

# Università di Pisa

Facoltà di Lettere e Filosofia

Anno accademico 2006/2007

Corso di laurea specialistica in filosofia e  
forme del sapere

Tesi di laurea

*Einstein e l'immaginazione scientifica*

Primo Relatore

Prof. Gennar Luigi Linguiti

Candidato

Alessio Rossi

Secondo Relatore

Prof. Aldo Giorgio Gargani

# Indice

Introduzione p. 5

## Einstein

1.1 Nascita e apogeo della concezione meccanicistica p.12

1. La crisi della concezione meccanicistica p.31

1.3 Mach critico di Newton p.41

1.4 La relatività ristretta

a) *L'annus mirabilis* di Einstein p.55

b) Poincaré precursore della relatività ristretta p.71

1.5 La relatività generale

a) Il pensiero più felice della mia vita p.79

b) Geometria, esperienza e fisica p.93

# L'immaginazione scientifica di Einstein

2.1 Einstein e Mach p.106

2.2 Il credo epistemologico di Einstein

a) Le libere invenzioni della nostra mente p.120

b) Einstein e l'esperimento cruciale di Michelson p.133

c) Il modello di teoria di Einstein p.147

2.3 L'immaginazione scientifica

a) Tre strumenti nascosti p.157

b) I temi di Einstein p.166

## Il dibattito sulla relatività

3.1 Einstein filosofo implicito p.175

### 3.2 La dissoluzione dell'a priori

a) Relatività e giudizi sintetici a priori p.187

b) Schlick e Reichenbach p.193

### 3.3 Cassirer e il metodo critico

a) Il neokantismo di Cassirer p.207

b) Cassirer e la relatività p.213

Conclusione p.221

Bibliografia p.224

# Introduzione

Questo lavoro scaturisce da un bisogno che poi in realtà è la constatazione di una carenza, quello di affiancare ad una formazione di tipo prettamente umanistico ( filosofia, letteratura, storia e arte ) anche l'altro grande ramo del sapere, quello scientifico matematico. La metafora dell'albero con tutte le sue differenti diramazioni è a mio avviso quanto mai appropriata per esprimere la diversità e vastità del sapere umana e nel contempo la sua intrinseca unità originaria.

Per quanto eterogenei possano apparire i frutti ( un opera d'arte, una poesia, una teoria fisica ) tutti derivano e si alimentano della medesima linfa che possiamo definire creatività. In questo lavoro che verte principalmente sulla figura di Einstein e sulle sue due più note teorie, la relatività ristretta e la relatività generale, ho cercato di esporre come anche nella mente di un fisico, uno dei più geniali di sempre, un grande contributo sia svolto dall'immaginazione, la virtù poetica per antonomasia: “ *The poet's eye, in a fine frenzy rolling,/Doth glance from heaven to earth, from earth to haven;/And as imagination bodies forth/The forms of things unknown, the poet's pen/Turns them to shapes, and gives to airy nothing/A local abitation and a name.*”<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> “ L'occhio del poeta, roteando in sublime frenesia,/ guarda dal cielo alla terra e dalla terra al cielo;/ e mentre l'immaginazione dà corpo/ a cose sconosciute, la sua penna/ le cambia in forme e all'aereo nulla/ dà un luogo in cui vivere e un nome. “ W. Shakespeare, *Sogno di una notte di mezz'estate*, V, I.

È chiaro che l'impresa scientifica non si può catalogare come un puro volo di fantasia o come un ragionamento prettamente analogico ma debba sempre rimanere ancorata al dato esperenziale ed al procedimento logico; tuttavia negare una componente creativa nel procedimento della scienza sarebbe un errore piuttosto grossolano. Pensare che la scienza si riduca alla raccolta di osservazioni, alla formulazione di ipotesi ed alla verifica sperimentale denota una grande miopia che non tiene in giusta considerazione l'estro creativo di qualunque grande scienziato. Nonostante la divisione dei saperi e la conseguente differenziazione dei lavori abbia portato oramai a una deprecabile ma ineludibile suddivisione in compartimenti stagni<sup>2</sup>, quasi mai comunicanti, delle diverse aree del sapere, non bisogna dimenticare che la radice di tutte queste diverse discipline è la stessa.

L'unità degli strumenti, dei mezzi intellettuali può quindi essere vista come garanzia dell'unicità della cultura. Non esistono due culture distinte, quella umanistica e quella scientifica, o addirittura molteplici culture a seconda del diverso campo di specializzazione preso in considerazione. La cultura è una sola perché unico è lo strumento che la crea e la accresce. Voler conoscere tutto è pura utopia, ma tentare di capire tutto è possibile e costituisce il dovere del filosofo.

Questa tesi si articola in tre parti. Il primo capitolo è un'esposizione del lungo cammino di alcune idee fisiche, a partire dai padri fondatori della scienza moderna sino alle due teorie della relatività che s'inseriscono in questa lunga tradizione costituendone il coronamento. Einstein non si considerò mai un

---

<sup>2</sup> Lo stesso Einstein nella sua breve autobiografia sembra quasi rammaricarsi della vastità e profondità di studi raggiunti dalla matematica, tant'è che occorrerebbe una vita per esaurire al massimo una o due delle sue molteplici branche

rivoluzionario ma un continuatore dell'opera di Faraday, Maxwell ed Hertz, i quali, con l'introduzione in fisica del concetto di campo, stabilirono una svolta nei confronti della solida concezione meccanicistica di newtoniana memoria.

Figure altrettanto importanti per questa svolta che cronologicamente si può collocare a cavallo del XIX e XX secolo sono quella del fisico-filosofo moravo Ernst Mach e del grande matematico francese Henri Poincaré, entrambi molto apprezzati dal giovane Einstein.

Mach fu il più convinto avversario della concezione newtoniana e nel suo capolavoro, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, non lesina critiche agli oscuri concetti di massa, legge d'inerzia e gravità che costituiscono l'ossatura della concezione meccanicistica sempre più traballante.

Poincaré invece può venir ricordato come colui che più di ogni altro, Einstein a parte naturalmente, si avvicinò alla scoperta della relatività ristretta.

Da un punto di vista esclusivamente matematico, relativo cioè alla deduzione delle trasformazioni di Lorentz ( proprio a Poincaré si deve questa attribuzione ), lo scienziato francese andò di pari passo col giovane e sconosciuto Einstein; tuttavia dal punto di vista fisico non comprese la novità dell'impostazione einsteiniana che faceva discendere la contrazione dei regoli e degli orologi dall'assunzione dei due postulati a base della relatività ristretta: il principio di relatività e la costanza della velocità della luce nel vuoto.

Le idee di Einstein e Poincaré si incrociarono di nuovo attorno a un tema di grande rilevanza tornato in primo piano sulla scorta degli esiti della teoria della relatività generale: la geometria riscontrabile nello spazio fisico.

Poincaré sosteneva che allo spazio fisico si sarebbe sempre applicata la geometria euclidea perché era più comoda rispetto alle altre complicate geometrie non euclidee egualmente valide da un punto di vista logico; la relatività generale ha dimostrato invece che nello studio dell'universo era meglio servirsi della geometria riemanniana che consentiva un risparmio notevole nell'introduzione di leggi fisiche *ad hoc*.

Nella seconda parte di questa tesi ho cercato di mettere in luce le indicazioni epistemologiche disseminate da Einstein in occasione di conferenze, celebrazioni e articoli. Einstein non scrisse mai opere di epistemologia, ma rivolse spesso la sua attenzione alle questioni epistemologiche. Questo interesse non solo traspare in modo chiaro dalla sua corrispondenza personale con diversi amici e fisici, ma si rivela anche nell'impostazione stessa di alcune sue teorie. Ad esempio la relatività ristretta nasce anche da una profonda riflessione sulla validità di un concetto apparentemente banale e scontato come la simultaneità. Parafrasando Kant Einstein giungerà a dire che “ *L'epistemologia senza contatto con la scienza diventa uno schema vuoto. La scienza senza epistemologia-se pure si può concepirlo-è primitiva e informe.* ”<sup>3</sup>.

Significativo del modo di fare scienza di Einstein è l'importanza riservata all'inventiva, all'intuizione creativa, al senso estetico che permette di volare dalle esperienze agli assiomi che le possono interpretare. La progressiva valutazione, e sul finire della sua vita esaltazione, del potere creativo della ragione a discapito dei fatti empirici va di pari passo col suo pellegrinaggio filosofico- scientifico dal positivista Mach allo speculativo Planck.

---

<sup>3</sup> A. Einstein, *Replica ai vari autori*, in *Albert Einstein Scienziato e filosofo*, p. 629



Il caso emblematico della fiducia di Einstein nel potere interpretativo della razionalità è quello inerente il contributo dell'esperimento di Michelson-Morley nella genesi della relatività ristretta. Diverse dichiarazioni di Einstein e un'attenta analisi delle fonti dimostrano come l'esperimento cruciale dei fisici americani per misurare il presunto vento d'etere influi poco o nulla nella mente del giovane fisico tedesco, impegnata piuttosto nel tentativo di eliminare sgradevoli asimmetrie presenti nell'edificio maxwelliano.

Non fu la negazione per via sperimentale dell'esistenza dell'etere a far balenare in Einstein la teoria della relatività ristretta, fu semmai l'aderenza a certi criteri o temi che lo portavano a ricercare e prediligere nelle teorie fisiche, così come nella vita, la semplicità, l'unità, la simmetria e vorrei aggiungere la bellezza.

A mio avviso è proprio in questa continua aderenza e fiducia in ben definiti temi che si esplica l'immaginazione scientifica di Einstein. Il suo bagaglio tematico costituirà un filtro selettivo non tanto nei confronti dell'esperienza, che mai viene apprezzata in modo neutro, quanto nei confronti delle altre teorie e del loro impianto ipotetico-assiomatico. I criteri che guidano Einstein nella ricerca di un *Weltbild* sono la semplicità da intendersi come economia, parsimonia nell'utilizzo delle leggi fisiche e l'unità come capacità di abbracciare il maggior numero possibile di fenomeni. È quindi appropriato, alla luce di questi ideali regolativi così veementi nell'opera del grande fisico, parlare di una vera e propria fede cosmica in un ordine nell'universo: secondo Einstein Dio non gioca a dadi.

In questa convinzione di fondo è facile vedere una linea di continuità con altri grandi filosofi scienziati quali Newton e Keplero la cui opera è il sommo esempio di una felice compenetrazione di matematica, fisica, metafisica e religione.

L'ultima parte di questa tesi è invece dedicata alla ricezione in ambito filosofico della teoria della relatività ( ormai diventata un edificio a due piani ).

Tra i filosofi che si dedicarono con maggior impegno alla diffusione delle idee di Einstein e alla loro collocazione nel solco della tradizione filosofica sono da annoverare Schlick e Reichenbach, i futuri animatori dei Circoli di Vienna e di Berlino, vertici di quel vasto movimento che va sotto il nome di empirismo logico; e il massimo esponente del neokantismo del XX secolo, Cassirer.

Questi tre grandi filosofi diedero il via, attorno ai primi anni venti, a una vera e propria *querelle* attorno agli esiti filosofici della relatività e ai suoi contrastanti rapporti con la dottrina kantiana. Fulcro della discussione divenne il concetto di sintetico a priori, il cuore della magnifica architettura kantiana e il perno della cosiddetta rivoluzione copernicana in filosofia. Era ancora possibile conservare la dottrina di Kant, la cui *Critica della Ragion pura* costituiva il tentativo filosoficamente più maturo e meglio riuscito di sistematizzare l'opera newtoniana, dal naufragio subito da quest'ultima per via della nuova concezione einsteiniana ?

Con il venir meno dei concetti di spazio e di tempo assoluti ad opera della relatività ristretta e con la successiva riformulazione della gravità e della legge d'inerzia operata dalla relatività generale che per giunta si serviva di una geometria non euclidea, la fisica newtoniana risultava completamente superata.

Sembrava quindi naturale pensare che, se la fisica che sottedeva la filosofia di Kant era stata superata, stessa sorte dovesse accadere alla dottrina filosofica.

Schlick fu il più deciso sostenitore di questa posizione: tra l'interpretazione criticistica o empiristica della relatività, egli sceglieva quest'ultima.

A Reichenbach invece, almeno in un periodo iniziale, si deve l'assunzione di una posizione intermedia: rifiuto del sintetico a priori nell'accezione di apoditticamente ed universalmente valido e mantenimento del sintetico a priori nell'accezione di costitutivo dell'oggetto. In questa fase iniziale del suo pensiero, Reichenbach non sembra disposto a rinunciare alla funzione concettuale svolta dai principi sintetici a priori nella formazione della conoscenza.

Per questo motivo cerca di risolvere il palese contrasto tra alcuni principi sintetici a priori e alcuni esiti della teoria della relatività assumendo che i suoi principi della coordinazione siano rivedibili a seconda dell'esperienza.

In seguito, Reichenbach, sulla scia della lezione schlickiana, abbandonerà la concezione dei due sintetici a priori, per assestarsi su una posizione di negazionismo forte del sintetico a priori di kantiana memoria.

Cassirer rimane invece un difensore della tradizione kantiana: a suo dire la teoria della relatività non urta con la concezione kantiana del tempo e dello spazio puri che sono fonti di conoscenza, non oggetti di pertinenza della fisica, che si occupa dello spazio e del tempo empirici. Cassirer vede anzi nella relatività che ha spogliato lo spazio e il tempo degli ultimi residui di oggettività fisica, un ulteriore sostegno all'idealismo critico coinvolto nel passaggio dal concetto-genere al concetto-funzione.

Al di là di qualsivoglia presa di posizione nella disputa tra filosofia kantiana e teoria della relatività, rimane, a mio modo di vedere, il fatto incontrovertibile che una nuova immagine del mondo era sorta e la riflessione filosofica non poteva che rivolgersi verso essa.

# Capitolo primo

## Einstein

### 1.1 Nascita ed apogeo della concezione meccanicistica

Lo sviluppo delle scienze pure ed applicate assunse durante la seconda metà dell'Ottocento un ritmo rapidissimo, che le pose al centro dell'interesse culturale soprattutto nei paesi più progrediti d'Europa quali Francia, Gran Bretagna, Germania, Austria e persino nella neonata Italia.

Effetto immediato per il pubblico crescente, furono il moltiplicarsi dei periodici scientifici di matematica, di fisica, di chimica, di fisiologia; si organizzarono sempre più congressi internazionali con la partecipazione dei più illustri scienziati dell'epoca; crebbe il peso delle facoltà scientifiche all'interno delle università; alcuni governi giunsero persino ad affidare il ministero dell'istruzione, da sempre ad appannaggio di umanisti e giuristi, ad uomini di scienza quali il chimico Marcelin Bertholet in Francia e il matematico Luigi Cremona in Italia.

I risultati ottenuti furono enormi in tutti i campi e le applicazioni tecnologiche di volta in volta più perfezionate cambiarono ben presto il tenore di vita e le abitudini di ampi strati della popolazione.

Da un punto di vista puramente teorico campi di studio così distanti tra loro quali la meccanica, l'ottica, la termodinamica, l'astronomia e i nuovi fenomeni elettrici e magnetici parvero trovare un elemento comune nel meccanicismo fisico.

Con questa espressione che i filosofi riconoscono come la cifra caratterizzante il pensiero scientifico moderno, è da intendersi il modello allora dominante di spiegazione scientifica. I grandiosi successi della meccanica ottenuti da Newton spinsero a credere che ogni fenomeno fosse interpretabile in base alla conoscenza della propria posizione, velocità e massa, interagenti tra loro tramite una forza a distanza attrattiva o repulsiva.

Così si esprime Helmholtz verso la metà del XIX secolo: “ *Pertanto, noi finiamo con lo scoprire che il problema della scienza fisica materiale, è quello di riferire i fenomeni naturali a forze immutabili, di attrazione e di ripulsione, le cui intensità dipendono interamente dalla distanza. La risolubilità di questo problema è la condizione per la completa comprensione della natura*”<sup>4</sup>

Da questo principio Helmholtz desume la sua concezione di progresso scientifico, determinato e incanalato all'interno di un percorso forzato: “ *Ed il suo obiettivo sarà raggiunto, non appena la riduzione dei fenomeni naturali a forze semplici sarà completa, e verrà fornita la prova che tale riduzione è la sola di cui i fenomeni sono suscettibili*”<sup>5</sup>. A una tale concezione Einstein non lesinerà critiche definendola opaca, ingenua e monocorde. I fisici del ventesimo secolo non

<sup>4</sup> A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*, p. 66, Bollati Boringhieri, Torino 1965.

<sup>5</sup> *Ibid.* pp. 66-67

potranno accettare l'idea che venga stabilita per tutti i tempi a venire un modello infallibile circa la comprensione dell'universo. L'avventura dell'indagine scientifica è ben altra cosa: la relatività e la fisica quantistica dimostreranno in maniera inequivocabile che il vetusto edificio newtoniano aveva delle crepe insanabili e che il raggiungimento di un'unificazione finale tra le diverse branche della fisica era solo un'illusione.

La meccanica è una scienza antica, infatti già al pensiero greco risalgono le prime elaborazioni sul movimento. I primi esempi di spiegazioni meccanicistiche nella fisica greca si trovano nell'uso, da parte di filosofi della natura e di autori di opere mediche, di analogie tratte da attività tecniche. I primi esempi di spiegazioni meccaniche della materia si hanno in relazione alle forze di espansione e contrazione, all'aspirazione, alla pressione e alla forza centrifuga. Ad Aristotele si deve una fisica che, sebbene risulti completamente fallace, è da considerarsi una teoria profondamente elaborata che partendo dai dati sensibili, in particolare da quelli osservativi, cerca di collocarli all'interno di una dottrina, coerente e rigorosa rispetto alle esigenze logiche e di sistema.

I dati per il filosofo greco non costituiscono il banco di prova delle ipotesi formulate ma vengono piegati alla logica precostituita dalla teoria che risponde a criteri di eleganza interna piuttosto che di verità sperimentale.

La *physis* ellenica, che noi traduciamo con natura, è un concetto ben determinato e articolato presso i greci: la mobilità è una caratteristica propria di solo due tipi di sostanze, di quelle sensibili corruttibili cioè i corpi terrestri, e di quelle sensibili eterne, vale a dire i corpi celesti. L'indagine di Aristotele inizia con una constatazione: il mondo della natura è caratterizzato dal divenire a sua volta

composto da tre elementi o principi: privazione e forma ( da intendersi come contrari all'interno di un medesimo genere) e da un substrato a cui questi contrari ineriscono, la materia.

Aristotele analizza il mutamento sotto tutte le forme: alterazione o mutamento di qualità; generazione-corruzione o mutamento di sostanza; aumento-diminuzione o mutamento di quantità; traslazione o mutamento di luogo. Il moto di luogo è quello fondamentale infatti anche gli altri sono riconducibili ad esso. Per Aristotele conoscere significa conoscere le quattro cause di ogni sostanza, rispettivamente causa materiale, formale, agente e finale. Applicando questo principio metodologico di ordine logico agli oggetti dell'esperienza non si può che incorrere in forzature e semplificazioni.

Tutti gli oggetti terrestri vengono ridotti a quattro elementi (acqua,terra,fuoco e aria) che costituiscono la causa materiale di ogni cosa. Questi elementi sono disposti a seconda del peso in un ordine verticale: la terra, più pesante, in basso, sopra l'acqua, quindi l'aria ed infine il fuoco.

La causa formale consiste nel realizzare la propria essenza che si può ottenere soltanto raggiungendo il proprio luogo naturale. Causa finale e causa agente vengono a coincidere e corrispondono proprio a quei luoghi naturali cui ogni oggetto tende.

Ogni oggetto, a seconda dell'elemento primario di cui è composto, tenderà a raggiungere la propria collocazione attraverso un moto verticale ascendente o discendente ritenuto naturale: il fuoco andrà verso l'alto mentre l'acqua e la terra verso il basso. Gli astri invece, sostanze incorruttibili composte d'etere, continuano eternamente a muoversi lungo orbite circolari non soggetti ad alcun

altro tipo di mutamento al di fuori del moto locale. Lo studio aristotelico del moto si configura quindi come una fisica prettamente qualitativa piuttosto che quantitativa, dove la causa finale svolge il ruolo di linea guida nella ricerca di risposte circa i fenomeni naturali. Si può comprendere a pieno questa concezione soltanto collocandola nella cosmologia di fondo che la sottende: il cosmo era infatti per lo stagirita un tutto, finito e gerarchicamente ordinato sistema di sfere concentriche, di cui la terra non costituiva che la sfera più interna. La gravità veniva quindi interpretata come il moto naturale verso la terra, situata nel luogo più basso. Quando un corpo è deviato dal suo moto naturale, si parla di moto violento. Questo è caratterizzato dalla presenza di un motore esterno in continuo contatto con il corpo. Nel cosmo di Aristotele non esisteva il vuoto. Nel vuoto non si potrebbero avere punti di riferimento, non si darebbero più un alto ed un basso. Inoltre l'ammissione del vuoto avrebbe cagionato moti istantanei, infatti se gli oggetti non trovassero un mezzo interposto in cui muoversi ed essere frenati, presto andrebbero a velocità infinita. Inconcepibile.

Della mancante unione tra fisica e geometria, che tanto gioverà invece ai moderni, il motivo è presto spiegato: per Aristotele gli oggetti di studio della geometria e della fisica risultano nettamente distinti, l'una studia gli oggetti astraendoli dalla materia, l'altra in concreto.

*Il passaggio dal mondo chiuso all'universo infinito*, per citare il titolo di un celebre saggio di Koyré, richiederà venti secoli di gestazione. Seguendo la lezione del Koyré sono due i cambiamenti che meglio caratterizzano quel lungo periodo che va sotto il nome di rivoluzione scientifica: la dissoluzione del cosmo greco e la geometrizzazione dello spazio.



L'introduzione in fisica dello spazio euclideo, infinito ed omogeneo comportò il rigetto dello spazio aristotelico caratterizzato dall'ordine dei luoghi naturali. Non aveva più senso dividere i moti tra violenti e naturali perché in uno spazio infinito non si danno luoghi privilegiati, non si ha più un alto ed un basso, il luogo naturale diventa lo spazio stesso. Si assistette all'unificazione tra la *physica coelestis* e la *physica terrestris*, tra astronomia e fisica entrambe subordinate alla geometria. Il mondo delle qualità di Aristotele lascia il campo al mondo delle quantità misurabili. Poco a poco cause formali e cause finali spariscono dalla spiegazione fisica a vantaggio di cause agenti e materiali. Il concetto di sostanza che tanta importanza aveva avuto nel pensiero greco viene superato da una visione che equipara o quasi gli oggetti celesti a quelli sublunari.

