**Alle origini della relatività ristretta**

**Giovanni Battimelli**

**Il movimento nell’etere e il principio di relatività**

Quella che chiamiamo teoria della relatività ristretta si forma all’inizio del ventesimo secolo all’incrocio di una serie di situazioni problematiche in fisica, tutte in varia misura connesse al rapporto tra i domini concettuali della meccanica e dell’elettromagnetismo. Di queste, quella cui si fa quasi esclusivamente riferimento nelle narrazioni canoniche dell’emergere della relatività è la questione dell’etere; l’esigenza di ipotizzare una “sede” per i fenomeni elettrici e magnetici, in particolare per giustificare la possibilità stessa della propagazione di onde elettromagnetiche, portava ad assegnare ad un particolare sistema di riferimento (quello solidale con l’etere) uno status privilegiato, facendo riemergere sotto vesti nuove l’idea di un riferimento assoluto che la meccanica aveva abbandonato da tempo. Fenomeni elettromagnetici (e ottici, dopo la riduzione dell’ottica a capitolo dell’elettromagnetismo teorizzata da Maxwell e sanzionata da Hertz) osservati nell’etere, sede intrinseca delle interazioni elettromagnetiche, o in sistemi in moto rispetto ad esso, avrebbero così dovuto mostrare caratteristiche differenti. L’intento dichiarato dei celebri esperimenti di interferenza condotti da Albert A. Michelson, nel 1881 e poi nel 1887 in collaborazione con Edward Morley, era per l’appunto quello di mettere in evidenza l’effetto del moto della Terra attraverso l’etere previsto dalla teoria, che avrebbe dovuto manifestarsi in un osservabile spostamento delle frange di interferenza nel loro dispositivo sperimentale. Come è noto, questo tipo di esperimenti diedero sistematicamente un risultato negativo; dell’effetto previsto non si riscontrava alcuna traccia. Ed è altrettanto noto che proprio questi risultati negativi sono stati ripetutamente indicati come la fonte primaria da cui sarebbe scaturita la relatività, fino ad arrivare a sostenere che la teoria di Einstein sarebbe una conseguenza necessaria dell’esperimento di Michelson-Morley. Quale che sia la solidità di una tale conclusione sul piano epistemologico, essa si rivela comunque storiograficamente inconsistente, come ormai ampiamente provato dalla vasta letteratura sull’argomento (Miller 1981). E questo per due ordini di ragioni: perché il risultato negativo dell’esperimento aveva avuto una sua soddisfacente spiegazione all’interno della teoria lorentziana dell’etere e degli elettroni, e perché d’altra parte non risulta che esso abbia giocato un ruolo determinante nell’elaborazione del punto di vista einsteiniano.

In sostanza, il problema risiedeva nel fatto che il valore della velocità della luce nel vuoto era ovviamente supposto tale rispetto al mezzo in cui l’onda luminosa si propagava, cioè l’etere; in un sistema (quale un laboratorio collocato sulla Terra) in moto rispetto all’etere esso avrebbe dovuto cambiare, in virtù delle più elementari leggi della meccanica, ed era questa alterazione della velocità della luce nei bracci dell’interferometro che avrebbe dovuto produrre lo spostamento delle frange che al contrario non veniva osservato. Qualcuno fece immediatamente notare che tutto avveniva come se il moto dell’apparato sperimentale attraverso l’etere ne contraesse le dimensioni in modo tale da cancellare esattamente l’effetto del movimento; e il fattore di correzione necessario affinché i due effetti si compensassero esattamente era facilmente calcolabile. Il problema era piuttosto quello di fornire una spiegazione fisicamente plausibile di questa contrazione. Ed è questo quanto il fisico olandese Hendrik A. Lorentz riuscì a fare in una serie di lavori, sulla base di una congettura (che a posteriori sappiamo essere del tutto corretta) sulla natura delle forze agenti tra le molecole, forze in ultima analisi responsabili delle dimensioni dei corpi macroscopici e la cui natura era all’epoca del tutto indeterminata: se si faceva l’ipotesi che queste forze fossero riducibili a interazioni elettromagnetiche, era del tutto naturale giungere alla conclusione che il moto attraverso l’etere influenzasse la loro intensità, costringendo dunque le parti del corpo a ridistribuire le mutue posizioni di equilibrio e originando quindi un cambiamento delle dimensioni. Questo poteva essere calcolato, e il risultato forniva esattamente la contrazione lungo la direzione del moto che era stato originalmente suggerito da Fitzgerald per compensare l’effetto del “vento d’etere” e spiegare il risultato negativo degli esperimenti volti a rilevare il moto della Terra rispetto all’etere. Era dunque possibile reinterpretare il fallimento dei tentativi di localizzare sperimentalmente l’elusivo etere, non più come l’evidenza empirica della fallacia di una previsione teorica, ma al contrario come un risultato che trovava una spiegazione naturale in termini dei concetti di base di uno schema teorico in grado di incorporare e spiegare un complesso sempre più vasto di fenomeni. In questa prospettiva l’etere rimaneva saldamente in vita come supporto necessario alle azioni elettromagnetiche, ma al tempo stesso rimaneva inaccessibile all’esperienza: si accettava l’esistenza di un sistema di riferimento assoluto, conciliandolo con l’impossibilità di localizzarlo empiricamente grazie alla peculiare proprietà delle leggi della fisica, fatte in modo da rendere invisibili gli effetti del moto attraverso di esso. Il principio di relatività rimaneva così valido, sia pure con uno status ambiguo: aveva senso parlare di un movimento assoluto, ma si dimostrava che non era possibile distinguerlo osservativamente da moti rispetto ad altri sistemi di riferimento.

