

J. Renn, *La rivoluzione della relatività vista dalla prospettiva dell'epistemologia storica*, Atti del XXV Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell'Astronomia, Milano, 10-12 novembre 2005, (Milano: SISFA, 2008): R3.1-R3.11.

LA RIVOLUZIONE DELLA RELATIVITÀ VISTA DALLA PROSPETTIVA DELL'EPISTEMOLOGIA STORICA¹

JÜRGEN RENN

1. INTRODUZIONE

La rivoluzione della relatività è particolarmente adatta per analizzare il vero significato di ciò che è una rivoluzione scientifica. Questo genere d'analisi è un compito tipico della storia della scienza, mentre un'altra funzione di questa disciplina è quella di sfatare miti. Questa funzione sembra essere particolarmente necessaria proprio nell'anno di Einstein, che inevitabilmente contribuisce a gonfiare il mito di un Einstein "genio solitario" che piace a tutti, ma che pochi sembrano comprendere veramente.

La scienza di Einstein non era e non è in alcun modo esoterica e ha avuto ripercussioni ben oltre la fisica, proprio in quanto i suoi concetti svolgono un ruolo nella vita quotidiana. Lo psicologo svizzero Jean Piaget, che ha dedicato le sue ricerche alla psicologia infantile, fu stimolato dall'analisi di Einstein dei concetti di spazio e tempo quando intraprese i propri studi rivoluzionari sulla nascita di tali concetti nell'ontogenesi. Nel campo della psicologia Piaget ha confermato il punto di vista di Einstein secondo il quale i concetti di spazio e tempo non sono semplicemente elaborati a priori, ma sono il risultato di una impegnativa costruzione evolutiva.

La ridefinizione einsteiniana dei concetti di spazio e tempo è uno dei risultati della rivoluzione della relatività dello stesso Einstein: prima con la formulazione della teoria della relatività speciale nel 1905 e poi con quella della relatività generale nel 1915.

Per trattare il tema della rivoluzione della relatività verrà prima fornita un'introduzione bibliografica. In seguito verrà analizzato l'*annus mirabilis* di Einstein, il 1905, anche in riferimento ai suoi contesti storici. Infine si procederà fino alla nascita della teoria della relatività generale.

¹ Una versione inglese di questo articolo è apparsa su *Isis*, 2004, 95: 640-648. Per una bibliografia dettagliata si prendano in considerazione i seguenti testi: Renn, Jürgen (ed.) (2007). *The Genesis of General Relativity* (4 volumes) (Dordrecht: Springer, 2007). Renn, Jürgen (2006). *Auf den Schultern von Riesen und Zwerge: Einsteins unvollendete Revolution* (Weinheim: Wiley-VCH, 2006).

2. ACCENNI BIOGRAFICI

Einstein è stato una figura politica fondamentale del ventesimo secolo. Emigrato per fuggire il nazionalsocialismo tedesco, l'Einstein politico non esitò ad alzare la voce contro le repressioni delle minoranze e la proliferazione delle armi di distruzione di massa durante la sua intera vita. Einstein era inoltre ben cosciente della relazione ambivalente che il suo paese d'origine e i suoi abitanti avevano nei suoi confronti:

Per loro io sono un fiore fetido e loro mi rimangono ancora attaccati come fossi un fiore da mettere all'occhiello.

Notevole è il fatto che l'Einstein, *homo politicus*, era in grado, come spesso nel suo pensiero scientifico, di accettare sfide senza derive ideologiche. Sebbene egli fosse un pacifista ardente, accettò di incoraggiare il presidente Roosevelt ad adottare misure contro il pericolo di una bomba nazista. Ma come giunse Einstein a divenire questa figura fondamentale del ventesimo secolo partendo dal suo lavoro specialistico nell'ambito della fisica? Quando si cerca di capire la natura delle rivoluzioni scientifiche di Einstein occorre prima di tutto tener presente che egli non era nato vecchio. Prima di passare all'analisi epistemologica, risulteranno rilevanti alcuni commenti al contesto storico in cui Einstein ha vissuto.

La sua famiglia possedeva una fabbrica elettrotecnica presso la quale il giovane Einstein ebbe l'opportunità di entrare in contatto con lo sviluppo tecnologico del suo tempo. Una prima introduzione alla scienza la ricevette da suo zio, lo studente di medicina Max Talmey, che visitava regolarmente la famiglia Einstein. Talmey introdusse il giovane Einstein alla letteratura popolare scientifica e filosofica, come, ad esempio, il lavoro enciclopedico di Bernstein, il quale, sfidando ogni chiusura mentale dovuta alle specializzazioni e suggerendo una prospettiva internazionalista della scienza, gli fornì una panoramica sulla scienza contemporanea. Idee come uno dei primi esperimenti mentali di Einstein circa il movimento di un raggio di luce, erano probabilmente stimulate dalla lettura di quei famosi libri di Bernstein.

