa non appariva interamente degna del titolo di scienza.

Chi diede un contributo decisivo a provare l'autentica scientificità dell'elettrologia fu Coulomb, con la sua dimostrazione (di tipo sperimentale, sì, ma condotta con tutto il rigore che si potesse allora esigere dalla più accurata sperimentazione) che le azioni esercitate, una sull'altra, da due cariche puntiformi —

¹ Non è il caso di ricordare, tanto la cosa è basti aggiungere che con lui ha inizio la partecipazione dell'America del Nord alla storia del pensiero per l'indipendenza degli Stati Uniti. Qui siero scientifico moderno.

o analogamente da due masse magnetiche — sono forze di tipo newtoniano, cioè forze agenti lungo la retta che congiunge i due punti considerati, e inversamente proporzionali al quadrato della distanza fra i punti in questione. È bensì vero che le azioni elettriche o magnetiche presentano una profonda differenza rispetto all'azione gravitazionale che due masse esercitano una sull'altra (essendo questa, in ogni caso, un'azione attrattiva, e quella invece potendo essere attrattiva o repulsiva): vero è però che l'analogia formale fra la legge di Newton e le leggi di Coulomb rappresentava comunque una conquista di incontestabile valore.

Come spiega molto bene Mario Giliotti, « le forze elettriche, inquadrandosi nel tipo di forze newtoniane, venivano di colpo a godere di tutte le proprietà che la meccanica razionale aveva trovato per i campi newtoniani »; da quel momento in poi l'elettrostatica (e, in modo analogo, la magnetostatica) riuscirà a compiere rapidissimi progressi, resi possibili proprio dal conquistato legame con la meccanica. L'elettrologia non avrà più l'aspetto di disciplina meramente empirica, staccata dal grande albero della vera e propria scienza, e, per converso, la concezione newtoniana sembrerà trovare in essa la riconferma della propria validità universale.

All'incirca nei medesimi anni in cui Coulomb stabiliva le sue importantissime leggi, l'abate Luigi Galvani (1737-98) scopriva — con le famose esperienze sulla rana — un tipo di fenomeni elettrici completamente nuovo, da lui interpretati come la prova incontestabile dell'esistenza di una vera e propria « elettricità animale ». Un altro grande scienziato italiano, Alessandro Volta (1745-1827), studiando i risultati di Galvani riteneva di poterli spiegare in modo più fisico, senza dover fare appello alla nozione, che gli pareva alquanto misteriosa, di elettricità animale. Nello sviluppare le proprie argomentazioni scopriva le leggi del contatto e giungeva a costruire la sua celeberrima pila (di cui darà notizia in una lettera del marzo 1800 a Joseph Banks, presidente della Royal Society).

Giudicando dal punto di vista odierno la polemica Galvani-Volta, dobbiamo riconoscere che sia l'uno sia l'altro avevano ragione nella *pars constans* e torto nella *pars destruens*. Come hanno ampiamente dimostrato le ricerche dei secoli successivi, esiste infatti sia un'elettricità animale (seppure da intendersi in modo alquanto diverso da come la intendeva Galvani) sia un'elettricità originata dal contatto di metalli eterogenei. Certo è però che tanto l'una scoperta quanto l'altra fuoruscivano completamente dal quadro concettuale del Settecento: esse aprivano la via a un tipo nuovo di indagini, che darà grandi frutti nelle fasi successive della scienza, e che i fisico-filosofi romantici cercheranno di sfruttare nella loro polemica generale contro il newtonianesimo.

III - PROGRESSI DELLE RICERCHE FISICO-CHIMICHE

La tendenza alla specializzazione si manifesta nelle discipline fisico-chimiche in modo assai diverso che non nella matematica; non connessa, cioè, ad un'acresciuta esigenza di rigore formale, ma al moltiplicarsi dei dati osservativi, raccolti mediante esperimenti sempre più complessi e precisi, la cui esecuzione richiede abilità e competenza, difficilmente possedute in pari misura da un medesimo studioso per tutti i campi di indagine (la maggiore complessità ora accennata è uno dei caratteri specifici delle scienze dell'Ottocento nei confronti di quelle settecentesche).