Da questo punto di vista, l’operazione condotta da Einstein nelle prime battute del suo celebre articolo (Einstein 1905) consiste in un sostanziale ribaltamento della prospettiva: se il mondo come lo osserviamo non mostra alcuna traccia di asimmetrie tra diversi sistemi di riferimento, assumiamo questa evidenza come principio a tutti gli effetti anziché tentare di darne una spiegazione. Il risultato di Michelson-Morley non è neanche menzionato esplicitamente; Einstein si riferisce genericamente ai “tentativi privi di successo di scoprire un qualche moto della terra relativamente al mezzo luminoso”, concludendo che tali tentativi falliti “suggeriscono che i fenomeni dell’elettromagnetismo così come quelli della meccanica non possiedono proprietà corrispondenti all’idea di quiete assoluta”. L’esempio esplicito considerato da Einstein è quello dell’effetto reciproco tra un magnete e un conduttore; mentre tutto ciò che si osserva dipende esclusivamente dal moto relativo tra i due – che origina una corrente indotta – la teoria corrente fornisce una spiegazione differente a seconda che sia il magnete a muoversi rispetto al conduttore fermo (nell’etere, beninteso) o viceversa (e non è una digressione inutile sottolineare che di questa spiegazione asimmetrica c’è ancora traccia in alcuni manuali di fisica contemporanei: l’insorgere della corrente viene ricondotta alla forza di Lorentz agente sugli elettroni del conduttore qualora sia questo a muoversi rispetto al magnete, mentre nell’altro caso il moto del magnete genera una “forza elettromotrice indotta”). E’ questa asimmetria nella spiegazione teorica, che non è giustificata da alcuna asimmetria nei fenomeni osservati, che Einstein vuole eliminare: “Innalzeremo questa congettura (il cui contenuto chiameremo d’ora in avanti “principio di relatività”) allo status di postulato, e introdurremo anche un altro postulato, solo apparentemente inconciliabile col primo, cioè che la luce si propaga nello spazio vuoto con una velocità definita c indipendente dallo stato di moto del corpo che la emette… L’introduzione di un “etere luminifero” sarà dimostrata superflua, in quanto il punto di vista qui sviluppato non richiede uno “spazio stazionario assoluto” dotato di proprietà particolari”.

**Come si misura il tempo?**

Se con l’innalzare il principio di relatività a postulato della teoria Einstein ribaltava il punto di vista corrente, con l’introduzione del secondo postulato, relativo all’invarianza della velocità della luce, compiva invece un radicale passo innovativo che nessuno dei suoi contemporanei aveva osato fare esplicitamente. Le ragioni che lo spinsero ad introdurre questo nuovo principio si possono rintracciare nel particolare percorso intellettuale da lui seguito per affrontare un altro problema che si poneva in modo urgente all’attenzione della comunità scientifica dell’epoca: la misura del tempo, o, più precisamente, la specificazione delle procedure necessarie per poter coerentemente correlare misure di intervalli temporali effettuate a distanza da osservatori in quiete o in moto relativi.

