



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Einstein Filosofo-Scienziato

Relatore:
Prof. Giulio Peruzzi

Laureando:
Giovanni Zanon

Anno Accademico 2017/2018

Indice

<i>Introduzione</i>	1
1. <i>La Filosofia Einsteiniana</i>	4
1.1 <i>Il credo epistemologico</i>	4
1.2 <i>Teorie dei principi</i>	6
2. <i>I Principi della Teoria della Relatività</i>	8
2.1 <i>Le radici estetiche della relatività</i>	8
2.2 <i>I sistemi di riferimento inerziali</i>	10
2.3 <i>I postulati della relatività ristretta</i>	11
2.4 <i>La soluzione dell'apparente incompatibilità dei postulati</i>	12
2.5 <i>Definizione operativa di tempo</i>	14
2.6 <i>Il principio di equivalenza</i>	16
2.7 <i>L'estensione del principio di relatività</i>	18
3. <i>I Principi della Teoria Quantistica</i>	20
3.1 <i>La probabilità è epistemica o ontologica?</i>	20
3.2 <i>La teoria quantistica è incompleta</i>	22
3.3 <i>La supercausalità</i>	23
3.4 <i>La causalità è semplice</i>	25
<i>Bibliografia</i>	26

Introduzione

Così Albert Einstein scrive nei *Pensieri degli Anni Difficili*: “Il fisico non può semplicemente lasciare al filosofo la considerazione critica dei fondamenti teorici; è lui infatti che sa meglio e sente più nettamente dov'è che la scarpa fa male.”¹ Questa presa di posizione ci indica come Einstein si inserisca in quella schiera di scienziati illustri - quali Galilei, Newton, Schroedinger, Born e altri ancora - che non considerando la scienza, ed in particolare la fisica, riduttivamente come una disciplina “neutra”, “vuota” e “matematizzata”, riconoscono in essa soprattutto una sostanza “viva” e “malleabile”, una natura “filosofica”. Di conseguenza egli sosteneva la necessità di un “rapporto reciproco fra epistemologia e scienza”: un contatto in assenza del quale la prima è destinata a isterilirsi, diventando “uno schema vuoto”, mentre la seconda, “se pure si può concepirla, è primitiva e informe”. Al tempo stesso metteva in guardia dal rischio, per lo scienziato, di legarsi le mani con questo o quel sistema filosofico, dovendo egli anzitutto rispettare “le condizioni esterne” date dai “fatti dell'esperienza”. Esiste dunque una diversità tra scienziato ed epistemologo, diversità per la quale occorre, talvolta, pagare un prezzo:

“È inevitabile che all'epistemologo sistematico egli [lo scienziato] appaia come una specie di opportunist senza scrupoli: che gli appaia come un *realista*, poiché cerca di descrivere il mondo indipendentemente dagli atti della percezione; come un *idealista*, perché considera i concetti e le teorie come libere invenzioni dello spirito umano (non deducibili logicamente dal dato empirico); come un *positivista*, poiché ritiene che i suoi concetti e le sue teorie siano giustificati *soltanto* nella misura in cui forniscono una rappresentazione logica delle relazioni fra le esperienze sensoriali. Può addirittura sembrargli un *platonico* o un *pitagoreo*, in quanto considera il criterio della semplicità logica come strumento indispensabile ed efficace per la sua ricerca.”²

Non è dunque difficile trovare nella produzione einsteiniana, disseminati qua e là, scritti di carattere epistemologico, che esulano dagli argomenti prettamente “tecnici”. In questo lavoro, particolare attenzione viene rivolta all'autobiografia scientifica di Einstein del 1949, *Albert Einstein: Filosofo – Scienziato*, che per chiarezza ed organicità dell'esposizione illumina sulla sua visione epistemologica. Tale filosofia è riassunta in una lettera, datata 1952, scritta all'amico Maurice Solovine:

“Per quel che riguarda la questione epistemologica (...) io vedo la cosa nel modo seguente:

1) ci sono date le *E* (esperienze immediate).

2) *A* sono gli assiomi, dai quali traiamo conclusioni. Dal punto di vista psicologico gli *A* poggiano sulle *E*. Ma non esiste alcun percorso logico che dalle *E* conduca agli *A*; c'è solamente una connessione intuitiva (psicologica) e sempre <<sino a nuovo ordine>>.

1 Albert Einstein, Opere scelte, a cura di E. Bellone, Bollati Boringhieri, Torino 1988, p. 528.

2 A. Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori*, in A. Einstein, Autobiografia scientifica, Universale Scientifica Boringhieri, Torino 1979, p. 227 sg.

3) Dagli *A* si ricavano, con procedimento deduttivo, enunciati particolari *S* che possono pretendere di essere veri.

4) Gli *S* sono messi in relazione con le *E* (verifica per mezzo dell'esperienza). Questa procedura, a ben vedere, appartiene essa stessa alla sfera extralogica (intuitiva), non essendo di natura logica la relazione tra i concetti che intervengono negli enunciati e le esperienze immediate. Questa relazione tra gli *S* e le *E* è tuttavia (pragmaticamente) molto meno incerta di quella che sussiste tra gli *A* e le *E* (ad esempio, tra il concetto di cane e le corrispondenti esperienze immediate.) Se una tale corrispondenza, pur restando inaccessibile alla logica, non potesse essere stabilita con un elevato grado di certezza, tutto l'armamentario logico non avrebbe alcun valore ai fini della <<comprensione della realtà>> (esempio, la teologia).”³

In questo scarto ineliminabile tra “mondo delle idee” e “mondo sensibile”, fondamentale è il ruolo giocato dagli assiomi, cioè i principi da cui poi far discendere la struttura logica della teoria. In questo lavoro si vuole trattare nello specifico i principi che costituiscono il fondamento della teoria della relatività, principi che in qualche modo riflettono la visione einsteiniana. L'intento della trattazione è quello di presentarli non in maniera “assiomatica”, ma piuttosto di “indurli”, ricordando come il principio fisico, a differenza di quello matematico, sia profondamente legato all'esperimento. A tale proposito sarà inevitabile introdurre la discussione con un breve excursus storico sulle problematiche sulle quali si dibatteva il dibattito scientifico di allora e, quando inevitabile, inserire qualche parte di trattazione formale. Solo così si potrà pretendere di aver compreso le motivazioni che hanno portato alla formulazione di tali principi.

Tale approccio è giustificato anche dalla seguente considerazione: nell'analizzare la filosofia personale di uno scienziato, non si può fare a meno di considerarne anche il lavoro di ricerca ed i problemi connessi ad esso. Sarebbe infatti sbagliato pensare che le opinioni filosofiche di Einstein siano le cause o le radici della sua scienza; al contrario, è proprio il lavoro di ricerca a generare problematiche filosofiche. E dunque, se si vuole tentare una vera comprensione di queste, non si può a fare a meno dello studio approfondito della scienza che ne è all'origine.

Il lavoro si conclude con una parte relativa alla teoria quantistica. Dalla trattazione dei problemi connessi con tale teoria emergeranno altri principi, fondamentali nella filosofia einsteiniana. Inoltre si avvertirà la problematicità del rapporto epistemologia-scienza: infatti, nonostante il successo della teoria, Einstein esprimeva un'insoddisfazione per l'incapacità della teoria stessa di fornire “la descrizione completa di ogni situazione reale (individuale) che si supponga possa esistere indipendentemente da ogni atto di osservazione o di verifica”. A suo dire, tutto dipendeva dalla possibilità di postulare come “reale” ciò che non è osservabile: possibilità che il “fisico moderno dalle simpatie positivistiche” negava con “un sorriso di compatimento”. Questo era l'asciutto commento di Einstein:

3 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 742 sg.

“Quello che non mi piace, in questo tipo di ragionamento, è l'atteggiamento positivistico di fondo, che dal mio punto di vista è insostenibile e che, a mio parere, si riduce ad essere la stessa cosa del principio di Berkeley: *esse est percipi*.”⁴

4 Citazione da Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 14.

Capitolo 1

La Filosofia Einsteiniana

1.1 *Il credo epistemologico*

Vogliamo dunque presentare nel dettaglio la filosofia einsteiniana. A questo scopo, di particolare interesse è la sua autobiografia scientifica, scritta all'età di sessantasette anni in seguito alle sollecitazioni del professore di filosofia e sacerdote metodista Paul Arthur Schilpp, noto per essere il curatore di una collana di libri dal titolo *La Biblioteca dei Filosofi Viventi*. Pubblicata nel 1949 con il titolo *Albert Einstein: Filosofo – Scienziato*, questa contiene “il mio credo epistemologico”, che a ragione può essere considerata una dichiarazione esplicita delle sue convinzioni filosofiche.