L'abbattimento del cosmo gerarchicamente ordinato e finito ebbe forti ripercussioni sui filosofi e teologi che videro disgregarsi i fondamenti della secolare visione del mondo. Giordano Bruno fu il più audace tra i sostenitori della nuova concezione copernicana a tal punto che le sue sconvolgenti affermazioni circa l'infinità del cosmo e l'infinità dei mondi sopravanzarono le conclusioni degli scienziati ancora legati da una sorta di timore reverenziale all'antica concezione. Bruno pagò le sue sconvolgenti tesi con la vita, ma d'altro canto per cambiare la fisica occorreva nel contempo abbattere la metafisica che la sosteneva. La rivoluzione astronomica inaugurata dal *De revolutionibus orbium coelestium* di Copernico nel 1543, anticipò e favorì la nascita della scienza in senso moderno. I problemi cagionati dalla disputa tra geocentrismo ed eliocentrismo spinsero molti studiosi tra i quali spicca Galilei ad affinare sempre più le proprie osservazioni, attraverso l'uso di strumenti man mano più precisi, e a

creare soprattutto un metodo e un linguaggio scientifico. Galilei è giustamente annoverato tra i padri fondatori della scienza perché a lui si deve, tra le altre cose, nonostante non ne abbia fornito un resoconto scritto elaborato, il metodo della fisica.

Tuttavia le sue opere sul moto e sull'astronomia sono costellate da indicazioni metodologiche che rivelano l'applicazione di un nuovo metodo di indagine.

Il lavoro dello scienziato può suddividersi schematicamente in due momenti essenziali: uno "risolutivo" o analitico; l'altro "compositivo" o sintetico. Al primo momento compete la formulazione di un'ipotesi matematica circa il comportamento di un determinato fenomeno previamente scomposto nei suoi dati più semplici.

Al secondo momento è legata la verifica dell'ipotesi tramite l'esperimento, che è una riproduzione artificiale del fenomeno osservato in natura. Con Galileo prende campo la matematizzazione del reale che si spoglia di tutte le qualità magico, simboliche, religiose che lo avevano caratterizzato fino a tutto il medioevo, e viene riconosciuto soltanto attraverso i dati quantitativi misurabili.

Così si esprime Galileo nel *Saggiatore* " *Io dico che ben sento tirarmi dalla necessità, subito che concepisco una materia o sostanza corporea, a concepire insieme ch'ella è terminata e figurata di questa o di quella figura, ch'ella in relazione ad altre è grande o piccola, ch'ella è in questo o in quel luogo, in questo o quel tempo, ch'ella si muove o sta ferma, ch'ella tocca o non tocca un altro corpo, ch'ella è una, poche o molte, né per veruna immaginazione posso separarla da queste condizioni; ma ch'ella debba essere bianca o rossa, amara o dolce, sonora o muta, di grato o ingrato odore, non sento farmi forza alla mente*

*di doverla apprendere da cotali condizioni necessariamente accompagnata: anzi, se i sensi non ci fossero scorta, forse il discorso o l'immaginazione per se stessa non v'arriverebbe già mai. Per lo che vo io pensando che questi sapori, odori, colori, etc., per la parte del soggetto nel qual ci pare che riseggano, non sien altro che puri nomi, ma tengano solamente lor residenza nel corpo sensitivo, sì che rimosso l'animale, siano levate ed annichilite tutte queste qualità...Ma che ne'corpi esterni, per eccitare in noi i sapori, gli odori e i nomi, si richiegga altro che grandezze, figure, moltitudini e movimenti tardi o veloci, io non lo credo; e stimo che, tolti via le orecchie, le lingue e i nasi, restino bene le figure, i numeri e i moti, ma non già gli odori né i sapori né i suoni, li quali fuor dell'animal vivente non credo che sien altro che nomi, come a punto altro che nome non è il solletico e la titillazione, rimosse l'ascelle e la pelle intorno al naso.”<sup>6</sup>*

La separazione tra due tipi di qualità, definite in seguito primarie e secondarie o anche soggettive ed oggettive, a seconda della misurabilità o meno, costituì una delle più importanti acquisizioni filosofiche della modernità. Tutti i più grandi filosofi tra cui Cartesio e Locke faranno loro questa importante scoperta nella teoria della conoscenza.

Un altro luogo di attacco da parte del Seicento alla scienza antica fu la verifica sperimentale di molte cose considerate fino a questo momento come fatti e che non riuscirono invece a superare la prova dell'esperienza.

Il primo importante risultato della nuova scienza consistette in un rigetto della concezione aristotelica del moto e in particolare nella credenza intuitiva che tanto è maggiore la forza esercitata su di un corpo, tanto è maggiore la sua velocità.

---

<sup>6</sup> G.Galilei, *Il Saggiatore*, a cura di F. Flora, pp. 223-225

Galileo comprese che la forza applicata ad un corpo vi imprime un'accelerazione, e questo aumenterebbe la sua velocità infinitamente se non intervenissero forze contrarie a frenarlo come l'attrito.

Attraverso un noto esperimento mentale in cui eliminava ogni sorta di attrito, persino l'azione dell'aria, Galileo stabilì che un corpo né spinto, né tirato, né comunque sollecitato da alcuna forza esterna continua a perseverare nel suo moto uniforme, vale a dire senza alcuna variazione di velocità, lungo una linea retta. Questa preziosa conclusione poté scaturire soltanto attraverso l'attività speculativa di Galileo infatti in natura non è dato riscontrare il moto uniforme perché è impossibile eliminare l'azione frenante dell'attrito. Il basilare principio a fondamento della meccanica scoperto da Galilei verrà meglio definito poco dopo da Newton come legge d'inerzia: ogni corpo persevera nel suo stato di riposo, oppure di moto rettilineo uniforme, a meno che non sia costretto a cambiare tale stato da forze agenti su di esso. Galileo fu il primo a formulare in maniera corretta un'altra basilare legge della meccanica, quella della caduta dei gravi. In un primo momento Galileo collegò l'aumentare dell'accelerazione allo spazio percorso, la regola esatta invece, a cui il matematico pisano giunse in seguito, mette in relazione l'accelerazione con il passare del tempo.

A questo errore quanto mai proficuo, per lo storico della scienza, e niente affatto casuale dato che fu commesso pure da Cartesio, cerca di dare una risposta Koyré nei suoi *Studi galileiani*. Il sunto della dettagliata analisi dello storico della scienza sta in questa frase: “ *E' più facile, e più naturale, vedere, ovvero sia immaginare, nello spazio, che pensare nel tempo.*”<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> A. Koyré, *Studi galileiani*, p. 94, Einaudi, Torino 1976.

Per superare questa ingannevole corrispondenza biunivoca tra gli istanti e i punti percorsi nello spazio era senza dubbio necessaria una buona padronanza del calcolo integrale ma occorreva anche fare violenza ai propri sensi ingannevoli per seguire una spiegazione meno intuitiva ma esatta.

Problemi che a noi sembrano semplicissimi, come la legge d'inerzia e la caduta dei gravi, risultarono estremamente difficili a uomini dalle qualità non certo comuni come Galileo e Cartesio perché il loro approccio ai problemi risentiva ancora dell'influenza metafisica che per secoli aveva determinato le risposte ai problemi scientifici. Il mantenimento delle orbite circolari in Galileo o l'*horror vacui* in Cartesio non sono che gli ultimi tributi pagati a una presunta gerarchia assiologica dell'universo. Nonostante alcuni comprensibili errori, essi furono gli apripista verso un nuovo modo di guardare alla natura che ha apportato all'umanità benefici immani.

Certamente Cartesio non ottenne risultati scientifici paragonabili a quelli di Galileo tuttavia il suo contributo alla nascente concezione meccanicistica del mondo fu decisivo sul piano filosofico.

Lo storico olandese E.J. Dijksterhuis che ha scritto una storia del meccanicismo dai presocratici sino a Newton, si è domandato se questo termine sia riconducibile al significato di ordigno o macchina presente nel termine greco di *mechané* o non vada piuttosto ricondotto a quella branca della fisica che studia l'equilibrio e il moto denominata appunto meccanica. La soluzione di Dijksterhuis è chiara: solo con Galilei e Newton si può parlare di una scienza meccanica, vale a dire di una fisica matematica che studia l'equilibrio e il moto dei corpi. La filosofia meccanica è invece una concezione precedente la nascita della scienza, fondata su

alcuni presupposti: la natura non è la manifestazione di un principio vivente ma è un sistema di materia in movimento retta da leggi determinabili con precisione matematica. Si riteneva inoltre che poche leggi bastassero per spiegare l'universo da cui erano bandite le cause finali e le forze vitali. Solo dopo l'avvento di Newton si tenderà a far coincidere la concezione meccanicistica della natura con la portentosa, visti i risultati, meccanica newtoniana che nel volger di un secolo è diventata il modello dominante nella scienza. La metafora prediletta dai meccanicisti è quella di un grande orologio sempre più emancipato dal proprio artefice, se inizialmente è ancora ritenuto indispensabile l'avvio da parte di un creatore ( orologiaio per restare nella metafora ), agli inizi dell'Ottocento non si sente già più il bisogno di questa "ipotesi", siamo al *dieu faineant*.

Il pensatore che maggiormente contribuì al sorgere dell'idea del mondo come macchina fu Cartesio che con il suo sistema filosofico riuscì a colmare il vuoto lasciato dall'irrimediabile sconfitta dell'aristotelismo. La filosofia meccanica di Cartesio ebbe il merito di dare ordine e struttura a una mole immensa di brillanti risultati scientifici accumulati nei decenni precedenti.

L'edificio cartesiano si presentò alla cultura europea, ed è questo un motivo della sua grande fortuna, come un sistema. Esso era fondato sulla ragione, bandiva definitivamente ogni ricorso a forme di occultismo e di vitalismo, e riusciva a connettere in maniera nuova e soddisfacente scienze della natura, filosofia della natura e religione in un quadro armonico e coerente. *Res cogitans* e *res extensa* appaiono realtà rigidamente separate. La natura non ha nulla di psichico e non può essere interpretata con le categorie dell'animismo; gli unici ingredienti che costituiscono il mondo sono il movimento e la materia. Tutti i fenomeni naturali

sono spiegabili in base al movimento, alla grandezza, alla forma e all'organizzazione delle sue parti. La fisica di Cartesio coincide con la sua geometria, fu questo il suo grave errore. Cartesio aveva scritto tutta la sua fisica senza impiegare formule e non si era servito del linguaggio della matematica. La sua fisica non conteneva leggi espresse matematicamente, la sua era una fisica matematica senza matematica. Il "matematismo" cartesiano si manifestava solo nel carattere assiomatico e deduttivo della sua costruzione del mondo. Il titolo stesso del capolavoro di Isaac Newton *Philosophiae naturalis principia mathematica* esprimeva una presa di posizione polemica nei confronti della fisica di Cartesio e dei cartesiani. Newton rappresenta il culmine e la sintesi del secolo della genialità, così come lo definì Whitehead. In una oramai celebre frase contenuta in una lettera di Newton indirizzata ad Robert Hooke, lo scienziato della gravitazione universale affermava di aver visto più cose degli altri perché era salito sulle spalle di giganti, per usare una celebre metafora di Bernardo di Chartres.

Naturalmente non si può sminuire il genio<sup>8</sup> di Newton ma l'immagine delle spalle dei giganti trasmette bene l'idea della grande sintesi operata dallo scienziato inglese: presentare in un linguaggio matematico i principi della filosofia naturale e nel contempo fare propria la grande lezione dello sperimentalismo di Bacone, di Hooke e di Boyle.

Seguendo la lezione di Koyré, Newton si presenta come la sintesi di due diverse correnti di pensiero che avevano animato la discussione: da un lato il

---

<sup>8</sup> Alla fine del XVIII secolo che vide il trionfale successo della scienza newtoniana, Pope poté esclamare: *Nature and nature's laws lay hid in night: God said, Let Newton be ! And all was light !*

panmatematismo di Galilei e di Cartesio che richiama l'indirizzo platonico di una struttura e determinazione matematica dell'essere; dall'altro la filosofia corpuscolare di Boyle, Gassendi, Roberval, Hooke che si ricollega in maniera esplicita alla concezione atomistica della materia di Democrito e di Epicuro.

Il libro della natura per Newton è scritto in termini corpuscolari legati da una sintassi matematica.

I *Philosophiae naturalis principia mathematica* ( 1687 ) di Newton portano a compimento definitivo quell'impressionante rivoluzione nella scienza e nell'astronomia che possiamo far iniziare con il *De revolutionibus orbium coelestium* ( 1543 ) di Copernico. Lo scienziato inglese riuscì nell'impresa di completare e unire una gran mole di risultati già esistenti, dando alla scienza un edificio solido e apparentemente imperituro. Gli elementi essenziali della teoria di Newton furono: l'accettazione delle leggi di Keplero, un'applicazione conseguente della legge dell'inerzia rettilinea, una chiara comprensione della forza centrifuga e una dottrina della gravitazione universale in cui tutta la materia presente nell'universo è considerata equivalente e in cui ogni parte attrae ogni altra parte con una forza proporzionale alla quantità di materia e inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra le parti che si attraggono. Newton sistemò definitivamente la dinamica dandogli la sua veste classica attraverso l'enunciazione dei tre principi basilari: la legge d'inerzia; il principio di proporzionalità tra la forza e l'accelerazione; il principio di azione e reazione.

I primi due principi furono già intuiti da Galileo mentre il terzo è un contributo originale di Newton. Il principio di azione e reazione stabilisce che ogni azione ha una reazione uguale e contraria quindi le azioni reciproche di due corpi sono



sempre uguali e di senso contrario. Questo principio diventa evidente se guardiamo alla più grande scoperta di Newton, la gravitazione universale.

Già durante lo studio sulla caduta dei gravi Galileo aveva compreso che la velocità dei corpi in caduta libera va aumentando in proporzione ai tempi, e non agli spazi come in precedenza aveva creduto. Ma sarà Newton a estendere con una felice intuizione la forza che attira gli oggetti al suolo, al moto dei pianeti unificando definitivamente lo studio della fisica e dell'astronomia.

L'effetto di questa insperata unificazione fu enorme e Newton fu riconosciuto come colui che aveva svelato l'arcano dell'universo. Un altro grande merito di Newton consiste nella distinzione tra il concetto di massa e di peso, quest'ultimo infatti varia a seconda dell'intensità della forza gravitazionale cui è sottoposto, mentre la massa non varia in alcun luogo dell'universo. Il mondo per Newton risulta costituito da diversi enti: la materia, vale a dire un infinito numero di particelle separate, distinte, impenetrabili ed immodificabili; il movimento; lo spazio concepito come vuoto infinito e omogeneo; ed infine l'attrazione. Oltre al vuoto, la cui ammissione denota un'ulteriore differenziazione dalla fisica cartesiana che lo negava decisamente, l'attrazione gravitazionale è la grande novità del sistema newtoniano, il punto di forza ma allo stesso tempo il bersaglio polemico.

Ricorrendo a una terminologia moderna, la legge della gravitazione può essere considerata o una legge operativa o l'ipotesi in un sistema ipotetico-deduttivo: in entrambi i casi Newton era giustificato quando rispondeva ai suoi critici di non aver fatto ipotesi fisiche speciali ma di essersi limitato a descrivere i fenomeni nel modo più semplice possibile. La gravità è definita come una forza centripeta, è

sulla causa della gravità che i pareri sono discordanti. Mary B. Hesse sostiene che c'erano almeno quattro ipotesi comunemente accettate sulla gravità all'epoca di Newton: la forza di gravità è suscitata dagli angeli per far muovere i pianeti; i corpi hanno tendenze interne naturali a muoversi l'uno verso l'altro e queste tendenze possono essere inconsce, consapevoli o addirittura intelligenti; i corpi hanno una qualità innata di attrazione gravitazionale; esiste un qualche meccanismo corpuscolare in grado di produrre la forza richiesta. Le maggiori polemiche ruotarono attorno alla terza ipotesi che sostituiva la tendenza al movimento della seconda ipotesi in virtù della quale il mobile è attivo, con una qualità di attrazione interna al corpo che attrae rendendo di fatto il mobile passivo. In questo cambio di prospettiva i critici di Newton videro un ritorno alla teoria aristotelica ed accusarono la gravità di essere una "qualità occulta". Newton si difese affermando che l'attrazione non era in alcun caso una "qualità occulta" come le qualità postulate dagli aristotelici perché le forze gravitazionali della sua teoria spiegavano il moto dei corpi mentre le qualità aristoteliche erano semplici nomi. Illuminante è un passaggio nella *Query* che Newton inserisce nella seconda edizione della sua *Opticks* nel 1717 : *"Considero questi principi [gravità, fermentazione o azioni chimiche e coesione] non come qualità occulte, che si suppone risultino da forme specifiche di cose, ma come leggi generali della natura, dalle quali le cose stesse sono formate e la cui verità ci appare attraverso i fenomeni, benché le loro cause non siano ancora scoperte. Poiché queste sono qualità manifeste, e soltanto le loro cause sono occulte."*<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> *Opticks*, 2 ed., London 1718, *Query* 31. Citato da M. B. Hesse, *Forze e campi*, p. 175, Feltrinelli, Milano, 1974

L'interpretazione della gravità come qualità innata dei corpi, paragonabile all'estensione o alla massa, è forse quella che trae in inganno più facilmente, perché evoca la nozione di un potere invisibile che fluisce fuori dal corpo ed esercita una presa sui corpi lontani. Newton mette in guardia circa una tale interpretazione della forza centripeta, non considerando la gravità come essenziale ed intrinseca alla materia. Tuttavia l'idea che la gravità sia da porre tra il novero delle qualità primarie dei corpi, come l'estensione, la mobilità e l'impenetrabilità si deve a Roger Cotes che scrisse la prefazione alla seconda edizione dei *Principia* nel 1713.

Secondo Newton deve esistere una qualche causa fisica, non ancora scoperta, della gravità infatti era per lui inconcepibile che “ *la materia bruta, inanimata, possa, senza la mediazione di qualcos'altro, operare su altra materia e influire su di essa senza un mutuo contatto.* ”<sup>10</sup>

Inoltre “*E' assurdo supporre che la gravità sia innata e agisca senza un mezzo, materiale o immateriale.*”<sup>11</sup> A Newton va quindi attribuito il grande merito di aver scoperto come si muovono i pianeti, ma la causa della gravità gli rimase oscura e sarebbero occorsi ancora dei secoli per fare chiarezza su quella misteriosa forza che teneva assieme l'universo. Nel frattempo Newton si accontentava di supporre che le particelle dei corpi abbiano “*certi poteri, virtù o forze, mediante cui agiscono a distanza*”<sup>12</sup>, presentando sia attrazione che repulsione.

Oltre agli studi meccanici e astronomici, Newton fornì contributi enormi persino nel campo dell'ottica. Nella sua *Opticks, or a Treatise of the Reflexions,*

---

<sup>10</sup> Terza lettera a Bentley, in *Works of Richard Bentley*, III, p. 211. Citato da M. B. Hesse, *op. cit.*, p. 177

<sup>11</sup> *Ibid.*

<sup>12</sup> *Query* 31, in *Opticks*, p. 375, cit. da M.B. Hesse, *op. cit.*, p. 178

*Inflexions and Colours of Light*, pubblicata a Londra nel 1704, Newton rielaborava ricerche già ampiamente trattate in precedenza.

Riprendendo il tema della natura ondulatoria o corpuscolare della luce Newton assunse una posizione favorevole alla tesi corpuscolare. Tra gli studiosi propensi a considerare la luce composta da corpuscoli inconcepibilmente piccoli e veloci emanati dai corpi e tra quelli che consideravano la luce come un fluido attraverso il quale si compiono moti ondulatori, Newton scelse l'una o l'altra interpretazione a seconda dei dati sperimentali. Tuttavia ritenne che la tesi ondulatoria non fosse in grado di spiegare né la propagazione rettilinea della luce, né la formazione delle ombre dietro gli ostacoli.

Questa disputa tra corpuscolaristi e sostenitori della teoria ondulatoria si protrarrà con alterne vicende sino al Novecento con l'ormai assodato dualismo onda-particella.

Un altro grande risultato ottenuto dallo scienziato britannico nel campo dei fenomeni ottici fu quello relativo alla scomposizione della luce bianca nei diversi colori attraverso l'ormai celeberrimo esperimento del prisma. I colori non derivano dalla riflessione o dalla rifrazione dei corpi naturali, ma dipendono da qualità insite nel raggio di luce che a seconda del diverso grado di assorbimento delle superfici, fa apparire gli oggetti di colori differenti. La luce bianca non è luce pura, ma è data dalla miscela di raggi che hanno caratteristiche differenti.

La grande autorità di Newton fece accettare questa opinione per oltre un secolo e soltanto durante l'Ottocento si inizierà a porre in discussione la teoria corpuscolare della luce e a riabilitare la teoria ondulatoria.

Ben presto la sintesi newtoniana assurse a schema dominante e venne identificato con la scienza *tout court*. La figura di Newton fu mitizzata dai suoi successori che portarono a perfezione il sistema, sviluppando gli strumenti matematici e affinando le ricerche sperimentali. Laplace, nel suo *Système du monde*, affermò con orgoglio di aver trovato soluzione a tutti i problemi astronomici e a Napoleone che gli chiedeva quale posto fosse rimasto per il buon dio, rispose che si poteva ormai fare a meno di quella ipotesi. La scienza newtoniana fu ben presto oggetto d'interesse da parte dei filosofi, di Locke prima e di Kant in seguito, diventando il credo scientifico del XVIII secolo.

La meccanica si presentava quindi come la scienza delle scienze. Con il termine meccanicismo, ricordiamolo, dobbiamo intendere una dottrina filosofica che rigetta l'interpretazione finalistica del mondo e sostiene un rigoroso determinismo che spiega i fenomeni del mondo fisico tramite il movimento spaziale dei corpi. La spiegazione meccanicistica venne applicata con successo anche a fenomeni apparentemente distanti dai fenomeni propriamente meccanici quali lo studio del calore e dell'energia. Joule attraverso semplici esperimenti riuscì a collegare uno spostamento di pesi con un innalzamento di temperatura, dimostrando che energia meccanica e calorifica sono solo due differenti forme che assume l'energia. Successivamente con la teoria cinetica della materia si cercò di ricondurre il calore a una forma di energia meccanica. Grazie ad esperimenti compiuti sui gas si giunse alla conclusione che il calore è propriamente l'energia cinetica del moto molecolare.