Sincronizzare orologi a distanza per poter controllare la misura di intervalli temporali, o, in modo equivalente, definire senza ambiguità la nozione di simultaneità di due eventi lontani nello spazio, per stabilire un tempo condiviso e misurabile; il problema, antico quanto quello della determinazione della longitudine, cominciava ad acquistare particolare rilevanza in un mondo in cui la disponibilità di segnali elettromagnetici consentiva di connettere luoghi assai lontani in tempi brevissimi ma pur sempre finiti, rendendo dunque la definizione rigorosa delle procedure necessarie per la sincronizzazione di orologi indifferibile e mostrandone al tempo stesso la difficoltà; nonostante l’apparente ovvietà dell’intuizione naturale del concetto di simultaneità, definirla operativamente attraverso l’invio di segnali elettromagnetici era tutt’altro che immediato, dovendo fare affidamento, per la definizione delle misure di tempo, sulla velocità finita dei segnali utilizzati, che richiedono tempo per essere scambiati. La difficoltà di uscire da questa circolarità col semplice ricorso a nozioni intuitive di durata e simultaneità era ben presente ai numerosi scienziati che si agitavano intorno al problema nei vari comitati impegnati intorno al volger del secolo nella complessa e delicata operazione di definire standard universali di misura. In modo particolare, Henri Poincaré era giunto a riconoscere in modo esplicito la necessità di un accordo convenzionale per poter dare un senso operativamente efficace alla nozione di simultaneità di due eventi e procedere quindi alla sincronizzazione di orologi a distanza; la coordinazione di misure di intervalli temporali era possibile solo ammettendo la possibilità di inviare segnali viaggianti con la stessa velocità in ogni direzione.

Come è stato efficacemente argomentato (Galison 2003) lo stesso genere di questioni era costantemente presente all’attenzione del giovane Einstein nella sua funzione di impiegato dell’ufficio brevetti di Berna: buona parte delle richieste sottoposte al suo esame critico erano per l’appunto tentativi di risolvere con mezzi tecnologici basati sull’elettromagnetismo il problema della coordinazione delle misure del tempo. La riflessione critica che portò Einstein alla revisione del concetto di tempo incorporata nella teoria della relatività, lungi dall’esserne stata ostacolata, fu invece filiazione diretta del suo lavoro di critico scrupoloso delle tecnologie che nascevano all’incrocio tra le proprietà della propagazione delle onde elettromagnetiche e la definizione di modalità non ambigue per la misura di intervalli temporali. In situazioni e da punti di vista diversi, per Poincaré ed Einstein si intrecciavano strettamente speculazione filosofica sulla natura del concetto di tempo e riflessione critica sulle procedure tecnologicamente efficaci per dare consistenza a quel concetto. Il secondo postulato richiesto da Einstein ha le sue origini in questa riflessione: se per la sincronizzazione di orologi a distanza occorre postulare la possibilità di usare segnali che viaggiano in ogni direzione con la stessa velocità, e se, avendo escluso l’esistenza di riferimenti “dotati di proprietà particolari”, questa procedura deve essere valida in qualunque sistema, non resta che assumere, a dispetto e in contraddizione con la legge classica di composizione delle velocità, l’invarianza della velocità della luce, e tirarne le conseguenze.

Le conseguenze, ricavate da Einstein nel lavoro del 1905, erano esattamente le stesse trasformazioni di coordinate cui era già pervenuto Lorentz nella sua ricerca di una soluzione al problema posto dal movimento nell’etere. L’identità formale dei risultati rischia di nascondere (e di fatto nascose per qualche tempo agli occhi dei contemporanei) la sostanziale diversità dell’impianto concettuale su cui sono basati. Un risultato particolarmente inquietante cui conducevano le nuove leggi di trasformazione era il fatto che la misura di intervalli temporali, così come quella di intervalli spaziali, risultava differente per due osservatori in moto relativo: il tempo non era più quella cosa che scorre uniformemente e in modo uguale per tutti. Mentre Lorentz aveva fornito una ben definita spiegazione fisica per la relatività delle misure di lunghezze (la contrazione dovuta al movimento nell’etere), non altrettanto riuscì a fare per le misure di durate, salvo introdurre una non chiarissima definizione di “tempo locale” (reinterpretata da Poincaré come la distorsione introdotta nelle operazioni di sincronizzazione dal fatto che un osservatore in moto rispetto all’etere deve utilizzare segnali la cui velocità, in realtà, non è la stessa in ogni direzione). Nell’ottica einsteiniana, non c’è nessuna contrazione e nessuna asimmetria: semplicemente, le procedure necessarie per la misurazione di intervalli spaziali e temporali conducono a risultati che dipendono dallo stato di moto dell’osservatore rispetto all’oggetto della misura. La corrispondenza dell’effetto teorico della dilatazione temporale con la realtà fisica rimase peraltro a lungo un problema aperto: le prime conferme sperimentali della realtà dell’effetto giunsero solo molto più tardi, verso la fine degli anni Trenta, con le prime determinazioni della vita media e dei tempi di volo dei mesoni dei raggi cosmici.

Alla data del 1905, comunque, non era questo il problema capace di attrarre più di una fugace attenzione. Anche nel lavoro di Einstein, la rivisitazione critica dei concetti di spazio e tempo appariva come un’introduzione necessaria alla questione centrale, che come recitava il titolo dell’articolo era l’elettrodinamica dei corpi in movimento. Ad agitare le acque della fisica teorica erano all’epoca soprattutto le novità emerse recentemente dai laboratori in cui una nuova generazione di fisici sperimentali stava letteralmente costruendo una nuova immagine della struttura della materia, fondata sul definitivo riconoscimento di una sua costituzione discreta a livello microscopico, di cui il concetto di elettrone stava diventando l’elemento principale. Ed è a questo contesto generale che occorre fare riferimento per collocare storicamente nella giusta prospettiva il terreno di coltura su cui nacque e con cui si dovette confrontare la novità einsteiniana.