Prima di arrivare al cuore della dichiarazione, è bene soffermarsi su alcuni passaggi che lo precedono, che chiariscono e al tempo stesso fanno emergere la complessità nel suo insieme del pensiero einsteiniano. Così, molto significative e di indubbia bellezza letteraria, troviamo le seguenti affermazioni:

“Fuori c'era questo enorme mondo, che esiste indipendentemente da noi, esseri umani, e che sta di fronte come un grande, eterno enigma, accessibile solo parzialmente alla osservazione e al nostro pensiero. La contemplazione di questo mondo mi attirò come una liberazione, e subito notai che molti degli uomini che avevo imparato a stimare e ad ammirare avevano trovato la propria libertà e sicurezza interiore dedicandosi ad essa. Il possesso intellettuale di questo mondo extrapersonale mi balenò alla mente, in modo più o meno consapevole, come la meta più alta fra quelle concesse all'uomo.”⁵

All'interno di questo passaggio troviamo due convinzioni non dichiarate esplicitamente, ma fondamentali nella visione einsteiniana. Da una parte abbiamo il realismo, ovvero l'assumere l'esistenza di un mondo esterno e indipendente dalle nostre percezioni sensibili; dall'altra il “mistero” dell'intelligibilità della natura, ossia il meccanismo di per sé miracoloso che porta ad estrapolare, se pur parzialmente, le “leggi” della natura. Einstein inoltre, come si vedrà nel seguito, considera nella natura una “semplicità” e “armonia” intrinseca, come se questa, più benigna che maligna, volesse guidare lo scienziato suggerendogli indirettamente quali strade e metodi seguire per arrivare alla sua comprensione.

Abbiamo visto dunque come l'uomo, grazie allo strumento del pensiero, possa investigare il mondo che gli sta di fronte. Ecco, ma che cos'è esattamente il “pensiero”? Einstein precisa:

“Io ritengo che il passaggio dalla libera associazione, o <<sogno>>, al pensiero sia caratterizzato dalla funzione più o meno dominante che assume in quest'ultimo il <<concetto>>.”⁶

5 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 62.

6 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 63.

Per Einstein il pensiero dell'uomo procede in massima parte per immagini, senza far uso di parole, e il tutto spesso inconsapevolmente. Se un'impressione sensoriale produce in noi una sequenza caotica e sconnessa di immagini, è compito del concetto - attraverso la sua iterazione - ordinare queste immagini e porle in relazione tra loro. In definitiva possiamo affermare che il pensiero altro non è che una catena di immagini - dove quella precedente richiama quella successiva - e dove il collante che tiene insieme l'una con l'altra è appunto il concetto.

Vogliamo ora fare un passo ulteriore. Infatti è evidente che, se pensiamo ad una teoria scientifica, questa dovrà ricorrere a più concetti; e più in generale l'uomo è portato in modo naturale ed inconscio ad armarsi di sistemi concettuali che possano guidarlo nel quotidiano confronto con il mondo esterno. La costruzione di tali sistemi rimane tuttavia un "libero gioco dei concetti": è una scelta arbitraria dell'uomo e non esistono delle regole logiche o deduttive che si possano applicare. La loro giustificazione e bontà sarà data solo dal maggiore o minore accordo con l'esperienza. Ed è proprio il ruolo ineliminabile e vincolante dell'esperienza a dare nuovo impulso a questo meccanismo di costruzione del sapere, in particolare quello scientifico. Quando un sistema di concetti, il quale pensavamo acquisito con certezza, entra in conflitto in modo aspro ed intenso con l'esperienza, ci sentiamo disorientati, e l'istinto di fuggire da questa "meraviglia" che proviamo ci porta a mettere in discussione le nostre convinzioni.

A tal proposito Einstein ricorda della sua infanzia:

"Provai una meraviglia di questo genere all'età di quattro o cinque anni, quando mio padre mi mostrò una bussola. Il fatto che quell'ago si comportasse in quel certo modo non si accordava assolutamente con la natura dei fenomeni che potevano trovar posto nel mio mondo concettuale di allora, tutto basato sull'esperienza diretta del <<toccare>>. Ricordo ancora – o almeno mi sembra di ricordare – che questa esperienza mi fece un'impressione durevole e profonda. Dietro alle cose doveva esserci un che di profondamente nascosto."⁷

A questa esperienza, ne contrappone subito un'altra:

"All'età di dodici anni provai una nuova meraviglia di natura diversa; e fu leggendo un libretto di geometria piana euclidea, capitatomi fra le mani al principio dell'anno scolastico. C'erano delle asserzioni, ad esempio quella che le tre altezze di un triangolo si intersecano in un sol punto, che – pur non essendo affatto evidenti – potevano tuttavia essere dimostrate con tanta certezza da eliminare qualsiasi dubbio. Questa lucidità e certezza mi fecero un'indescrivibile impressione."⁸

Due esperienze che appartengono a contesti diversi, una al mondo dell'esperienza diretta e sensibile, una al mondo degli assiomi, delle proposizioni e dei concetti. Il giovane Einstein, al tempo inconsapevole, connette questi due mondi:

"Inoltre, mi sembrava che le cose di cui tratta la geometria non fossero essenzialmente diverse da quelle che si percepiscono coi sensi, << che si possono vedere e toccare >>. Quest'idea rudimentale, si fonda ovviamente sul fatto che il rapporto esistente fra i concetti

7 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 64.

8 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 64 sg.

geometrici e gli oggetti dell'esperienza sensibile (asta rigida, intervallo finito ecc.) mi era inconsciamente presente.”⁹

Esiste dunque una connessione tra questi due mondi; un rapporto che, viene chiarito, non è di natura logica, bensì intuitiva ed in definitiva arbitraria. Il “pensiero logico”, con le regole logiche di cui si serve, può essere utilizzato solamente per stabilire le relazioni che intercorrono tra proposizioni e concetti, ma pensare che questo possa dedurre la conoscenza della natura dall'astrazione e dalla pura speculazione è in realtà una presunzione eccessiva dell'uomo, un “errore”. Ed ancora una volta emerge l'importanza del vincolo con l'esperienza. Non solo, come visto, come motore della conoscenza, ma come ciò che fornisce “significato” e “contenuto” - insomma quella sostanza “viva” di cui si parlava all'inizio - a proposizioni ed enunciati che altrimenti resterebbero vincolati alla sterilità del mondo delle idee. Così è possibile distinguere la “vuota fantasia” dalla “verità scientifica” di una teoria, data dal grado di certezza con cui viene eseguita la connessione con il dato di esperienza.

Se da una parte abbiamo visto come la costruzione di un sistema concettuale sia una scelta del tutto arbitraria, questo tuttavia quando costituisce l'ossatura di una teoria scientifica è bene che abbia le seguenti caratteristiche: deve coordinare tra loro e giustificare in modo preciso quanti più fatti empirici; deve tendere a ridurre il più possibile il numero di assiomi e concetti logicamente indipendenti su cui si basa. Questa “economia di pensiero”, non è solo un utile criterio che lo scienziato deve adottare, ma riflette la convinzione einsteiniana che si debba sempre preferire la rappresentazione più “semplice” della natura, perché probabilmente quella più “vera”.

1.2 *Teorie dei principi*

Nello scritto *Tempo, Spazio e Gravitazione* del 1919, Einstein tenta di delineare una distinzione tra “diverse specie” di teorie fisiche. Quelle più diffuse, sono quelle che egli definisce le teorie di “tipo costruttivo”:

“Esse tentano di formare un quadro dei fenomeni complessi partendo da certi principi relativamente semplici. (...) Quando affermiamo di comprendere un certo gruppo di fenomeni naturali, intendiamo dire che abbiamo trovato una teoria costruttiva che li abbraccia.”¹⁰

Si badi come in questo caso il termine “principi” stia ad indicare un'ipotesi o una quantità ipotetica. La teoria cinetica dei gas, per esempio, appartiene a questa categoria. Questa, partendo da un'idea relativamente semplice, il “movimento molecolare”, tenta di ricondurre ad essa e di spiegare “le proprietà meccaniche, termiche e di diffusione dei gas”. Contrapposto a questo gruppo di teorie, troviamo invece quello che egli chiama il gruppo delle “teorie dei principi”.

9 Albert Einstein, *Opere scelte*, Op. cit., p. 65.

10 Albert Einstein, *Opere scelte*, Op. cit., p. 580.

“Esse fanno uso del metodo analitico, invece di quello sintetico. Il loro punto di partenza e il loro fondamento non consistono di elementi ipotetici, ma di proprietà generali dei fenomeni osservate empiricamente, principi dai quali vengono dedotte formule matematiche di tipo tale da valere in ogni caso particolare che si presenti.”¹¹

Un esempio di tali teorie è la termodinamica. Questa parte dal fatto che il “moto perpetuo non si verifica mai nell'esperienza ordinaria”. Da questo assunto- elevato a principio generale - tenta di dedurre, mediante procedimenti “analitici”, una teoria valida in ogni caso particolare.

A tale gruppo appartiene soprattutto la teoria della relatività. Per comprenderla, bisogna dunque “afferrare” il principio su cui si fonda. Una volta postulata la “verità” dei principi di partenza, le leggi fisiche - essendo logicamente dedotte da essi - “ripeteranno” tale “verità”. Ed è qui che emerge ancora una volta la visione einsteiniana. Cruciale è dunque trovare quali siano i principi fondamentali della natura, da cui poi poter far discendere tutte le leggi fisiche. Ricordiamo comunque come tale “estrapolazione” dei principi dall'osservazione della natura resti in ultima istanza un'operazione arbitraria.

Il merito delle teorie costruttive sta nella “generalità”, nella “flessibilità” e nella “chiarezza”, mentre il merito delle teorie dei principi è da ricercarsi nella “perfezione logica” e nella “saldezza delle basi”.

11 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 580.