Una sorprendente prova sulla natura delle molecole fu fornita successivamente dal botanico scozzese Brown che osservò il movimento disordinato di alcuni grani di

polline in sospensione nell'acqua. Inizialmente si pensò che il loro moto fosse dovuto alla presenza di vita nel polline; ma esito uguale si ottenne pure con particelle di colorante del tutto inanimate. Solo in seguito si comprese che il moto disordinato dei minuscoli granelli era provocato dagli urti delle molecole d'acqua, confermando la natura granulare della materia.

Anche per quanto riguarda l'allora nascente interesse verso i fenomeni elettrici e magnetici, l'impostazione meccanicistica fece da guida e modello.

La fondamentale legge di Coulomb sull'attrazione e repulsione tra le cariche ricalca alla perfezione la legge sulla forza di attrazione tra le masse. L'iniziale teoria elettrica basata sul concetto dei fluidi denota l'influenza delle idee meccanicistiche che cercano di spiegare qualsiasi fenomeno mediante sostanze e forze interagenti.

Per riassumere e concludere l'origine della meccanica risale agli albori della civiltà, quando Archimede studiò il principio della leva; Aristotele cercò di spiegare il moto, ma il suo tentativo rivelatosi fuorviante, oltre ché infruttuoso verrà superato dalla scienza del Seicento e in particolare da Galilei a cui si deve l'intuizione dell'inerzia e la formulazione della caduta dei gravi.

Sarà Newton a completare l'opera con la fondamentale scoperta della legge di gravitazione universale che permetterà di accomunare i moti terrestri e quegli degli astri. A Newton si deve inoltre l'importante distinzione tra i concetti di peso, legato all'accelerazione terrestre, e di massa, uguale in ogni parte dell'universo.

A fronte di questi strabilianti successi è facile capire come la spiegazione meccanicistica divenne lo “ *sfondo filosofico* ” dominante, per usare un’espressione di Einstein.

## **1.2 La crisi del meccanicismo**

La meccanica fu la prima parte della fisica a essere sviluppata secondo gli schemi che usiamo oggi: servì da modello per il lavoro successivo e, per molto tempo, vi furono la speranza o l’illusione di ridurre a essa tutta la fisica. L’elettromagnetismo costituisce l’altro grande pilastro della fisica classica, e in ultima analisi, si dimostrò irriducibile alla meccanica. Alla morte di Newton, quando la meccanica aveva quasi preso la sua configurazione moderna, la maggior parte delle scoperte relative all’elettricità doveva ancora essere fatta: la fenomenologia dell’elettrostatica e della magnetostatica infatti fu esplorata in larga misura nel XVIII secolo. Attorno al 1770 la fenomenologia dell’elettricità statica poteva dirsi nota. Si sapeva che esistevano due tipi di elettricità, una positiva e l’altra negativa, ovvero, come altri pensavano, un tipo solo, ma tale da poter essere aggiunto o sottratto a un campo elettricamente neutro. Si sapeva che l’elettricità si conserva e cioè che la somma delle cariche positive e negative è costante. Si conoscevano gli isolanti nei quali l’elettricità non si può spostare e i conduttori, nei quali essa si sposta liberamente. Si sapeva che cariche uguali si respingono tra loro e che cariche opposte si attraggono.

La decadenza dell'interpretazione meccanicistica della natura inizia a manifestarsi in contemporanea all'insorgere di difficoltà insormontabili all'interno della teoria dei fluidi elettrici e della teoria corpuscolare della luce. La prima anomalia fu riscontrata da Oersted in un semplicissimo esperimento in cui poneva un ago magnetico al centro di un filo collegato inizialmente soltanto ad una piastra di rame e scollegato dalla piastra di zinco. Congiungendo il filo alla piastra di zinco si produce un effetto strano: l'ago magnetico inizia a ruotare in senso perpendicolare al piano del circuito. Questo esperimento oltre a mettere in luce l'interazione tra fenomeni elettrici e magnetici, è interessante soprattutto perché rivela una forza agente perpendicolarmente alle linee congiungenti il circuito e l'ago magnetico. Questa forza contraddice il modello meccanicista in cui le forze agiscono in maniera attrattiva o repulsiva lungo la linea congiungente gli oggetti. In seguito un altro fisico, Rowland, effettuò il solito esperimento ma con un'interessante variazione, invece che un filo conduttore, utilizzò una sferetta carica in moto circolare. L'effetto sull'ago magnetico fu lo stesso. Inoltre Rowland notò che aumentando la velocità della sferetta, aumentava l'intensità della forza che fa deflettere l'ago. Questo risultato era in stridente contrasto con l'assunto meccanicistico basato sulla convinzione che tutti i fenomeni debbano essere spiegati mediante forze dipendenti unicamente dalla distanza e non dalla velocità.

I nomi a cui si deve maggiormente la svolta nel campo dei fenomeni elettromagnetici sono quelli di Faraday e Maxwell: il primo fu un infaticabile sperimentatore, il secondo un geniale teorico.



Nel 1821 Faraday aveva analizzato l'azione scoperta da Oersted, sottolineando il fatto che l'azione magnetica era perpendicolare alla direzione della corrente che la produceva. Faraday era convinto che il rapporto tra l'elettricità e il magnetismo doveva essere esteso oltre i risultati di Oersted e che, se una corrente poteva produrre un campo magnetico, anche un campo magnetico doveva essere in grado di produrre una corrente. Nel 1831 Faraday presentava una comunicazione in cui descriveva i risultati sperimentali che gli permettevano di dimostrare che, come un circuito percorso da corrente elettrica era in grado di produrre linee di forza magnetiche circolari, allo stesso modo, simmetricamente, si potevano ottenere correnti elettriche variando nel tempo le linee di forza magnetiche concatenate col circuito. Erano le basi di quella che ancora oggi è nota come legge di induzione elettromagnetica. Le osservazioni di Faraday aprivano scenari di ricerca talmente nuovi da imporre l'uso di nuovi termini. Le basi stesse su cui Faraday aveva costruito l'unificazione dei fenomeni elettrici e magnetici, le linee di forza e le azioni per contatto, contraddicevano la descrizione dualistica del mondo fisico dei newtoniani, fatto di materia composta di atomi, quindi intrinsecamente discreta, collocata in un continuo spaziale inerte. Il passaggio dal linguaggio dei fluidi al linguaggio del campo rappresentò un notevole cambiamento. Il nuovo concetto di campo, introdotto da Faraday, non solo fu un modo nuovo di rappresentare i fenomeni elettrici, ma permise facilmente di riconoscere la similarità tra la corrente circolante in un solenoide ed un magnete lineare. Soltanto le proprietà del campo appaiono essenziali nella descrizione dei fenomeni, la diversità delle sorgenti non conta. Inizialmente il campo apparve come qualcosa da inserire tra una sorgente di elettricità ed un ago magnetico, ben presto ci si rese conto che il

campo era il vero e proprio intermediario o agente della corrente tramite il quale la corrente esplica la sua azione. Infine il campo diviene il nuovo linguaggio per esprimere gli effetti delle cariche e dei magneti.

Grazie alla nozione di campo diventa facile spiegare gli esperimenti simmetrici di Oersted e di Faraday: un campo elettrico variante è accompagnato da un campo magnetico e viceversa un campo magnetico variante è accompagnato da un campo elettrico.

A proposito dell'introduzione della nozione di campo così si esprime Einstein : “ *Durante la seconda metà del secolo XIX idee nuove e rivoluzionarie permearono la fisica ed aprirono il varco a nuovi criteri filosofici, in contrasto con l'interpretazione meccanicistica. I risultati dei lavori di Faraday, di Maxwell e di Hertz condussero allo sviluppo della fisica moderna, alla creazione cioè, di nuovi concetti che ci offrono una nuova immagine della realtà.*”<sup>13</sup>

Come sostiene Mary B. Hesse nel suo volume *Forze e campi*, all'inizio dell'Ottocento si distinguevano tre modi attraverso cui si trasmetteva l'azione a distanza, ciascuno caratterizzato da un modello matematico: l'azione attraverso urti nella quale l'elasticità è considerata una proprietà ultima dei corpi, come nella legge newtoniana dell'urto elastico; l'azione a distanza come nelle teorie della gravitazione e dell'attrazione elettrica e magnetica dove veniva universalmente supposto che l'azione si trasmettesse istantaneamente; l'azione in un mezzo continuo, descritta nei termini di una teoria del campo.

Fu Faraday per primo a proporre che l'azione a distanza fosse una spiegazione inadeguata delle forze elettriche e magnetiche. Poisson aveva dimostrato che un

---

<sup>13</sup> A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*, p.135, Bollati Boringhieri, Torino 1965.

potenziale potrebbe essere introdotto nell'elettrostatica in modo simile all'introduzione del potenziale gravitazionale, e benché Faraday riconoscesse di non avere le conoscenze matematiche per avallare tale trattazione, si convinse per via sperimentale che il mezzo interposto doveva essere considerato il portatore di azione elettrica e magnetica in un senso più che formale. Faraday desiderava concretamente raffigurare gli eventi che hanno luogo in un mezzo, e seppur non diede contributi matematici alla teoria dei campi, le sue raffigurazioni di linee di forza emananti da conduttori carichi e da magneti divennero la base dell'estensione della teoria nelle mani di Maxwell. Il suo uso di rappresentazioni grafiche lo condusse a discutere e reinterpretare il significato dell'azione per contatto e dell'azione a distanza. Analizzando il fenomeno dell'induzione elettrica Faraday maturò l'idea che l'azione si propagasse attraverso un mezzo e non a distanza. Grazie ai risultati di continue ricerche sperimentali Faraday stabilì che il mezzo isolante propaga l'induzione elettrica per mezzo delle proprie particelle, ciascuna delle quali si comporta come un conduttore e diviene polarizzata.

Questa azione ha luogo tra particelle contigue lungo linee curve e Faraday ritiene che questa sia una forte prova del fatto che l'induzione sia “ *un'azione di particelle continue che agiscono l'una sull'altra e non un'azione a distanza.* ”<sup>14</sup>

Questa constatazione spinge Faraday a ritenere, contro la concezione ortodossa, che la materia è ovunque continua, che gli atomi sono molto elastici e deformabili, in grado di compenetrarsi a vicenda, e che “ *la materia riempie tutto lo spazio, o almeno tutto lo spazio a cui si estende la gravitazione...poiché la gravitazione è una proprietà della materia dipendente da una certa forza ed è*

---

<sup>14</sup> *Diary*, vol. III, p. 88. Da M. B. Hesse, *Forze e campi*, p. 230, Feltrinelli Milano 1974.

*questa forza a costituire la materia...*<sup>15</sup>. In queste righe è segnato il passaggio decisivo da un'azione continua concepita meccanicamente a un'azione continua intesa nei termini di forze riempienti lo spazio. Maxwell interpreta l'opera di Faraday come una sostituzione di concetti di azione a distanza con un'azione continua nel senso seguente: *“Faraday concepiva linee di forza che attraversavano tutto lo spazio, mentre i matematici vedevano centri di forza che attraevano a distanza: Faraday vedeva un mezzo dove essi non vedevano altro che distanza; Faraday ricercava la sede dei fenomeni in azioni reali che si propagavano nel mezzo, mentre essi erano soddisfatti di averla trovata in un potere di agire a distanza impresso nei fluidi elettrici.”*<sup>16</sup> Faraday è propenso a considerare come veicolo delle vibrazioni luminose non un etere quasi materiale ma le linee di forza stesse che costituiscono la materia e pervadono tutto lo spazio. In altri luoghi lo scienziato inglese si sforza di sottolineare che l'espressione *“ linee di forza ”* non lo impegna a sostenere alcuna teoria particolare circa la loro natura: *“ L'espressione linea di forza magnetica è intesa a esprimere semplicemente la direzione della forza in un luogo dato e non un'idea o nozione fisica del modo in cui la forza può esservi esercitata, si tratti di azioni a distanza, pulsazioni, onde, una corrente o altre cose ancora.”*<sup>17</sup> Le linee di forza sono qui semplicemente ciò che sarebbe rappresentato da limatura di ferro disseminata nel campo, e Faraday usa le loro strutture come un modello: *“ Se uno sperimentatore che ha deciso di considerare il potere magnetico come rappresentato da linee di*

---

<sup>15</sup> *Experimental Researches*, vol. II, p.293. Da M. B. Hesse, *Forze e campi*, p. 232, Feltrinelli Milano 1974

<sup>16</sup> *Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford 1873, vol. I, p. x. Da M. B. Hesse, *Forze e campi*, p. 233, Feltrinelli Milano 1974

<sup>17</sup> *Experimental Researches*, cit. da M. B. Hesse, *Forze e campi*, p. 233, Feltrinelli Milano 1974

*forza magnetiche si negasse l'uso di limatura di ferro, rinunciarebbe volontariamente e senza necessità a un aiuto prezioso. Usando tale limatura egli può rendere immediatamente visibili molte condizioni di tale potere, anche in casi complicati...In tal modo risultati probabili possono emergere immediatamente e si può ottenere più di un suggerimento valido per futuri esperimenti.*"<sup>18</sup>

Il problema di Faraday, che ha sostituito il dualismo di materia e forza con la concezione di una forza onnipervasiva ma differenziata in modo continuo, è quello di descrivere le forze che agiscono in spazi apparentemente vuoti. Faraday usa una terminologia derivata dall'idea di un fascio di fibre elastiche in tensione ed espressioni come conduttività che attestano un'analogia tra forza magnetica e corrente elettrica.

Per introdurre nel discorso la fondamentale figura di Maxwell conviene riportare quanto dice Einstein ne *L'evoluzione della fisica* : “ *La definizione quantitativa, ovvero matematica, del campo si riassume nelle equazioni che portano il nome di Maxwell...La formulazione di queste equazioni costituisce l'avvenimento più importante verificatosi in fisica dal tempo di Newton in poi e ciò, non soltanto per la dovizia del loro contenuto, ma anche perché esse hanno fornito il modello di un nuovo tipo di legge.*”<sup>19</sup> Le equazioni di Maxwell sono leggi che descrivono la struttura del campo la cui realtà è fuori discussione. Le equazioni di Maxwell permettono di prevedere il comportamento del campo elettromagnetico a partire da un istante dato, a differenza della meccanica newtoniana dove per conoscere il moto di una particella era necessario conoscere la sua posizione e la sua velocità in un preciso istante e inoltre le forze agenti su di essa. Un'altra notevole

<sup>18</sup> *Experimental Researches*, cit. da M. B. Hesse, *Forze e campi*, p. 233, Feltrinelli Milano 1974

<sup>19</sup> A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*, p.153, Bollati Boringhieri, Torino 1965.

differenza tra la teoria del campo e quella della gravitazione è costituita dal fatto che quest'ultima agisce a distanza, mettendo in relazione fatti ed "attori" lontani tra loro, come ad esempio la Terra e il Sole, invece il campo aumenta le nostre conoscenze gradualmente a partire dalle immediate vicinanze e dall'istante appena trascorso.

Il principale scopo propostosi da Maxwell nelle sue ricerche sull'elettromagnetismo fu quello di tradurre in forma matematica precisa le idee di Faraday, dimostrando con ciò ai fisici-matematici seguaci della grande tradizione newtoniana che anche la fisica del continuo poteva venire elevata al rango di autentica scienza, altrettanto bene quanto la fisica del discontinuo.

L'abbandono da parte di Maxwell della teoria dell'azione a distanza costituisce un distacco definitivo dal meccanicismo di marca newtoniana che di fatto nel corso dell'Ottocento si identificava del tutto con il meccanicismo, come sottolineavano sia fisici che filosofi.

Il gravissimo colpo inferto dal fisico britannico alla concezione sostanzialmente newtoniana dei fenomeni elettrici e magnetici, fin da allora sostenuta da gran parte dei fisici, provocò quindi agli occhi dei contemporanei una decisiva svolta verso l'antimeccanicismo. Di questo parere sono fermamente convinti anche Einstein ed Infeld che a chiare lettere lo ribadiscono nella loro *Evoluzione della fisica* : “ *L'accettazione del nuovo concetto si affermò progressivamente, e finalmente il campo lasciò in ombra la sostanza. Ci si accorse allora che qualcosa di molto importante era avvenuto in fisica. Erasi creata una nuova realtà, un nuovo concetto che non trovava posto nello schema meccanicistico. Lentamente e non senza lotta il concetto di campo finì per occupare una posizione*

*direttiva in fisica e ne costituisce tuttora uno dei concetti basilari. Per il fisico moderno, il campo elettromagnetico è altrettanto reale quanto la sedia su cui egli siede.* <sup>20</sup>. Di diverso avviso è il convinto antimeccanicista Duhem secondo cui le teorie elettriche di Maxwell non costituivano affatto una radicale innovazione nella metodologia classica della fisica. L'accusa mossa da Duhem a Maxwell è quella di non aver rinunciato a rappresentarsi i fenomeni elettromagnetici mediante modelli; la ragione di ciò sarebbe da ricercarsi della maniera inglese di ritenere i modelli come l'unico strumento in grado di visualizzare le teorie fisiche, cioè di renderle concrete e tangibili in accordo con i canoni dell'empirismo. Tuttavia sta di fatto che Maxwell finì per rinunciare del tutto ai modelli per affidarsi a una trattazione prettamente matematica. L'affermazione di Hertz, uno dei massimi conoscitori delle opere maxwelliane, “ *La teoria di Maxwell è il sistema delle equazioni di Maxwell*”, è illuminante. In base a questa frase non si deve ritenere, sempre secondo Duhem che le equazioni costituissero per lo scienziato britannico una sorta di modello, ma piuttosto viene espressa la convinzione che lo scienziato non sia tenuto a completare la matematizzazione con l'aggiunta di una teoria perché in fin dei conti matematizzare e teorizzare coincidono. A mio avviso è proprio con questa presa di posizione che Maxwell fa compiere un passo in avanti ai fisici-matematici, liberandoli dal peso ingombrante di una qualsivoglia spiegazione “filosofica” attraverso la teoria.

Maxwell porta a compimento il lungo processo, iniziato da Galileo, di emancipazione della fisica dalla metafisica come fa giustamente notare Emilio Segrè nel suo volume *Personaggi e scoperte nella fisica classica* dove tracciando

---

<sup>20</sup> A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*, p.161, Bollati Boringhieri, Torino 1965.

un bilancio finale sul grande Galilei individua la sua tesi più importante nella separazione tra scienza e filosofia da cui deriverebbe la sua ostilità nei confronti di Aristotele in quanto autorità. I modelli sono semplici ausili della ricerca da abbandonarsi a ricerca compiuta. L'impresa della scienza si riduce ai dati osservativi e alla loro traduzione in formule.

Approfondendo lo studio del campo e le sue variazioni nel tempo, Maxwell intuì che le cariche oscillanti emettevano energia sotto forma di onde elettromagnetiche. Ulteriori ricerche dimostrarono che l'onda elettromagnetica si propaga nel vuoto alla velocità della luce, un risultato strabiliante. Soltanto in seguito Hertz dimostrò sperimentalmente ciò che era stato ipotizzato a livello teorico. Il fatto che onde elettromagnetiche e luce avessero la stessa velocità gettò un ponte tra i fenomeni elettromagnetici e ottici. La teoria ondulatoria della luce trovò un'ulteriore conferma. Questo risultato giovò inoltre all'idea di una possibile unificazione di tutti i fenomeni fisici sotto un'unica teoria infatti le equazioni di Maxwell per l'induzione elettrica e per la rifrazione ottica sono identiche. Uno dei cardini della teoria elettromagnetica della luce era la presenza di un mezzo che assicurasse la trasmissione dei segnali nello spazio. Questa funzione fu assunta da un'ipotetica sostanza definita etere. Così si esprime Maxwell alla voce "Etere" nella nona edizione dell'*Encyclopaedia Britannica* " *Senza alcun dubbio gli spazi interplanetari e interstellari non sono vuoti, ma occupati da una sostanza materiale o da un corpo, che è sicuramente il più grande, e probabilmente il più uniforme che sia a nostra conoscenza.* " <sup>21</sup>

---

<sup>21</sup> A. Pais, *Sottile è il signore*, p.123, Bollati Boringhieri, Torino 1986.



### 1.3 Mach critico di Newton

Quando si pensa al venir meno della certezza nella concezione meccanicistica della natura, sul finire del XIX secolo, un nome a cui non si può non fare riferimento è quello di Ernst Mach.

Mach che studiò fisica e matematica a Vienna, ebbe una solida formazione scientifica impostata secondo il più rigoroso meccanicismo allora dominante. Successivamente alla laurea, per motivi pratici, Mach si avvicinò a studi di fisiologia della sensazione, ( a questo periodo risale il *Compendio di fisica per medici* ), che subito suscitarono in lui un rigetto nei confronti delle spiegazioni fisico-meccaniche ritenute inadeguate per i fenomeni fisiologici. Inizia da questo momento l'antimeccanicismo machiano. Da subito l'obiettivo polemico di Mach fu Helmholtz, il grande fisico fisiologo campione del meccanicismo. Helmholtz venne accusato di non limitarsi ad avanzare ipotesi per la spiegazione dei fenomeni, ma di voler elevare le teorie scientifiche a criterio supremo per distinguere i fenomeni veri da quelli illusori, senza tener conto che essi mutano da un periodo all'altro. Il meccanicismo di Helmholtz ci impedirebbe di guardare all'esperienza in tutta la sua ricchezza, ci allontana dai fatti concreti, sostituisce ad essi dei presupposti speculativo metafisici.