**Un fondamento unitario per la fisica: la concezione elettromagnetica del mondo**

Per il grande pubblico gli ultimi anni del 19° secolo furono, in modo molto tangibile, l’epoca del trionfo dell’elettromagnetismo. La nuova tecnologia fondata sull’elettricità stava modificando ad un ritmo mai visto in precedenza stili di vita, modi di comunicazione e livelli di *comfort*. L’illuminazione elettrica nelle città, il telegrafo, i motori azionati dall’energia elettrica, tutto stava ad indicare lo straordinario successo ottenuto nel mondo reale grazie all’applicazione del mondo di carta delle teorie dei fisici. L’antica battuta attribuita a Faraday in risposta a Gladstone, che lo interrogava sull’utilità delle sue ricerche sui fenomeni magnetici (“Non so a quali risultati pratici porteranno, ma sono pronto a scommettere che tra qualche anno ci metterete una tassa sopra”) si rivelava fondata oltre ogni ragionevole aspettativa.

I fisici avevano motivi più profondi per guardare con soddisfazione all’elettromagnetismo, al di là dell’innegabile utilità delle sue applicazioni. Nel quadro generale della conoscenza le varie teorie dell’elettricità e del magnetismo avevano rivelato nel corso del secolo una singolare capacità di integrarsi le une con le altre, e di fornire così una chiave unificata per decifrare i misteri della natura, crescendo tanto in estensione quanto in profondità. Il coronamento di questo processo, realizzato dall’opera di Maxwell con l’unificazione sotto un unico compatto schema formale dei fenomeni elettrici e magnetici, si era appena rivelato il punto di partenza per una ulteriore estensione, dimostrando che la luce non era altro che una proprietà del campo elettromagnetico, nascosta nelle equazioni che ne descrivevano il comportamento. L’ottica era così ridotta ad una branca di quella che si configurava sempre più come una descrizione unificata del mondo fisico. I fisici cominciarono a sognare una unificazione generale dell’intera fisica sotto il segno dell’elettromagnetismo. Si faceva gradualmente strada la convinzione che il suo vero valore non risiedesse principalmente nella praticità e comodità dei risultati derivanti dalle sue applicazioni quanto dalla prospettiva di una radicale revisione degli stessi fondamenti della conoscenza fisica, che avrebbe portato ad una descrizione unificata fondata esclusivamente sui concetti dell’elettromagnetismo. Era un programma di ricerca che implicava il ribaltamento dello statuto fondazionale della meccanica per la scienza naturale; stimolati dal crescente successo del loro campo di ricerca favorito, alcuni fisici cominciarono a studiare, nelle parole di Wilhelm Wien, “la possibilità di un fondamento elettromagnetico per la meccanica” (Wien 1900).

Nel 1900, quando Wien formulò la sua ambiziosa proposta, l’idea non era affatto così folle come potrebbe apparire a prima vista. Si stavano accumulando indizi promettenti sulla possibilità di individuare qualche forma di connessione tra le proprietà elettriche e meccaniche di corpi carichi in moto. Avanzata all’inizio come una pura congettura speculativa, l’idea che una particella carica avrebbe potuto mostrare un’inerzia di origine elettromagnetica aveva gradualmente preso consistenza a seguito della scoperta dell’elettrone e della elaborazione di modelli teorici dettagliati per la sua struttura. Come era stato notato già da tempo da colui che avrebbe più tardi scoperto l’elettrone (Thomson 1881), per accelerare una particella carica è necessario spendere più lavoro di quanto sarebbe strettamente richiesto dalla meccanica, per fornire l’energia associata all’intensità del campo elettromagnetico prodotto dall’aumento della sua velocità. Le particelle cariche dunque si comporterebbero a tutti gli effetti come se, oltre alla loro massa “vera”, meccanica, fossero dotate di una ulteriore massa “apparente” di origine elettromagnetica. I calcoli mostravano che questa inerzia supplementare era funzione della velocità della particella; i dettagli cambiavano leggermente a seconda del particolare modello adottato per la struttura dell’elettrone, ma tutte le formule indicavano, al crescere della velocità, un marcato aumento della massa, che diventava infinita quando la particella si avvicinava alla velocità della luce.