Capitolo 2

I Principi della Teoria della Relatività

2.1 *Le radici estetiche della relatività*

Per comprendere a fondo la genesi della relatività, dobbiamo richiamare brevemente in quale situazione si articolava il dibattito scientifico di allora.

James Clerk Maxwell, nel 1865 nel testo *A dynamical theory of the electromagnetic field*, aveva pubblicato il sistema fondamentale di equazioni che costituisce la teoria dell'elettromagnetismo. Tali equazioni inoltre, prevedevano l'esistenza delle onde elettromagnetiche, le quali erano state rivelate sperimentalmente da Hertz nel 1887.

Al tempo si credeva che la luce, al pari del suono, non potesse essere visibile in assenza di un mezzo che ne consentisse la propagazione. Tale radicato pregiudizio condizionava la fisica ottocentesca. Così era stata postulata l'esistenza dell'etere, il mezzo materiale permeante tutto lo spazio (il *plenum*) che dava non solo giustificazione della propagazione delle onde elettromagnetiche ma anche del calore. Tuttavia per questo ruolo c'erano molti candidati, diversi tipi di etere - come quello di Fresnel, Cauchy, Stokes, Neumann, MacCullagh, Kelvin e Plank - ciascuno con le proprie proprietà, come il grado di omogeneità e di compressibilità e per il maggiore o minore trascinamento da parte della Terra. Alcuni erano addirittura precedenti alla teoria di Maxwell.

L'equazione delle onde elettromagnetiche prevedeva inoltre che queste si dovessero propagare ad una velocità fissa e ben determinata, la velocità della luce c . Ma come l'intuizione ordinaria insegna (legge di addizione delle velocità galileiana), la velocità di un "oggetto" fisico dipende dal sistema di riferimento in cui ci si pone. E quindi sorgeva spontanea la domanda: rispetto a quale sistema di riferimento la velocità della luce era proprio c ?

Per ovviare a queste problematiche, alla fine la scelta ricadde su un etere in quiete assoluta (rispetto alle stelle fisse), al quale la Terra, che si muove rapidamente, fosse in qualche modo trasparente cosicché non avvertisse una resistenza nel suo moto. Così nel 1881 Albert Abraham Michelson, un capitano della marina statunitense, aveva realizzato uno strumento, oggi noto come interferometro, che provasse l'esistenza del vento d'etere, cioè che rivelasse un eventuale moto della Terra rispetto all'etere. Il metodo utilizzato consisteva nel confrontare i tempi impiegati dalla luce per percorrere la stessa distanza in direzione parallela e perpendicolare al moto della terra rispetto all'etere. La presenza di un etere stazionario avrebbe dovuto dar luogo ad una differenza nei tempi di percorrenza, con un ritardo da parte del raggio trasversale. Facendo poi interferire il raggio trasversale con quello parallelo si sarebbe potuto rivelare l'effetto. L'esperimento non aveva dato prova dell'esistenza del vento d'etere. Nel 1887, Michelson si avvalse della collaborazione del chimico Edward Williams Morley, realizzarono un nuovo interferometro e ripeterono l'esperimento, ma anche questa volta non venne rivelato alcuno spostamento della terra rispetto all'etere. L'esito negativo dell'esperimento fu una delusione non solo per i suoi

autori, ma anche per altri fisici, come Kelvin, Rayleigh, Lorentz e FitzGerald. A questo punto, per alcuni iniziò ad affacciarsi l'idea che bisognasse ripensare i fondamenti dell'elettrodinamica, tenendo comunque salvo l'etere come sistema di riferimento assoluto. Non per Einstein, il quale non sembrò mai preoccuparsi seriamente di sanare il conflitto tra la teoria dell'etere ed il risultato dell'esperimento di Michelson e Morley, ritenendo probabilmente l'etere un qualcosa di intrinsecamente artificioso e poco persuasivo. Le ragioni che portarono alla formulazione della teoria della relatività ristretta sono altre. Come scrive lo storico della fisica - autore della più completa biografia scientifica einsteiniana - Abraham Pais:

“Einstein fu condotto alla teoria della relatività ristretta soprattutto da considerazioni di carattere estetico, vale a dire da criteri di semplicità. Questa splendida ossessione non l'avrebbe più lasciato per il resto dei suoi giorni. Lo avrebbe portato alla conquista più grande, la relatività generale, e anche al suo grandioso fallimento, la teoria unitaria dei campi.”¹²

La giustificazione di tale affermazione la troviamo esplicita nell'introduzione dell'articolo del 1905, *L'elettrodinamica dei corpi in movimento* - pietra miliare della storia della fisica – nel quale, per la prima volta, compaiono le basi e le intuizioni fondamentali della teoria ristretta:

“È noto che l'elettrodinamica di Maxwell – così come essa è oggi comunemente intesa – conduce, nelle sue applicazioni a corpi in movimento, ad asimmetrie che non sembrano conformi ai fenomeni.”¹³

Einstein propone il seguente esempio. Consideriamo l'interazione tra un magnete ed un filo conduttore in moto l'uno rispetto all'altro. Possiamo descrivere il sistema in un riferimento S solidale con il magnete, in cui il filo conduttore si muove con velocità \mathbf{v} , oppure in un riferimento S' solidale col conduttore, in cui è il magnete a muoversi con velocità $-\mathbf{v}$. In entrambi i casi misuriamo nel circuito la stessa corrente. Dunque la fisica del fenomeno non dipende dal riferimento scelto ma - come egli precisa - “il fenomeno osservabile, dipende in questo caso, solo dal moto relativo di magnete e conduttore.” Tuttavia, la descrizione che due osservatori in S e S' danno del fenomeno è diversa. Per un osservatore in S vi è un campo magnetico \mathbf{B} costante e nessun campo elettrico. Ogni carica e all'interno del conduttore è soggetta a una forza di Lorentz $\mathbf{F} = (e/c) \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ che non compie lavoro. L'integrale lungo il circuito della forza per unità di carica \mathbf{F}/e è la forza elettromotrice. Dal canto suo, un osservatore in S' vede il filo conduttore fermo e misura un campo elettrico \mathbf{E}' dal magnete in movimento, cioè indotto dalla variazione del flusso magnetico attraverso la superficie del circuito. Le cariche nel circuito sono, in questo caso, soggette a una forza elettrica $\mathbf{F}' = e\mathbf{E}'$, la quale compie lavoro.

Ciò che Einstein si propone di fare, non è tanto risolvere il problema dell'etere, bensì ristabilire una simmetria tra due descrizioni fisicamente equivalenti ma formalmente diverse dello stesso fenomeno.

L'articolo prosegue:

12 Abraham Pais, <<Sottile è il Signore...>> La scienza e la vita di Albert Einstein, Bollati Boringhieri, Torino 1986, Op. cit., p 155.

13 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 148.

“Esempi come questo, come pure i tentativi falliti di individuare un qualche movimento della Terra relativamente al <<mezzo luminifero>> suggeriscono che i fenomeni elettrodinamici, al pari di quelli meccanici, non possiedono proprietà corrispondenti all'idea di quiete assoluta.”¹⁴

Non avendo più senso parlare di quiete assoluta, viene a mancare la proprietà meccanica fondamentale che aveva reso necessario l'introduzione dell'etere, la quiete assoluta appunto, rendendolo di conseguenza superfluo.

“L'introduzione di un <<etere luminifero>> si manifesterà superflua, tanto più che la concezione che qui illustreremo non avrà bisogno di uno <<spazio assolutamente stazionario>> corredato di particolari proprietà, né di un vettore velocità assegnato a un punto dello spazio vuoto nel quale abbiano luogo processi elettromagnetici.”¹⁵

Si noti appunto, come era stato anticipato in precedenza, come Einstein spazzi via il problema dell'etere soprattutto a monte, in quanto logicamente inconsistente, più che come evidenza sperimentale.

Se viene a mancare il concetto di quiete assoluta, viene anche a mancare l'unico “punto di vista” privilegiato da cui descrivere la natura, rappresentato dal sistema di coordinate solidale dall'etere. Questo viene sostituito da un insieme di infiniti sistemi di coordinate, tutti ugualmente privilegiati, i riferimenti inerziali, dove per definizione, due qualsiasi di questi sono in moto uniforme l'uno rispetto all'altro.

Tuttavia si consideri come permane ancora un punto di vista privilegiato, questa volta rappresentato dai sistemi di riferimento inerziali. Questo fatto giustifica il nome di teoria ristretta. La relatività generale avrà il merito di eliminare definitivamente questa “asimmetria” rendendo indipendente il punto di vista adottato per descrivere i fenomeni fisici.

2.2 I sistemi di riferimento inerziali

Prima di procedere, cerchiamo di definire meglio cosa intendiamo per un sistema di riferimento inerziale e per fare ciò dobbiamo richiamare la prima e la seconda legge della dinamica di Newton. Nella formulazione originaria, la prima legge della dinamica afferma che un corpo non soggetto a forze permane nel proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme. In presenza di forze vale invece la seconda legge della dinamica:

$$\frac{md^2\vec{x}}{dt^2} = \vec{F}$$

dove m è la massa del corpo, \vec{F} è la forza (o la risultante delle forze) cui esso è soggetto, e \vec{x}

14 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 148.

15 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 149.

è il suo vettore posizione. L'equazione appena scritta è anche nota come l'equazione del moto della meccanica newtoniana.