Mach non ha certo difficoltà a riconoscere che, nel Seicento e Settecento, il meccanicismo fornì utilissimi strumenti per correlare i fatti; nega però che possa ancora oggi svolgere un'analogha funzione. Attraverso un'accurata analisi storica Mach vuole dimostrare come le nozioni generali utilizzate in modo tanto efficace

nei secoli scorsi derivino in realtà dall'osservazione. Ritenere, con i meccanicisti contemporanei, che le medesime nozioni risultino perennemente valide equivale a negare all'esperienza la possibilità di smentire alcune categorie ormai cristallizzate e di fornirci prove per concetti nuovi e più vicini al vero. La storia è un'arma potentissima che ha la capacità di mettere a nudo l'effettiva origine empirica delle nozioni che oggi siamo soliti accogliere come evidenti, assolute, imm modificabili, e di farci quindi comprendere che abbiamo il pieno diritto di modificarle, correggerle ed addirittura di abbandonarle. Risalta il legame tra la polemica tenacemente svolta da Mach contro il meccanicismo e la battaglia che nella prima metà del secolo il fondatore del positivismo, Auguste Comte, aveva ingaggiato contro la metafisica. Tenendo conto di questo legame, si può senz'altro sostenere che il grande fisico-filosofo di Vienna fu un positivista, con la differenza che, mentre per Comte il puro e semplice avvento della scienza segnava in qualsiasi campo la fine della metafisica, per Mach invece il pericolo metafisico è sempre presente, nascosto nelle pieghe delle più accreditate teorie scientifiche. La meccanica classica, galileiano-newtoniana, è carica di presupposti metafisici; e se all'inizio essi non le apportavano alcun danno, ora rischiano di frenare e distorcere lo sviluppo di tutta la scienza. L'istanza antimetafisica comtiana muta in istanza metodologica interna alla scienza. Inizialmente la polemica di Mach si indirizzò verso uno scritto di Helmholtz sulla conservazione della forza pubblicato nel 1847.

In quest'opera Helmholtz esponeva la tesi meccanicistica secondo una nuova formulazione di cui si ammirava la forza semplificatrice e persuasiva.

Un procedimento lineare e procedimenti matematici accessibili mostrano come le leggi empiriche scoperte per i fenomeni elettrici, magnetici, termici siano enunciabili in modo da poter essere dedotte dal principio di conservazione della forza e dal principio langrangiano delle velocità virtuali. Helmholtz ne ricava la prova che ogni ramo della fisica in tanto è scienza in quanto ha una fondazione meccanica; addirittura che ogni fenomeno in tanto è intelligibile in quanto riducibile a fenomeni di moto. Mach vuole invece portare alla luce i procedimenti logici, le segrete implicazioni metafisiche, i procedimenti storici del pensiero per mostrare che la meccanica ha una fondazione non meccanica.

Il dibattito Helmholtz-Mach ruota attorno al concetto di conservazione della forza o del lavoro.

Helmholtz sostiene che il principio non è valido per tutte le forze, ma solo per le forze motrici scomponibili in forze prodotte da punti materiali, dirette secondo le rette che legano questi punti e le cui intensità non dipendono che dalle distanze dei punti. Il principio è valido solo per le forze centrali. Reciprocamente si può affermare che in ogni sistema sottoposto alla legge di conservazione della forza viva, le forze elementari dei punti materiali sono forze centrali. Helmholtz estende quindi il principio della conservazione della forza anche a fenomeni termici, elettrici e magnetici affermando che questi ultimi sono riducibili a forze centrali.

Questo fatto lo porta a concludere che: “ *Compito delle scienze fisiche è quello di ridurre i fenomeni della natura a forze invariabili di attrazione e di repulsione, la cui intensità varia con la distanza. Questa è la condizione per la piena intelligibilità della natura. Il compito della scienza teorica sarà adempiuto quando essa avrà ridotto i fenomeni a forze elementari e dimostrato che questa*

*riduzione è la sola che i fatti permettano. Una tale riduzione sarà considerata come la forma concettuale necessaria della concezione della natura e le si potrà attribuire il titolo di verità obiettiva.* <sup>“22</sup>

Mach sostiene invece che il principio dell'impossibilità del *perpetuum mobile* non appartiene alla teoria meccanica infatti questo principio è molto più antico ed è servito come punto di partenza per le ricerche meccaniche svolgendo una funzione euristica universalmente valida. Dal punto di vista fattuale il principio del *perpetuum mobile* afferma che di per sé i corpi non vanno verso l'alto e tale affermazione, sostiene Mach, coincide con il fatto che i fenomeni sono in relazione tra loro.

Questa reciproca dipendenza può definirsi anche causalità. Il principio del *perpetuum mobile* si applica quindi sia a fenomeni meccanici che non. I diversi domini della fisica possono essere unificati, ma non necessariamente sotto un principio meccanico. Mach prospetta l'idea di una grande fisica di cui la meccanica sia solo una parte e non il fondamento. Mach usa parole molto dure contro la concezione meccanicistica che secondo lui ha perso il contatto con la realtà, diventando uno schema troppo rigido e angusto le cui pretese di completezza circa una visione unitaria e definitiva dell'universo lo riportano allo stato di una mitologia se non addirittura di animismo. “ *La concezione secondo cui la meccanica è il fondamento di tutte le altre parti della fisica, e perciò tutti i fenomeni fisici debbono essere spiegati meccanicamente, è per noi un pregiudizio.*

<sup>“23</sup> e ancora “ *La concezione meccanicistica della natura ci appare come*

---

<sup>22</sup> A. D'Elia, *Ernst Mach*, p. 84 La nuova Italia editrice, Firenze 1971

<sup>23</sup> E. Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, p. 484, Bollati Boringhieri, Torino 1977.

*un'ipotesi storicamente comprensibile, giustificabile, forse anche temporaneamente utile, ma del tutto artificiosa.* <sup>24</sup> Come rimedio a questa deplorabile situazione Mach propugna l'economia di pensiero che significa la distinzione tra le conoscenze reali e l'apparato intellettuale che avviluppa e nasconde queste conoscenze. Parlare di "economicità" di un sistema di leggi non vuol dire relegare tale sistema al campo dell'utile negandogli ogni valore conoscitivo; significa invece, secondo Mach, fare riferimento alla sua capacità conoscitiva di proporre una visione unitaria del mondo fenomenico. L'esigenza di unità è legittima, la via intrapresa dal meccanicismo è errata. Mach sostiene invece che la via imboccata grazie al principio di conservazione dell'energia sia quella giusta. Tale principio infatti permette di descrivere tutti i fenomeni, non solo quelli inclusi nella dinamica dei corpi rigidi, dei fluidi e dei gas, ma anche quelli che appartengono alla termodinamica, all'elettricità e al magnetismo.

Il rifiuto del procedimento meccanicistico e delle grandezze che lo fondano quali dimensione, posizione, massa, velocità e forza, conducono Mach a un rifiuto della concezione atomica della materia. La ragione per cui il fisico viennese respinge la concezione atomistica dei meccanicisti a lui contemporanei è che, secondo tali autori, l'atomo costituirebbe la realtà ultima della natura: realtà non percepibile dall'osservazione ma dotata nonostante ciò delle proprietà comunemente attribuite ai fenomeni osservabili. L'atomo è un ente di ragione, non un ente di fatto; è un postulato metafisico, non un oggetto di ricerca fisica, sostiene Mach. La sua accettazione reintroduce nella fisica un che di dogmatico. Stessa critica Mach riserva alla ricerca delle cause in fisica. A suo dire nel

---

<sup>24</sup> *Ibid.* p. 485

concetto di causa è implicito un carattere di necessità che dovrebbe determinare in un certo modo, ad esclusione di altri, la produzione dell'effetto.

L'esperienza non ci permette mai di constatare questa necessità, è l'abitudine a farci trascendere il mondo dei fatti osservati facendoci accettare per buona, consapevolmente o inconsapevolmente la suddetta necessità. Per limitarci soltanto a ciò che l'esperienza ci fornisce, dobbiamo prediligere i nessi funzionali, applicando alla fisica il concetto di funzione già felicemente applicato nella matematica. Esprimendo le leggi fisiche sotto forma di leggi funzionali potremo anche aggirare l'imposizione meccanicistica della natura esclusivamente causale delle leggi. La conoscenza della storia della scienza ci permette di evitare il rischio di attribuire un valore ed un'estensione illimitata a concetti e leggi che si sono formati in situazioni particolari. Alla concezione meccanicistica Mach contrappone la propria che definisce sensistica. Il mondo percepito dai sensi ha una straordinaria gamma di qualità, psichico e fisico sono uniti. Per Mach ogni conoscenza inizia con l'esperienza intesa come un fluire mai concluso di dati immediati e cerca di organizzarla mediante concetti astratti. I concetti scientifici dovranno permetterci di formulare connessioni chiare e precise, effettivamente controllabili per via empirica. Come il fisico studia l'esperienza sotto un determinato punto di vista, traendo da essa talune nozioni che definiamo fisiche, così lo psicologo la esamina sotto un punto di vista che possiamo ritenere psichico. Mach ha sviluppato una personale teoria gnoseologica comunemente definita teoria degli elementi. Quest'ultimi coincidono talvolta con le sensazioni elementari, altre volte sono invece definiti come dati né psichici né fisici, quello

che interessa comunque è attraverso questi elementi Mach intende portare avanti un discorso scientifico.

Non vuole interpretare gli elementi alla maniera settecentesca dei dati immediati di senso ma vuole impostarli a una schietta analisi scientifica improntata alla misurazione e alla verifica sperimentale.

Questo modo di rapportarsi alla realtà risente della critica di fondo alle idee metafisiche insita nel suo indirizzo di pensiero. Il fenomenismo di Mach non è un soggettivismo perché respinge parimenti il vecchio concetto meccanicistico di materia e quello metafisico di io. Una tale concezione ha come esiti filosofici il rifiuto di una qualsiasi realtà esistente oltre l'esperienza, intesa come un fluire di dati né psichici né fisici, in cui è impossibile riscontrare nessi necessari che permetterebbero di attribuirle un'intrinseca razionalità. La negazione di leggi aprioristiche serve per non limitare la ricerca di possibili nuove connessioni tra i fenomeni.

Infatti la meccanica prende in considerazione soltanto le qualità geometriche e meccaniche, trascurando le altre, tuttavia, si tratta soltanto di un procedimento usato dalla mente umana, di un'astrazione a cui non corrisponde una effettiva diversità ontologica tra proprietà corporee come sosteneva la teoria delle qualità primarie e secondarie. Non siamo autorizzati a privilegiare alcune qualità rispetto ad altre, la realtà che percepiamo attraverso un senso non è più reale di quella percepita mediante gli altri. Le proprietà spaziali si possono ridurre a determinazioni di contenuto, le quali non rappresentano nulla di più elevato dei contenuti sensoriali quali il calore, il suono, il colore.

Per Mach il compito della scienza consiste nel cogliere la connessione tra i fenomeni in termini quantitativi: “ *Il compito della scienza non può essere che la riproduzione nel pensiero di queste relazioni date dalle sensazioni. L’unica cosa che vogliamo stabilire è che nella ricerca scientifica importa solo la conoscenza della connessione dei fenomeni. Questa conoscenza va formulata in termini quantitativi: la nostra conoscenza naturale consiste solo nella riproduzione dei fatti nel pensiero, nella espressione astratta quantitativa di tali fatti.* ”<sup>25</sup>

Nel principio che stabilisce la convertibilità del calore in lavoro, Mach ha colto una conferma della sua concezione. I principi della termodinamica assicurano il passaggio tra differenti classi di fenomeni.

L’analisi dell’opera newtoniana compiuta da Mach ha lo scopo di stabilire cosa riguardi propriamente i fatti e l’apprendimento dei fatti e cosa al modo storico, accidentale, convenzionale di ordinarli ed esporli. L’opera del grande scienziato è caratterizzata da un misto di conservazione e di innovazione: nella sua teoria sono presenti residui della teoria statica, della speculazione scolastica e del sapere istintivo. Newton ha formulato il criterio metodologico di prendere in considerazione solo i fatti ma ciò non gli impedisce di introdurre nella teoria lo spazio e il tempo assoluti che sono pure entificazioni di idee. Al grande scienziato sembra mancare la consapevolezza metodologica degli strumenti che usa, compito dei continuatori è cimentarsi in una nuova esposizione della meccanica che abbia i caratteri di maggior semplicità e organicità. La critica machiana tocca tutti i capisaldi del sistema meccanicista: l’inerzia come proprietà della materia, il sistema di riferimento assoluto, la forza considerata concetto primario, la sostanza

<sup>25</sup> E. Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, p. 490, Bollati Boringhieri, Torino 1977.



e la causa quali categorie fondamentali della intelligibilità del reale, la costituzione atomistica della materia. Alcuni concetti risultano superflue ripetizioni di altri e quindi vanno espunti, di altri viene denunciata la natura di mere *voces*, di altri la storia della scienza metterà in luce l'origine accidentale. Grazie a questa critica serrata cadrà la pretesa imputabile non a Newton bensì ai newtoniani di aver edificato un sistema intoccabile e perenne, modello di assoluta perfezione. Mach mette in crisi anche uno dei pilastri dell'apriorismo: infatti se nel procedimento critico machiano c'è qualcosa che potrebbe dirsi kantiano, per la distinzione tra contenuto e forma, è chiaro che l'esito di Mach è l'opposto di quello di Kant.

Il fisico austriaco intende proprio negare che gli schemi e i concetti della meccanica newtoniana costituiscano forme apriori della mente umana, senza i quali non è possibile scienza. Kant ha ordinato le sue forme tenendo presente una scienza già costituita; non al contrario la scienza si è costituita sul fondamento di quelle forme.

Come già accennato sopra uno dei concetti newtoniani criticati da Mach è quello di massa che Newton definì come la quantità di materia misurata dal prodotto della sua densità per il volume.

Mach muove tre critiche a questo concetto: è una definizione tautologica, si richiama a rappresentazioni non chiare e non è una definizione meccanica. Newton affermava che la quantità di materia è misurata dal prodotto della sua densità per il volume.

In questa definizione è evidente il circolo vizioso: la densità infatti non può essere definita se non come la massa dell'unità di volume. Al termine quantità di materia

inoltre non corrisponde una rappresentazione chiara, infatti se astraiano dal caso di due composti chimicamente omogenei sussiste un *quid* misurabile con la stessa unità di misura. Non è una definizione meccanica perché la vera definizione di massa può essere ottenuta solo quando si prendono in considerazione le relazioni dinamiche dei corpi.

Iniziando dal fatto sperimentale che i corpi determinano l'uno sull'altro accelerazioni, sia per azione a distanza o mediante vincoli, dobbiamo concludere che il rapporto delle masse di due corpi è il rapporto inverso delle loro rispettive accelerazioni prese con segno negativo. La misura della massa è data da una relazione di accelerazioni e non è necessario utilizzare il concetto statico di forza-pressione. Storicamente si è passati dal concetto di forza a quello di massa, ma nell'ordine logico la definizione dinamica di forza è possibile quando si possenga un'unità di massa. Il concetto di massa è il concetto fondamentale della meccanica. Nel concetto di massa e nel principio di reazione il medesimo fatto è esposto due volte, in modo superfluo. La definizione di massa come quantità di materia è propria di un momento della storia della scienza in cui si considerano solo le proprietà legate al moto e alla traslazione nello spazio e non vengono prese in considerazione le differenze chimiche. Per Mach la massa è soltanto una proprietà dinamica della quantità di materia. Alla parola materia non corrisponde un'entità semplice, una sostanza, ma una somma di proprietà che la ricerca sperimentale aumenta svelandone nel contempo le reciproche relazioni.

Secondo Mach la meccanica stabilisce, tramite un processo di astrazione, uno stato ideale dei corpi, si pensi in particolare al fondamentale principio d'inerzia, e utilizza l'idea di forza assimilandola all'idea di causa. La nozione di forza risulta

quindi altrettanto ideale ed astratta quanto lo è la condizione che viene a modificare perché nella realtà non esistono luoghi in cui la gravità non agisca.

I fatti che osserviamo immediatamente sono fatti dinamici che potrebbero essere descritti dalla velocità e dalle accelerazioni, evitano gli astratti concetti newtoniani come la forza intesa come causa che modifica l'originario stato di inerzia.

Legato all'inerzia è pure il concetto di spazio assoluto a cui Mach riserva una critica serrata.

Se per spazio assoluto Newton intende sia lo spazio fisicamente esistente che uno spazio non influenzato dalle masse corporee e dai loro movimenti pur agendo esso su queste masse e su questi movimenti, come si può, sostiene Mach, non cogliere una contraddizione in queste affermazioni.

Infatti ciò che è fisicamente reale non può essere sottratto all'azione degli altri corpi su cui agisce. La proprietà di essere sottratto all'azione di altri corpi è propria e sola dei sistemi di riferimento astratti della geometria cui però va negata realtà fisica. Ecco dunque il paradosso di Newton: parlare di uno spazio assoluto di riferimento, esistente realmente, che agisce su altri corpi e che non subisce alcuna influenza perché si comporta come un sistema astratto di riferimento.

La critica al concetto di spazio assoluto coinvolge direttamente la legge d'inerzia che lo richiede come presupposto logico. Tra i sostenitori della necessità logica dello spazio assoluto, da cui per altro deriverebbe la sua esistenza oggettiva incondizionata, vanno annoverati Eulero, il maggior newtoniano di Germania e l'inglese Colin Mac Laurin. Così si esprime Eulero *“E' impossibile affermare che il primo principio della meccanica sia fondato su qualcosa che non esiste se non nella nostra immaginazione; da ciò occorre concludere assolutamente che l'idea*

*matematica dello spazio non è immaginaria, e che al contrario esiste nel mondo qualcosa di reale corrispondente a tale idea.*<sup>26</sup> Mach accusa questi fisici di utilizzare il procedimento della prova teologica per l'esistenza di Dio, di medioevale memoria, allo spazio assoluto. Mach persevera nella sua critica mettendo in dubbio il fatto che la legge d'inerzia costituisca la chiave di volta del sistema meccanico e nega nel contempo che la legge d'inerzia diventi impossibile una volta negato lo spazio assoluto.

La legge d'inerzia non è un principio primo perché non ha significato se non in quanto è esposta congiuntamente al principio di gravitazione. Inoltre manca di precisione perché non specifica cosa è da intendersi con moto in linea retta: ogni movimento che dal nostro pianeta è considerato rettilineo, risulta invece curvo se considerato da Saturno. Occorre quindi dire a quale corpo celeste fa riferimento il moto inerziale. La legge d'inerzia è il caso limite dell'esperimento mentale del piano orizzontale di Galileo ma era già implicita nell'affermazione galileiana che le forze producono accelerazioni, infatti se non intervengono forze il corpo rimane nel suo stato di quiete o persegue nel suo stato di moto uniforme. Il moto rotatorio si presenta con caratteri che sembrano spiegabili solo ammettendo uno spazio assoluto e un moto assoluto.

Il migliore esempio della critica machiana è costituito dalla confutazione dell'esperimento del secchio presentato da Newton a sostegno del moto assoluto.

*“ Si sospende un recipiente a un filo molto lungo, e lo si fa girare in circolo con moto continuo sino a che il filo divenga rigido per effetto della rotazione. Poi lo si riempie di acqua e lo si lascia in quiete assieme all'acqua. Si imprime infine al*

---

<sup>26</sup> L. Euler cit. da A. D'Elia, *Ernst Mach*, p. 156, La nuova Italia editrice, Firenze 1971

*recipiente un moto circolare nel verso contrario a quello precedente. Il filo disvolgendosi persevererà per qualche tempo in questo moto. La superficie dell'acqua sarà da principio piana, come era prima che iniziasse il moto del recipiente, ma poi il recipiente, comunicando a poco a poco la forza all'acqua, fa sì che questa a sua volta cominci sensibilmente a girare. L'acqua si allontana un po' per volta dal centro e salendo verso i bordi del recipiente, assume una forma concava.*<sup>27</sup>

Newton sostiene che se ogni moto rotatorio fosse soltanto relativo, fra i due stati non dovrebbe manifestarsi nessuna differenza fisica. Però non è così: la superficie dell'acqua contenuta nel recipiente è piana nel primo caso e parabolica nel secondo. La rotazione dell'acqua conclude Newton, è assoluta. Per Mach invece: “ *L'esperimento di Newton del vaso d'acqua sottoposto a moto rotatorio insegna solo che la rotazione relativa dell'acqua rispetto alle pareti del vaso non provoca forze centrifughe percettibili, ma che queste forze sono prodotte dal suo moto rotatorio relativo alla massa della terra e agli altri corpi celesti.* ”<sup>28</sup>

Secondo Newton solo attraverso l'esistenza della forza centrifuga si può rilevare la rotazione rispetto allo spazio assoluto. Secondo Mach lo spazio assoluto fu inventato proprio per spiegare l'esistenza di questa forza. Per il fisico austriaco non esiste rotazione assoluta, ma solo rotazione relativa rispetto ad altra materia dell'universo. In un passo che compare nella quarta edizione della *Meccanica* e non nelle successive Mach è ancora più netto : “ *Secondo me, tutto sommato, non esiste che un moto relativo e non scorgo a questo riguardo alcuna differenza tra*

---

<sup>27</sup> I. Newton, *Principia mathematica*, cit. da A. D'Elia, *Ernst Mach*, p. 160, La nuova Italia editrice, Firenze 1971

<sup>28</sup> E. Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, p. 249, Bollati Boringhieri, Torino 1977

*la rotazione e la traslazione. Una rotazione relativa alle stelle fisse dà origine in un corpo a delle forze di allontanamento dall'asse. Se la rotazione non è relativa alle stelle fisse, queste forze di allontanamento non esistono. Non mi oppongo che si dia alla prima rotazione la denominazione di assoluta, però non si deve dimenticare che essa non è altro che una rotazione relativa alle stelle fisse. Possiamo fissare il vaso d'acqua di Newton, poi far girare il cielo delle stelle fisse e provare che queste forze di allontanamento non esistono ? Queste esperienze sono irrealizzabili; questa idea è priva di senso perché i due casi sono indiscernibili tra loro nella percezione sensibile. Perciò considero questi due casi come ne formassero uno solo, e la distinzione, che ne fa Newton, come illusoria.*

«29

La critica machiana allo spazio assoluto esercitò un gran fascino sulla generazione dei fisici formati a cavallo dei due secoli, il più grande dei quali risulterà Albert Einstein, che ormai in età avanzata non scorderà di menzionare, nella sua autobiografia, Ernst Mach come colui che per primo lo svegliò dal suo sonno dogmatico.

---

<sup>29</sup> E. Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico* ( quarta edizione ), cit. da A. D'Elia, *Ernst Mach*, p.161

## 1.4 La relatività ristretta

### a) *L'annus mirabilis* di Einstein

In tutta la storia della fisica non c'è mai stato un periodo di transizione tanto repentina, tanto inaspettata ed estesa su un fronte tanto ampio, come il decennio che va dal 1895 al 1905.