Dai dati anzidetti si ricavano numerose leggi di carattere prettamente sperimentale, che vengono inizialmente coordinate fra loro in forma alquanto sommaria; solo alcuni studiosi, come vedremo, sentono l'esigenza di inquadrarle in sistemi davvero soddisfacenti, matematicamente elaborati. Si compiono invece molti sforzi, spesso ingegnosi, per « spiegarle », cioè per dedurle da alcuni modelli — ritenuti intuitivi — per lo più già ideati nei secoli antecedenti, ed ora corretti, completati e perfezionati. Non si giunge mai comunque ad ideare nuove ampie teorie di rigore confrontabile a quello che aveva caratterizzato la teoria newtoniana della gravitazione (per esempio — come vedremo — il concetto di « campo » viene sì abbozzato in questo periodo, ma la teoria generale dei campi verrà matematicamente elaborata solo nella seconda metà del secolo).

Se ne trae, in certo senso, l'impressione che i progressi compiuti — incontestabilmente numerosi e importantissimi — attecchiscono senza dubbio un contributo decisivo alla costruzione del grande mosaico della scienza moderna, ma, pur chiarendone assai bene alcuni fondamentali settori, non riescano a farci cogliere le linee generali del disegno complessivo.

In questa situazione, non essendo nei nostri intenti presentare una vera e propria storia dettagliata delle singole scienze, ma guidare il lettore alla comprensione dello sviluppo del pensiero scientifico, ci limiteremo qui, come già si è accennato nel primo paragrafo, a fornirgli una visione panoramica dell'enorme massa di ricerche compiute in quegli anni, affinché egli si renda conto — malgrado la schematicità e le lacune della nostra esposizione — dell'importanza delle scoperte raggiunte e dei nuovi problemi da esse sollevati. Sulla base di tale visione panoramica risulterà possibile, nel successivo paragrafo, enucleare alcune questioni di fondo emerse nell'epoca in esame, che ci sembrano possedere un notevolissimo interesse per la storia generale del pensiero. * * *

Non meno interessanti, sia in se stessi sia dal punto di vista metodologico, furono i progressi conseguiti nella medesima epoca dall'elettrologia. Essi risultarono in gran parte determinati dalla scoperta del primo « generatore di corrente »: la pila di Volta (cui si è già fatto cenno nel capitolo testé citato della sezione precedente), pila che subì in pochi decenni vari perfezionamenti, in modo da dar luogo a una corrente più intensa e più regolare.

Il primo problema « teorico » cui ci si trovò di fronte, fu quello di stabilire se il « fluido galvanico » generato dalla pila risultasse o no identificabile con il « fluido elettrico » prodotto dalle macchine elettrostatiche costruite e studiate nel Settecento. Che esistessero a prima vista delle differenze fra i due, era incontrovertibile; si pensi per esempio al perdurare del « flusso galvanico » lungo un certo tempo e invece al carattere rapido ed esplosivo della scintilla generata dalle macchine elettrostatiche. Ciò malgrado Volta sostenne, fin dal 1802, la loro identità; in un primo tempo però la sua risposta fu assai dibattuta e finì poi per imporsi solo a causa delle sempre più strette analogie che un'attenta sperimentazione dimostrò esistere fra i fenomeni relativi ai due fluidi. A testimonianza delle gravi perplessità inizialmente sorte al riguardo, possiamo comunque notare che una chiara traccia di esse risulta presente nello stesso nome di « galvanometro »: introdotto (nel 1801), come scrive Mario Gliozzi, « non già in onore di Galvani » ma « per indicare un misuratore d'intensità del galvanismo ».

Le indagini sulle cause del fluido galvanico portarono ben presto a discutere i rapporti fra esso e le reazioni chimiche che si producono entro la pila durante il tempo in cui questa genera la corrente; di qui si passò immediatamente a studiare in generale gli effetti chimici della corrente nell'attraversare un liquido. L'importanza di tali effetti risultò subito enorme, cosicchè si accentrò su di essi l'interesse di molti ricercatori. Ne nacque una vera e propria nuova disciplina — l'elettrochimica — in cui lavorarono scienziati inglesi, francesi, tedeschi, italiani, ecc. Quelli che vi recarono contributi più rilevanti furono però gli inglesi: spetta ad Anthony Carlisle (1768-1840) e William Nicholson (1753-1815) il merito di avere per primi eseguito l'elettrolisi dell'acqua; qualche anno più tardi Humphry Davy (1778-1829) riuscì a dimostrare che la corrente elettrica non scompone, in realtà, l'acqua, ma i sali e gli acidi in essa disciolti (nel 1807 giunse a decomporre la potassa e la soda, ottenendo due nuovi metalli cui diede il nome di potassio e di sodio); finalmente nel decennio 1830-40 Michael Faraday (1791-1867) — « il più grande fisico sperimentatore del secolo » come scrive Gliozzi — scoperse le due fondamentali leggi dell'elettrolisi che ancora oggi vanno sotto il suo nome e introdusse una nuova adeguata terminologia relativa ai fenomeni elettrolitici (a lui si devono i termini elettrodo, anodo, catodo, ecc.). I progressi dell'elettrochimica esercitarono un'influenza decisiva sullo sviluppo della chimica sia teorica che applicata.