Già a Newton era evidente come il moto di un oggetto dipendesse dal particolare sistema di riferimento da cui esso viene osservato e come ciò avesse delle conseguenze sulle leggi della dinamica. Così la prima legge della dinamica poteva essere valida in un sistema di riferimento ma non in un altro, oppure poteva cambiare la forma dell'equazione del moto. A questo punto viene naturale chiedersi: rispetto a quali sistemi di riferimento sono valide le leggi della dinamica, cioè restano invariate in forma?

La risposta di Newton era che tale forma rimanesse invariata nel passaggio da un sistema di riferimento ad un altro che fosse in moto uniforme rispetto al primo. Questi erano i riferimenti inerziali. Per ovviare poi al problema di come individuare tali sistemi, egli introduceva lo spazio assoluto, “per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, rimane sempre uguale e immobile” e rispetto al quale valessero le leggi della dinamica. Grazie a questo era possibile individuare i sistemi in moto uniforme e dunque individuare i riferimenti inerziali.

Si può tuttavia evitare di introdurre lo spazio assoluto, o qualsivoglia sistema privilegiato, definendo semplicemente come sistema di riferimento inerziale un sistema in cui ogni corpo libero è in quiete o in moto rettilineo uniforme; in questo modo l'individuazione e l'esistenza di tali sistemi è garantita dalla prima legge della dinamica, la quale diventa un postulato (il principio di inerzia). La condizione matematica che mi permette di salvaguardare la forma delle equazioni della dinamica nel passaggio da un sistema inerziale ad un altro è data dalle trasformazioni di Galilei (verranno chiamate così a partire dal 1909) definite come:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x} - \mathbf{v}t \quad , \quad t' = t$$

dove i termini senza apice indicano le coordinate (\mathbf{x}, t) del sistema S , mentre quelli con l'apice le coordinate (\mathbf{x}', t') del sistema S' .

2.3 I postulati della relatività ristretta

Al tempo non si era ancora riscontrata una violazione sperimentale dell'invarianza in forma delle leggi della meccanica. Tale proprietà dei fenomeni meccanici era conosciuta come principio di relatività della meccanica newtoniana (oggi noto come principio di relatività galileiano). Gli esperimenti sembravano suggerire che un principio simile valesse anche per i fenomeni elettromagnetici. Il problema si poneva a livello teorico quando si tentava di estendere l'invarianza galileiana anche all'elettromagnetismo dal momento che le equazioni di questa teoria non sono invarianti per le trasformazioni di galilei.

Tuttavia la convinzione di Einstein sulla validità delle equazioni dell'elettromagnetismo – tra l'altro corroborate da una fenomenologia ricchissima – era abbastanza solida da non fargli credere che queste dovessero essere ridiscusse per renderle compatibili con la meccanica. A questo si aggiungeva un modo di pensare sempre teso ad unificare e semplificare, apparendogli quindi naturale che tutte le leggi della natura dovessero essere invarianti in forma.

Dopo aver demolito l'ipotesi dell'etere, l'articolo prosegue con l'enunciazione del “principio di relatività”:

“(…) per tutti i sistemi di coordinate per i quali valgono le equazioni della meccanica varranno anche le stesse leggi elettrodinamiche e ottiche. Eleveremo questa congettura (il contenuto della quale verrà detto, in quanto segue, <<principio di relatività>>) al rango di postulato.”¹⁶

Facciamo ora le seguenti considerazioni. Se con Galilei la relatività era stata assunta dall'osservazione empirica, operazione ugualmente geniale in quanto richiedeva di fare astrazione da molteplici cause di disturbo, è con Einstein che la relatività viene innalzata a principio di simmetria (o di invarianza), nel senso moderno del termine, come criterio regolatore che si pone al di sopra delle leggi della fisica. Il principio era stato verificato sperimentalmente in molti casi e, grazie al “libero gioco dei concetti”, viene assunto come generale, valido in “tutti i casi”. Diventa dunque una sorta di “meta-legge”, che svolge un ruolo fondamentale nella conoscenza del mondo fisico, in quanto conduce la ricerca formale delle leggi della natura, eliminando quelle forme inammissibili.

Sia chiaro, che a priori, nulla vieterebbe una situazione diametralmente opposta a questa, dove ad una rappresentazione unica del mondo naturale si sostituisse un'infinità di rappresentazioni. Ma il fatto che proprio il postulato di relatività sia in accordo con l'evidenza empirica è in un qualche modo sorprendente ed una prova di quella misteriosa comprensibilità della natura di cui parlava Einstein.

A questo principio viene affiancato il postulato della costanza della velocità della luce:

“(…) supporremo inoltre – un postulato, questo, solo apparentemente incompatibile col precedente – che la luce, nello spazio vuoto, si propaghi sempre con una velocità determinata, c , che non dipende dallo stato di moto del corpo che la emette.”¹⁷

Questi due postulati bastano per giungere a una “teoria elettrodinamica dei corpi in movimento”, “semplice” e “coerente”, fondata sulla teoria di Maxwell per i corpi stazionari. Al tempo stesso ciò comporta che la meccanica newtoniana sia solo una teoria approssimata, ovverosia non universalmente valida, ma “vera” solo in un certo dominio di fenomeni (quelle in cui le velocità in gioco sono piccole rispetto a quella della luce). La relatività ristretta mi permette dunque di valutare il grado di approssimazione che si introduce quando si utilizza la meccanica newtoniana.

2.4 La soluzione dell'apparente incompatibilità dei postulati

Cerchiamo di capire meglio dove si celava l'apparente incompatibilità. Abbiamo detto come l'elettromagnetismo non fosse invariante per le trasformazioni di coordinate galileiane, le quali dunque, se vogliamo l'invarianza di tutte le leggi fisiche, non possono essere quelle corrette.

16 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 148 sg.

17 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 149.

Cercando “sulla base di presupposti fondamentali certi, e senza trascurare termini di alcun ordine di grandezza, che molti effetti elettromagnetici sono del tutto indipendenti dal moto del sistema” Lorentz nel 1904 aveva finalmente ricavato - così come oggi le conosciamo e che portano il suo nome - le trasformazioni che rendevano invarianti le leggi dell'elettromagnetismo. Le trasformazioni di Lorentz sono:

$$x' = \gamma (x - vt) \quad , \quad t' = \gamma (t - vx/c^2) \quad , \quad \gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2} \quad .$$

Si noti che Einstein, come disse più volte in seguito, conosceva il lavoro di Lorentz solo fino all'anno 1895. Dunque non conosceva le trasformazioni così come le abbiamo scritte, se non una variante della seconda, ovverosia $t' = (t - \mathbf{v} \cdot \mathbf{x}/c^2)$ che Lorentz aveva utilizzato come strumento matematico per dimostrare, nell'approssimazione al primo ordine in v/c , come gli esperimenti ottici terrestri fossero indipendenti dal moto della Terra. Ma appunto per Lorentz, e per tutti i fisici, questa nuova equazione non era nient'altro che un trucco, un ausilio formale, privo di significato fisico. Così egli aveva proposto di chiamare t *tempo generale* e t' *tempo locale*, e senza mai dichiararlo esplicitamente, ritenendo che solo il primo fosse il tempo fisico, il tempo “vero” per così dire. Ma che significato fisico aveva il *tempo locale*?

Ed è qui che il giovane Einstein rivela il suo genio, la sua capacità di svelare la contraddizione in ciò che appare ovvio e consolidato. Se la gestazione della relatività ristretta aveva coinvolto più personaggi, quali appunto Lorentz o Poincaré, è con Einstein che si ha l'intuizione fondamentale, il tempo assoluto non esiste. Ripercorriamo quel momento, grazie alle parole della conferenza di Kyoto del 1922.

“Ad ogni modo, allora ero certo della validità delle equazioni di Maxwell-Lorentz nell'ambito dell'elettrodinamica. Per di più tale esperimento ci chiariva le conseguenze della cosiddetta invarianza della velocità della luce che quelle equazioni dovrebbero implicare anche in riferimenti in moto. Questa invarianza della velocità della luce, tuttavia, era in contrasto con la legge di addizione delle velocità, ben nota in meccanica. Ebbi molte difficoltà a capire quale fosse la natura del contrasto. Avevo perso quasi un anno in riflessioni infruttuose, nella speranza di riuscire a modificare l'idea di Lorentz, rendendomi ben conto, peraltro, che si trattava di un enigma davvero non facile da risolvere. Inaspettatamente venne in mio aiuto un amico di Berna. Fu un giorno splendido quello in cui andai a trovarlo e cominciai a parlargli della cosa in questi termini: <<Ho avuto un problema, ultimamente, del quale non riesco a venirne a capo. Così oggi sono venuto qui per discuterne a oltranza.>> Dopo aver lungamente dibattuto la questione con lui, all'improvviso la soluzione mi fu chiara. Il giorno dopo tornai a trovarlo e gli dissi, senza neanche averlo salutato: <<Grazie. Ho completamente risolto il problema.>> La soluzione coinvolgeva in effetti lo stesso concetto di tempo; l'idea era che il tempo non è definito in assoluto, ma vi è una connessione inscindibile fra tempo e velocità dei segnali. In tal modo, quello che era parso un ostacolo insormontabile poté essere completamente superato. Cinque settimane dopo questa chiarificazione, la teoria della relatività ristretta come la conosciamo oggi era completamente formulata.”¹⁸

18 citazione da Abraham Pais, Op. cit., p. 153 sg.