La nascita della teoria dei quanti ad opera di Planck e della teoria della relatività di Einstein segnarono l'inizio di un'epoca in cui le fondamenta stesse della teoria fisica si rivelarono bisognose di revisione. *L'annus mirabilis* di Einstein è il 1905, quando uno pressoché sconosciuto giovane fisico tedesco impiegato presso l'ufficio brevetti di Berna diede alla luce sei memorie tra cui quelle fondamentali sulla relatività ristretta, manifestando un'esplosione di creatività senza precedenti. Abraham Pais, nella sua biografia su Einstein, fornisce il seguente elenco per quanto concerne i lavori del 1905:

1. Un articolo sul quanto di luce e l'effetto fotoelettrico.
2. Una dissertazione sul tema “ nuova determinazione delle dimensioni molecolari “.
3. Un primo articolo sul moto browniano.
4. La prima memoria sulla relatività ristretta, ricevuta il 30 Giugno.
5. La seconda memoria sulla relatività ristretta, ricevuta il 27 Settembre.
6. Un secondo articolo sul moto browniano.

A fronte di questi contributi che gli valsero, tra le altre cose, il premio Nobel, è facile capire come gli storici della scienza considerino quell'anno come uno dei più significativi della storia della fisica, al pari dell'anno di pubblicazione del capolavoro di Newton. Nel Giugno 1905 Einstein pubblicò una memoria sull'elettrodinamica dei corpi in moto ( che consiste di dieci paragrafi ).

Dopo i primi cinque paragrafi la teoria appare già nella sua formulazione definitiva, tutto il resto sino ai giorni nostri è consistito nell'applicazione dei principi stabiliti in quei primi cinque paragrafi.

Per capire come Einstein stesso considerasse la teoria della relatività conviene riferirsi alla distinzione, che lo stesso fece, alcuni anni dopo, tra due tipi di teorie fisiche.

Einstein sosteneva che la maggior parte delle teorie fossero costruttive, vale a dire che interpretano fenomeni complessi in termini di proposizioni relativamente semplici. Un esempio di teoria di questo tipo è la teoria cinetica dei gas, in cui le proprietà meccaniche, termiche e di diffusione dei gas sono ricondotte alle iterazioni e ai moti molecolari. Poi vi sono le teorie di principio che fanno uso del metodo analitico piuttosto che di quello sintetico: “ *I punti di partenza di tali teorie non sono costituenti ipotetici, ma proprietà generali dei fenomeni osservate empiricamente*”<sup>30</sup>.

I pregi delle teorie di principio risiedono nella loro perfezione logica e nella certezza della loro fondazione. Un esempio di teorie di principio è dato dall'impossibilità del moto perpetuo in termodinamica così come dalla relatività che al tempo in cui Einstein scriveva era divenuta “ *come una casa con due piani*”

---

<sup>30</sup> A.Einstein, *Che cos'è la teoria della relatività ?*, in *Idee e opinioni*, p. 216



*indipendenti* “. L’assimilazione della relatività ristretta da parte della comunità scientifica seguì un percorso piuttosto rapido e tranquillo. È altresì vero che scienziati della statura di Hendrik Antoon Lorentz e Henri Poincaré ebbero difficoltà a rendersi conto che si trattava di una nuova teoria di principio di carattere cinematico e non di una teoria dinamica costruttiva, e che la teoria causò inevitabili confusioni nei circoli filosofici, come testimonia il libretto di Henri Bergson scritto sull’argomento nel 1922. Tuttavia sia fisici di grande esperienza come Planck, che una generazione di nuovi teorici, si resero conto immediatamente che la relatività ristretta era una teoria di principio completa e definita dai due postulati enunciati da Einstein nella memoria del 1905.

A differenza della teoria dei quanti, non ci fu una “ vecchia “ ed una “ nuova “ relatività con tutte le difficoltà che la qualcosa avrebbe cagionato.

Nel caso della nascita delle due teorie della relatività si trattò di transizioni ordinate, mentre l’epoca della vecchia teoria dei quanti ( 1900-1925 ) fu un periodo rivoluzionario. Questa distinzione si riferisce al processo storico della scoperta, e non di certo al contenuto delle teorie fisiche, infatti furono entrambe dirompenti e in misura diversa rivoluzionarie. Certo è che Einstein non si considerò mai un rivoluzionario della fisica, infatti a più riprese espresse il convincimento che la relatività costituisse l’approdo ultimo di transizioni ordinate, e che fosse conseguenza diretta ed in un certo senso compimento naturale dell’opera di Faraday, Maxwell e Lorentz. Di questo avviso è anche Hermann Bondi che afferma all’inizio della sua introduzione sulla relatività che “ *Quando la teoria della relatività nacque, e per molti anni dopo, essa apparve come qualcosa di rivoluzionario: l’attenzione venne fissata sugli aspetti più inconsueti*

*della teoria. Ma con il passare del tempo gli aspetti sensazionali del lavoro di Albert Einstein hanno cessato di provocare stupore, almeno tra gli scienziati, e ora si comincia a considerare la teoria non come una rivoluzione, ma piuttosto come una conseguenza naturale e uno sviluppo logico di tutto il lavoro compiuto in fisica fin dai tempi di Newton e di Galileo.*<sup>31</sup>Tuttavia se da un punto di vista strettamente fisico Einstein è da porre sulla linea della continuità, è egualmente vero che da un punto di vista più ampio, filosofico e non solo, alcune delle sue acquisizioni non possono che definirsi rivoluzionarie.

L'abbattimento definitivo dell'etere, la negazione della simultaneità assoluta e il rifiuto dello spazio assoluto sono motivi, che benché legati all'ambito delle teorie fisiche, hanno avuto un impatto enorme sulla filosofia e sul modo di pensare in generale.

Durante gli anni di apprendimento universitario al Politecnico di Zurigo, Einstein dedicò buona parte del suo tempo allo studio delle opere di grandi autori quali Boltzmann, Kirchhoff, Helmholtz, Hertz. Grazie alla lettura diretta di quegli scritti Einstein prese confidenza con i problemi che erano sul tappeto alla svolta del secolo, come già ricordato, un periodo quanto mai fecondo per la fisica.

Il giovane fisico era affascinato soprattutto dalla recente teoria elettromagnetica di Maxwell e dalle grandi novità che essa apportava: la preferenza accordata alla nozione di campo rispetto a quella di forza a distanza e l'incorporazione dell'ottica all'interno della teoria elettromagnetica.

Tuttavia in relazione alla teoria di Maxwell si era da tempo presentato un problema, quello relativo all'etere cosmico. Nella visione di Maxwell la

---

<sup>31</sup>H.Bondi, *La relatività e il senso comune*, p.9, Zanichelli, Torino 1979.

propagazione delle onde elettromagnetiche consisteva nella trasmissione degli stati di perturbazione di un mezzo permeante tutto lo spazio, persino gli interstizi della materia. Se pensiamo in analogia le onde elettromagnetiche nell'etere con le onde sonore nell'aria, osserviamo immediatamente che la velocità delle onde dipende dal mezzo e dalle sue proprietà fisiche e non dallo stato di moto o meno della sorgente. Per fare un esempio, la velocità di un suono varierà a seconda della presenza o meno di vento. Applicando questo modello all'idea di un etere permeante tutto l'universo, l'ipotesi più semplice che ne scaturiva è che le sue parti fossero in quiete le une rispetto alle altre. La velocità delle onde elettromagnetiche nell'etere era fissata una volta per tutte rispetto all'etere stesso. Riguardo al fatto oramai assodato che la Terra si muove nell'etere, esistevano due ipotesi riguardo al comportamento di quest'ultimo: o la Terra trascinerà con sé gli strati dell'etere più vicini alla sua superficie ( teoria dell'etere di Stokes ), o l'etere rimarrà indisturbato ( Augustin Jean Fresnel sosteneva che l'etere fosse un mezzo in stato di quiete assoluta rispetto alle stelle fisse, in cui la luce si propaga e attraverso il quale la Terra si sposta come se non opponesse resistenza alcuna al suo moto ). Nel caso di questa seconda ipotesi, il moto della Terra avrebbe provocato una sorta di “ vento d'etere “ con velocità uguale ma di senso opposto al moto del nostro pianeta. Della presenza di questo “ vento d'etere “ avrebbero dovuto risentire le misurazioni in laboratorio della velocità della luce.

Il fisico sperimentale che maggiormente contribuì, con una serie continua e sempre più raffinata di misurazioni, a demolire il concetto di etere, fu l'americano Michelson, tra le altre cose insignito del premio Nobel nel 1907. A Michelson, che dedicò i suoi sforzi nel misurare la velocità della luce, si deve l'invenzione di

uno strumento, l'interferometro, capace di confrontare i tempi impiegati dalla luce per coprire la medesima distanza in direzione parallela e perpendicolare al moto del nostro pianeta rispetto all'etere. Nel suo dispositivo sperimentale, un etere stazionario avrebbe dovuto dar luogo a una differenza nei tempi di percorrenza, con un ritardo, da parte del raggio parallelo, calcolato attorno a un venticinquesimo della lunghezza d'onda della luce gialla. L'effetto si sarebbe potuto rilevare facendo interferire fra loro il raggio trasversale e quello parallelo.

Il risultato della prima misurazione realizzata da Michelson a Postdam nel 1881, fu sorprendentemente nullo, non vi era quindi nessuna prova dell'esistenza di un vento d'etere.

Un secondo esperimento ancora più accurato, fu effettuato da Michelson che si avvale della collaborazione del chimico, anch'esso americano, Morley, nel 1887 a Cleveland; il risultato fu lo stesso: nessuna traccia dell'ipotetico vento d'etere.

A fronte di questi strabilianti dati sperimentali i fisici europei iniziarono a prendere atto delle serie difficoltà a cui rischiavano di andare incontro le loro felici teorie dinamiche e cinematiche con il venir meno dell'etere cosmico.

Il fisico olandese Lorentz, che seguiva attentamente gli sviluppi sperimentali, notò, in primo luogo che il vento d'etere avrebbe influenzato anche la propagazione nel braccio perpendicolare al vento d'etere. La conferma dell'esito negativo dell'esperimento avrebbe comunque inficiato soltanto una delle diverse teorie sull'etere: si poteva infatti tranquillamente continuare a ipotizzare che gli strati superficiali dell'etere fossero trascinati dal moto terrestre. Esperimenti sempre più raffinati e precisi da parte del duo americano Michelson Morley spinsero alcuni fisici europei a spiegazioni sempre più sconcertanti per salvare

l'etere: il fisico irlandese Fitzgerald e l'olandese Lorentz, indipendentemente l'uno dall'altro, giunsero a ipotizzare che oggetti in moto attraverso l'etere subiscano una contrazione della loro dimensione. Così si esprimeva Lorentz: “ *Questo esperimento mi ha lasciato a lungo perplesso, e alla fine sono riuscito a concepire un solo mezzo per riconciliarlo con la teoria di Fresnel. Si tratta dell'ipotesi secondo cui il segmento che congiunge due punti di un corpo solido, che supponiamo in un primo tempo parallelo alla direzione del moto della Terra, non conserva la stessa lunghezza quando, in un secondo momento, viene fatto ruotare di novanta gradi* ”<sup>32</sup>. E' facile controllare che in tal caso i tempi di percorrenza sono gli stessi nei due bracci dell'interferometro.

Dopo diversi tentativi protrattisi per circa dieci anni, finalmente Lorentz nel 1904 diede una sistemazione definitiva alle trasformazioni<sup>33</sup> che portano il suo nome. Lorentz modificò le vetuste trasformazioni galileiane introducendo come nuovo parametro il rapporto tra velocità di spostamento relativa ai sistemi inerziali e la velocità della luce. In questo modo veniva inclusa all'interno delle equazioni la possibilità della contrazione dimensionale nel caso un sistema inerziale si muovesse con velocità prossima a quella della luce. L'accurata analisi di Pais ci rivela come Einstein nella sua memoria del 1905 giunse indipendentemente alla formulazione delle nuove trasformazioni, infatti da diversi documenti emerge che il giovane Einstein fosse a conoscenza soltanto dei lavori di Lorentz precedenti il 1895. Einstein era quindi a conoscenza: delle preoccupazioni di Lorentz relative agli esperimenti di Michelson-Morley, delle trasformazioni di Lorentz del primo

---

<sup>32</sup>Cit. da A. Pais, “ *Sottile è il Signore...* ”, p. 138, Bollati Boringhieri, Torino 1986.

<sup>33</sup>Con il termine “ trasformazione ” è da intendersi una serie di quattro equazioni, elaborate per la prima volta da Galileo per stabilire il passaggio da un sistema inerziale di coordinate ad un altro.

ordine, della sua dimostrazione del teorema relativo agli effetti del primo ordine per i fenomeni ottici, della necessità di integrare questa dimostrazione con l'ipotesi della contrazione e infine del nuovo postulato relativo alla forza di Lorentz.

Il radicato pregiudizio che angustiava la fisica dell'Ottocento era quello circa la presenza di un etere indispensabile mezzo per trasmettere la luce, il suono e le onde elettromagnetiche.

Il migliore tra tutti gli eteri possibili si riteneva fosse un mezzo in quiete assoluta, tuttavia i recenti studi sulla luce rivelatasi costituita da onde trasversali spingevano necessariamente verso un etere rigido. La teoria della relatività ristretta privò l'etere della sua fondamentale caratteristica meccanica, la quiete assoluta, rendendolo di fatto superfluo.

Nell'introduzione alla memoria del Giugno 1905 Einstein afferma che: “ *L'introduzione di un “ etere luminoso “, si manifesterà superflua, tanto più che nella nuova concezione non verrà introdotto uno “ spazio assolutamente in quiete “, corredato di particolari proprietà, né verrà associato un vettore di velocità a un punto dello spazio vuoto nel quale abbiano luogo processi elettromagnetici* ”<sup>34</sup>.

La relatività ristretta costituisce la rinuncia alle costruzioni meccaniche come ausilio per l'interpretazione dei fenomeni elettromagnetici. Si lascia cadere l'idea di un unico sistema di coordinate privilegiato in quiete assoluta: al suo posto subentrano i riferimenti inerziali, vale a dire, un insieme di infiniti sistemi di coordinate, tutti ugualmente privilegiati.

Nel 1905 Einstein era sufficientemente convinto della validità delle equazioni di Maxwell-Lorentz da percepire il contrasto tra la costanza della velocità della luce

---

<sup>34</sup> Cit. da A. Pais, “ *Sottile è il Signore...* ”, p.152, Bollati Boringhieri, Torino 1986.

nel vuoto e il principio di relatività galileiano della meccanica classica secondo cui tutte le leggi meccaniche devono essere identiche in ogni coppia di sistemi di coordinate. Il conflitto nasce se si cerca di elevare l'invarianza galileiana a principio universale. Un etere in quiete assoluta ben difficilmente può inserirsi in questo quadro.

Alcuni fisici credevano che a causa di tale contrasto si dovessero rivedere i principi dell'elettrodinamica. Einstein optò invece per una diversa soluzione: “ *Al concetto della quiete assoluta, non solo nella meccanica, ma anche nell'elettrodinamica, non corrisponde alcuna delle proprietà di ciò che si manifesta*”.<sup>35</sup> Nella memoria di Giugno il fisico tedesco fornì due argomenti per questo punto di vista: primo l'assenza di qualsiasi prova sperimentale in favore del vento d'etere; secondo l'esistenza nella teoria di Maxwell-Lorentz di “ *asimmetrie che paiono non essere aderenti ai fenomeni* ”<sup>36</sup>. Come esempio di tali asimmetrie, Einstein prende in considerazione l'asimmetria delle equazioni per calcolare la corrente in due fenomeni simmetrici. Infatti in un sistema costituito da un magnete e da un conduttore si possono avere le seguenti situazioni: se il magnete si muove in presenza di un conduttore fermo, si genera un campo elettrico che induce una corrente nel conduttore. Se, d'altra parte, è il conduttore a muoversi in vicinanza di un magnete fermo, allora si produce una forza elettromotrice che di nuovo genera una corrente. In entrambi i casi la corrente prodotta è identica, ma il modo per calcolarla variava a seconda del caso che fosse il magnete o il conduttore a muoversi. Questa dissimmetria infastidiva e disturbava Einstein che fu condotto alla teoria della relatività ristretta soprattutto da considerazioni di

<sup>35</sup>Cit. da A. Pais, “ *Sottile è il Signore...* ”, p.154, Bollati Boringhieri, Torino 1986.

<sup>36</sup> *Ibid.*

carattere estetico, vale a dire da criteri di semplicità. Questa splendida ossessione lo avrebbe accompagnato per tutto il resto della sua vita, conducendolo prima alla sua più grande conquista, la relatività generale, quindi al suo più grave errore, la teoria unitaria dei campi.

L'intero assetto della teoria della relatività ristretta si basa su due postulati:

- 1) Le leggi della fisica hanno la stessa forma in ogni riferimento inerziale
- 2) In qualsiasi riferimento inerziale, la velocità della luce  $c$  è la stessa, sia che la luce venga emessa da un corpo in quiete, sia che venga emessa da un corpo in moto uniforme.

FitzGerald e Lorentz erano convinti che per spiegare l'esperimento di Michelson-Morley fosse necessario introdurre un nuovo postulato, la contrazione. Essi ritenevano che la contrazione fosse un effetto di carattere dinamico ( le forze molecolari in un regolo in moto uniforme differirebbero da quelle che agiscono in un regolo in quiete ) mentre Einstein sosterrà invece che la contrazione dei regoli sia una conseguenza necessaria dei suoi due postulati.

La legge fondamentale della meccanica classica è il principio d'inerzia che ad un'analisi più attenta non ci dice soltanto qualcosa sul movimento dei corpi, ma ci offre anche importanti informazioni sui corpi di riferimento o sistemi di coordinate. Un sistema di coordinate il cui stato di moto sia tale che il principio di inerzia risulti valido con riferimento ad esso, viene detto sistema di coordinate galileiano. Se  $K$  è un sistema di coordinate galileiano, allora è pure galileiano ogni altro sistema di coordinate  $K'$  che si trovi rispetto a  $K$ , in uno stato di moto traslatorio uniforme. E' fondamentale che i sistemi si muovano l'uno rispetto



all'altro uniformemente e senza rotazione. Le leggi di Galileo-Newton sono valide in entrambi i sistemi che si definiscono equivalenti.

Il secondo postulato è invece la semplice legge sulla velocità costante di propagazione della luce nel vuoto. Questa legge vale per tutti i colori e inoltre l'astronomo olandese De Sitter ha dimostrato che la velocità di propagazione della luce non dipende dal moto della sorgente.

Tuttavia, utilizzando l'esempio di Einstein, se pensiamo a due sistemi di riferimento inerziali, costituiti rispettivamente da un treno e da una banchina, e ad un raggio di luce emesso dal treno, notiamo con facilità come ai due osservatori il raggio di luce sembrerà andare a velocità differenti, rispettivamente  $c$  ( la velocità della luce ritenuta costante ) e  $c$  sommata alla velocità del treno.

Questo dilemma rischiava di portare o alla rinuncia del principio di relatività, infatti una fondamentale legge di natura risulterebbe differente a seconda del sistema di riferimento inerziale preso in considerazione, o alla rinuncia della costanza della velocità della luce.

Einstein riuscì a dimostrare come nella realtà non esiste la minima incompatibilità fra il principio di relatività e la legge di propagazione della luce.

Il primo passo consiste in una revisione del concetto di tempo. Einstein si domanda come si possa definire la simultaneità, un concetto il cui significato viene dato spesso come per scontato.

Einstein ci suggerisce di immaginare due fulmini che colpiscono una banchina ferroviaria nello stesso istante: per verificare la simultaneità dell'avvenimento dovremmo porci nel punto medio della distanza tra i due punti colpiti dai fulmini e osservare se i bagliori ci raggiungono insieme.

Se ripetiamo la medesima esperienza, ma ponendoci su un treno in movimento, che diviene in tal caso il nostro sistema di riferimento, la simultaneità tra i due eventi andrà perduta. Infatti l'osservatore posto nel punto medio si avvicinerà al fulmine che lo precede. Einstein si esprime così: “ *gli eventi che sono simultanei rispetto alla banchina non sono simultanei rispetto al treno e viceversa ( relatività della simultaneità ); ogni corpo di riferimento ( sistema di coordinate ) ha il suo proprio tempo particolare: un'attribuzione di tempo è fornita di significato solo quando ci venga detto a quale corpo di riferimento tale attribuzione si riferisce. Orbene, prima dell'avvento della teoria della relatività, nella fisica si era sempre tacitamente ammesso che le attribuzioni di tempo avessero un significato assoluto, cioè fossero indipendenti dallo stato di moto del corpo di riferimento. Abbiamo però visto or ora che tale ipotesi risulta incompatibile con la più naturale definizione di simultaneità; se abbandoniamo quest'ipotesi, scompare il conflitto fra la legge di propagazione della luce nel vuoto e il principio di relatività.* ”<sup>37</sup>

Analogha argomentazione si può sostenere riguardo alla misura di una distanza su un treno in moto. Non è scontato che le misurazioni effettuate da un passeggero sul treno e da un osservatore sulla banchina coincidano. Einstein è portato a concludere che l'apparente incompatibilità della legge di propagazione della luce con il principio di relatività è stata ottenuta in base a due ipotesi gratuite prese a prestito dalla meccanica classica:

- 1) L'intervallo di tempo fra due eventi è indipendente dalla condizione di moto del corpo di riferimento;

---

<sup>37</sup> A.Einstein, *Relatività: esposizione divulgativa*, p. 62, Bollati Boringhieri, Torino 1967.

- 2) L'intervallo di spazio fra due punti di un corpo rigido è indipendente dalla condizione di moto del corpo di riferimento.

Se vengono meno queste ipotesi, scompare il dilemma tra principio di relatività e costanza della velocità della luce. Con il rifiuto del carattere assoluto dei tempi e delle lunghezze anche le secolari trasformazioni galileiane vengono abolite. Il loro posto è occupato dalle trasformazioni di Lorentz.