Se, come abbiamo ora detto, fu enorme il peso degli studi compiuti all'inizio dell'Ottocento intorno agli effetti chimici della corrente, non minore fu l'importanza della fondamentale scoperta degli effetti magnetici da essa prodotti. Il maggiore merito di tale scoperta spetta, come già ricordammo nel capitolo V, al danese Hans Christian Oersted (1777-1811), sebbene già altri — per esempio il filosofo italiano Romagnosi — avessero intuito che i fenomeni elettrici e quelli magnetici dovevano risultare tra loro connessi. La scoperta di Oersted risultò tanto più sorprendente, in quanto la forza da essa evidenziata fuoriusciva in modo completo dal tipo di forze (le cosiddette forze centrali) che stavano alla base della teoria gravitazionale newtoniana e di pressochè tutte le altre allora note ai fisici (centrali erano, per esempio, le forze di attrazione o repulsione fra cariche elettriche puntiformi, delle quali Coulomb aveva qualche decennio prima scoperto le leggi). L'interesse suscitato dai nuovi fenomeni fu enorme, e sappiamo che, partendo da esse, Ampère riuscì a compiere le sue celebri scoperte

4 di elettrodinamica ed a dimostrare una formula che pareva ricondurre le forze recentemente osservate nel grande alveo delle idee newtoniane. Riusci fra l'altro a dimostrare che una sbarra di acciaio avvolta da un filo ad elica si magnetizza quando questo è percorso da corrente. Era l'inizio della costruzione delle elettrocalamite, che si dimostrarono ricchissime di applicazioni scientifiche e tecniche. Basti pensare al telegrafo, ideato da Ampère e portato a pratica realizzazione nel 1839 dall'americano Samuel Morse (1791-1842).

Un apparecchio fra i molti basati sull'elettromagnetismo, merita particolare menzione: il galvanometro o misuratore dell'intensità di corrente. Già prima del 1820 si era sentita la necessità di misurare il « fluido galvanico », e si era fatto ricorso, a tale scopo, a strumenti che ne sfruttavano gli effetti chimici; essi erano però poco precisi e poco sensibili, mentre i nuovi tipi di galvanometro — basati appunto sugli effetti magnetici della corrente — rivelarono subito notevolissimi pregi. A tutti è ancora oggi noto quello a sistema « astatico », costruito nel 1825 dall'italiano Leopoldo Nobili (1784-1835).¹

Qui basti aggiungere che si tratta di apparecchi ad alta sensibilità che, gradualmente perfezionati nel corso degli anni, compirono e continuano a compiere una funzione preziosissima in molte fra le più delicate ricerche di fisica.

Un settore di fenomeni, in certo modo simmetrico a quello testé menzionato, è costituito dai cosiddetti fenomeni di « induzione elettromagnetica »: trattasi, come tutti sanno, della possibilità di produrre variazioni in una corrente elettrica, spostando una calamita nella prossimità del filo in cui circola l'elettricità. Tale induzione venne scoperta nel 1831 da Faraday e attrasse subito l'attenzione di molti scienziati: basti ricordare i nomi del russo Emilij Christianovič Lenz (1804-63) e del tedesco Franz Ernst Neumann (1798-1893) che — nel 1834 e, rispettivamente nel 1845 — riuscirono a determinare le leggi solitamente note con i loro nomi. Anche questi nuovi fenomeni si rivelarono subito del massimo interesse teorico e pratico: essi aprirono infatti la via alla costruzione di nuovi importantissimi generatori di corrente elettrica; l'utilizzazione effettiva di tali generatori non si ebbe però che qualche decennio più tardi (all'inizio della seconda metà del secolo).

Parecchi fisici avevano intanto cominciato a studiare la resistenza che i conduttori oppongono quando vengono percorsi da una corrente elettrica; tali studi giunsero a conclusione in una celebre opera del fisico tedesco Georg Simon Ohm (1789-1854) dal titolo *Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet* (*Il circuito elettrico, trattato matematicamente*, 1827). In essa si trovano per la prima volta distinti con chiarezza i concetti di intensità di corrente e di forza elettromotrice (già intuiti da Ampère) nonché la legge, detta appunto di Ohm, che collega fra loro tali due grandezze e la resistenza del conduttore percorso dalla corrente.