Il fondamento della teoria della relatività speciale, e di conseguenza della relatività generale poggia dunque nella fondamentale revisione del concetto di misura di tempo. Come fa notare Abraham Pais, l'altra "fondamentale revisione del concetto di misura" che segna "la discontinuità tra il diciannovesimo secolo e il ventesimo secolo" è proprio quella che porta alla Meccanica Quantistica.

Le coordinate spaziali e temporali, da astratte funzioni matematiche, acquistano un significato fisico solo nel momento in cui se ne dà una definizione operativa di misura. Se si vuole stabilire la "verità" di un concetto, bisogna metterlo in relazione con un oggetto "reale", che possa essere soggetto a verifiche empiriche, anche "mentali". Ritorna dunque quello scarto, e la conseguente connessione intuitiva, tra mondo delle "idee" e mondo "sensibile". Un concetto a priori non è giudicabile in quanto arbitraria scelta dell'uomo. Ma come insegna l'esempio della geometria euclidea, tali mondi, spesso ed inconsapevolmente vengono confusi e fatti coincidere.

Ci proponiamo dunque di dare una "rappresentazione fisica" delle coordinate spaziali. Innanzitutto sia dato un sistema di riferimento inerziale. Nella "realtà" questo sarà "rappresentato" da un sistema costituito da tre superfici piane rigide, perpendicolari l'una all'altra e collegate a un corpo rigido.¹⁹ Rispetto a tale sistema il "luogo" di un evento sarà determinato dalla specificazione delle lunghezze delle tre perpendicolari, o "coordinate", che possono venir abbassate dal luogo dell'evento su queste tre superfici piane. Tali lunghezze si possono ottenere da misurazioni eseguite mediante "regoli-campione", rigidi ed in quiete rispetto al sistema. Le coordinate spaziali "rappresentano" dunque tali misure. Allo stesso modo diamo un'interpretazione fisica di tempo. Vediamo nel dettaglio cosa significhi eseguire una misura di tempo. Si vedrà come questa non sia così intuitiva.

2.5 Definizione operativa di tempo

Ripercorriamo il ragionamento presente nell'articolo del 1905.

Consideriamo un sistema di riferimento inerziale e consideriamo un punto materiale in quiete in esso. Possiamo determinare la posizione di tale punto, facendo riferimento al nostro sistema di riferimento, "impiegando le regole della geometria euclidea", ed esprimerla in coordinate cartesiane. Se vogliamo descrivere il *moto* di tale punto diamo i valori delle coordinate in funzione del tempo. Ma affinché tale descrizione matematica acquisti un significato fisico dobbiamo chiarire come definiamo il "tempo".

"Noi dobbiamo considerare che tutti i nostri giudizi in cui interviene il tempo sono sempre giudizi su *eventi simultanei*. Se io per esempio dico: << Quel treno giunge qui alle ore 7 >>, ciò equivale a dire, in pratica: << il posizionamento della lancetta del mio orologio sul 7 e l'arrivo del treno sono eventi simultanei >> ."²⁰

19 Tale descrizione dettagliata in realtà non si trova nell'articolo del 1905 ma in A. Einstein, *Relatività: esposizione divulgativa e scritti classici su Spazio Geometria Fisica*, Bollati Boringhieri, Torino 1967, p. 49.

20 Albert Einstein, *Opere scelte*, Op. cit., p. 150.

Il tempo di un evento è definito dunque dall'indicazione di un orologio spazialmente coincidente con l'evento e in quiete relativamente ad esso. Tuttavia tale definizione non è soddisfacente quando “ si tratti di correlare nel tempo eventi che si verificano in luoghi differenti, oppure – il che è lo stesso – di stabilire i tempi di eventi che si producono in luoghi lontani dall'orologio”. Si pensi per esempio ad un osservatore che voglia misurare la velocità media di un corpo, egli dovrà eseguire due osservazioni in due punti e due istanti diversi: una nel passaggio del corpo nel punto A al tempo t_A ; l'altra nel passaggio del corpo nel punto B al tempo t_B . Saranno quindi necessari due orologi, uno nel punto A , ed uno “ strutturalmente identico al precedente” nel punto B .

“Ma non è possibile, senza ulteriori convenzioni, confrontare rispetto al tempo un evento in A e un evento in B ; noi abbiamo finora definito un <<tempo A >> e un <<tempo B >>, ma non un tempo comune ad A e B .”²¹

Ciò di cui Einstein sta parlando è il problema della sincronizzazione degli orologi, fondamentale se si vuole mettere in relazione temporale eventi spazialmente separati. A questo punto egli opta per utilizzare i segnali luminosi ed assume:

“(…) occorre stabilire, *per definizione*, che il << tempo >> che la luce impiega nel percorso da A a B è uguale al << tempo >> che essa impiega nel percorso da B ad A .”²²

Facciamo notare, come già aveva intuito Poincaré, che è necessario postulare che la velocità della luce sia la stessa nelle due direzioni. Infatti se volessimo verificare tale affermazione dovremmo conoscere come misurare il tempo, ma è proprio ciò che stiamo cercando di definire!

A questo punto possiamo sincronizzare i due orologi. Siano due osservatori, l'uno nel punto A ed uno nel punto B , separati da una distanza L . L'osservatore in A invia un segnale luminoso quando il suo orologio segna il tempo $t=0$. L'osservatore in B , nell'istante in cui riceve il segnale, aggiusta il proprio orologio sul tempo $t = L/c$.

L'uguaglianza della velocità della luce nelle due direzioni garantisce che questa operazione sia consistente: una volta sincronizzati gli orologi, se l'osservatore in B invia, al tempo t , un segnale luminoso verso A , l'osservatore in A riceverà il segnale al tempo $t + L/c$.

Supponiamo infine che tale “definizione di sincronismo” possa essere applicata “a un numero qualsivoglia di punti”, in questo modo abbiamo costruito “un sistema di orologi stazionari, disposti in luoghi diversi e sincronizzati tra loro”. Possiamo ora dare la definizione completa e definitiva di “tempo”.

“Il << tempo >> di un evento è quello indicato, simultaneamente al prodursi dell'evento stesso, da un orologio stazionario situato nel luogo dell'evento e sincronizzato, per ogni determinazione temporale, con un ben preciso orologio stazionario.”²³

Si mostra facilmente che il secondo postulato - la costanza della velocità della luce in ogni sistema di riferimento inerziale - implichi la relatività della simultaneità. Ovvero, se due

21 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 151.

22 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 151.

23 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 151.

eventi sono simultanei in un dato sistema di riferimento inerziale, non lo sono più, in generale, in un altro sistema di riferimento. Ma se il concetto di “simultaneità” è logicamente connesso al concetto di “tempo”, allora ogni sistema di riferimento inerziale avrà il proprio “tempo”. Così la grandezza ausiliaria introdotta da Lorentz, il “tempo locale”, non era semplicemente che “tempo”. L'esperimento mentale ci mostra come a priori non ci sia alcun legame tra la definizione di tempo data in un sistema di riferimento e la definizione data in un altro. A questo punto non avremo problemi ad accettare che due sistemi abbiano tempi diversi. Il legame matematico e quantitativo - che ci è dato come conseguenza logica dei postulati - è dato dalle trasformazioni di Lorentz. Così si esprime Abraham Pais:

“Questa è la sostanza della parte cinematica della memoria di giugno, una tra le conquiste più alte della scienza, sia per contenuto che stile. Tutti gli scienziati, indipendentemente dal fatto che conoscano o meno la relatività, dovrebbero leggere questi paragrafi, non fosse altro che per il piacere che possono dare. Mi sembra anzi che questa parte cinematica, compreso il teorema di addizione delle velocità, potrebbe e dovrebbe essere insegnata nelle scuole medie superiori, come l'esempio più semplice del modo in cui la fisica moderna va al di là dell'ordinaria intuizione.”²⁴

2.6 *Il principio di equivalenza*

Successivamente al lavoro del 1905, Einstein non si era soffermato più di tanto sulla teoria ristretta. Questo fatto è dovuto principalmente a due motivi. Il primo, legato al carattere del personaggio, il quale non era tipo da soffermarsi sulle proprie idee fondamentali elaborandone nei particolari tecnici le conseguenze. In secondo luogo in quanto la sua mente fu principalmente occupata dalla teoria quantistica.

Nel 1907 gli venne chiesto di scrivere un articolo di rassegna sulla relatività ristretta per la rivista “Jahrbuch”, ed è qui che ha inizio la lunga strada di transizione dalla teoria ristretta a quella generale. Nella preparazione del lavoro Einstein si rende conto di come tutti i fenomeni naturali possano essere trattati in termini di relatività ristretta, ad eccezione della gravitazione. Il tentativo di rendere compatibili le leggi della gravitazione con la relatività ristretta risulta vano, in quanto richiede l'aggiunta di ipotesi “prive di fondamento fisico”. Ciò fa scaturire in lui un profondo desiderio di capire le ragioni di tale discontinuità ed è allora - come egli ricorda in un articolo del 1921 destinato per la rivista “Nature” - che gli si materializza il “pensiero più felice della mia vita”, quello che in seguito sarà conosciuto come principio di equivalenza.