Misure accurate del rapporto e/m di elettroni di differenti energie avrebbero dunque consentito di rispondere alla domanda su quanta parte della massa dell’elettrone fosse “reale” e quanta solamente “apparente”. O almeno, avrebbero potuto farlo in linea di principio: per ottenere risultati affidabili era necessaria una sorgente di elettroni davvero veloci, dato che la dipendenza della massa elettromagnetica dalla velocità diventava sensibile solo a velocità molto elevate. I tubi a vuoto di Thomson e i loro simili fornivano agli sperimentali fasci di elettroni di energia troppo bassa per consentire di rivelare l’effetto. Bastò tuttavia attendere solo pochi mesi perché la scoperta accidentale della radioattività risolvesse il problema: fu presto chiarito che i raggi beta emessi dalle sostanze radioattive erano le stesse particelle osservate da Thomson, ma molto più energetiche, dotate di velocità abbastanza vicine a quella della luce da trasformare quello che era un puro esperimento ideale in una concreta possibilità. Tra gli altri, Walter Kaufmann a Gottingen lavorò intensamente al problema nei primi anni del nuovo secolo, effettuando una serie di raffinate misure con crescente accuratezza. Nel 1903 aveva raggiunto sufficiente fiducia nella affidabilità dei suoi dati da sbilanciarsi in una conclusione definitiva: gli esperimenti mostravano al di là di ogni ragionevole dubbio che non c’era alcuna traccia di una massa “reale”. L’inerzia era solo “apparente”, una mera conseguenza della sola “vera” proprietà dei corpi, la carica elettrica. La materia si era dissolta. Il concetto alla base della meccanica era stato ridotto ad un fondamento elettromagnetico. Sembrava a portata di mano la realizzazione del progetto di una unificazione definitiva, che lo stesso Kaufmann aveva avanzato solo un paio di anni prima: “E qui tocchiamo una questione che riguarda profondamente la struttura della materia in generale. Se un atomo di elettricità, solo in virtù delle sue proprietà elettrostatiche, si comporta come una particella dotata di inerzia, non è allora possibile considerare tutte le masse come solo apparenti? Non potremmo, invece degli sterili sforzi di ridurre i fenomeni elettrici alla meccanica, tentare il processo inverso e ridurre i principi meccanici a elettrici?” (Kaufmann 1901).

L’evidenza fornita da questi risultati della dinamica dell’elettrone dava un forte supporto alle aspirazioni dei sostenitori della concezione elettromagnetica del mondo, ulteriormente incoraggiati nel loro entusiasmo dall’opinione di alcune delle figure principali della fisica teorica. Hendrik A. Lorentz, l’autorità riconosciuta nel campo della teoria dell’elettrone, concordò sul fatto che “la cosa migliore sarà accettare la conclusione di Kaufmann per cui gli elettroni negativi non hanno affatto massa materiale. Questo è certamente uno dei più importanti risultati della fisica moderna” (Lorentz 1909). Sia pure con toni più cauti, anche il grande Henri Poincaré considerava la dinamica dell’elettrone un settore di ricerca che stava costringendo ad una revisione dei fondamenti di base della meccanica: “Da tutti questi risultati, se saranno confermati, sorgerà una meccanica interamente nuova, che sarà soprattutto caratterizzata dal fatto che nessuna velocità potrà superare quella della luce” (Poincaré 1905a).

A differenza di Poincaré, Lorentz aveva dato il suo personale contributo all’unificazione elettromagnetica della fisica. Nel 1900 aveva preso in considerazione la possibilità di una riduzione delle interazioni gravitazionali a quelle elettromagnetiche, un programma chiaramente in sintonia con l’indirizzo generale dell’epoca. Da queste speculazioni non era scaturito nulla di rilevante, ma un risultato molto più interessante era derivato, come si è visto in precedenza, dalla sua lunga lotta per dare un fondamento fisico alle equazioni di trasformazione per sistemi di cariche in differenti sistemi di riferimento, cui aveva lavorato fin dal 1892 e che lo aveva portato nel 1904 ad ottenere finalmente una soddisfacente derivazione delle trasformazioni che ancora portano il suo nome, dimostrando che la contrazione della lunghezza di un corpo in moto attraverso l’etere era una necessaria conseguenza delle equazioni dell’elettromagnetismo.