Ma simili idee speculative non rappresentano nessuna garanzia per il sopravvenire di una rivoluzione scientifica. Einstein dovette prima apprendere lo stato dell'arte delle scienze naturali, cosa che avvenne al Politecnico di Zurigo. Einstein amava lavorare nel laboratorio ed era in tutto e per tutto piuttosto un autodidatta che un alunno diligente che seguiva le lezioni dei suoi professori.

Senza l'aiuto degli appunti del suo compagno di scuola Marcel Grossmann non avrebbe forse superato gli esami. Fu inoltre Grossmann che l'aiutò sia ad ottenere in seguito il posto all'ufficio brevetti di Berna sia ad utilizzare il formalismo matematico della teoria relatività generale, come verrà mostrato in seguito. A Berna Einstein fondò "L'Accademia Olimpia", dove lesse con i suoi amici una vasta gamma di opere letterarie e filosofiche che lo resero consapevole del carattere costruttivo dei concetti scientifici quali lo spazio e il tempo.

Ma come permise questo tipo di preparazione scientifica al 26enne, impiegato dell'ufficio brevetti, di compiere una rivoluzione scientifica nel 1905? E da cosa è costituita esattamente questa rivoluzione?

3. L'ANNUS MIRABILIS DI EINSTEIN

Uno degli indizi per capire questa rivoluzione sono le prime lettere di Einstein. Una fonte chiave è la lettera che Einstein scrisse nella primavera del 1905 al suo compagno Conrad Habicht, membro dell'Accademia Olimpia, nella quale egli presenta all'amico i quattro maggiori articoli scientifici che stava preparando. Einstein inizia la lettera con questa domanda:

Allora, come ti butta, balena ghiacciata, pezzo d'anima affumicata, secca, inscatolata, o qualsiasi cosa io voglia lanciare alla tua testa, ripieno come sono di 70 per cento di collera e 30 per cento di pietà?

Circa il suo primo articolo scientifico – l'articolo sui quanti di luce – Einstein scrive:

L'articolo tratta la radiazione e le proprietà energetiche della luce ed è molto rivoluzionario...

La definizione dell'articolo come "rivoluzionario" è dovuta al fatto che Einstein osa sfidare la ormai ben affermata teoria ondulatoria della luce, basata sull'idea che le radiazioni elettromagnetiche sono trasportate da un etere che pervade ogni dove. Einstein invece suggerisce che in certe circostanze la luce si comporta come un fascio di particelle la cui energia è funzione del colore della luce. Nel suo articolo dimostra per prima cosa che la teoria classica non può portare a un equilibrio termodinamico stabile tra materia e luce. Poi introduce la sua famosa ipotesi sui quanti di luce in collegamento con la formula di Wien per la distribuzione energetica della radiazione termica, benché la formula di Wien fosse stata in verità respinta da esperimenti che avevano piuttosto confermato la legge radioattiva di Planck.

L'accordo tra le due leggi di distribuzione nell'ambito delle alte frequenze era sufficiente tuttavia per garantire l'uso dell'ipotesi dei quanti di luce appunto in quel regime. Probabilmente Einstein aveva inventato l'ipotesi dei quanti di luce nel momento in cui ancora credeva che la legge di Wien fosse quella corretta e continuò quindi ad usarla per interpretare il regime di Wien della legge di radiazione di Planck. Einstein fu dunque il primo ad accorgersi che la legge di Planck costituiva una cesura con la fisica classica che rendeva necessaria l'attribuzione di entrambe le proprietà – discreta e ondulatoria – alla luce.

Sebbene Einstein usasse l'ipotesi dei quanti di luce per interpretare fenomeni enigmatici, che rappresentavano un problema per la teoria ondulatoria, quale l'effetto fotoelettrico, in cui l'energia degli elettroni espulsi da un piano metallico dipende dal colore della luce e non dalla sua intensità, dovettero trascorrere più di due decenni prima che il quanto di luce fosse preso seriamente in considerazione dalla comunità scientifica, mentre Einstein vinse il Premio Nobel nel 1921 per la sua spiegazione dell'effetto fotoelettrico.

L'articolo successivo, che Einstein annunciò a Habicht, era la sua dissertazione di dottorato. Egli scrisse:

Il secondo articolo è una determinazione delle vere dimensioni degli atomi a partire dalla diffusione e dalla viscosità delle soluzioni diluite di sostanze neutrali.