“Fu allora che ebbi il pensiero più felice della mia vita, nella forma seguente. Il campo gravitazionale ha solo un'esistenza relativa, in modo analogo al campo elettrico generato dall'induzione magnetoelettrica. *Infatti, per un osservatore che cada liberamente dal tetto di una casa, non esiste - almeno nelle immediate vicinanze - alcun campo gravitazionale* [corsivo di Einstein]. In effetti, se l'osservatore lascia cadere dei corpi, questi permangono in uno stato di quiete o di moto uniforme rispetto a lui, indipendentemente dalla loro

24 Abraham Pais, Op. cit., p. 156.

particolare natura chimica o fisica (in questo genere di considerazioni, ovviamente si trascura la resistenza dell'aria). L'osservatore di conseguenza ha il diritto di interpretare il proprio stato come uno << stato di quiete >>.”²⁵

Per Einstein se due situazioni fisiche si possono confondere l'una con l'altra, allora queste devono rappresentare la stessa “realtà fisica”, devono essere dunque equivalenti. Da qui il nome del principio. Prosegue poi facendo notare come tale indistinguibilità sia una conseguenza della legge – ben nota sperimentalmente – secondo cui, in un campo gravitazionale, tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione. Se tale legge non fosse valida, ed in particolare “ se vi fosse anche un solo oggetto che cadesse nel campo gravitazionale in modo diverso da tutti gli altri “ allora, grazie ad esso, un osservatore potrebbe rendersi conto di trovarsi in un campo gravitazionale e di star cadendo in esso. L'osservatore sarebbe dunque in grado di comprendere in quale delle due situazioni si trova e verrebbe dunque a mancare la validità del principio. Si noti come anche in questo caso venga effettuata la medesima operazione che aveva portato ad innalzare a principio l'invarianza delle leggi fisiche: un fatto sperimentale verificato in molti casi “particolari”, da Galileo a Newton, che viene elevato a principio, valido in “generale”.

Nel lavoro del 1907, Einstein fornisce una formulazione diversa del principio. Considera un sistema di riferimento Σ_1 accelerato nella direzione x con accelerazione costante γ ed un secondo sistema di riferimento Σ_2 in quiete in un campo gravitazionale omogeneo che imprime un'accelerazione $-\gamma$ nella direzione x a tutti gli oggetti. E di nuovo conclude:

“Allo stato attuale delle esperienze, non abbiamo ragione di supporre che (...) Σ_1 e Σ_2 siano distinti sotto qualche aspetto; nel seguito, di conseguenza, postuleremo la completa equivalenza fisica di un campo gravitazionale e della corrispondente accelerazione del sistema di riferimento [Σ_1].”²⁶

Di nuovo ritorna l'indistinguibilità e dunque l'equivalenza fisica delle due situazioni. Immaginiamo uno sperimentatore all'interno di una “navicella-laboratorio” che non sia in grado di “vedere” cosa accade all'esterno. Supponiamo inoltre che lo sperimentatore “percepisca” una “forza” che lo tenga a contatto con la base della navicella. Egli non sarà in grado - attraverso nessuno dei suoi esperimenti – di risalire alla causa di tale “forza”, e cioè di capire se la navicella, e in particolare lo sperimentatore, si trovi sulla superficie di un pianeta e come tale ne subisca l'attrazione gravitazionale oppure se si tratti di una forza inerziale, perché la navicella, che si trovi in realtà nello spazio vuoto libero da campi gravitazionali, stia accelerando con un'accelerazione uguale e contraria a quella di gravità esercitata dal pianeta.

Precisiamo che il principio di equivalenza vale solo nel caso di campi gravitazionali di piccola estensione spaziale, ovvero campi che si possano considerare omogenei ed uniformi (di eguale intensità in ogni punto dello spazio e del tempo). Se così non fosse infatti, lo sperimentatore della navicella, osservando la caduta degli oggetti contenuti al suo interno,

25 Citazione da Abraham Pais, Op. cit., p. 194 sg.

26 Citazione da Abraham Pais, Op. cit., p. 196.

sarebbe in grado di distinguere le due situazioni e dunque di capire in quale si trova. Il principio ha dunque una validità locale.

Ma soprattutto il principio di equivalenza ha un'implicazione logica profonda sul principio di relatività. Vediamone il perché.

2.7 L'estensione del principio di relatività

Riprendiamo il principio di equivalenza, in particolare nella formulazione che abbiamo dato all'inizio e si pensi all'uomo che cade dalla casa. Ciò che il principio ci sta dicendo è che in un campo gravitazionale - di piccola estensione - tutto accade come in uno spazio libero da gravitazione, purché ci si ponga, al posto di un sistema inerziale, in un sistema di riferimento accelerato rispetto ad un sistema inerziale. Ma poiché abbiamo postulato l'equivalenza delle due descrizioni, sarà lecito considerare il sistema accelerato, non inerziale, "equivalente" al sistema inerziale che adopererei per descrivere ciò che accade nello spazio vuoto. In questo modo viene a crollare l'"asimmetria" che ancora permeava la teoria ristretta e che interessava anche la meccanica: perché i sistemi inerziali devono spiccare, da un punto di vista fisico, rispetto agli altri sistemi di coordinate?²⁷ Tutti i sistemi di coordinate sono ora equivalenti. Non esistono più sistemi di coordinate privilegiati, e così come era accaduto per il concetto di "quiete assoluta", così ora il concetto di "sistema inerziale" diventa vuoto e dunque superfluo. Conseguentemente viene a perdere di significato sia il concetto di "accelerazione relativa allo spazio" che il "principio d'inerzia", il cui postulato garantiva l'esistenza dei sistemi inerziali.

Ci si accorge inoltre come la richiesta della teoria ristretta dell'invarianza delle leggi fisiche, rispetto ai soli sistemi inerziali, sia troppo restrittiva. Diventa dunque naturale chiedersi:

“È concepibile che il principio di relatività valga anche per sistemi accelerati l'uno rispetto all'altro?”²⁸

Per Einstein la risposta deve essere affermativa:

“In virtù di tale ipotesi [principio d'equivalenza] il principio di relatività viene esteso al caso del moto uniformemente accelerato del sistema di riferimento.”²⁹

La questione dell'ulteriore estensione all'accelerazione non uniforme non verrà sollevata fino al 1912, anno in cui per la prima volta Einstein farà riferimento alla propria ipotesi come al "principio di equivalenza". Da lì in avanti l'invarianza delle leggi fisiche sarà rispetto a trasformazioni qualsiasi - purché continue - delle coordinate.

La conquista dell'invarianza globale di Lorentz, che aveva rappresentato un risultato formale fondamentale per la formulazione della teoria ristretta, verrà comunque inclusa nella teoria

27 Tale questione era stata originariamente sollevata da Ernst Mach, i cui scritti, per stessa ammissione di Einstein, lo avevano profondamente influenzato.

28 Citazione da Abraham Pais, Op. cit., p. 196.

29 Citazione da Abraham Pais, Op. cit., p. 196.

generale. Non avrà più una validità globale, bensì locale. Ma come fa notare Abraham Pais, al tempo della formulazione del principio di equivalenza e della conseguente estensione del principio di relatività, era già palese ad Einstein come ciò cozzasse con l'invarianza globale di Lorentz. Tuttavia Einstein non può tradire i principi della natura che ha appena scoperto, come detto questi si pongono "al di sopra" delle leggi fisiche. Così si esprime:

“Altri avrebbero rinunciato al principio di equivalenza pur di mantenere l'invarianza globale. Ma non Einstein. Senza il benché minimo timore, egli imbocca la nuova strada, e per tutti gli otto anni successivi non ha scelta: deve andare avanti. Da quel momento anche il suo stile subisce un mutamento. Se il lavoro del 1905 fa pensare alla qualità di un Mozart, il lavoro del periodo 1907-1915 ricorda invece Beethoven.”³⁰

Di nuovo ritorna la forza ed il carattere irriducibile delle intuizioni einsteiniane. Nonostante ciò, l'obiettivo di costruire una teoria che includesse la gravitazione e che garantisse la covarianza generale delle leggi fisiche, risultò più arduo di quanto ci si aspettasse. Ci furono tentativi, errori e lunghe pause fino al punto conclusivo in cui, il 25 novembre 1915, la struttura della teoria generale, così come la conosciamo oggi, si dispiegò ai suoi occhi. Fondamentale per la formulazione della teoria, fu l'implementazione di strutture matematiche come la geometria riemanniana ed il calcolo tensoriale. Tale fatto fece registrare un profondo cambiamento nell'atteggiamento di Einstein verso la matematica, tanto che ebbe a dichiarare:

“ (...) l'animo mi si è riempito di un grande rispetto per la matematica, la parte più sottile della quale avevo finora considerato, nella mia dabbenaggine, un puro lusso.”³¹