**La dinamica dell’elettrone**

Attraverso i loro prolungati sforzi di risolvere i paradossi posti dall’esistenza di uno speciale sistema di riferimento così elusivo da rendere impossibile l’individuazione della sua esistenza (esistenza, d’altra parte, che doveva essere postulata sulla base di solide argomentazioni fisiche), Lorentz e Poincaré crearono così un nodo di problemi in cui la dinamica dell’elettrone si intrecciava con la questione dello status del principio di relatività, inteso, secondo la definizione di Poincaré, come “l’impossibilità di rivelare il movimento assoluto” (Poincaré 1905b). Le proprietà delle particelle in movimento e le proprietà dello spazio e del tempo in cui il movimento avveniva componevano insieme i pezzi di un più complesso puzzle teorico. Ciascuno nel suo modo caratteristico (e dando diverse priorità ai differenti aspetti del puzzle) Lorentz, Poincaré e finalmente Einstein spostarono gradualmente il centro dell’attenzione dalla struttura della materia al problema del tempo: Lorentz con la creazione del concetto di “tempo locale” che emergeva dalle sue trasformazioni, senza però sapere come attribuirgli un significato fisico, Poincaré riflettendo sulla natura convenzionale dell’idea di simultaneità, Einstein asserendo il carattere universale del segnale necessario per dare significato alle misure di spazio e tempo – e dichiarando, nel far questo, il carattere superfluo del concetto di etere. Tuttavia, il problema della misura del tempo, e quello ad esso collegato della relatività, non costituiva il principale oggetto di attenzione per la maggior parte dei ricercatori attivi in questo settore di frontiera della fisica. Certo, la rivoluzione era nell’aria, ma sembrava legata piuttosto al raggiungimento del nuovo fondamento unitario offerto dal programma elettromagnetico. La dinamica dell’elettrone era il punto chiave intorno a cui ruotava la realizzabilità del programma:

“Già tutta l’ottica, non solo dell’etere, ma anche della materia, riceve un’interpretazione immediata, che la meccanica si è mostrata incapace di fornire, e la stessa meccanica è ora considerata come una prima approssimazione, largamente sufficiente in tutti i casi di movimento della materia in blocco, ma che richiede comunque per una completa espressione il ricorso alla dinamica dell’elettrone. Il concetto di elettrone, che oggi siamo in grado di afferrare individualmente con l’esperienza, che costituisce il legame tra l’etere e la materia, composta da aggregati di elettroni, ha conosciuto in pochi anni un’immenso sviluppo, al punto di rompere i limiti della vecchia fisica e rovesciare l’ordine stabilito delle leggi e dei concetti, portando verso un’organizzazione che si può prevedere semplice, armoniosa e feconda” (Langevin 1905).

L’”immenso sviluppo” cui si riferiva Langevin aveva prodotto tra altri risultati una varietà di modelli per la struttura dell’elettrone, da cui derivavano espressioni leggermente diverse per la dipendenza della sua massa dalla velocità. Il teorico di Gottingen Max Abraham, che condivideva con Kaufmann affiliazione accademica e entusiasmo senza riserve per il programma elettromagnetico, aveva ottenuto una formula basata sul suo modello di elettrone, pensato come una densità di carica superficiale distribuita uniformemente su una superficie sferica, la cui stabilità veniva assunta come postulato. Quello di Abraham era il modello di una perfetta teoria puramente elettromagnetica, che conduceva a previsioni differenti da quelle fornite dal modello di elettrone di Lorentz, rivisto nel 1904. La teoria di Lorentz richiedeva che l’elettrone in moto nell’etere andasse soggetto alle deformazioni richieste dalla validità generale delle sue trasformazioni. Questa condizione portava ad una espressione per la massa elettromagnetica che differiva, anche se in modo quasi impercettibile, da quella di Abraham; e, cosa più importante, rendeva necessaria l’introduzione di qualche forma di azione fisica per garantire la stabilità dell’elettrone e impedirgli di esplodere a causa della repulsione elettrostatica. La stabilità dell’elettrone rigido di Abraham poteva essere postulata; la stabilità di un elettrone deformabile richiedeva una spiegazione. Poincaré diede il tocco finale a questo modello di elettrone nel 1905, fondendo insieme la dinamica dell’elettrone di Lorentz e il suo approccio al problema della relatività:

“Io mostro… che si ottiene una compensazione totale, se supponiamo che l’inerzia è un fenomeno esclusivamente elettromagnetico, come viene generalmente ritenuto dopo gli esperimenti di Kaufmann, e che, a parte la pressione costante di cui parlerò e che agisce sull’elettrone, tutte le forze sono di origine elettromagnetica. Si ha in questo modo la prova dell’impossibilità di mostrare il moto assoluto e della contrazione di tutti i corpi lungo la direzione del moto della Terra” (Poincaré 1906).

A dispetto dell’insistenza di Poincaré sul fondamento elettromagnetico del suo modello, la “pressione costante” esercitata sull’elettrone per garantirne la stabilità era una grave pecca che non poteva essere tollerata dai sostenitori di un approccio puramente elettromagnetico. L’accettazione di un concetto simile minava alla base l’idea stessa di una completa riduzione della fisica ad un fondamento elettromagnetico. E’ da notare che in quello stesso 1905, nel lavoro sull’elettrodinamica dei corpi in movimento, Einstein ricavò un’espressione per la massa dell’elettrone identica a quella di Lorentz, ottenendola come un caso particolare delle proprietà dinamiche richieste dalla sua nuova cinematica, senza alcun riferimento a ipotesi specifiche sulla struttura del corpo in movimento. Non stupisce, considerato che il lavoro di Einstein circolò inizialmente in un ambiente che guardava all’unificazione elettromagnetica come alla questione principale sul tappeto, che il suo nome fu associato a quello di Lorentz per indicare una teoria “meccanico-relativistica di Lorentz-Einstein”, vista come un contributo dal sapore piuttosto retrogrado.