Non occorre aggiungere altro per rendersi conto dell'ampiezza dei progressi compiuti dall'elettrologia durante l'epoca in esame: sono progressi ricarati da una seria e rigorosa sperimentazione, che a poco a poco conduce gli specialisti a precisare tutte le grandezze fondamentali del complesso settore e le principali leggi che ne regolano i rapporti reciproci. Non si ha ancora una sistemazione teorica generale dei fenomeni studiati (questa verrà operata solo nella seconda

1. Il modello ondulatorio della luce richiese qualcosa di filosoficamente impegnativo, l'affermazione dell'esistenza dell'etere, cioè una speciale sostanza che riempirebbe l'intero spazio. Per chiarire il concetto di tale sostanza i fisici discussero con sempre maggior precisione quali proprietà essa avrebbe dovuto avere per poter trasmettere le onde luminose secondo il modello di Fresnel.

La storia del concetto di etere è una delle più interessanti perché. Dopo averlo introdotto come puro termine teorico, gli scienziati cominciarono a poco a poco a credere nella sua effettiva esistenza e giunsero nell'800 a immaginarlo come la "realizzazione" fisica dello spazio assoluto newtoniano.

Di qui i numerosi e ingegnosi tentativi compiuti nella seconda metà dell'800 per verificarne l'esistenza. Solo il costante fallimento di questi li condurrà ad abbandonare l'anzidetta fede, ma sarà un passo tanto difficile quanto poco chiara la definizione dell'oggetto in questione.

1. La denominazione di questo galvanometro dipende dal fatto che esso utilizza in modo assai ingegnoso il cosiddetto « equipaggio astatico », formato da due aghi magnetici paralleli e diretti in senso opposto, già ideato da Ampère nel 1827.

Il modello dei cilindri e delle sferette, da noi schematicamente riferito, induceva Maxwell ad attribuire al sistema portante del magnetismo e dell'elettricità una vera e propria elasticità, grazie alla quale non solo i mutamenti nella forza magnetica producono mutamenti in quella elettrica e viceversa, ma tali mutamenti si propagano dal punto in cui hanno avuto luogo in tutte le direzioni dello spazio circostante. È stato lo studio approfondito di questa propagazione a fare sorgere in lui l'idea delle onde elettromagnetiche, ed a fargli scoprire che esse debbono venire considerate come trasversali rispetto alla direzione lungo la quale si propagano.

Ma già i fisici della generazione precedente erano stati condotti ad ammettere qualcosa di molto simile per la luce: cioè ad ammettere che questa consista di vibrazioni dell'etere, trasversali rispetto alla direzione del raggio luminoso. Di qui l'ipotesi sorta quasi spontaneamente in Maxwell, che tra le onde elettromagnetiche e le onde luminose dovesse esistere una stretta affinità.

Il nostro autore non era però uomo che potesse accontentarsi di un'ipotesi generica, per quanto affascinante. Si trattava dunque di darle una formulazione rigorosa, che potesse garantirne la piena dignità scientifica.

Ancora una volta lo strumento cui egli fa ricorso è quello di costruire con dovizia di particolari un modello ideale dell'etere. Esso dovrà risultare capace, per un verso, di spiegare la funzione attribuitagli ormai unanimemente dagli studiosi di ottica (cioè la funzione di trasmettere le onde luminose concepite, come si è detto, quali onde trasversali rispetto alla direzione del raggio di luce), e capace, per un altro verso, di spiegare l'affinità poco sopra accennata fra le onde luminose e quelle elettromagnetiche.

Effettivamente, il modello ideato all'uopo da Maxwell (sul cui funzionamento preferiamo non scendere in particolari) si rivelò discretamente idoneo ad adempiere i due compiti testé accennati. Esso gli permise fra l'altro di cogliere il grande significato di un risultato sperimentale, scoperto pochi anni prima (nel 1852) dai due fisici tedeschi Wilhelm Weber e Rudolf Kohlrausch: la quasi identità tra il valore della velocità della luce e quello del rapporto tra unità elettrostatica e unità elettrodinamica delle cariche (rapporto avente, esso pure, le dimensioni di una velocità). Riflettendo su tale risultato il nostro autore giunse all'importantissima conclusione che le onde elettromagnetiche e le onde luminose si propagano con la medesima velocità. Non era ancora, a rigore, la formulazione esplicita della natura elettromagnetica della luce, ma era un passo decisivo verso di essa.