30 Abraham Pais, Op. cit., p. 200.

31 Citazione da Abraham Pais, Op. cit., p. 236.

Capitolo 3

I Principi della Teoria Quantistica

3.1 *La probabilità è epistemica o ontologica?*

Vogliamo adesso trattare il particolare rapporto che Einstein ebbe con la meccanica quantistica; questo infatti conduce a riflessioni epistemologiche, indubbiamente serie e tuttora valide, e di riflesso permette di delineare ulteriormente la filosofia einsteiniana. Per fare ciò, riprendiamo come riferimento la sua autobiografia scientifica così come avevamo fatto quando avevamo discusso del suo credo epistemologico. Nella parte conclusiva di questa egli si decide ad affrontare la questione della “teoria fisica di maggior successo del nostro tempo”, la “teoria statistica dei quanti”, che grazie al contributo fondamentale di fisici come Schrodinger, Heisenberg, Dirac e Born, ha definitivamente assunto una “forma logica rigorosa”. Einstein riconosce il merito alla meccanica quantistica di essere riuscita a cogliere un “importante frammento della verità”; essa infatti è in perfetto accordo con i dati sperimentali e ha permesso di descrivere una vasta fenomenologia di fenomeni, principalmente microscopici:

“È, questa, la sola teoria che permetta presentemente una visione unitaria delle esperienze relative al carattere quantico degli eventi micromeccanici.”³²

Il problema sorge quando si voglia attuare una “reciproca integrazione” tra questa teoria e la relatività generale – le due teorie che “sono in un certo senso considerate valide” - unificazione che risulta tuttora incompiuta. Questo è “probabilmente” il motivo per cui i fisici teorici contemporanei divergono su quali siano i “principi che in futuro costituiranno il fondamento teorico della fisica.” Saranno i principi della teoria della relatività, della teoria quantistica, o entrambi? A questa domanda, se ne aggiunge un'altra:

“Si tratterà di una teoria di campo; oppure, sostanzialmente, di una teoria statistica?”³³

La teoria relativistica è infatti una teoria di campo, la teoria quantistica è una teoria statistica; le strutture formali e matematiche su cui poggiano sono nettamente diverse. La prima poggia su equazioni alle derivate parziali, la cui evoluzione è determinata da leggi deterministiche. Tale struttura fa sì che la teoria della relatività sia una teoria causale: date le condizioni iniziali del sistema, sarà sempre possibile determinarne in modo univoco lo stato finale. Ciò non accade invece per la teoria quantistica; date le condizioni iniziali essa è in grado di determinare “solo” la probabilità che si verifichi un certo stato finale.

32 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 100.

33 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 100.

Su quale debba essere il futuro della fisica teorica, Einstein ha un'idea ben precisa che procede ad argomentare. Innanzitutto chiarisce che cosa si debba intendere per “realità fisica”:

“La fisica è un tentativo di afferrare concettualmente la realtà, quale la si concepisce indipendentemente dal fatto di essere osservata. In questo senso si parla di <<realità fisica>>.”³⁴

Nella filosofia di Einstein, come avevamo già visto nel suo credo epistemologico, il realismo è un presupposto fondamentale per la conoscenza: al di fuori dell'uomo sta “questo enorme mondo”, che esiste “indipendentemente da noi” e dalla nostra osservazione. Importante è l'idea che tale “realità” è determinata; di questa realtà il fisico, se pur parzialmente, tenta di dare una “rappresentazione”.

Prima dell'avvento della meccanica quantistica, non c'era stato alcun dubbio a proposito: nella teoria di Newton, la realtà era rappresentata da punti materiali nello spazio e nel tempo; nella teoria di Maxwell, dal campo nello spazio e nel tempo. In meccanica quantistica la rappresentazione della realtà non è così facile. Per esempio, nella teoria quantistica si definisce la funzione d'onda ψ , come la massima informazione che si possa avere sullo stato di un sistema. Ma alla domanda se la ψ rappresenti una “situazione reale effettiva”, così come la intendiamo per un sistema di punti materiali o per un campo elettromagnetico, non è così semplice rispondere. Come sappiamo dall'interpretazione statistica di Born della ψ , il modulo quadro della funzione d'onda rappresenta una densità di probabilità; il modulo quadro della ψ – tramite un'opportuna operazione d'integrazione – restituisce la probabilità che una data grandezza fisica q - se misuro tale grandezza nell'istante t - abbia un valore compreso in un dato intervallo ben definito. Se si reitera il processo di misura di q , sarà possibile determinare empiricamente la probabilità che risulti un certo valore. Da ciò si evince come in meccanica quantistica sia la probabilità ad essere “la” grandezza fisica “reale”.

“Ma che cosa ci dice del singolo valore di q misurato? Il sistema individuale corrispondente avrà questo valore di q anche prima della misurazione?”³⁵

Poiché nell'ambito della teoria quantistica, la misurazione è un procedimento che implica una perturbazione finita del sistema, si è portati a pensare che il sistema “acquisti” un determinato valore numerico per q solo attraverso l'atto della misurazione stessa. Ma se così fosse, si potrebbe pensare che il sistema acquisti una “realità fisica” determinata solo tramite il processo di misura. Si noti inoltre, come ad ogni successiva misura, indipendentemente dal risultato della misura precedente, si possa ottenere un nuovo valore – e dunque una nuova “realità fisica” - della grandezza q . Ammesso dunque che esista una realtà a priori, questa non sarebbe comunque ben definita e continuerebbe a “fluttuare”. A questo punto, o ci si convince che l'“essere” della natura stessa sia di carattere probabilistico, e ci si riduce a considerare la “casualità” come un elemento intrinseco ed ineliminabile, oppure, se si vuole preservare una visione della natura come realtà determinata, bisognerà riconoscere come la meccanica quantistica non sia una descrizione esauriente di tale realtà. Per Einstein,

34 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 100.

35 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 100.

convinto sostenitore della seconda idea, il carattere statistico della teoria quantistica va attribuito all'incompletezza della teoria stessa, al fatto cioè che il suo apparato formale non comprende tutti gli "elementi di realtà" e le variabili fondamentali del sistema in esame. La ψ infatti non è una descrizione esauriente della realtà. In tale senso, gli esiti stocastici di misure sul sistema vanno attribuiti all'ignoranza dello sperimentatore sullo stato reale del sistema; e dunque, se volessimo rispondere alla domanda contenuta nel titolo di questo capitolo, la probabilità andrebbe considerata come epistemica.

3.2 *La teoria quantistica è incompleta*

Einstein prosegue la sua disamina con il seguente esperimento mentale. Consideriamo due fisici, che chiameremo *A* e *B*, ognuno dei quali abbia una concezione diversa sulla "situazione reale" descritta dalla funzione ψ .³⁶

"A. Ogni singolo sistema (prima della misurazione) ha un valore definito di q (o p) per tutte le variabili del sistema, e precisamente *il* valore determinato attraverso una misurazione di tali variabili. Sviluppando questa concezione, egli dirà: la funzione ψ non è una descrizione esauriente della situazione reale del sistema; essa esprime soltanto ciò che è già noto in base alle misurazioni precedenti compiute sul sistema.

B. Ogni singolo sistema (prima della misurazione) non ha un valore definito di q (o p). Il valore della misurazione nasce solo in concomitanza con l'unica probabilità che esso viene ad avere, grazie alla funzione ψ , attraverso l'atto stesso della misurazione. Sviluppando questa concezione, egli dirà (o almeno potrebbe dire): la funzione ψ è un'esauriente descrizione della situazione reale del sistema."³⁷

A questo punto, si consideri un sistema che all'istante t della nostra osservazione sia costituito da due sistemi parziali S_1 e S_2 , spazialmente separati, e non soggetti ad interazione di rilievo. Il sistema totale sia poi completamente descritto dalla funzione d'onda ψ_{12} ; tale funzione conterrà dunque le informazioni, per così dire "mescolate", sia sul sistema S_1 che sul sistema S_2 . Tramite questa non è dunque possibile fare delle affermazioni precise su uno o l'altro sottosistema. Ma se adesso effettuiamo una misurazione completa di S_1 , dai risultati di tale misurazione, sarà possibile determinare dalla funzione di partenza ψ_{12} una nuova funzione ψ_2 , perfettamente definita, del sistema S_2 . Se però effettuiamo una nuova misurazione di S_1 , ed otteniamo dei nuovi valori differenti da quelli ricavati in precedenza, allora da questi potremmo ricavare una nuova funzione per il sistema S_2 , che essendo appunto diversa chiameremo ψ_2' . È chiaro che, reiterando tale procedimento, in definitiva avremo una serie di funzioni diverse tra loro ($\psi_2, \psi_2', \psi_2'' \dots$) che descrivono lo stesso sistema S_2 . In questo modo concluderemmo:

36 Il ragionamento che segue si ispira all'articolo del 1935, *La descrizione quantica della realtà può essere considerata completa?*, di Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen.