Nel 1906 il progetto di una teoria elettromagnetica unificata sembrò guadagnare un punto decisivo quando Kaufmann pubblicò i risultati di una nuova serie di misure, effettuate con l’esplicito obiettivo di discriminare tra le diverse previsioni sulla massa dell’elettrone fornite dalle teorie rivali di Abraham e di Lorentz-Einstein. Sintetizzando le conclusioni che potevano essere tratte dalle sue ricerche, Kaufmann asseriva: ”i risultati delle misure non sono compatibili con le ipotesi fondamentali di Lorentz-Einstein” (Kaufmann 1906).

A difendere il principio di relatività intervenne Max Planck, che con un esame scrupoloso di tutti i dettagli rilevanti del lavoro sperimentale appena completato a Gottingen provò che Kaufmann aveva sovrastimato l’accuratezza e l’affidabilità dei suoi dati, saltando troppo rapidamente a conclusioni che non sembravano così forti come aveva ritenuto. Lo scambio di commenti che seguì la presentazione di Planck, fatta all’annuale congresso degli scienziati tedeschi nello stesso 1906, mostrò chiaramente che oggetto della discussione non era tanto una questione di accuratezza sperimentale e evidenza empirica, quanto, sopra tutto e più generalmente, un conflitto tra punti di vista diversi e apparentemente inconciliabili sui fondamenti della fisica. Abraham enunciò il problema in termini molto chiari:

“Il punto di partenza era la domanda, se la massa dell’elettrone sia o meno una quantità puramente elettromagnetica… l’elettrone di Lorentz possiede anche, oltre all’energia elettromagnetica, un altro tipo di energia potenziale interna. Secondo la teoria relativistica, dunque, i raggi catodici non sarebbero oggetti puramente elettromagnetici, ma oggetti che l’elettrodinamica non sarebbe sufficiente a spiegare” (Planck 1906).

Planck concordava su questo, lasciando la scelta tra modelli in competizione, in assenza di un’evidenza empirica decisiva, a una questione di gusti personali: “I due postulati, a quanto pare, sono incompatibili, e sorge il problema di quale preferire. Per dirla francamente, a me piace più quello di Lorentz”. E Arnold Sommerfeld aveva pochi dubbi su quale fosse quello dei due punti di vista che meglio interpretava il vento nuovo che stava rinfrescando la fisica teorica: “Nella questione di principio sollevata da Herr Planck si potrebbe sostenere che chi ha meno di quarant’anni sceglierà il postulato elettrodinamico, e chi ne ha di più opterà per quello meccanico-relativistico. Io preferisco il postulato elettrodinamico”.

**Le tracce della storia**

Sommerfeld non impiegò molto tempo a cambiare idea (e a contraddirsi): già nel 1907, all’età di trentanove anni, si schierò in favore della relatività. Le cose si muovevano in fretta nella fisica teorica. Sotto la pressione di un intero nuovo mondo di evidenza empirica che emergeva dai laboratori grazie a una tecnologia sperimentale sempre più raffinata, nuovi modelli, linguaggi e schemi concettuali apparivano e, talvolta, venivano abbandonati. Il programma di una unificazione dell’intera fisica su una base esclusivamente elettromagnetica conobbe il suo destino e finì abbastanza rapidamente nel cestino delle costruzioni teoriche abbandonate e delle idee antiquate.

Non del tutto, però. Quella che oggi chiamiamo teoria speciale della relatività non emerse tutta di un colpo in un solo blocco elegante dal lavoro fondante di Einstein del 1905. L’articolo di Einstein, dopotutto, aveva come oggetto l’elettrodinamica dei corpi in movimento; la riflessione introduttiva sulla misura del tempo veniva sfruttata per un ulteriore studio delle proprietà di trasformazione del campo elettromagnetico e della dinamica dell’elettrone. In questo modo risultati già consolidati erano ottenuti da una prospettiva radicalmente diversa, mentre l’attenzione si spostava dalla struttura della materia in movimento alle proprietà dello spazio e del tempo in cui il movimento si svolgeva. Tuttavia, una dinamica relativistica pienamente sviluppata era ancora di là da venire. La sua formulazione finale, e il suo consolidamento nella versione canonica che è diventata il paradigma per una nuova generazione di fisici, ha richiesto gli sforzi prolungati di non pochi individui per non pochi anni. Dai primi sforzi di Planck per chiarire i fondamenti della teoria e preservarla da verdetti sperimentali apparentemente contrari ma in realtà di dubbia solidità, passando per la confezione da parte di Minkowski di eleganti abiti formali, fino alle prime presentazioni da manuale da parte di von Laue in Germania e di Lewis e Tolman negli stati Uniti, fu un complesso lavoro di svariati attori, che non volevano dire tutti esattamente la stessa cosa, che cercavano talvolta di trasmettere lo stesso significato fisico usando differenti linguaggi, mentre altre volte chiamavano con gli stessi nomi e incorporavano negli stessi formalismi costrutti concettuali differenti.