Non è il caso di ripetere, dopo quanto chiarimmo nel paragrafo precedente, che anche la costruzione di un modello dell'etere rientrava incontestabilmente nel programma della fisica meccanicistica. Certo è, comunque, che quello maxwelliano si rivelò particolarmente felice, riuscendo ad eliminare parecchie difficoltà per l'innanzi riscontrate da quasi tutti i fisici in tale strano fluido, e quindi accrescendo l'accettabilità della sua esistenza. Con esso il programma meccanicista dimostrava di essere ancora in grado di fornire agli scienziati utili suggerimenti.

Col trascorrere del tempo anche questo modello perse però, agli occhi dello stesso Maxwell, gran parte del proprio interesse. Esso gli era servito per intuire la profonda identità fra onde elettromagnetiche e onde luminose; una volta compiuta questa funzione, poteva ormai venire abbandonato come i modelli precedenti.

Già nell'opera del 1864 il nostro autore si limita a parlare dell'etere come di un mezzo elastico, estremamente sottile, che ha l'unico compito di fungere da veicolo delle onde elettromagnetiche e luminose.

Nel 1873 egli identificherà tale « fluido immaginario » con il mezzo portante delle onde anzidette, senza attribuirgli alcuna altra proprietà fisica se non quella, appunto, di trasportare onde elettromagnetiche. Non lo interessa più, ormai, di costruire un'immagine visualizzabile dell'etere; ma solo di formulare con esattezza le equazioni differenziali che regolano i fenomeni in esso verificantisi. La trattazione matematica ha finito per eclissare ogni spiegazione modellistica.

VI · LA TEORIA MAXWELLIANA DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO

Abbiamo già detto più volte che il principale scopo proposto da Maxwell nelle sue ricerche sull'elettromagnetismo fu quello di tradurre in forma matematica precisa le idee di Faraday, dimostrando con ciò ai fisici-matematici seguaci della grande tradizione newtoniana che anche la fisica del continuo poteva venire elevata al rango di autentica scienza, altrettanto bene quanto la fisica del discontinuo. Talvolta egli sembra anzi sostenere che il valore dell'una equivale a quello dell'altra, malgrado l'opposizione radicale dei loro metodi e dei loro punti di partenza: « Allorché io ebbi rivestito di forma matematica quelle che mi parevano le idee di Faraday, vidi che in generale le conclusioni ottenute coi due metodi si accordavano, sicché dello stesso fenomeno si poteva dar ragione nei due modi arrivando a stabilire le stesse leggi, ma i metodi di Faraday somigliano a quelli, nei quali si procede all'analisi delle parti muovendo dal tutto, mentre i soliti metodi matematici muovono dalle parti e costruiscono il tutto per via di sintesi. »

In realtà, se in taluni casi i due metodi conducono effettivamente alle medesime leggi, vero è però che in molti altri il nuovo metodo porta a conclusioni che sfuggivano completamente al metodo precedente. Basti citare a titolo di esempio la « polarizzazione elettrica dei dielettrici » che resta inspiegabile dal punto di vista « classico », mentre assume invece un ruolo fondamentale nella concezione maxwelliana; essa permette al nostro autore di definire con esattezza le cosiddette « correnti di spostamento », facendo appello alle quali egli riesce ad eliminare il grave divario fin allora esistente nella trattazione dei circuiti « chiusi » e di quelli « aperti ».

Non è il caso di riportare qui le equazioni di Maxwell, che risultano incomprensibili a chi non possieda un adeguato bagaglio di nozioni tecniche; il lettore

6 che lo desidera può del resto andarle a leggere in un qualsiasi trattato moderno di fisica. In esse il metodo poco fa caratterizzato da Maxwell come trapasso dal tutto alle parti, trova riscontro nel fatto che egli suppone determinata — in un dato istante — la distribuzione del vettore elettrico E e del vettore magnetico H in tutti i punti dello spazio (per esempio E dovrà essere definito anche nel dielettrico e non solo nei conduttori): così l'intero spazio potrà venire considerato come « campo » elettrico e magnetico (o campo elettromagnetico), senza escludere ovviamente che esso risulti « più forte » in alcune zone e « più debole » in altre. Va detto, per inciso, che l'ipotesi testé accennata, secondo cui E e H sono determinati in tutti i punti dello spazio, non implica che noi ne conosciamo gli effettivi valori in ogni punto; in genere accadrà invece che li conosciamo soltanto nei punti di una regione e in un dato istante. Si tratterà allora di determinarne i valori anche al di fuori di questa regione e in istanti successivi. Orbene, le equazioni di Maxwell ci forniscono proprio lo strumento *ad hoc*, in quanto determinano i nessi reciproci fra le variazioni del campo elettrico e quelle del campo magnetico. Esse pongono in luce l'esistenza di una sostanziale simmetria fra elettricità e magnetismo, e riassumono in sé tutte le leggi valide per questi due importantissimi settori dell'esperienza.