Come sottolinea Silvio Bergia<sup>38</sup> non c'è modo di uscire dal dilemma se non si ammette che la coordinata temporale di un evento possa mutare, come quella spaziale, nel passare da un riferimento inerziale ad un altro e che la stessa durata dei processi fisici possa dipendere dal sistema di riferimento. Alla stessa conclusione era giunto, qualche anno prima di Einstein, anche Lorentz, tuttavia la sua era più una scelta pragmatica piuttosto che una profonda modifica delle nostre concezioni sullo spazio e sul tempo come sarà per il giovane fisico tedesco. Il grande merito di Einstein sta nell'aver liberato la fisica moderna dall'assioma sul carattere assoluto del tempo che scorre allo stesso modo per tutti. Nella sua *Autobiografia*, Einstein sottolinea come ogni tentativo di uscire dalla difficoltà “*era condannato al fallimento, finché l'assioma del carattere assoluto del tempo, cioè della simultaneità, fosse rimasto ancorato nell'inconscio senza che noi ce ne accorgessimo. Riconoscere chiaramente questo assioma e il suo carattere arbitrario significa appunto risolvere il problema. Il tipo di ragionamento critico necessario per la scoperta di questo punto essenziale mi fu reso enormemente più facile dalla lettura degli scritti filosofici di David Hume e di Ernst Mach*”<sup>39</sup>.

---

<sup>38</sup> S. Bergia, *Einstein, quanti e relatività, una svolta nella fisica teorica*, Milano, Le Scienze 1998

<sup>39</sup> A. Einstein, *Note autobiografiche*, in *Albert Einstein, scienziato e filosofo*, a cura di Arthur Schilpp.

Lorentz nella sua spiegazione pensa ancora in termini di movimento assoluto: è un movimento assoluto rispetto all'etere che produce una contrazione, assoluta, delle lunghezze.

Le ipotesi di Lorentz possono riformularsi così:

- 1) i moti sono assoluti, dato che si ha una contrazione assoluta delle lunghezze;
- 2) la velocità della luce si compone vettorialmente, secondo le regole galileiane, con la velocità del sistema di riferimento.

Se cancelliamo la prima ipotesi, non potrà restare intatta la seconda: se la velocità si compone secondo le regole standard, per spiegare l'esito nullo occorre la contrazione. L'ipotesi alternativa più semplice è che la luce si propaghi con la stessa velocità sia nell'etere che nel laboratorio terrestre.

Il nucleo della relatività ristretta che implica tutte le conseguenze eversive del senso comune, è che la velocità della luce nel vuoto sia una velocità limite. Che la velocità della luce nel vuoto costituisca un limite insuperabile per i moti dei corpi materiali e dei segnali fisici è oggi testimoniato da vari esperimenti e da inferenze estremamente plausibili. Secondo Einstein se esiste una velocità limite, il suo valore deve essere lo stesso rispetto a tutti i sistemi di riferimento. Su questo argomento si era pure espresso Poincaré nel suo intervento al Congresso internazionale di Arti e Scienza di St Louis, dove conclude dicendo : “ *Forse dobbiamo edificare una nuova meccanica, che riusciamo a mala pena a intravedere, (...) in cui la velocità della luce diventi un limite invalicabile.* ”<sup>40</sup>

---

<sup>40</sup>Cit. da A. Pais, *Sottile è il Signore...*, p. 144, Bollati Boringhieri, Torino 1986.

In altri termini se la costanza della velocità della luce diventa una legge di natura, allora essa come tutte le altre leggi deve sottostare al principio di relatività, e valere in qualsiasi sistema di riferimento. La costanza della velocità della luce si scontra però con la galileiana addizione delle velocità. La svolta di Einstein consiste nel mantenere invariata la velocità della luce e nel postulare relazioni di nuovo tipo per la conversione delle coordinate e dei tempi degli eventi: le trasformazioni cui Lorentz era giunto in precedenza. Se, anziché la legge di propagazione della luce, avessimo utilizzato come base le tacite ammissioni della vecchia meccanica circa il carattere assoluto dei tempi e delle lunghezze, avremmo mantenuto le trasformazioni di Galilei.

Tuttavia il teorema di addizione delle velocità ci avrebbe condotto al risultato inaccettabile di una velocità superiore a quella della luce, postulata inizialmente come velocità limite.

L'unico modo possibile per mantenere i postulati e uscire dal dilemma era quello di formulare nuove leggi di trasformazione che incorporano quelle galileiane come caso riservato a velocità molto lontane a quelle della luce. Certo queste nuove equazioni danno risultati contrari al senso comune, infatti risulta che regoli e orologi in un sistema di coordinate in moto siano soggetti a contrazioni e a rallentamenti. L'esperienza ci mostra che l'adeguamento della meccanica classica alla nuova cinematica vale soltanto per moti veloci, quali ad esempio quelli degli elettroni o degli ioni; per gli altri moti le deviazioni dalle leggi della meccanica classica sono troppo piccole per risultare praticamente percepibili.

Come afferma Einstein: “ *Ogni legge generale della natura deve essere costituita in modo da venire trasformata in una legge avente esattamente la stessa forma*

*quando, in luogo delle variabili spazio-temporali  $x,y,z,t$ , dell'originario sistema di coordinate  $K$ , noi introduciamo nuove variabili spazio-temporali  $x',y',z',t'$ , di un sistema di coordinate  $K'$ , dove la relazione tra le grandezze ordinarie e quelle accentate è data dalla trasformazione di Lorentz* <sup>41</sup>

Dalle varie considerazioni sin qui svolte risulta che la teoria della relatività ristretta si è sviluppata a partire dall'elettrodinamica e dall'ottica; non è inoltre un caso che gli unici autori citati da Einstein nelle sue memorie del 1905 siano Maxwell, Hertz e Lorentz.

In questi campi la nuova teoria non ha modificato in modo significativo gli enunciati della teoria inerente tali fenomeni, ma ne ha semplificato notevolmente la struttura, cioè la derivazione delle leggi, riducendo le ipotesi tra loro indipendenti.

---

<sup>41</sup>A. Einstein, *Relatività: esposizione divulgativa*, p. 77, Bollati Boringhieri, Torino 1967.

## **b) Poincaré precursore della relatività ristretta**

Seguendo l'opinione di Gerald Holton, l'atteggiamento di Poincaré nei confronti della relatività einsteiniana “ è un tipico caso che rientra in quel gruppo di esempi in cui l'autore di fondamentali contributi alla scienza sembra arretrare o esser ricacciato indietro proprio dalla compiuta comprensione, ovvero dal pieno sfruttamento di un grande progresso che potrebbe prender le mosse dal suo proprio lavoro oppure che si comporta in modo irragionevole nei confronti del lavoro di altri, che è poi dato riconoscere come genuini sostenitori della sua propria causa. “<sup>42</sup>.

Alla luce di questa considerazione Poincaré appare come il più enigmatico precursore della teoria della relatività ristretta di Einstein, a cui non fece mai cenno nelle sue pubblicazioni.

In diversi articoli e conferenze il matematico francese espresse intuizioni e segnò vie che soltanto il giovane Einstein qualche anno dopo avrebbe portato a piena maturazione. Nel 1898 apparve un articolo di grande importanza, intitolato *La mesure du temps*, poi confluito ne *Il valore della scienza*, dove l'autore sviluppa un'importante riflessione sulla simultaneità: “ *Non abbiamo alcuna intuizione diretta dell'uguaglianza di due intervalli temporali: coloro che ritengono di avere tale intuizione sono vittime di un'illusione.* “<sup>43</sup>. Lo scienziato francese ritiene che

---

<sup>42</sup> G. Holton, *Le origini della teoria della relatività speciale*, p. 67, in *L'intelligenza scientifica*, Armando editore Roma 1994.

<sup>43</sup> H. Poincaré, *Il valore della scienza*, p.29, La nuova italia, Firenze, 1994.

per misurare due tempi uguali si debba ammettere il postulato implicito secondo cui “ *la durata di due fenomeni identici è la stessa; o, se si preferisce, che le stesse cause<sup>44</sup> impiegano lo stesso tempo a produrre gli stessi effetti.* “<sup>45</sup>.

Secondo Poincaré “ *la regola che noi seguiamo, e la sola che possiamo seguire: quando un fenomeno ci si presenta come la causa di un altro, lo riteniamo anteriore. E' dunque per via della causa che definiamo il tempo; ma più spesso, quando due fatti ci sembrano legati da una relazione costante, come riconosciamo qual è la causa e qual è l'effetto ? Ammettiamo che il fatto anteriore, l'antecedente, sia la causa dell'altro, del conseguente. Quindi noi definiamo la causa per via del tempo. Come liberarci da questa petizione di principio?* “<sup>46</sup>.

Questo problema si ripresenta con maggior intensità quando si cerca di definire due eventi simultanei che non avvengono nel medesimo luogo: “ *E' difficile separare il problema qualitativo della simultaneità dal problema quantitativo della misura del tempo; sia che si ricorra ad un cronometro, sia che si debba*

---

<sup>44</sup>Ad un'analisi più rigorosa Poincaré giunge a ritenere che “ *Nella realtà fisica, una causa non produce un effetto, ma una moltitudine di cause distinte contribuiscono a produrlo, senza che si abbia alcun mezzo di discernere la parte di ciascuna di esse. I fisici cercano di fare una siffatta distinzione; ma non la fanno che in modo approssimativo, e, per quanto progrediscono, non la faranno mai che approssimativamente.* “. In seguito a questa lucida e allo stesso tempo critica presa di posizione nei confronti della presunta precisione della fisica, Poincaré propone di “ *modificare il postulato e la definizione. Invece di dire: le stesse cause impiegano lo stesso tempo per produrre gli stessi effetti. Dobbiamo dire: cause pressapoco identiche impiegano pressapoco lo stesso tempo per produrre pressapoco gli stessi effetti. La nostra definizione non è più dunque che approssimata.* “. H. Poincaré, *Il valore della scienza*, pp. 31-32, La nuova italia, Firenze, 1994.

<sup>45</sup> H. Poincaré, *op. cit.*, p.30

<sup>46</sup> H. Poincaré, *op. cit.*, p.36



*tenere conto di una velocità di trasmissione, come quella della luce, poiché non si potrebbe misurare una simile velocità senza misurare un tempo.*<sup>47</sup>.

Poincaré fa l'esempio di alcuni naviganti impegnati a stabilire la loro longitudine, in altre parole calcolare l'ora di Parigi senza esservi, come fare ?

*“ Portano con sé un cronometro regolato a Parigi. Il problema qualitativo della simultaneità è ricondotto al problema quantitativo della misura del tempo....Oppure, osservano un fenomeno astronomico, come un'eclissi di luna, e ammettono che questo fenomeno sia avvertito simultaneamente da tutti i punti della terra. Ciò non è affatto vero, poiché la propagazione della luce non è istantanea; se si volesse un'assoluta esattezza, vi sarebbe una correzione da fare secondo una regola complicata.* <sup>48</sup>.

Da questi passaggi si rileva come già Poincaré iniziasse fortemente a dubitare del carattere assoluto del tempo fisico soprattutto in relazione ai problemi cagionati dalla difficoltà di riscontrare due avvenimenti simultanei in luoghi differenti. Tuttavia mi sembra di poter affermare che l'attenzione dello scienziato francese fosse ancora rivolta soltanto alle diverse distanze che un segnale deve percorrere da un punto di riferimento ( la luna ) ai supposti eventi simultanei in due diversi luoghi della terra. L'attenzione di Poincaré non si rivolge ancora, come sarà in Einstein, al fatto che due sistemi possano risultare in moto l'uno rispetto all'altro e che gli orologi in essi presenti misurino il tempo in maniera differente.

Nel 1904 Poincaré ritorna su questo stesso argomento nel suo intervento al Congresso internazionale di Arti e Scienze di St Louis: *“ Immaginiamo che due osservatori vogliano regolare i loro orologi con segnali ottici: essi si scambiano*

<sup>47</sup> H. Poincaré, *Il valore della scienza*, p.41, La nuova italia, Firenze, 1994.

<sup>48</sup> H. Poincaré, *op. cit.*, p.40

*dei segnali, ma poiché sanno che la trasmissione della luce non è istantanea, fanno in modo di aggiustarli. Quando la stazione B avverte il segnale della stazione A, il suo orologio non deve segnare la stessa ora di quello della stazione A nel momento dell'emissione del segnale, ma deve invece segnare tale ora aumentata di una costante che rappresenta la durata della trasmissione...E infatti essi segnano la stessa ora nel medesimo istante fisico, ma a una condizione: che le due stazioni siano ferme. Nel caso contrario, la durata della trasmissione non sarà la stessa nei due sensi, poiché la stazione A, per esempio, si muove davanti alla perturbazione ottica emanata da B, mentre la stazione B fugge davanti alla perturbazione emanata da A. Gli orologi regolati in tal maniera non segneranno dunque il tempo vero, segneranno quello che si può chiamare il tempo locale, sì che l'uno di essi ritarderà sull'altro.* <sup>49</sup>.

Le riflessioni sviluppate in questo intervento sono praticamente le stesse che utilizzerà Einstein nella sua memoria del giugno 1905. Poincaré ha pienamente intuito che non si può parlare di simultaneità per eventi in diversi sistemi di riferimento e si sta avvicinando alla relatività ristretta ma esita “ *Ciò sfortunatamente non basta e occorrono ipotesi complementari; bisogna ammettere che i corpi in movimento subiscano una contrazione uniforme nel senso del movimento* ”<sup>50</sup>. Da quest'ultimo passaggio si evidenzia come la teoria della relatività non fosse ancora stata scoperta.

Nel concludere la conferenza Poincaré auspica la possibilità di edificare una nuova meccanica in cui la velocità della luce sia un limite invalicabile tuttavia non è ancora sicuro che i vecchi principi, l'etere *in primis*, siano destinati ad abdicare.

<sup>49</sup> H. Poincaré, *Il valore della scienza*, p.136, La nuova italia, Firenze, 1994.

<sup>50</sup> H. Poincaré, *op. cit.*, p.136

Una serie di interessanti argomenti quanto mai critici verso la fisica tradizionale sono espressi anche ne *La scienza e l'ipotesi* ( 1902 ) un libro che Einstein lesse e apprezzò molto come ricorda in alcune lettere Maurice Solovine, che insieme ad Einstein e a Konrad Habicht formava, negli anni di Berna, l'*Akademie Olympia*.

Nel sesto capitolo de *La scienza e l'ipotesi*, dal titolo *La meccanica classica* Poincaré afferma: “ 1° Non vi è spazio assoluto e noi concepiamo solo movimenti relativi; tuttavia i fatti meccanici si enunciano spesso come se vi fosse uno spazio assoluto, al quale si potrebbero riferire. 2° Non vi è tempo assoluto; dire che due durate sono eguali è un'asserzione che non ha per se stessa alcun senso, e non può acquistarne uno, se non per convenzione. 3° Non solamente non abbiamo l'intuizione diretta dell'eguaglianza di due durate, ma non abbiamo nemmeno quella della simultaneità di due avvenimenti producentesi in due teatri diversi; 4° Infine la nostra geometria euclidea non è che una specie di convenzione di linguaggio; possiamo enunciare i fatti meccanici; riferendoli a uno spazio non euclideo, il che è meno comodo, ma anch'esso del tutto legittimo, come il nostro spazio ordinario: l'enunciato diviene così molto più complicato, ma è pur sempre possibile. “<sup>51</sup>.

Oltre a questi importanti scritti in cui compare l'aspetto qualitativo dei problemi, Poincaré diede alla luce anche due memorie dal medesimo titolo *Sur la dynamique de l'électron*, entrambe uscite nel 1905 pressapoco in contemporanea alla prima memoria di Einstein: in essa compaiono la dimostrazione completa della covarianza dell'elettrodinamica e la dimostrazione delle proprietà di gruppo delle trasformazioni di Lorentz, senza naturalmente che potesse sapere che

---

<sup>51</sup> H. Poincaré, *La scienza e l'ipotesi*, pp. 93-94, La nuova italia.

qualche settimana prima erano state rilevate in maniera indipendente dal giovane collega.

A causa di queste brillanti intuizioni prive però di un seguito fruttuoso, lo scienziato francese rimane sospeso tra assolutismo e relativismo. Holton ha cercato il motivo di questa ambigua posizione nella natura e nelle inclinazioni personali di Poincaré ritenuto un gradualista, il conservatore brillante del suo tempo. Poincaré viene incluso in quella classe di scienziati che riescono a sviscerare sino ad un livello esaustivo problemi vecchi di secoli. Di contro Einstein apparterebbe invece a quella classe di scienziati che scoprono vasti campi inesplorati.

Holton adduce un altro motivo, di natura epistemologica, per spiegare la miopia di Poincaré nei confronti della relatività: il matematico francese perseguiva nel sostenere la mera natura di fatto sperimentale del principio di relatività: “ *Ecco dunque il significato del principio di relatività fisica; esso non è più una semplice convenzione: esso è verificabile, e potrebbe perciò anche non essere verificato; si tratta di una verità sperimentale...* ”<sup>52</sup>.

A tal proposito è significativa la reazione di Poincaré alla notizia che i risultati ottenuti dal grande fisico sperimentale Walter Kaufmann ( 1906 ) smentivano la teoria della relatività di Lorentz come quella di Einstein, “ *Le principe de la Relativité n'aurait donc pas la valeur rigoureuse qu'on était tenté de lui attribuer* ”<sup>53</sup>. Chiaramente Poincaré non doveva essere molto convinto del principio di

---

<sup>52</sup> H. Poincaré, *Spazio e tempo*, in *Dernières pensées* ( 1913 ), cit. da A. Einstein, *Relatività: esposizione divulgativa*, p. 289, Bollati Boringhieri Torino 1967.

<sup>53</sup> Cit. da G. Holton, *Le origini della teoria della relatività speciale*, p. 71, in *L'intelligenza scientifica*, Armando editore Roma 1994.

relatività sul quale aveva fondato il proprio importante lavoro pubblicato nello stesso anno sui “ *Rendiconti del circolo matematico di Palermo* “.

Einstein invece rispose diversamente alla presunta smentita sperimentale di Kaufmann: concesse che i suoi calcoli sembravano esenti da errore ma “ *se vi è un insospettato errore sistematico o se i fondamenti della teoria della relatività non corrispondono ai fatti si potrà decidere con certezza solo quando una grande varietà di materiale osservativo sarà disponibile* ”<sup>54</sup>.

La differenza decisiva tra Einstein e Poincaré consiste nel fatto che il primo aveva abbracciato senza riserve il concetto di relatività, elevando quello che nella memoria del 1905 chiamava ancora *Vermutung* ( congettura ), cioè il principio della relatività, al rango di *Voraussetzung* ( postulato ). Si trattava evidentemente per Einstein di una proposizione o ipotesi tematica.

Secondo Holton sono proprio le ipotesi tematiche, non verificabili e non falsificabili ( anche se non del tutto arbitrarie ) che vanno più a fondo, ad essere le più difficili da avanzare o da accettare. Nell'aprile del 1909 Poincaré tenne una serie di sei lezioni a Göttinga. Nell'ultima intitolata *la Mécanique nouvelle* trattò i problemi attinenti alla relatività. Secondo Poincaré la nuova meccanica si basa su tre ipotesi. La prima è che i corpi non possano raggiungere velocità superiori a quella della luce; la seconda è che le leggi della fisica debbano essere identiche in tutti i riferimenti inerziali. Fin qui queste due ipotesi coincidono con i due postulati della relatività einsteiniana cui per altro il matematico francese non fa minimamente menzione. Ma Poincaré introduce una terza ipotesi: “ *Occorre fare un'ulteriore ipotesi, ben più sorprendente, ben più difficile da accettare, e che*

---

<sup>54</sup> Cit. da G. Holton, *L'immaginazione scientifica*, p. 159

*contrasta in modo stridente con ciò a cui siamo abituati. Un corpo in moto traslatorio subisce una deformazione nella direzione in cui si sposta...Per quanto strana possa apparirci, si deve ammettere che la terza ipotesi è perfettamente verificata.* <sup>55</sup>. Da questa formulazione risulta chiaro come nel 1909 Poincaré non aveva compreso che la contrazione dei regoli è una conseguenza dei due postulati di Einstein. Poincaré dunque non comprese uno dei punti fondamentali della relatività ristretta.

Abraham Pais esprime delle perplessità sul fatto che Poincaré in questo suo lavoro non citasse Einstein, così come non lo citò quasi mai in nessuna altro suo intervento. Il grande scienziato francese non poteva non aver compreso i fondamentali contributi del giovane fisico tedesco; il motivo di un tale ( voluto ? ) misconoscimento dell'altro non può che essere ricondotto al diverso orientamento di base: conservatore l'anziano Poincaré, disposto ad innovare il giovane Einstein. In termini kuhniani Einstein e Poincaré non condividevano lo stesso paradigma.

Per concludere questa è l'impressione che ebbe Einstein di Poincaré dopo l'unico incontro avvenuto al primo Congresso Solvay a Bruxelles nell'Ottobre 1911: “ *Poincaré era in generale del tutto ostile ( alla teoria della relatività ) e, nonostante la sua acutezza, dimostrava scarsa comprensione della situazione.* <sup>56</sup>.

---

<sup>55</sup> Cit. da A. Pais, *Sottile è il Signore...*, p. 183.

<sup>56</sup> Cit. da A. Pais, *op. cit.*, p. 186.

## 1.5 La relatività generale

### a) “ Il pensiero più felice della mia vita “

Abraham Pais racconta con dovizia di particolari nella sua monografia sul grande fisico “ *Sottile è il Signore...* ” come e quando Einstein ebbe la sua intuizione più feconda ed originale che lo spinse in maniera decisiva ad affrontare i problemi relativi alla gravità.

Il passaggio estremamente significativo, perché ci rende partecipi non solo della genesi delle idee all'interno della mente di Einstein ma anche delle sue sensazioni, si trova in un manoscritto, mai pubblicato, ora conservato alla Pierpont Morgan Library di New York City.