In questo processo, il vecchio sogno di una teoria finale basata esclusivamente su concetti elettromagnetici si spense lentamente e alla fine scomparve, cancellato dalla formazione di una più profonda comprensione della struttura della materia, che portò all’attenzione della ricerca nuove interazioni, nuovi meccanismi fisici e nuovi linguaggi formali per parlarne adeguatamente. Ma pezzi del vecchio modo di pensare sopravvissero a questo processo, e trovarono una loro collocazione nel nuovo linguaggio emergente. Noi continuiamo a discutere, e ad insegnare, la “contrazione di Lorentz”, e le parole che usiamo trasmettono con forza l’idea di una sorta di “accorciamento” di un oggetto in movimento, suggerendo così, se non imponendo, una rappresentazione mentale del fenomeno non diversa da quella originariamente proposta dal fisico olandese, che è sostanzialmente diversa dalla nozione propriamente relativistica di lunghezza, intesa come una proprietà il cui carattere relativo deriva da un ben definito processo di misura nello spazio e nel tempo. Ed è ancora largamente diffusa nelle presentazioni canoniche della teoria (anche se sta gradualmente scomparendo nelle trattazioni più avanzate) la nozione di “massa relativistica” dipendente dalla velocità, un residuo della antica concezione dell’inerzia elettromagnetica delle particelle cariche difesa dai sostenitori del programma elettromagnetico, nozione che è sopravvissuta al destino del quadro concettuale generale entro cui fu partorita e che, attraverso lo strumento della somiglianza formale, si è costruita, e ha mantenuto a lungo, un posto nella nuova fisica. Si direbbe che la storia ha la sua inerzia, e che ne possiamo individuare le tracce, anche a distanza di un secolo, nei discorsi fuori dal tempo dei manuali di fisica, nei nostri linguaggi e rappresentazioni.

Einstein A. (1905), *Zur Elektrodynamik bewegter Korper*, in “Annalen der Physik” **17**, 891.

Galison P. (2003), *Einstein’s Clocks, Poincaré’s Maps. Empires of Time*, Norton and C., New York.

Kaufmann W. (1901), *Die magnetische und elektrische Ablenkbarkeit der Becquerelstrahlen und die scheinbare Masse der Elektronen*, in “Nachrichtungen der Gesellschaft fur Wissenschaften in Gottingen” **2**, 143.

Kaufmann W. (1906), *Uber die Konstitution des Elektrons*, in “Annalen der Physik” **19**, 487.

Langevin P. (1905), *La physique des électrons*, in “Revue génerale des Sciences” **16**, 257.

Lorentz H.A. (1909), *The Theory of Electrons*, Teubner, Leipzig, cit. p. 43.

Miller A. (1981), *Albert Einstein’s Special Theory of Relativity: Emergence (1905) and Early Interpretation (1905-1911)*, Addison-Wesley, Reading.

Planck M. (1906), *Die Kaufmannschen Messungen der Ablenkbarkeit der -Strahlen in ihrer Bedeutung fur die Dynamik der Elektronen*, in “Physikalische Zeitschrift” **7**, 753. In appendice è riportata la discussione che seguì la presentazione di Planck, con l’intervento di Abraham e i successivi di Planck e Sommerfeld.

Poincaré H. (1905a), *The Principles of Mathematical Physics*, in “Monist” **15**, 1 (conferenza tenuta all’International Congress of Sciences and Arts, St. Louis, settembre 1904).

Poincaré H. (1905b), *Sur la dynamique de l’électron*, in “Comptes Rendus hebdomadaires des Séances de l’Académie des Sciences de Paris” **140**, 1504.

Poincaré H. (1906), *Sur la dynamique de l’électron*, in “Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo” **21**, 129.

Thomson J.J. (1881), *On the electric and magnetic effects produced by the motion of electrified bodies*, in “Philosophical Magazine” **11**, 229.

Wien W. (1900), *Uber die Moglichkeit einer elektromagnetischen Begrundung der Mechanik*, in “Archives Néerlandaises des Sciences” 2° ser., **5**, 96.