Le differenze di fondo tra l'impostazione maxwelliana e quella « classica » della trattazione dei fenomeni in esame, sono state mirabilmente illustrate da Einstein e Infeld in alcune pagine del volume *L'evoluzione della fisica*, che meritano di venire qui riportate per la loro straordinaria chiarezza e la loro accessibilità anche ai non specialisti.

« Le equazioni di Maxwell definiscono la struttura del campo elettromagnetico. Sono leggi valide nell'intero spazio e non soltanto nei punti in cui materia o cariche elettriche sono presenti, com'è il caso per le leggi meccaniche.

« Rammentiamo come stanno le cose in meccanica. Conoscendo posizione e velocità di una particella, in un dato istante, e conoscendo inoltre le forze agenti su di essa, è possibile prevedere l'intero percorso futuro della particella stessa. Nella teoria di Maxwell invece basta conoscere il campo in un dato istante per poter dedurre dalle equazioni omonime in qual modo l'intero campo varierà nello spazio e nel tempo. Le equazioni di Maxwell permettono di seguire le vicende del campo, così come le equazioni della meccanica consentono di seguire le vicende di particelle materiali.

« Ma fra le leggi della meccanica e quelle di Maxwell sussiste un'ulteriore differenza essenziale. Un confronto fra le leggi di gravitazione di Newton e le leggi del campo di Maxwell porrà in rilievo alcuni dei tratti caratteristici di queste ultime e delle rispettive equazioni.

« Mediante le leggi di Newton possiamo dedurre il moto della Terra, dalla forza agente fra Sole e Terra. Dette leggi collegano il moto della nostra Terra con il lontano Sole. Benché così distanti l'una dall'altro, Terra e Sole prendono ambedue parte allo spettacolo delle forze agenti, in qualità di attori.

« Nella teoria di Maxwell non vi sono attori materiali. Le equazioni matematiche di questa teoria esprimono le leggi governanti il campo elettromagnetico. Non collegano, come nelle leggi di Newton, due eventi separati da una

che succede *qui* con *le* comete *lontano* imperanti "cola". Il campo "qui" ed "ora" dipende dal campo nell'*immediata* vicinanza, e nell'istante *appena trascorso*. Le equazioni del campo consentono di predire ciò che avverrà un poco più lungi nello spazio ed un poco più tardi nel tempo, se sappiamo ciò che avviene qui ed ora. Esse ci mettono in grado di estendere a piccolissimi passi la nostra conoscenza del campo. Sommando tutti questi piccoli passi, possiamo dedurre ciò che succede qui, da ciò che avviene a grande distanza. Nella teoria di Newton al contrario, non si hanno che lunghi passi fra eventi distanti. Gli esperimenti di Oersted e di Faraday possono dedursi dalla teoria del campo elettromagnetico, ma soltanto sommando tanti piccoli passi, ognuno dei quali è governato dalle equazioni di Maxwell. »

Parecchi studiosi ritengono che la fisica maxwelliana fuoriesca sostanzial-

mente dal quadro di tale indirizzo perché basata — come testé abbiamo visto — sul totale abbandono del principio newtoniano dell'azione a distanza. Di tale parere sono ad esempio Einstein e Infeld, come dimostrano le seguenti parole ricavate dal volume testé citato:

« L'antico criterio meccanicistico tendeva a ridurre, tutti gli eventi della natura a forze agenti fra particelle elementari... Per il fisico dei primi anni del XIX secolo il campo non esisteva. Egli considerava come reali soltanto la sostanza e le sue modificazioni. Egli tentava di descrivere l'azione di due cariche elettriche unicamente mediante concetti afferenti direttamente alle cariche stesse. Al principio il concetto di campo non fu altro che uno strumento volto ad agevolare la comprensione dei fenomeni dal punto di vista meccanico. Ma nel nuovo linguaggio del campo l'essenziale per la comprensione dell'azione fra le due cariche, è la descrizione del campo interposto fra di esse, e non già le cariche stesse. L'acertazione del nuovo concetto si affermò progressivamente, e finalmente il campo lasciò in ombra la sostanza. Ci si accorse allora che qualcosa di molto importante era avvenuto in fisica. Si era creata una nuova realtà, un nuovo concetto che non trovava posto nello schema meccanicistico. »