37 Albert Einstein, *Opere scelte*, Op. cit., p. 101.

“ Il carattere di ψ_2 dipende allora dal *tipo* di misurazione da me eseguita su S_1 . ”³⁸

Il punto cruciale in questo problema è tenere a mente la “reale situazione di fatto” del sistema parziale S_2 . Poiché i due sistemi sono spazialmente separati, non è possibile che la reale situazione di fatto del sistema S_2 venga alterata da ciò che si fa, ed in particolare dall'atto della misurazione, sul sistema S_1 . Tale condizione può essere violata solo se supponiamo che la misurazione di S_1 cambi “telepativamente” la situazione reale di S_2 , oppure se neghiamo che possano esistere situazioni reali indipendenti, relative a cose che siano spazialmente separate l'una dall'altra. Alternative che però paiono “del tutto inaccettabili”. Arriviamo dunque a concludere che per la stessa situazione reale di S_2 è possibile trovare diversi tipi di rappresentazione, ciascuna corrispondente ad una determinata ψ_2 , e dunque:

“Se ora i fisici A e B riconoscono la validità di questa considerazione, allora B dovrà rinunciare alla sua affermazione che la funzione ψ costituisca una descrizione completa di una reale situazione di fatto. Perché in questo caso sarebbe impossibile che due diversi tipi di funzione ψ possano essere coordinati con la medesima situazione di fatto di S_2 . ”³⁹

Tutto ciò porta a valutare il “carattere statistico” come un'implicazione “necessaria” dell'incompletezza della rappresentazione quantistica dei sistemi fisici. Per questo motivo, Einstein era convinto che non si potesse fare affidamento su tale teoria come punto di partenza per ulteriori sviluppi della fisica teorica. Di conseguenza, anche il tentativo di sintesi con la teoria della relatività, non poteva condurre a nessun risultato attendibile. Non bastava semplicemente accorpare i principi delle due teorie, prima di tutto bisognava “rifondare” la teoria quantistica, e per fare ciò Einstein aveva in mente un programma preciso.

3.3 *La supercausalità*

Riconosciuto l'importante progresso che la meccanica quantistica aveva rappresentato, Einstein prendeva spunto da ciò che era successo alla teoria di Newton per fare la seguente analogia. Prima dell'avvento della teoria della relatività, il “prodigioso successo pratico” della meccanica newtoniana aveva impedito ai fisici di rendersi conto del “carattere fittizio” di alcuni dei suoi principi, quale l'idea di quiete assoluta o di forze istantanee operanti a distanza. Il fatto sorprendente è che – se ci si limita ad una precisa scala di grandezza dei fenomeni - entrambe le teorie, nonostante poggino su principi diversi, concordino con l'esperienza. Come sappiamo infatti la meccanica newtoniana si può ottenere, sotto certe condizioni, come limite dalla teoria relativistica. In modo analogo, Einstein era convinto che la teoria quantistica dovesse emergere, come caso limite, da una teoria più profonda ancora da scoprire. In realtà egli sperava di più, ovvero che la si potesse dedurre logicamente. In questa idea egli era stato influenzato da ciò che era successo all'elettrostatica ed alla termodinamica; la prima era deducibile dalle equazioni di Maxwell del campo

38 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 101.

39 Albert Einstein, Opere scelte, Op. cit., p. 102.

elettromagnetico, la seconda dalla meccanica statistica. Importante è far notare come da tale teoria non solo dovesse essere possibile ricavare la struttura formale e logica della teoria quantistica – che un tale successo aveva rappresentato - ma anche e soprattutto i postulati quantistici come condizioni imposte dalla teoria stessa. Einstein dunque sperava che i “principi” quantistici, a differenza di quelli relativistici, non fossero realmente tali, ma deducibili logicamente come “leggi”, ossia che questi fossero delle semplici proposizioni e non postulati. Ciò avrebbe salvato la visione “causale” della natura in cui egli tanto credeva. Abbiamo già detto come non fosse possibile trovare la nuova teoria tentando di affinare o reinterpretare la meccanica quantistica. Pensiamo di nuovo alla termodinamica: non è possibile invertire la freccia logica e da questa arrivare alle “fondamenta” della meccanica statistica. Così si imponeva la necessità di ripartire da zero.

Per Einstein tale punto di partenza era costituito dalla teoria della gravitazione in quanto sono le equazioni di questa teoria, più di tutte le altre equazioni della fisica, che danno una “certa garanzia di poter affermare qualcosa di preciso”. Possiamo ritenere che tale scelta fosse giustificata principalmente da due motivi. In primo luogo, come si è già ampiamente rimarcato, questa è una teoria causale, e, in questa direzione, rappresentava cronologicamente l'ultima conquista della fisica. In secondo luogo, Einstein era fortemente convinto della covarianza generale delle leggi fisiche, condizione che è ottenibile dall'implementazione della geometria differenziale: questa doveva essere la struttura matematica su cui avrebbe poggiato la nuova teoria. Egli puntava poi a costruire una teoria “generalizzata” della relatività, compiendo una sintesi della gravitazione e dell'elettromagnetismo.

Premesso che tale unificazione non riuscì ad Einstein, si imponeva un'ulteriore domanda: era possibile includere i vincoli dati dalla teoria quantistica in una teoria di campo? Einstein ragionava sul carattere discreto delle orbite di Bohr, ritenendo che questo indicasse una mancanza di arbitrarietà nella scelta delle condizioni iniziali. In questo modo egli riteneva che si potesse risolvere il problema “sovradeterminando” le variabili del campo tramite l'aggiunta di opportune equazioni. Così facendo, sperava che tali equazioni avrebbero “codeterminato” il “comportamento meccanico dei punti singolari (gli elettroni)” in modo tale che le condizioni iniziali del campo e dei punti singolari stessi risultassero a loro volta soggette a “vincoli restrittivi”, così come accadeva alle orbite di Bohr. La “sovradeterminazione” era e rimase la speranza di Einstein; speranza che non poté essere mai verificata, dal momento che, come si è detto, non si riuscì mai a scoprire le equazioni del campo per il campo totale.

Ma perché era così importante la sovradeterminazione per Einstein? Rivolgendosi a Plank, faceva notare come tale interpretazione avesse il merito di ristabilire la causalità nei fenomeni quantistici e addirittura di rafforzarne il concetto:

“ Sembra che i fenomeni naturali siano determinati a tal punto che non solo la loro evoluzione temporale, ma anche lo stato iniziale è fissato in larga misura dalla legge [fisica]. Mi è parso di dover esprimere questa idea ricercando sistemi di equazioni differenziali sovradeterminati (...) Credo fortemente che non arriveremo a una sorta di subcausalità, ma anzi, nel senso indicato, a una supercausalità.”⁴⁰

40 Citazione da Abraham Pais, Op. cit., p. 494.

Concludiamo tale paragrafo con un'ultima annotazione. Abbiamo visto come la nuova teoria che si andava cercando dovesse implicare logicamente i principi quantistici. Ma non solo, Einstein auspicava che dalle equazioni generali del campo scaturissero come soluzioni particolari – soluzioni statiche ed a simmetria sferica – anche il protone e l'elettrone, e in generale tutte le particelle fondamentali della fisica. Questo auspicio rifletteva la convinzione einsteiniana che una teoria “veramente razionale” dovesse “*dedurre* le particelle elementari (elettroni ecc.), non *porre* in partenza”. Allo stesso modo egli credeva che da una futura teoria generalizzata della relatività si sarebbe potuto ricavare, sempre come soluzioni delle equazioni fondamentali, l'esistenza degli “orologi” e dei “regoli di misura”, che nella relatività ristretta venivano introdotti ad hoc come “entità teoricamente autosufficienti”.

3.4 *La causalità è semplice*

Abbiamo visto come in tutta la sua produzione scientifica, Einstein fu sempre mosso da criteri di semplicità, così come quando spazzò l'idea artificiosa di etere, o ancora più sorprendente quando si convinse dell'invarianza in forma delle leggi fisiche per i sistemi di riferimento in moto qualunque. Il successo delle sue teorie lo portava a convincersi che la rappresentazione più corretta della natura fosse sempre quella più semplice ed elegante. E questo fatto era in qualche modo straordinario, perché era proprio grazie ad esso che l'uomo era in grado di comprendere così tanto del mondo. Pensiamo al fatto ipotetico che leggi fisiche non siano invarianti, ciò porterebbe a infinite descrizioni del mondo, tutte “vere”. Sarebbe il caos. È in questa chiave di lettura che va interpretata la convinzione einsteiniana della causalità. Einstein non era un agguerrito sostenitore della causalità, semplicemente perché ancorato alle convinzioni ottocentesche della fisica classica, o perché nutriva antipatia verso la casualità. Egli era convinto che una descrizione causale della natura fosse logicamente la più semplice, e per questo quella “vera”, quella corretta! Si sarebbe tentati di interpretare la causalità come una “legge”, farla discendere da un ipotetico principio di “semplicità”, e a ben pensarci tale operazione potrebbe essere estesa anche agli altri principi della teoria della relatività. In questa semplificazione, la “semplicità” verrebbe elevata a “principio fondamentale” della natura.

“A mio avviso, *la strada giusta esiste ed (...) è possibile trovarla. Sulla base dell'esperienza fin qui raccolta, abbiamo il diritto di credere che la natura sia la realizzazione di ciò che di più matematicamente semplice è immaginabile.*”⁴¹

41 Citazione da Abraham Pais, Op. cit., p. 496.

Bibliografia

- Enrico Bellone (a cura di), Albert Einstein, Opere scelte, Bollati Boringhieri, Torino 1988

- Abraham Pais, << Sottile è il Signore... >>. La scienza e la vita di Albert Einstein, Bollati Boringhieri, Torino 1986

- Bruno Cermignani (a cura di), Albert Einstein, Relatività: esposizione divulgativa (e scritti classici su Spazio, Geometria e Fisica), Bollati Boringhieri, Torino 1967

- Vincenzo Barone, Relatività. Princìpi e applicazioni, Bollati Boringhieri, Torino 2004