Poi annuncia il suo articolo sul moto browniano, un altro articolo rivoluzionario in quanto fornì prove cruciali per l'esistenza degli atomi, una questione ancora considerata controversa. Einstein scrive:

Il terzo [articolo] prova che, presupponendo la teoria molecolare del calore, i corpi dell'ordine di grandezza $1/1000$ mm, sospesi nei liquidi, devono eseguire un moto casuale osservabile che è prodotto da un moto termico.

In verità il moto browniano era conosciuto da circa un secolo. L'idea chiave di Einstein, che rese possibile la svolta rivoluzionaria, era l'interpretazione del moto irregolare di particelle sospese non in termini di un moto continuo con una velocità

ben definita in ogni punto, ma piuttosto come un processo stocastico controllato da una legge di probabilità.

Come nel caso del suo articolo relativo ai quanti di luce, Einstein prese come punto di partenza un risultato precedentemente raggiunto, conferendogli un'altra interpretazione. Nel caso del suo articolo sui quanti di luce, questo risultato precedentemente stabilito era la legge di radiazione di Planck. Nel caso del moto browniano si trattava dell'equazione di diffusione di Fick, che Einstein reinterpretò come conseguenza dal fatto che il moto browniano è un processo elementare statistico che dà origine al fenomeno visibile della diffusione.

Ai tempi in cui Einstein scrisse ad Habicht, l'articolo sulla relatività era ancora in preparazione. Egli scrisse:

Il quarto articolo è solamente una bozza, è un'elettrodinamica dei corpi in movimento che impiega una modificazione della teoria dello spazio e del tempo;

A beneficio di Habicht, che non era un professionista, Einstein modestamente aggiunse:

La parte esclusivamente cinematica di questo articolo ti interesserà sicuramente.

In ogni caso l'ondata di svolte rivoluzionarie non era ancora finita.

In una lettera scritta ad Habicht più di un anno dopo, Einstein scrisse a proposito di un'altra conseguenza del suo lavoro sull'elettrodinamica dei corpi in movimento: $E = mc^2$, una formula che, come egli stesso spiega, sostiene che la massa sia una misura diretta dell'energia contenuta in un corpo e che anche la luce trasporti massa con sé stessa.

Proprio come per le altre svolte rivoluzionarie di Einstein, la teoria della relatività speciale emerse da un precedente risultato della fisica classica, l'elettrodinamica dei corpi in movimento sviluppata da Lorentz, una teoria che era in grado di spiegare tutti i fenomeni più importanti, ma che era basata sull'idea di un etere diffuso ovunque.

L'etere dovrebbe offrire un sistema privilegiato di riferimento per i corpi in movimento attraverso esso – in netto contrasto con il principio di relatività della meccanica classica. Tuttavia risultò impossibile individuare tale moto tramite esperimenti, una circostanza che, almeno nella mente di Einstein, fornì argomenti a favore di un'estensione del principio di relatività all'elettrodinamica. Inoltre, il suo lavoro sulla radiazione termica e sul quanto di luce lo aveva convinto che un etere, come quello assunto da Lorentz, non avrebbe prodotto un equilibrio termico stabile tra materia e radiazione.

Einstein si trovava in una posizione incerta: la teoria di Lorentz sembrava inattaccabile, ma il suo assetto concettuale di base, l'etere, era insostenibile. Alla struttura della teoria di Lorentz Einstein dunque applicò lo stesso metodo utilizzato prima per la teoria della radiazione di Planck, la teoria cinetica del calore, e la teoria della diffusione: reinterpretò i risultati dalla sua prospettiva. Si può denominare "copernicano" questo processo, grazie all'analogia con il passaggio dal sistema terrestre tolemaico a quello copernicano. In tale passaggio la struttura deduttiva di una vecchia teoria viene per lo più preservata, mentre la sua semantica fisica cambia, come può essere illustrato con l'esempio della variabile ausiliare di Lorentz per il tempo locale in un sistema di riferimento in movimento. Questa variabile ausiliare rappresentava originariamente un aspetto secondario della teoria, ma poi fu reinterpretata da Einstein come tempo effettivamente misurato da orologi in un sistema di riferimento in movimento, affidando in questo modo alla variabile

ausiliare un ruolo centrale nella nuova struttura cinematica stabilita dalla relatività speciale.

4. NOVITÀ

La rivoluzione della relatività era tutt'altro che conclusa nel 1905, dopo che Einstein ebbe pubblicato il suo innovativo articolo sull'elettrodinamica dei corpi in movimento.