All'opinione, pur autorevolissima, di Einstein e Infeld si può tuttavia obiettare che essa commette l'errore di identificare tutto l'indirizzo meccanicistico con il particolare tipo di meccanicismo di marca newtoniana, diffuso tra i fisici del XIX secolo. Noi sappiamo però dalla sezione IV che in realtà il meccanicismo rappresentò un indirizzo filosofico-scientifico assai più ampio, per nulla legato alle nozioni di particella elementare e di azione a distanza: basti ricordare che uno dei primi sostenitori di esso fu proprio Cartesio (notoriamente contrario ad ogni concezione atomistica della sostanza estesa), e che furono per l'appunto i suoi continuatori gli avversari più decisi dell'azione a distanza postulata da Newton, in cui, anzi, essi scorgevano l'intrusione di idee di origine animistica, tutt'altro che conformi ai canoni meccanicistici.

Per quanto riguarda la tesi che l'abbandono della teoria dell'azione a distanza abbia costituito per Maxwell solo un distacco dal meccanicismo newtoniano e non dal meccanicismo in generale, vorremmo osservare che, malgrado la sua incontestabile esattezza, essa non può farci dimenticare che la cultura ottocentesca soleva proprio vedere nelle teorie di Newton l'esemplare più tipico del meccanicismo. Tale era il parere non solo dei fisici, ma anche di quasi tutti i filosofi,

nuovo e complesso modello meccanico, fini per lasciar cadere anche questa ingegnosa visualizzazione del singolare fluido (da lui stesso qualificato « immaginario »), per interessarsi esclusivamente della traduzione delle sue proprietà in termini matematici. Pur così volatilizzato, l'etere continuò, in ogni modo, a venir concepito — da Maxwell e dai suoi immediati continuatori — come qualcosa di reale: come il supporto, non meglio definito, dei campi elettromagnetici, pensati appunto come « stati » dell'etere.

Proprio la trattazione matematica della teoria dei campi, mentre per un lato favoriva l'anzidetta « volatilizzazione » del concetto di etere, per un altro lato sembrava invece destinata a dargli nuova dignità scientifica. Si dimostra infatti che le equazioni di Maxwell, diversamente da quelle della meccanica classica, non restano invarianti se le riferiamo a due differenti sistemi inerziali, cioè a due sistemi in moto rettilineo uniforme uno rispetto all'altro; ciò vale, beninteso, quando si ammetta (con la meccanica prerelativistica) che le coordinate di un punto variano — quando le riferiamo all'uno anziché all'altro di tali sistemi — secondo le formule di trasformazione galileiana. Se ne ricava che la validità stessa delle equazioni di Maxwell sembra provarci l'esistenza di un sistema di riferimento privilegiato o sistema inerziale assoluto: di qui l'idea che fosse appunto l'etere a costituire tale sistema. In altre parole: le equazioni di Maxwell risulterebbero valide se riferite proprio all'etere (concetto come immobile), mentre cesserebbero di esserlo se riferite a un sistema in movimento rispetto all'etere.

L'importanza di questa conclusione è evidente: essa suggeriva ai fisici della generazione immediatamente successiva a Maxwell di cercare nei fenomeni elettromagnetici, e in particolare in quelli luminosi, una nuova via per dare un significato concreto, scientificamente attendibile, ai vecchi termini newtoniani di « quiete assoluta » e di « moto assoluto ». Indicava cioè un programma di indagini, estremamente interessante, per risolvere alcuni dei fondamentali problemi concernenti la nostra concezione dell'universo; in primo luogo il problema di dimostrare sperimentalmente l'effettivo moto della terra intorno al sole.

Anche questa via però doveva fallire, come dimostreranno le famose esperienze eseguite negli ultimi anni del secolo da Michelson e Morley (delle quali si parlerà nel capitolo xiv della prossima sezione). E sarà proprio questo fallimento a segnare il punto di rottura fra la meccanica classica e la meccanica relativistica.

Non occorre ormai altro, per illustrare i profondi legami fra la teoria maxwelliana dei campi e la teoria einsteiniana della relatività. Si può dire che quella costitui la premessa di questa; fornì cioè il punto di partenza da cui prese le mosse la grande rivoluzione attuata, nella fisica, fra il xix e il xx secolo.