Einstein spiega che: “ *Quando nel 1907, stavo lavorando a un articolo riassuntivo sulla teoria della relatività ristretta per lo “ Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik “, dovetti anche tentare la teoria newtoniana della gravitazione in modo da rendere le sue leggi compatibili con la teoria della relatività ristretta. Tentativi in questa direzione avevano in effetti mostrato che la cosa era possibile, ma non ne ero soddisfatto perché si basavano su ipotesi prive di fondamento fisico* “. Einstein continua così: “ *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.*

*In effetti, se l'osservatore lascia cadere dei corpi, questi permangono in uno stato di quiete o di un moto uniforme rispetto a lui, indipendentemente dalla loro 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 “. Grazie a questa idea, quella singolarissima legge sperimentale secondo cui, in un campo gravitazionale, tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione, veniva improvvisamente ad acquistare un significato fisico profondo. Precisamente, 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 accorgersi di trovarsi in un campo gravitazionale e di stare cadendo in esso. Se però un oggetto del genere non esiste, come si è mostrato sperimentalmente con grande precisione, allora l'osservatore non dispone di elementi oggettivi che gli consentano di stabilire che si trova in caduta libera in un campo gravitazionale. Piuttosto ha il diritto di considerare il proprio stato come uno stato di quiete e il proprio spazio ambiente come libero da campi, almeno per quanto riguarda la gravitazione. L'indipendenza dell'accelerazione di caduta dalla natura dei corpi, ben nota sperimentalmente, è pertanto un solido argomento in favore dell'estensione del postulato di relatività a sistemi di coordinate in moto non uniforme l'uno relativamente all'altro”<sup>57</sup>.*

La tesi fondamentale della teoria della relatività ristretta è costituita dall'invarianza, per la descrizione fisica dei fenomeni, dei sistemi di riferimento inerziali, vale a dire di quelli in quiete o in moto rettilineo uniforme. La relatività

---

<sup>57</sup> A. Pais, *Sottile è il Signore...*, p. 194, Bollati Boringhieri, Torino, 1986



generale si presenta come il tentativo di estendere l'invarianza per la descrizione fisica delle leggi generali della natura a ogni sistema di riferimento qualunque sia il suo stato di moto. Già a partire da questo proposito si manifesta la tendenza di Einstein ad estendere e totalizzare le sue precedenti acquisizioni.

Einstein è convinto dell'unicità dell'universo e al contempo crede fermamente che non esista un riferimento privilegiato ma che gli infinitamente possibili sistemi di riferimento siano egualmente validi. Se con la relatività ristretta era riuscito ad estendere l'equivalenza dei sistemi inerziali anche a fenomeni, quali la propagazione luminosa, che parevano eluderla; ora con la relatività generale si tratta di estendere la classe dei possibili osservatori piuttosto che quella dei fenomeni osservati.

Risulta evidente dalle stesse parole di Einstein sopra citate che la relatività generale parte da considerazioni sulla forza di gravità e sul suo modo di agire. L'azione a distanza di newtoniana memoria è stata rifiutata: lo studio approfondito dei fenomeni elettromagnetici ha ormai definitivamente appurato che non esiste alcun tipo di azione a distanza senza l'ausilio di qualche entità fisica intermediaria, il campo. Anche la forza di gravità si esplica attraverso il concetto di campo.

La Terra produce attorno a sé un campo gravitazionale che agisce sugli oggetti e li attira a sé. A differenza dei campi elettrici e magnetici, il campo gravitazionale gode di una notevole proprietà: i corpi che si muovono sotto l'unica influenza di un campo gravitazionale ricevono un'accelerazione che non dipende minimamente né dalla materia né dallo stato fisico del corpo in questione. Questa proprietà della gravitazione è in stridente contrasto con l'azione delle forze elettrica e magnetica che non inducono la stessa accelerazione in tutti i corpi, anzi alcuni sono neutri

dal punto di vista elettromagnetico. Questa differenza tra gravitazione ed elettromagnetismo era naturalmente ben nota ai fisici fin dal tempo di Galilei, ma nessuno ne aveva colto il senso fisico sino al 1907. In quell'anno Einstein osservò che esiste un altro tipo di forze che, come la gravitazione, sono proporzionali alla massa del corpo su cui agiscono, e cioè le forze inerziali. Einstein intuì che questa somiglianza tra forze inerziali e gravitazionali rende impossibile distinguerle.

La cosa si chiarisce meglio pensando come le forze gravitazionali si possano distinguere dalle forze elettriche o magnetiche. Supponiamo che ci dicano che c'è un campo di forze presente e ci chiedano di scoprire quale parte del campo è gravitazionale e quale parte è elettrica. Tutto quel che dobbiamo fare è misurare l'accelerazione di un corpo neutro e di uno carico: l'accelerazione del corpo neutro dà l'intensità della componente gravitazionale del campo; questa componente induce sia nel corpo neutro che in quello carico la medesima accelerazione, e la differenza fra le accelerazioni dei due corpi darà la misura dell'intensità della componente elettrica. Ora supponiamo di provare a usare la stessa tecnica per distinguere una forza gravitazionale da una inerziale: poiché entrambe queste forze sono proporzionali alla massa del corpo su cui agiscono, non riusciremo mai a fare una qualsiasi distinzione. Quale che sia il corpo usato per misurare la forza, l'accelerazione finale sarà comunque la stessa: possiamo determinare l'intensità complessiva della forza, ma non possiamo dire quale parte di essa sia gravitazionale e quale inerziale.

Questa legge viene anche comunemente espressa dicendo che la massa gravitazionale e la massa inerziale sono uguali. Questa legge era già da lungo tempo conosciuta ma non era ancora stata interpretata: la stessa qualità di un

corpo, la massa, si interpreta a seconda delle circostanze come inerzia o come pesantezza. Nel primo caso la massa si oppone alla forza impressale e la contrasta: se per prova applicassimo la medesima forza a due carri le cui massa siano l'una il triplo dell'altra, le velocità dei carri su un piano orizzontale, trascurando gli effetti dell'attrito, risulterebbero inversamente proporzionali. Il modo più usuale per determinare la massa è quello di utilizzare la bilancia che sfrutta la forza attrattiva della Terra. I risultati coincidono e questo dato non è affatto accidentale come riteneva la fisica classica, anzi l'uguaglianza tra massa gravitazionale e massa inerziale costituisce un importante argomento a favore del postulato generale della relatività. Einstein ricorre a un felice esperimento mentale per mostrare ciò: supponiamo uno spazio vuoto sufficientemente lontano da qualsivoglia forza gravitazionale, in pratica un sistema di riferimento galileiano perfetto, e in questo spazio collochiamo una stanza ermeticamente chiusa e senza finestre, con all'interno un osservatore che librerà per l'assenza di gravità. Se alla stanza viene applicata una corda che la traina verso l'alto con un moto accelerato, il nostro osservatore all'interno vedrà cadere verso il basso con la medesima accelerazione tutti i suoi strumenti e potrà giustamente ritenere di essersi imbattuto in un campo gravitazionale. Un osservatore esterno invece, solidale con il quadro galileiano, vedrà che è la cassa a muoversi di moto accelerato verso l'alto. Ora se il nostro osservatore interno legasse al soffitto una corda e all'estremità libera ponesse un oggetto, osserverebbe la corda tendersi e attribuirebbe la tensione alla massa gravitazionale dell'oggetto. L'osservatore esterno invece interpreterebbe, a sua volta giustamente, la tensione della corda come conseguenza della massa inerziale del grave appeso.

La connessione tra gravità e moto accelerato è la fondamentale idea che balenò nella mente di Einstein in quel felice giorno del 1907 a Berna. Un'accelerazione verticale può produrre un sostituto della gravità e realizzare i medesimi effetti, infatti l'osservatore posto all'interno della stanza non riesce a capire se si trova in un campo inerziale o in un campo gravitazionale.

Se si applicasse un foro su un lato della stanza per far penetrare un raggio di luce si otterrebbe un risultato interessante: il raggio di luce non raggiungerebbe la parete opposta in maniera rettilinea, come se la cabina fosse in quiete, ma subirebbe una deflessione tale da incurvarlo.

L'osservatore interno è allora costretto a concludere che anche per le leggi dell'elettromagnetismo i due campi, quello gravitazionale e quello inerziale, sono equivalenti.

Affermare che i campi sono equivalenti significa affermare che sono equivalenti la massa inerziale, ossia la resistenza che un corpo offre alla variazione del suo stato dinamico, e la massa gravitazionale ossia la sorgente del campo gravitazionale. Bisogna però sottolineare che l'equivalenza tra il campo inerziale e il campo gravitazionale è quantitativa, ovvero numerica, e locale. Affermare che i due campi sono equivalenti non significa dire che sono la stessa cosa.

La principale differenza sta nel fatto che la sorgente del campo inerziale è data dal passaggio da un sistema di riferimento inerziale ad uno non inerziale, mentre la sorgente del campo gravitazionale è data da una distribuzione di massa, o da una distribuzione di energia giacché, come afferma la relatività speciale, massa ed energia sono due facce della stessa medaglia. Inoltre, e questa è la seconda profonda differenza, mentre il campo inerziale è globalmente uniforme, il campo

gravitazionale non lo è, come si può facilmente intuire pensando che le sue linee di forza convergono verso la sorgente. Questo significa che se localmente i due campi sono indistinguibili, non lo sono più globalmente. Basta infatti osservare se le traiettorie degli oggetti in caduta dentro la cabina continuano a essere parallele o se convergono. Nel primo caso siamo in presenza di un campo inerziale fittizio, nel secondo di un campo gravitazionale reale. Per la relatività speciale le leggi della fisica sono covarianti per trasformazioni di Lorentz, lo scopo è quello di rendere covariante pure la legge della gravitazione. Considerata l'equivalenza fra campi inerziali e campi gravitazionali, la relatività tra sistemi inerziali non è più sufficiente di conseguenza bisogna estenderla anche a sistemi non inerziali. Questo è un problema importante per chi, come Einstein, intendeva costruire una fisica dove non ci fossero sistemi di riferimento privilegiati. Nella relatività speciale, i sistemi inerziali godono ancora di uno status particolare rispetto a quelli non inerziali. Quindi da un lato vi è il problema di unificare la gravitazione con la relatività speciale, dall'altro vi è il problema di estendere la covarianza a sistemi non inerziali. La soluzione che conduce alla relatività generale, ossia alla teoria che risolve i due problemi detti, sta proprio nel principio di equivalenza. Infatti, se i campi inerziali o fittizi sono originati da un passaggio da un sistema inerziale ad uno non inerziale, è sempre possibile trovare una trasformazione fra sistemi di riferimento che permette di passare da un sistema non inerziale a uno inerziale. Poiché il campo gravitazionale, che è reale, localmente può essere pensato come un campo inerziale, allora è possibile trovare delle trasformazioni che permettono di passare a un sistema inerziale dove esso, sempre localmente, può essere trascurato.

La relatività generale porta a compimento i risultati della relatività ristretta.

Se quest'ultima proclamava la democrazia dei punti di vista in moto uniforme, per usare un'espressione di Brian Greene, l'intuizione successiva di Einstein proclama, con vero spirito egualitario, l'equivalenza di tutti i punti di vista, poiché non c'è differenza tra un osservatore che non sente il campo gravitazionale e uno che non sta accelerando. Tutti gli osservatori, indipendentemente dal loro stato di moto, possono affermare di essere stazionari, a patto che includano un opportuno campo gravitazionale nella descrizione del loro ambiente.

La relatività generale ci assicura, quindi, che includendo la gravità, tutti i sistemi di riferimento sono legittimi. L'entusiasmo di Einstein legato all' intuizione profonda dell'affinità tra accelerazione e gravità è dovuto al fatto che quest'ultima costituiva da sempre una componente fondamentale ma allo stesso tempo oscura dell'universo mentre il moto accelerato è qualcosa di concreto e tangibile che può contribuire a svelare la misteriosa gravità. La concezione classica della gravità aveva una funzione livellatrice: per Newton tutto esercitava un'attrazione gravitazionale su tutto quanto, indipendentemente dalla composizione fisica ogni corpo esercita la forza di gravitazione e ne è a sua volta soggetto.

Tuttavia anche se la fondamentale legge di Newton permetteva di compiere previsioni esatte, nulla si sapeva sulla natura di quella forza che si esercita tra corpi anche a milioni di chilometri di distanza l'uno dall'altro. Lo stesso Newton così si espresse : “ *E' inconcepibile che la materia bruta e inanimata possa ( senza la mediazione di qualcosa di immateriale ) agire e influire su altra materia senza reciproco contatto....Che la gravità sia qualcosa di innato, di inerente ed essenziale alla materia, si che un corpo possa agire a distanza su di*

*un altro attraverso il vuoto senza la mediazione di qualche altra cosa in virtù della quale, e per mezzo della quale, l'azione a distanza o la forza possa essere trasportata da un corpo all'altro, è per me un'assurdità così grande da farmi credere che nessun uomo il quale abbia una reale consapevolezza nelle materie filosofiche possa mai farla propria. La gravità deve necessariamente essere causata da un agente il quale agisca in modo costante secondo certe leggi; ma se questo agente sia materiale o immateriale è questione che lascio decidere ai lettori* <sup>58</sup>.

Con la teoria della relatività generale Einstein riesce a fornire una spiegazione soddisfacente della gravità, ma la sua risposta implica una totale rivoluzione dei concetti della fisica classica newtoniana quali lo spazio e il tempo assoluti, della fondamentale legge d'inerzia e della geometria che la sostiene, la vetusta geometria euclidea.

L'unico tipo di interazione fra corpi materiali è l'attrazione gravitazionale, e vari esperimenti dimostrano l'esistenza di un notevole legame fra gravità e inerzia, ( che nella formulazione newtoniana sembrano così distanti tra loro ), espresso dall'uguaglianza fra massa gravitazionale e massa inerziale. Questo postulato richiede una formulazione completamente nuova della legge d'inerzia dato che è proprio tale legge che conferisce uno statuto di privilegio ai sistemi inerziali. L'inerzia di un corpo non deve più essere considerata un effetto dello spazio assoluto, ma piuttosto una conseguenza delle masse distanti. L'idea che l'insieme delle masse distanti possa essere la causa delle forze centrifughe fu espressa decenni prima dal fisico Ernst Mach i cui scritti influenzarono il giovane Einstein.

---

<sup>58</sup> B. Greene, *L'Universo elegante*, p.50, Einaudi, Torino 2000

Inoltre tale ipotesi non è contraddetta da nessun fatto sperimentale, perché in astronomia il sistema di riferimento rispetto al quale si determinano le rotazioni dei corpi celesti è in uno stato di quiete relativo al sistema stellare considerato globalmente. Nella meccanica ordinaria il moto di un corpo, su cui non agiscono forze elettromagnetiche o di altro tipo, è generato da due cause: la sua inerzia, cioè la resistenza alle accelerazioni rispetto allo spazio assoluto; l'attrazione esercitata dalle masse circostanti. Occorre trovare una formulazione della legge del moto in cui inerzia e gravitazione si fondano in un unico concetto di carattere più generale, e in cui il moto di un corpo sia dovuto esclusivamente alla distribuzione di tutte le masse dell'universo.

In meccanica classica si distingue tra il moto di un corpo non soggetto a forze (moto inerziale) e il moto di un corpo sottoposto all'azione del campo gravitazionale: il primo è rettilineo e uniforme in un sistema inerziale, il secondo non è uniforme e percorre una traiettoria curvilinea. In base al principio di equivalenza, dobbiamo abbandonare questa distinzione, infatti è sufficiente passare a un sistema di riferimento accelerato perché il moto rettilineo e uniforme si trasformi in un moto curvo e accelerato, del tutto indistinguibile dal moto dovuto all'attrazione gravitazionale. Chiameremo d'ora in poi moto inerziale qualsiasi moto di un corpo su cui non agiscano forze elettriche, magnetiche o di altro tipo, e che si trovi esclusivamente sotto l'azione delle masse gravitazionali: in questo senso esso ha un significato più generale che in precedenza. Il teorema che un moto inerziale relativo a un sistema inerziale è rettilineo ed uniforme, cioè il principio di inerzia, perde ora qualsiasi significato, e sarà necessario quindi stabilire una formulazione più generale della legge dei moti inerziali. La soluzione



di questo problema costringe ad abbandonare il concetto di spazio assoluto per arrivare ad una teoria della gravitazione più intimamente legata ai principi della meccanica di quanto non fosse la teoria di Newton. Per iniziare conviene introdurre un altro esperimento mentale di Einstein: si immagina un disco rotante con degli osservatori posti uno al centro e l'altro sulla circonferenza. Se si effettuano delle misurazioni con un regolo rigido, si ottengono dei risultati sconcertanti: il rapporto tra circonferenza e raggio è maggiore del valore costante ( $\pi$ ). Questo fatto è dovuto alla contrazione del regolo utilizzato per misurare la circonferenza mentre la misura del raggio, perpendicolare alla direzione del moto rimane inalterata. Ovvero non vale più la geometria euclidea. Perciò se si vuol tener conto dei sistemi non inerziali, ossia se si vuol tener conto della gravitazione, bisogna avere presente che vi è anche la possibilità di rigettare la geometria euclidea della fisica classica e quella pseudo euclidea della relatività speciale. Analogo risultato si ottiene se si confrontano i tempi: l'orologio dell'osservatore posto sulla circonferenza risulterà in anticipo rispetto all'orologio dell'osservatore al centro. Allora in presenza di campi inerziali, o gravitazionali, dato che per il principio di equivalenza sono localmente la stessa cosa, i regoli sono più lunghi o più corti e gli orologi vanno più lentamente o più velocemente a seconda della loro posizione in tali campi. Ne consegue che si perde completamente il carattere metrico dell'usuale nozione di coordinata. Infatti sia classicamente che in relatività speciale, le coordinate sono intese come la distanza di un punto da un asse considerato come una linea retta. Però in relatività generale non abbiamo più né regoli rigidi che permettono di misurare distanze, né orologi che permettono di misurare tempi indipendentemente dalla loro posizione. Inoltre

non abbiamo neppure linee rette che possano figurare come assi. Se ad esempio pensiamo a cosa succede quando si spezza la fune che mantiene una palla in moto circolare, osserviamo che rispetto ad un osservatore esterno in quiete la palla segue un moto rettilineo lungo la tangente alla circonferenza mentre rispetto al sistema di riferimento non inerziale solidale al moto circolare, osserviamo che la palla percorre una traiettoria curva. Ovvero in presenza di campi inerziali o gravitazionali, le rette s'incurvano. Per risolvere questo problema Einstein fu costretto a ricorrere alla definizione di coordinata di Karl Gauss. Uno dei principi base della relatività ristretta è quello di covarianza secondo cui tutte le leggi della fisica hanno la stessa forma indipendentemente dal sistema inerziale dal quale le si descrive. In relatività generale è possibile estendere l'invarianza delle leggi a qualsiasi generico, inerziale o non inerziale, sistema di riferimento da cui le si descrive a patto che si utilizzino coordinate gaussiane.

Il principio di covarianza generale afferma che per descrivere i fenomeni fisici tutti i sistemi di coordinate gaussiane sono equivalenti, ossia che le leggi della fisica sono covarianti rispetto a sistemi di riferimento arbitrari in cui si utilizzano coordinate gaussiane.

In realtà questo costituisce un meta principio che ci dice come devono essere le leggi.

Il principio vero e proprio afferma che non vi è alcun sistema fisico, o stato di sistema fisico, che si comporta in un modo in un sistema di riferimento arbitrario e in un modo diverso in un altro sistema di riferimento arbitrario. Classicamente e in relatività speciale, il moto inerziale è il moto di un corpo che si muove senza che intervengano forze esterne a modificare il suo stato. In relatività generale

invece abbiamo a che fare con raggi di luce la cui traiettoria s'incurva in presenza di campi inerziali o gravitazionali. Si presentano quindi due possibilità: pensare che la struttura dello spaziotempo sia data da una geometria euclidea o pseudo euclidea quindi piatta, e che vi siano delle forze che causano l'incurvamento; oppure sostenere che non esistano forze di tal genere e che la struttura dello spaziotempo sia data da una geometria diversa da quella piatta. Einstein scelse di seguire la seconda ipotesi e di accettare uno spazio tempo con una geometria curva, la cui curvatura varia a seconda del campo gravitazionale che è diverso in ogni punto dell'universo. Einstein aveva bisogno di una geometria a curvatura variabile che localmente si riducesse alla geometria pseudo euclidea della relatività ristretta, in accordo col principio di equivalenza. Questa scelta radicale comporta che i raggi di luce siano incurvati non a causa di forze ma che siano naturalmente incurvati nello spaziotempo. In altri termini la gravità diventa lo spaziotempo incurvato e le traiettorie curve sono il moto inerziale.

Bisogna sostituire il principio d'inerzia della fisica newtoniana e della relatività speciale: non più moto libero di un corpo in assenza di forze, ma moto di un corpo in uno spaziotempo la cui curvatura dipende dal particolare campo gravitazionale.

Il moto libero in un campo gravitazionale è il moto di caduta quindi invece che parlare di moto inerziale si deve parlare di moto di caduta libera, ossia del moto di un corpo in un campo gravitazionale e non soggetto ad altre forze. Se la traiettoria del moto inerziale classico è data da una linea retta definita geodetica che minimizza la distanza tra due punti, in relatività generale la geodetica non sarà più una linea retta anche se continuerà a estremizzare la distanza tra due eventi dello

spaziotempo. Classicamente l'orbita ellittica descritta da un pianeta attorno al Sole è interpretata come dovuta alla forza di attrazione, invece dopo Einstein viene interpretata come la proiezione spaziale della geodetica percorsa da un corpo in uno spaziotempo la cui struttura è dovuta al campo gravitazionale generato dalla massa solare.

Nella gravitazione relativistica scompaiono del tutto le forze gravitazionali.

Stessa sorte accade all'idea newtoniana di spazio assoluto che si basava sull'esistenza delle forze d'inerzia e delle forze centrifughe infatti è chiaro che tali forze non possono dipendere dalle interazioni fra i corpi poiché nei limiti dei dati sperimentali si è osservata la loro presenza in tutto l'universo, indipendentemente dalla distribuzione locale delle masse.

Newton concluse quindi che esse dipendono dalle accelerazioni assolute e il concetto di spazio assoluto veniva introdotto come causa fittizia di fenomeni fisici. Tuttavia ritenere che lo spazio assoluto sia la causa di qualche fenomeno è certamente incompatibile con un criterio di logica causale. L'ipotesi di uno spazio assoluto è giustificata soltanto dal tentativo di interpretare le forze di inerzia, ma esse d'altra parte costituiscono l'unica indicazione della sua esistenza. Sulla base di una legittima critica epistemologica, tale ipotesi *ad hoc* è inaccettabile.

Il concetto di spazio assoluto mantiene un certo carattere metafisico. Inoltre la sua definizione è circolare: non si può spiegare lo spazio assoluto con le forze inerziali e identificare la causa di quest'ultime con lo spazio assoluto.