Secondo la struttura di questa teoria, le interazioni fisiche non possono propagarsi più velocemente della luce e perciò la ben stabilita teoria gravitazionale di Newton, che suppone un'azione istantanea a distanza, non era più accettabile dopo il 1905. La rivoluzione della relatività si concluse solo quando anche questo conflitto teorico venne risolto dieci anni più tardi, nel novembre del 1915, grazie alla formulazione della teoria della relatività generale.

Ricerche recenti sulla rivoluzione della relatività hanno cambiato radicalmente non solo l'immagine che noi abbiamo di Einstein, ma anche il modo di concepire le strutture di una rivoluzione scientifica. Einstein non appare più come pioniere solitario della fisica del ventesimo secolo, ma piuttosto come colui che ha completato la fisica classica sradicandone le fondamenta. Una rivoluzione scientifica assomiglia più a un lento processo geologico che a una drammatica ondata di novità, dal momento che ciò che sembra aprire una nuova via in un istante è in realtà conseguenza di un lungo processo temporale. Ad Einstein è capitato di scalare il vulcano, quando questi finalmente eruttò.

Tutte le innovazioni di Einstein del 1905 erano, come abbiamo visto, basate su conclusioni precedenti provenienti dalla fisica classica, quali il lavoro di Hendrik Antoon Lorentz, il lavoro di Max Planck, ma anche quello Wilhelm Wien sulla radiazione termica, e il lavoro di Ludwig Boltzmann sulla teoria cinetica del calore. Evidentemente la percezione da "non-esperto" di Einstein così come il suo sostegno giovanile alle idee atomistiche, gli permisero di attivare potenziali nascosti della fisica altamente specializzata del diciannovesimo secolo, potenziali che comunque anche altri quali Henri Poincaré, Paul Ehrenfest e Marian von Smoluchowski avevano esposto o stavano per farlo.

La relatività generale, al contrario, può sembrare un esempio di scienza senza contesto, creata contro il senso comune della comunità scientifica contemporanea.

Nel 1907, piuttosto che abbandonare l'intuizione di Galileo che nel vuoto tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione, Einstein mise in discussione la struttura cinematica, ormai stabilita, della relatività speciale e formulò il "Principio di Equivalenza", sostenendo l'uguaglianza tra assenza di gravitazione e inerzia e suggerendo la generalizzazione del principio di relatività a sistemi di riferimento accelerati.

Nel 1912, con sorpresa da parte dei suoi colleghi, Einstein abbandonò il potenziale gravitazionale scalare della fisica newtoniana a favore di un oggetto a sedici componenti: il tensore metrico, della cui matematica era a malapena al corrente, benché fosse comunque in grado di formulare i criteri univoci che un'equazione di campo gravitazionale avrebbe dovuto soddisfare per questo oggetto "mostruoso."

Nel 1913, nel contesto della cosiddetta "Teoria *Entwurf*" (Teoria bozza), Einstein scartò le equazioni generali di campo covarianti basate sul tensore di Riemann, un'espressione che includeva derivate di secondo ordine del tensore metrico. Einstein credeva anche di avere una prova che tali equazioni di campo dovessero essere escluse, sebbene queste fossero l'unica soluzione matematica accettabile, cosa di cui egli stesso dovette convincersi più tardi.

Nel 1915, infine, Einstein tornò a sostenere il suo programma originale e, verso la fine dell'anno, recuperò le equazioni di campo basate sul tensore di Riemann, formulando la teoria generale della relatività con le sue conseguenze non propriamente classiche, una teoria che essenzialmente ha presenziato a tutti gli sviluppi successivi di fisica e astronomia.

Negli ultimi anni, tutte le argomentazioni tradizionali che spiegano questo drammatico corso degli eventi, si sono ridotte in polvere una volta analizzate più da vicino. Era infine la digressione di Einstein causata dalla sua incompetenza matematica?

La presunta formulazione dell'equazione di campo gravitazionale prima di Einstein da parte del matematico David Hilbert (sebbene senza fornire una dettagliata interpretazione fisica) sembrò supportare questa interpretazione.

Questo supposto trionfo della matematica sulla fisica, legato all'eventuale priorità di Hilbert rispetto ad Einstein, si sgretolò tuttavia di fronte all'analisi delle bozze del primo articolo di Hilbert, le quali mostrano che le prospettive chiave, come ad esempio il carattere covariante della teoria o della sua relazione con la teoria gravitazionale di Newton, furono conseguite solo dopo la pubblicazione di Einstein.

Nell'inverno del 1912-13, inoltre, Einstein era già stato in grado di formulare il corretto approccio all'equazione di campo della relatività generale nei suoi "Appunti di Zurigo", un documento chiave per la ricostruzione della genesi della relatività generale. In seguito scartò questo approccio perché evidentemente lo trovava fisicamente inaccettabile.