Eppure la teoria di Maxwell non può ancora venire considerata come una teoria veramente moderna. Se è vero, infatti, che costitui una delle basi essenziali per i successivi lavori di Einstein, vero è però che questi poté giungere alla sua concezione tanto innovatrice solo con la negazione di alcuni punti basilari della teoria maxwelliana (in primo luogo col rifiuto completo dei concetti di quiete assoluta e di moto assoluto). Né va dimenticato che anche sotto altri aspetti la teoria di Maxwell entrò presto in crisi: la fine del secolo vide infatti un rapido

7
in particolare di quelli legati alla tradizione romantica (si vedano i vari capitoli della sezione vi, dedicati appunto al romanticismo). Il gravissimo colpo inferto da Maxwell alla concezione sostanzialmente newtoniana dei fenomeni elettrici e magnetici, fin allora sostenuta dalla gran maggioranza dei fisici, ebbe pertanto, agli occhi dei suoi contemporanei, un chiaro e indiscutibile significato antimeccanicistico; e ciò, a nostro parere, è un motivo sufficiente per considerarlo uno dei più importanti fattori della profonda crisi verso cui si avviò il secolare indirizzo.

Abbiamo ricordato nel vii paragrafo, valendoci all'uopo delle parole di Einstein e Infeld, che la fisica dei campi venne inizialmente accolta soprattutto come linguaggio: come « strumento volto ad agevolare la comprensione dei fenomeni dal punto di vista meccanico ». Non deve dunque stupirci se tale linguaggio fu ben presto largamente applicato anche alla teoria newtoniana della gravitazione, onde si cominciò a parlare di « campo gravitazionale » oltretutto di campi elettrici e magnetici. Col trascorrere del tempo il termine « campo » divenne di uso comune nei trattati degli astronomi, dei fisici e degli stessi ingegneri, senza però che ci si rendesse chiaro conto — nella maggioranza dei casi — delle profonde innovazioni categoriali implicate da tale nozione (sostituzione di una fisica del continuo alla vecchia fisica del discontinuo).

Sarà merito di Einstein non fermarsi all'aspetto tecnico della nuova teoria, cioè non limitarsi a cercarne formulazioni matematiche via via più rigorose e più generali. In realtà egli seppe penetrarne ad un tempo sia la grande « portata filosofica », come dimostrano le stesse citazioni da noi riferite, sia la straordinaria fecondità per la descrizione fisica del mondo (basti ricordare, a conferma di ciò, la sua famosa dichiarazione che senza la nozione di campo « sarebbe impossibile formulare la teoria della relatività generale »).

Vale la pena fare fin d'ora presente che, approfondendo il concetto di campo gravitazionale in stretta analogia con quello di campo elettromagnetico, Einstein giungerà a sostenere (nel 1918) che il campo di gravitazione si propaga in modo pressoché identico a quello delle onde elettromagnetiche (onde il termine di « onde gravitazionali » e quindi con una velocità finita. Va notato che questa tesi costituisce in certo senso il naturale sviluppo della polemica di Maxwell contro l'azione a distanza; in essa, infatti, il concetto di azione a distanza (azione che non può risultare se non istantanea) viene respinto a favore dell'azione per contiguità (la cui propagazione può invece aver luogo unicamente nel tempo) non solo — come aveva affermato Maxwell — nella trattazione dei fenomeni elettromagnetici ma perfino in quella dei fenomeni gravitazionali.

Il secondo punto, sul quale intendiamo brevemente soffermarci, concerne la nozione maxwelliana di etere, che ci porterà essa pure alle soglie della teoria della relatività. Ci sembra opportuno segnalare l'importanza che tale nozione conservò ancora in una fase del pensiero scientifico assai vicina alla nostra, proprio perché possa emergere con limpida chiarezza il profondo significato del suo definitivo abbandono all'inizio del xx secolo.

Come abbiamo detto nei paragrafi precedenti, Maxwell non abbandonò mai completamente la nozione tradizionale di etere, ma dopo averne costruito un

8 / ritorno alla fisica del discontinuo, sotto la forma di fisica dei quanti (non mai accettata da Einstein). Riservandoci di parlare di essa in altri capitoli, basti qui ricordare che la teoria dei campi dovette trasformarsi profondamente per adeguarsi alla nuova importantissima concezione; ne nacque la cosiddetta teoria quantistica dei campi (di cui tutti riconoscono oggi la straordinaria fecondità per le più raffinate ricerche atomiche e subatomiche), radicalmente diversa dalla teoria « classica » di Maxwell.