5. PARADOSSI

Le vere sfide della rivoluzione della relatività vennero alla luce solo dopo lo sfatamento delle leggende tradizionali. Queste sfide possono essere formulate nei termini di tre paradossi:

Il paradosso del sapere mancante:

Come era possibile creare una teoria come quella della relatività generale capace di fornire spiegazioni per una vasta gamma di fenomeni scoperti solo successivamente in seguito a svariate rivoluzioni dell'astronomia esplorativa? Quale sapere garantiva tale stabilità a una teoria che inizialmente non sembrava superiore alle altre, dato che ogni fenomeno noto a quel tempo poteva essere spiegato anche in base alla fisica classica?

Il paradosso dell'ingannevole euristica:

Come poteva Einstein aver formulato i criteri per un'equazione di campo gravitazionale anni prima di ottenerne la soluzione? Come poteva sviluppare una struttura euristica che in men che non si dica lo condusse a un'espressione matematica corretta e poi alla conclusione che in realtà era inaccettabile, solo per riportarlo indietro alla stessa espressione tre anni dopo?

Il paradosso del progresso discontinuo:

Come poteva essere la relatività generale con le sue conseguenze non classiche – quali la dipendenza di spazio e tempo da interazioni fisiche – il risultato di una fisica relativistica classica e speciale sebbene tali aspetti fossero incompatibili in riferimento al loro assetto concettuale?

Questi paradossi possono difficilmente essere risolti all'interno della storia classica delle idee. Le sfide possono però essere prese in considerazione anche in riferimento a quelle dimensioni che spesso vengono trascurate, ma che sono di

cruciale importanza per l'epistemologia storica della conoscenza scientifica: il carattere a lungo termine dello sviluppo cognitivo, la complessa architettura cognitiva e l'intricato meccanismo della dinamica cognitiva.

6. SVILUPPO COGNITIVO A LUNGO TERMINE

Una risposta adeguata al paradosso dell'insufficienza cognitiva può essere trovata solo dopo aver considerato lo sviluppo cognitivo a lungo termine. Questo sviluppo, dopo tutto, portò alla nascita di una teoria la cui comprensione di come la gravità influenzi il moto in termini di struttura spazio-temporale è in un certo senso più vicina al concetto aristotelico di moto naturale che alla spiegazione di Newton della forza antropomorfa. Il sapere su cui si fonda la sorprendente stabilità della relatività generale era accumulato già molto tempo prima della sua creazione: da secoli di fisica, astronomia e matematica.

Le leggi del moto planetario, per esempio, inclusa la curiosa anticipazione del perielio di Mercurio che ha fornito la prima pietra di paragone astronomica per la nuova teoria, erano già state stabilite a seguito di ampie osservazioni. La geometria non euclidea e il calcolo differenziale assoluto – il linguaggio matematico della relatività generale – erano stati sviluppati nel corso del diciannovesimo secolo e addirittura collegati da astronomi quali Schwarzschild ad osservazioni astronomiche ben prima dell'avvento della relatività.

Il principio secondo il quale tutti i corpi, indipendentemente dalla loro natura, cadono con la stessa accelerazione, fatto di cruciale importanza per il percorso investigativo di Einstein, appartiene al patrimonio della meccanica classica sin dai tempi di Galileo. Questo principio è stato la chiave della svolta einsteiniana del 1907, per andare oltre la relatività speciale. La conoscenza su cui Einstein basò i suoi primi passi verso la generalizzazione di questa struttura era anche derivata dalla fisica classica, così come dalla revisione critica di Ernst Mach, il cui libro sulla storia della meccanica fu letto da Einstein con grande attenzione.

Nel famoso esperimento ideale dell'"ascensore di Einstein", il cuore del suo "Principio di Equivalenza", egli stabilì una relazione di equivalenza tra processi fisici riscontrabili in un sistema che si muove con accelerazione uniforme e processi riscontrabili in un sistema a riposo con campo gravitazionale statico. In questo modo fu in grado di sfruttare conoscenze sui sistemi accelerati, mentre studiava i fenomeni gravitazionali e, in conclusione, di integrare la gravitazione e l'inerzia in un modo simile a come era avvenuta l'integrazione tra campi elettrici e magnetici nell'ambito della relatività speciale. Tutte queste fonti cognitive possono essere considerate come conoscenza condivisa e disponibile, già all'inizio del ventesimo secolo, per gli scienziati interessati al problema della gravitazione.

La struttura interna della fisica classica era ampiamente determinata dall'esistenza di tre domini con fondamenta concettuali relativamente autonome: meccanica, termodinamica ed elettrodinamica. Ai confini di questi settori emersero una serie di problemi che coinvolsero le basi concettuali di più di un dominio: i "problemi di confine" della fisica classica che generarono tensioni concettuali tra queste strutture differenti. L'elettrodinamica dei corpi in movimento presenta una serie di problemi di confine nei quali questioni di teoria elettrodinamica, come la propagazione della luce, erano combinati con la questione meccanica del ruolo dei sistemi di riferimento in movimento. Questa combinazione diede origine a un contrasto tra il modello d'etere sottostante l'elettrodinamica classica e il principio di relatività della meccanica classica.

Problemi di confine come questi erano di centrale interesse negli studi di Einstein del 1905 e catalizzarono il passaggio dalla fisica classica a quella moderna.

Dopo che la relatività speciale ebbe sollevato le esigenze di causalità implicite nella teoria dei campi a uno *status* universale, includendo l'esigenza che nessuna interazione fisica si propaghi più velocemente della luce, la gravitazione, che tradizionalmente era stata un tema centrale della meccanica, divenne un problema di confine tra meccanica e teoria dei campi.

Come per altri casi concernenti problemi di confine, una soluzione positiva dipendeva dalle fonti di conoscenza condivisa prese in considerazione. Nel caso della creazione della relatività speciale il successo di Einstein era dipeso dal suo combinare il patrimonio della meccanica, incorporato nel principio di relatività, con il patrimonio dell'elettrodinamica, incorporato nel principio della costanza della velocità della luce. Nel caso della teoria relativistica del campo gravitazionale la combinazione tra il patrimonio della meccanica, rappresentato dalla teoria newtoniana di campo gravitazionale statico, e ciò che era conosciuto sui campi dinamici dall'elettrodinamica non era sufficiente per creare una nuova teoria soddisfacente, come i concorrenti di Einstein dovettero sperimentare con loro rammarico.

Non c'erano indizi per comprendere le proprietà dei campi gravitazionali dinamici e la sfida di costruire una teoria di campo relativistica per la gravitazione poteva perciò essere paragonata allo sviluppo della completa teoria dell'elettromagnetismo conoscendo solo la legge di Coulomb.

A questo punto l'ampia prospettiva di Einstein, che includeva la critica filosofica alla meccanica classica di Mach, gli permise di raccogliere ulteriori fonti dalla fisica classica. Mach rivisitò un esperimento ideale inizialmente proposto da Newton su un secchio rotante. Newton sosteneva che la curvatura della superficie dell'acqua di un secchio rotante fosse dovuta al moto dell'acqua rispetto allo spazio assoluto e dunque considerò l'esperimento come prova evidente dell'esistenza dello spazio assoluto e del moto assoluto.

Mach, invece, criticò ciò che egli considerava nozioni di metafisica. Si chiese se le forze centrifughe nel secchio rotante di Newton non potessero essere attribuite a un'interazione tra la massa dell'acqua nel secchio e le masse delle stelle fisse. Mach dunque paragonò un sistema accelerato – il secchio rotante – allo stesso sistema a riposo nel quale una sorta di interazione tra le masse, dovuta alle stelle che ruotano intorno al secchio, giustifica gli stessi fenomeni fisici in quanto prodotti da forze inerziali nel caso del sistema accelerato. Mach fornì in questo modo il tracciato per l'esperimento mentale noto con il nome di "ascensore di Einstein".

Einstein sfruttò l'interpretazione di Mach delle forze inerziali in una struttura di riferimento accelerata riconducibile all'interazione di masse in movimento per coprire il divario, menzionato prima, verso una teoria di campo gravitazionale. Interpretando le forze inerziali in strutture di riferimento accelerate, quali il secchio rotante di Newton, come una rappresentazione dei campi gravitazionali dinamici, Einstein riuscì ad anticipare, infatti, le proprietà essenziali della teoria relativistica di gravitazione che stava costruendo, in particolare la generalizzazione del quadro spazio-temporale della relatività speciale che condusse alla nozione di uno spazio-tempo curvo.

7. L'ARCHITETTURA COGNITIVA

La risposta al secondo paradosso e cioè a come Einstein abbia potuto formulare i criteri per l'equazione di campo gravitazionale anni prima della scoperta della sua soluzione, deriva dalla considerazione dell'architettura del sapere a lui disponibile. Queste fonti erano, infatti, parte di un sistema cognitivo con componenti attive e capaci di produrre una guida euristica per la sua ricerca.

Le caratteristiche della ricerca di Einstein diventano improvvisamente comprensibili se si realizza che essa era guidata da una struttura di rappresentazione della conoscenza qualitativa ereditata dalla fisica classica: il “modello mentale” di una teoria di campo rappresentata in modo esemplare dalla teoria dell’elettrone di Lorentz. Secondo il “modello di Lorentz” una sorgente influenza il suo ambiente in modo tale da poter essere descritto da un’equazione di campo, mentre l’ambiente influenza il comportamento di una sonda in modo tale da essere descritta da un’equazione di moto.

L’architettura interna di un modello mentale è caratterizzata da terminali aperti a conoscenze supplementari che specificano il modello. Il modello di Lorentz di un’equazione di campo ha terminali per la sorgente del campo, per il campo stesso e per l’operatore differenziale che descrive come la sorgente genera il campo. La ricerca preliminare di Einstein sulla teoria relativistica gravitazionale negli anni tra il 1907 e il 1912 aveva rilevato configurazioni standard per due dei terminali: quella per il campo, fornita dalla supposizione che il potenziale gravitazionale è rappresentato dal tensore metrico, e quella per la sorgente, fornita dal tensore energia-impulso di materia come suggerito dalla meccanica continua relativistica. Per l’operatore differenziale che descrive come la sorgente genera il campo, Einstein non fu in grado di identificare una configurazione soddisfacente.

La difficoltà di Einstein non risultava dal fatto che si sapesse troppo poco ma piuttosto che troppo sapere doveva essere preso in considerazione per formulare un’equazione di campo che corrispondesse alla comprensione della gravitazione come problema di confine tra la meccanica e la teoria di campo.

Una configurazione fisicamente plausibile per l’operatore differenziale era suggerita dalla conoscenza del campo gravitazionale statico newtoniano e dalla relazione tra campi statici e dinamici nella teoria di campo elettrodinamica. Costruita in questo modo la nuova teoria sarebbe stata automaticamente compatibile con la teoria di Newton soddisfacendo quindi un “Principio di Corrispondenza”.

D’altra parte un modo matematicamente accettabile di ottenere una configurazione per l’operatore differenziale veniva offerto dalla conoscenza dei campi dinamici incorporati dal “Principio di Equivalenza” einsteiniano, il quale proponeva, in generale, di assumere come punto di partenza oggetti covarianti quali il tensore di Riemann. Costruita in questo modo, la nuova teoria avrebbe soddisfatto automaticamente un “Principio di Relatività Generalizzato”.

L’oscillazione di Einstein tra una strategia fisica che partisse da un’attuazione del Principio di Corrispondenza, e una matematica che partisse da un’attuazione del Principio di Relatività Generalizzato, può essere considerata come il meccanismo che gli permise di interpretare i campi disgiunti del sapere della fisica classica necessari alla costruzione della teoria della relatività generale.

8. DINAMICA COGNITIVA

Il terzo paradosso, quello del progresso discontinuo, può essere risolto solo se si prende in considerazione il fatto che lo sviluppo cognitivo non consiste esclusivamente nell’arricchire una data architettura, ma anche nell’attuare processi di riflessione attraverso i quali questa architettura viene trasformata. Nel caso della ricerca di Einstein dell’equazione di campo gravitazionale l’arricchimento del modello di Lorentz era guidato dalle strutture di ordine superiore relativamente stabili al centro dei suoi principi euristici, per esempio i Principi di Corrispondenza, Conservazione, Equivalenza e di Relatività Generalizzato.

Oltre al processo di assimilazione guidato da queste strutture di ordine superiore, l’esperienza conoscitiva di Einstein era caratterizzata anche da un processo di riflessione che cambiò le strutture di ordine superiore in funzione delle

esperienze che egli realizzò attuando i suoi principi euristici. L'interazione tra assimilazione e riflessione mediata dal formalismo matematico è il processo cruciale che determinò la dinamica cognitiva e condusse alla creazione della relatività generale come una teoria non classica. Sulla base di questo si possono distinguere quattro stadi della ricerca einsteiniana dell'equazione di campo gravitazionale.

La *fase di sperimentazione teorica* dell'autunno del 1912, che è documentata nelle prime pagine degli "Appunti di Zurigo" di Einstein. Questa fase è caratterizzata dalla quasi assoluta ignoranza delle operazioni matematiche adatte alla costruzione di un'equazione di campo per il tensore metrico. Nonostante ciò, riflettendo sui suoi tentativi per formulare un'equazione di campo che avrebbe dovuto soddisfare i principi euristici, Einstein costruì strutture di ordine superiore operando a un livello strategico che lo avrebbe successivamente guidato alla sistematica attuazione di questi principi, in particolare delle sue due strategie, quella fisica e quella matematica.

Anche la *fase di ricerca sistematica* che va dalla fine del 1912 fino all'inizio del 1913, è approfonditamente documentata negli "Appunti di Zurigo". In questa fase Einstein, con l'aiuto del suo amico matematico Marcel Grossmann, esaminò sistematicamente i candidati secondo i suoi principi euristici alternando la strategia fisica a quella matematica. Il principale risultato della sua ricerca in questa fase fu la derivazione di una teoria erronea: la "Teoria *Entwurf*". Questa teoria fu pubblicata nella primavera del 1913.

La *fase di consolidamento*, che è documentata dalle pubblicazioni di Einstein e dalla corrispondenza tra il 1913 e metà del 1915. Durante questa fase Einstein elaborò la "Teoria *Entwurf*" seguendo essenzialmente la sua euristica iniziale, benché più da una prospettiva di consolidamento che di esplorazione. Paradossalmente, tuttavia, il principale risultato del periodo di consolidamento fu la creazione dei presupposti per un'esplorazione rinnovata di candidati per le equazioni di campo.

Adattando la strategia matematica usata per giustificare la "Teoria *Entwurf*", Einstein trovò che il formalismo matematico risultante permetteva di riaprire la strada verso una riesaminazione dei candidati.

La *fase di riflessione*, decisiva nel risolvere il paradosso del progresso discontinuo, è documentata da una serie di drammatiche comunicazioni che Einstein sottopose alla Accademia Prussiana nel novembre 1915. L'essenza del ritorno di Einstein, nella prima di queste comunicazioni, a una relazione di campo collegata al tensore di Riemann consiste nel reinterpretare i risultati ottenuti nell'ottica della "Teoria *Entwurf*". Conseguentemente a questa reinterpretazione non solo i principi euristici originali di Einstein ricevevano una nuova interpretazione fisica, ma anche il modello di Lorentz stesso veniva trasformato.

Il passo fondamentale del passaggio dalla "Teoria *Entwurf*", ancora radicata nella fisica classica, alla teoria non classica della relatività generale fu un cambiamento nell'interpretazione fisica di alcuni aspetti del formalismo. Questa trasformazione fu di nuovo un processo copernicano come lo era stata la reinterpretazione di Einstein della variabile ausiliaria di Lorentz nella creazione della relatività speciale. Passando dalla "Teoria *Entwurf*" alla relatività generale, Einstein era però "il suo proprio Lorentz" – considerato l'isolamento in cui la seconda fase della rivoluzione della relatività generale ebbe luogo. Entrambe le teorie, la "Teoria *Entwurf*" e quella della "Relatività Generale", sono infatti caratterizzate dalla stessa forma della lagrangiana, ma con interpretazioni differenti delle variabili di campo.

Nel suo articolo del 4 novembre 1915 Einstein stesso considerò un "pregiudizio fatale" il non aver interpretato il simbolo di Christoffel come rappresentazione del campo gravitazionale.

Uno sforzo analogo di reinterpretazione fisica era assente nell'articolo contemporaneo sulla gravitazione di Hilbert. Nella versione originale del

manoscritto dell'articolo di Hilbert, che fortunatamente si è conservato quasi completamente, il matematico seguì rigorosamente l'indagine fisica che Einstein aveva sviluppato nel contesto della "Teoria *Entwurf*", inclusa l'argomentazione einsteiniana che generalmente le equazioni covarianti non possono essere ammesse, ma che occorre una condizione energetica in modo da limitare il numero delle coordinate ammissibili, una condizione che Hilbert presentò come ulteriore assioma della sua teoria.

Nella versione pubblicata, Hilbert trascurò questo assioma e nelle successive rielaborazioni, coinvolgendo anche altri colleghi quali Emmy Noether e Felix Klein, trasformò la sua teoria in un contributo alla relatività generale.

In breve, anche la fase più ingegnosa della rivoluzione della relatività – la fase di riflessione – fu, dal punto di vista di una teoria cognitiva storica, non il privilegio di un individuo eccezionale, ma solo un aspetto della trasformazione di un sistema cognitivo.²

² Per chi volesse approfondire il tema dello sviluppo cognitivo a lungo termine riferito alle conquiste einsteiniane, un percorso virtuale alla grande mostra berlinese, dedicata alla figura e all'opera di Einstein e realizzata nel 2005, è disponibile all'indirizzo internet <http://www.einsteinausstellung.de> (Maggio 2006). I cataloghi della mostra sono: Renn, Jürgen (ed.) (2005). *Albert Einstein, Chief Engineer of the Universe: 100 Authors for Einstein* (Berlin: Wiley-VCH, 2005).