Utilizzando il felice modo di esprimersi di Greene, prima di Einstein lo spazio e il tempo costituivano un palcoscenico inerte niente affatto influenzato dalle masse in esso presenti. La rivoluzionaria proposta di Einstein afferma invece che lo spazio

non è una scenografia passiva ma piuttosto uno scenario che si modifica a seconda degli oggetti presenti sulla scena. La relatività generale riesce inoltre a spiegare il segreto meccanismo grazie al quale la gravità si trasmette: la curvatura dello spazio che si accorda alla perfezione con la legge della gravitazione di Newton infatti l'attrazione- incurvamento è direttamente proporzionale alla massa del corpo che la provoca e si attenua proporzionalmente alla distanza dalla sorgente gravitazionale.

## **b) Geometria, esperienza e fisica**

Secondo Carnap “ *la geometria matematica e la geometria fisica costituiscono eccellenti paradigmi di due modi fondamentalmente distinti di acquisire conoscenze: l'aprioristico e l'empirico.* ”<sup>59</sup>. Questa è una distinzione tutt'altro che scontata. Per lungo tempo si è ritenuto che la geometria immaginata fosse naturalmente applicabile al mondo reale esterno.

In quest'ottica va concepita la grande opera kantiana che si proponeva di dimostrare una volta per tutte come la nostra concezione dello spazio fosse euclidea. La geometria offriva a Kant uno dei suoi esempi fondamentali di conoscenza sintetica a priori. La geometria euclidea, l'unica conosciuta sino a quel momento era il paradigma per eccellenza di un sapere certo. Si fondava su pochi

---

<sup>59</sup> R.Carnap, *I fondamenti filosofici della fisica*, p. 159

assiomi intuitivamente validi e derivava tutti i suoi teoremi per via logica. Inoltre nell'ottica kantiana questi teoremi descrivevano anche la struttura reale del mondo, erano sintetici oltretutto a priori. Secondo Carnap il punto di vista moderno circa i rapporti tra geometria e mondo fisico sono cambiati: “ *Oggi è per noi facile scorgere la fonte dell'errore di Kant: essa consisteva nel non aver realizzato che esistono due diverse specie di geometria, essenzialmente diverse fra loro, l'una matematica, l'altra fisica.* ”<sup>60</sup>.

In termini simili si espresse anche Einstein nella conferenza dal titolo *Geometria ed Esperienza*: “ *Come è possibile che le matematiche, le quali dopo tutto sono un prodotto del pensiero umano, dipendente dall'esperienza, siano così ammirevolmente adatte agli oggetti della realtà ? È forse la ragione umana, indipendentemente dall'esperienza, e solo col pensiero, capace di toccare a fondo le proprietà del reale ? A mio avviso la risposta a questa domanda è, in breve, la seguente: nella misura in cui le proposizioni matematiche si riferiscono alla realtà, esse non sono certe; e nella misura in cui esse sono certe, non si riferiscono alla realtà.* ”<sup>61</sup>.

La crisi della geometria euclidea entrò nel vivo alcuni anni dopo la morte di Kant. Il problema nacque attorno all'assioma delle parallele secondo cui: data una retta nel piano ed un punto esterno ad essa, esiste una e una sola retta, sul piano, che passa per il punto ed è parallela alla retta. I dibattiti attorno ad esso non riguardavano tanto la sua verità quanto il suo statuto di assioma, dal momento che sembrava meno elementare degli altri assiomi assunti da Euclide, e molti matematici ritenevano che esso potesse essere un teorema da essi derivabile.

---

<sup>60</sup> R. Carnap, *I fondamenti filosofici della fisica*, p.226

<sup>61</sup> A. Einstein, *Idee e opinioni*, p. 221

Solo nel secolo XIX fu possibile dimostrare effettivamente, tramite una logica rigorosa, che l'assioma delle parallele è indipendente dagli altri assiomi di Euclide: esso non può essere derivato da quegli assiomi. Se l'assioma delle parallele è indipendente dagli altri assiomi di Euclide, allora un enunciato incompatibile con tale assioma può essergli sostituito senza contraddire logicamente gli altri assiomi; sperimentando le differenti alternative, furono creati altri nuovi sistemi detti geometrie non euclidee. Le possibili sostituzioni dell'assioma euclideo delle parallele sono state essenzialmente due: si può dire che in un piano, per un punto fuori da una retta, non passa alcuna parallela alla retta data o diversamente si può ritenere che passa più di una retta parallela ( e risulta che, se ne passa più d'una, ne esistono infinite ).

Il primo tentativo fu perseguito dal matematico russo Nikolaj Lobačevskij, la seconda via fu percorsa invece dal matematico tedesco Bernhard Riemann. Nella geometria di Lobačevskij, indicata tecnicamente come geometria iperbolica, esiste un numero infinito di parallele; nella geometria di Riemann, nota come geometria ellittica, non esistono parallele. Nella geometria euclidea la somma degli angoli interni di ogni triangolo è uguale a due angoli retti, ossia a  $180^\circ$ ; nella geometria iperbolica di Lobačevskij questa somma è minore di  $180^\circ$ ; infine nella geometria ellittica di Riemann questa somma è maggiore di  $180^\circ$ . Tutte le superfici, tanto quelle euclidee, quanto quelle non-euclidee, hanno in ognuno dei loro punti una misura chiamata “ misura della curvatura “ di quella superficie in quel punto. La geometria di Lobačevskij è caratterizzata dal fatto che, in ogni suo punto di ogni piano, la misura di curvatura del piano è costante e negativa mentre nella geometria di Riemann la curvatura del piano è costante e positiva. In seguito

Riemann sviluppò una teoria generalizzata di spazi<sup>62</sup> a curvatura variabile dove si può considerare un numero qualunque di dimensioni e, in ogni caso, la curvatura può variare con continuità da punto a punto. Quando i fisici si riferiscono alla geometria riemanniana, essi intendono la geometria generalizzata della quale la vecchia geometria ellittica di Riemann, quella iperbolica di Lobačevskij, e la vecchia geometria euclidea, sono casi particolari.

Un dato fondamentale dei modelli assiomatici delle geometrie non euclidee è costituito dalla loro coerenza relativa rispetto alla geometria euclidea. Matematici quali Beltrami, Klein e Poincaré dimostrarono che se il sistema assiomatico euclideo non è contraddittorio, neppure gli altri lo sono. Naturalmente in ciò non si può vedere una prova della coerenza assoluta delle geometrie non euclidee se al contempo non si dispone di una dimostrazione della coerenza in senso assoluto del sistema euclideo. I vari modelli da un punto di vista logico-matematico risultano quindi equivalenti. Reichenbach nota che “ *Per capire la possibilità di una geometria non-euclidea, si deve ricordare che la costruzione assiomatica fornisce la dimostrazione di una asserzione in termini di derivazioni logiche dai soli assiomi...La geometria non-euclidea è un sistema logicamente costruibile, questo fu il primo e più importante risultato stabilito dai suoi inventori* ”<sup>63</sup>.

La questione della visualizzazione della geometria non ha nulla a che spartire con la sua possibilità che si basa solo ed esclusivamente su di una fondazione assiomatica.

---

<sup>62</sup> Qui si intendono spazi che non sono stati trattati assiomaticamente infatti le trattazioni assiomatiche delle geometrie non euclidee nelle quali si mantengono tutti gli assiomi di Euclide salvo quello delle parallele, che viene sostituito con un altro assioma, sono limitate a spazi di curvatura costante.

<sup>63</sup> H. Reichenbach, *Filosofia dello spazio e del tempo*, p. 29, Feltrinelli, Milano



Se diversi sistemi di geometrie venivano considerati come matematicamente equivalenti, sorgeva la questione circa quale di queste geometrie fosse applicabile alla realtà fisica; non v'era alcuna necessità di scegliere a tal scopo proprio la geometria euclidea.

Se si riconosce che la geometria dello spazio fisico costituisce un problema empirico, è compito della fisica scegliere lo spazio effettivo, ossia lo spazio fisico, tra i tipi di spazio possibili. E proprio in questa direzione si mossero i padri fondatori delle nuove geometrie per cercare di appurare la vera natura geometrica dello spazio. Dalla corrispondenza con Bessel emerge come Gauss ritenesse che *“...lo spazio ha una realtà anche al di fuori del nostro spirito, e le sue leggi noi non le possiamo prescrivere interamente a priori.”*<sup>64</sup>.

Gauss ritenne che fosse possibile decidere empiricamente fra le due geometrie misurando gli angoli di un grande triangolo rettilineo e calcolandone la somma.

Sembra infatti che un tale esperimento sia stato compiuto da Gauss durante la famosa triangolazione di Hannover avvenuta tra il 1818 e il 1847. Uno dei teoremi delle geometrie non euclidee afferma che la somma degli angoli interni di un triangolo rettilineo è non uguale, come nella geometria euclidea, ma minore di  $180^\circ$ , e che essa è tanto minore quanto maggiori sono i lati del triangolo in questione. Tuttavia l'autore non pubblicò in vita i suoi risultati temendo le grida dei Beoti.

Un altro celebre tentativo si deve a Lobacevskij mediante il ricorso a misurazioni non geodetiche ma astronomiche: il matematico russo cercò infatti di misurare gli angoli del triangolo stellare con vertici Terra, Sole e la stella Sirio. Lo scarto

---

<sup>64</sup> Cit. da P. Parrini, *Fisica e geometria dall'ottocento a oggi*, p.57

trovato tra la somma degli angoli interni e  $180^\circ$  era molto piccola e largamente giustificabile con gli errori strumentali.

Il valore probatorio di questi esperimenti era largamente inficiato da diverse obiezioni: la possibilità di errori sperimentali; il fatto che il margine di differenza tra la somma degli angoli interni della geometria euclidea e non-euclidea si assottiglia quanto più sono piccoli i triangoli considerati; l'assunzione di dati non certi come ad esempio il moto rettilineo dei raggi luminosi. Quest'ultimo genere di problema sarà ben presente ad Helmholtz che ha piena coscienza del fatto che la determinazione empirica della geometria presuppone delle operazioni di misura che a loro volta presuppongono delle assunzioni circa gli strumenti ed i processi fisici utilizzati per eseguire tali misure, “ *...determiniamo linee rette mediante il percorso dei raggi di luce, rettilineo secondo la nostra esperienza; ma che la luce si propaga lungo linee di minimo percorso fintantoché rimane in un mezzo di rifrangenza uniforme sarebbe ugualmente vero in spazi di diversa misura di curvatura. Tutte le nostre misure geometriche sono dunque basate sul presupposto che gli strumenti di misura da noi ritenuti rigidi siano effettivamente corpi di forma invariabile o per lo meno non subiscano altre variazioni di forma oltre quelle che conosciamo, come quelle dovute al cambiamento di temperatura o al diverso valore della gravità in luoghi diversi.* ”<sup>65</sup>.

Dal fatto che non è possibile un confronto diretto, immediato, degli assiomi della geometria e l'esperienza prenderà le mosse in funzione convenzionalistica ed antiempiristica anche Poincaré il quale afferma che: “ *Gli assiomi non sono dunque né giudizi sintetici a priori né fatti sperimentali: sono convenzioni. La*

<sup>65</sup> H. Helmholtz, *Sull'origine e il significato degli assiomi geometrici*, in A. Einstein, *Relatività: esposizione divulgativa*, p. 241

*nostra scelta tra tutte le convenzioni possibili è guidata da fatti sperimentali; ma essa resta libera ed è limitata solo dalla necessità di evitare ogni contraddizione. In tal modo i postulati possono rimanere rigorosamente veri, anche quando le leggi sperimentali, che ne hanno suggerita l'adozione, sono approssimative. In altri termini, gli assiomi della geometria ( non parlo di quelli dell'aritmetica ) sono semplici definizioni mascherate. Che si deve quindi pensare della questione circa la verità della geometria ? Essa non ha alcun senso. Sarebbe come domandare se il sistema metrico sia vero e false le antiche misure; se siano vere le coordinate cartesiane e false quelle polari. Una geometria non può essere più vera di un'altra; essa può essere soltanto più comoda. Ora la geometria euclidea è e resterà la più comoda: 1° Perché è la più semplice; e lo è, non solo in rapporto alle nostre abitudini intellettuali, o per non so quale intuizione diretta che noi avremmo dello spazio euclideo; ma anche perché essa è la più semplice in sé...2° Perché la geometria euclidea si accorda assai bene con le proprietà dei solidi naturali di questi corpi che noi tocchiamo e vediamo, e coi quali facciamo i nostri strumenti di misura. “<sup>66</sup>.*

Con il convenzionalismo di Poincaré una nuova posizione epistemologica si affianca a quelle tradizionali del kantismo e dell'empirismo. Attraverso il convenzionalismo Poincaré ritiene di poter superare le difficoltà sia del kantismo che data la natura sintetica a priori degli assiomi della geometria euclidea, non ammetterebbe alcun tipo di geometria diversa, sia le insidie di una geometria intesa come scienza sperimentale quindi soggetta ad una continua revisione.

---

<sup>66</sup> H. Poincaré, *La scienza e l'ipotesi*, p. 59

Secondo il matematico francese “ *l'esperienza non può decidere tra Euclide e Lobacevskij. Riassumendo, per quanto giri e rigiri, è impossibile scoprire nell'empirismo geometrico un senso ragionevole.* “<sup>67</sup> ma al massimo” *L'esperienza ci guida in questa scelta che essa non c'impone; ci fa conoscere non qual'è la geometria più vera, ma qual è la più comoda.* “<sup>68</sup>.

Poincaré suppose inoltre che i fisici scoprissero che la struttura vera dello spazio fosse differente dalla geometria euclidea, “ *Se quindi, supposto l'impossibile, si venissero a scoprire parallassi negative, o si riuscisse a provare che tutte le parallassi sono superiori a un certo limite, ci sarebbe da scegliere tra due conclusioni: potremmo rinunciare alla geometria euclidea, oppure potremmo modificare le leggi dell'ottica e ammettere che la luce non si propaghi rigorosamente in linea retta. È inutile aggiungere che tutti considererebbero più comoda l'ultima soluzione. La geometria euclidea non ha dunque nulla da temere da nuove esperienze.* “<sup>69</sup>. Siamo liberi di scegliere per lo spazio fisico la geometria che preferiamo, a patto di fare tutte le correzioni necessarie nelle leggi fisiche; queste correzioni vanno fatte non solo alle leggi relative ai corpi fisici, ma anche alle leggi dell'ottica.

Poincaré era convinto che i fisici avrebbero sempre scelto la seconda soluzione, conservare la geometria euclidea perché è molto più semplice delle altre infatti “*...per selezione naturale il nostro spirito si è adattato alle condizioni del mondo esterno: che esso ha adottato la geometria più vantaggiosa alla specie, in altri*

---

<sup>67</sup> H. Poincaré, *La scienza e l'ipotesi*, p. 85

<sup>68</sup> H. Poincaré, *op. cit.*, p. 77

<sup>69</sup> H. Poincaré, *op. cit.*, p. 80

*termini, la geometria più comoda. Ciò è pienamente conforme alle nostre conclusioni: la geometria non è vera, ma comoda.* <sup>70</sup>.

Alcuni anni dopo, nel 1915, la previsione del matematico francese circa la maggior semplicità della geometria euclidea sarebbe stata smentita radicalmente dalla teoria della relatività generale. Con la versione generale di questa teoria si rifiutava infatti la geometria euclidea come descrizione geometrica dello spazio fisico nella sua generalità, pur tuttavia continuando a riconoscerle una sorta di validità approssimata per porzioni limitate di spazio. Questa costituiva la sanzione più chiara della fecondità fisica, oltre che della legittimità logico-matematica dei sistemi geometrici alternativi. La nuova teoria veniva anche a suonare come una secca smentita della “temeraria” (l'aggettivo è mutuato da Duhem) previsione di Poincaré che la geometria euclidea, per motivi di maggior semplicità matematica e comodità empirica, sarebbe stata sempre preferita a qualunque geometria non euclidea.

Einstein e i suoi successori scelsero la più complicata geometria non-euclidea per descrivere lo spazio perché non considerarono la semplicità di aspetti parziali della situazione, bensì piuttosto la semplicità complessiva del sistema totale di fisica che sarebbe nato dalla scelta.

La teoria della relatività generale riesce a mostrare una geniale intuizione di Riemann: “ *Il problema della validità dei postulati della geometria dell'infinitamente piccolo è connesso col problema del fondamento interno delle relazioni metriche dello spazio. In questo problema, che si può a ragione considerare proprio della filosofia dello spazio, trova applicazione l'osservazione*

---

<sup>70</sup> H. Poincaré, *La scienza e l'ipotesi*, p. 92

*precedente, che mentre in una varietà discreta il principio delle relazioni metriche è implicito nella nozione di questa varietà, nel caso di una varietà continua deve venire da qualche altra parte. Quindi, o gli enti reali che sono alla base di uno spazio debbono costituire una varietà discreta, oppure il fondamento delle relazioni metriche deve essere cercato altrove, nelle forze che agiscono su di essi tenendoli assieme. Possiamo arrivare a una soluzione di questi problemi solo partendo dall'organizzazione dei fenomeni della quale Newton pose le basi, che è stata finora confermata dall'esperienza, e modificandola gradualmente sotto la spinta di fatti che essa non può spiegare.*<sup>71</sup>.

Secondo Max Jammer “ *queste parole erano chiaramente un'anticipazione di alcune idee centrali della teoria della gravitazione di Einstein, secondo la quale la struttura metrica, determinata dal tensore di Einstein, è posta in relazione in ogni punto del continuo spazio-tempo col tensore massa-energia dalle equazioni di campo* ”<sup>72</sup>.

L'approccio euclideo comporta una geometria molto più semplice, ma implica leggi fisiche molto più complesse mentre l'approccio non-euclideo comporta una geometria più complicata ma implica leggi fisiche molto semplificate.

Come aveva già riconosciuto Poincaré il punto importante da cogliere è il fatto che il comportamento dei regoli nei campi gravitazionali può essere descritto in due modi differenti. Si può mantenere la geometria euclidea, se si introducono nuove leggi fisiche, o si può conservare la rigidità dei corpi se si adotta la geometria non-euclidea. Seguendo quanto afferma Carnap ne *I Fondamenti filosofici della fisica*, per conservare la geometria euclidea i fisici avrebbero

<sup>71</sup> B.Riemann, cit. da P.Parrini, *Fisica e geometria dall'ottocento a oggi*, p.74

<sup>72</sup> M. Jammer, *Storia del concetto di spazio*, p. 140

dovuto inventare delle strane leggi sulla contrazione e la dilatazione dei corpi solidi e sulla deviazione dei raggi luminosi nei campi gravitazionali.

Adottando invece l'approccio non-euclideo, vi è un'enorme semplificazione delle leggi fisiche: non è più necessario introdurre nuove leggi che giustifichino la contrazione dei corpi rigidi e la deviazione dei raggi luminosi; le leggi che governano le traiettorie dei pianeti vengono semplificate e perfino l'oscura forza gravitazionale scompare dal quadro.

Einstein decise di utilizzare uno degli spazi a curvatura variabile della geometria generalizzata di Riemann, una teoria dove si possono considerare un numero qualunque di dimensioni e dove la curvatura può variare con continuità da punto a punto.

Nella teoria della relatività, le linee di universo dei pianeti e dei raggi luminosi sono geodetiche. Se nella fisica classica si afferma che un corpo non soggetto a forze esterne si muove per inerzia su una traiettoria rettilinea con velocità costante e, quindi, lungo una linea di universo rettilinea, invece nella fisica relativistica si afferma che anche nei campi gravitazionali un corpo in tali condizioni si muove lungo linee di universo che sono geodetiche. Per quanto riguarda il movimento dei pianeti, non è il Sole ad attrarre la Terra, ma piuttosto è la massa del Sole che crea una curvatura negativa nella struttura non-euclidea dello spazio-tempo. In questa struttura curva, la più diretta linea di universo della Terra, la sua geodetica, è l'orbita che compie attorno al Sole. Queste sono le parole di Einstein circa la modifica del concetto di spazio operata dalla relatività generale: “ *Secondo la meccanica classica e secondo la teoria della relatività ristretta, lo spazio ( spazio-tempo ) ha un'esistenza autonoma rispetto alla materia o al campo. Per*

*poter descrivere in generale ciò che riempie lo spazio e che dipende dalle coordinate, lo spazio-tempo o il sistema inerziale con le sue proprietà metriche deve essere pensato come già esistente a priori, poiché altrimenti la descrizione di “ ciò che riempie lo spazio “ non avrebbe significato. Secondo la teoria della relatività generale, invece, lo spazio non ha un'esistenza separata rispetto a “ ciò che riempie lo spazio “ e che dipende dalle coordinate. “<sup>73</sup>.*

Nell'importante conferenza dal titolo *Geometria ed Esperienza*, oltre che dal kantismo, Einstein prende una certa distanza anche dalle tesi convenzionalistiche avanzate da Poincaré a proposito della determinabilità empirica della geometria.

Einstein sa bene “ *che il sistema di concetti della geometria assiomatica non può da solo asserire nulla sul comportamento degli oggetti reali di questo tipo, che noi chiameremo corpi praticamente rigidi. Per essere capace di tali asserzioni la geometria dovrebbe liberarsi dal suo carattere puramente logico-formale mediante la coordinazione di oggetti reali dell'esperienza col vuoto schema concettuale della geometria assiomatica. Per far questo noi dobbiamo solo aggiungere la seguente proposizione: i corpi solidi sono da considerarsi, rispetto alle loro possibili posizioni, come corpi della geometria tridimensionale euclidea. Quindi le proposizioni di Euclide contengono affermazioni sul comportamento di corpi praticamente rigidi. La geometria così completata è evidentemente una scienza naturale; in realtà possiamo considerarla come la più antica branca della fisica. Le sue affermazioni derivano essenzialmente da induzioni compiute sull'esperienza e non soltanto da deduzioni logiche. Chiameremo questa geometria completata “ geometria pratica “ e la distingueremo in seguito dalla “*

---

<sup>73</sup> A. Einstein, *La relatività e il problema dello spazio*, in *Relatività: esposizione divulgativa*, p.310



*geometria puramente assiomatica “.* Il problema se la geometria pratica dell'universo sia o no euclidea ha un chiaro significato, e solo l'esperienza può rispondervi. <sup>74</sup>. Einstein a differenza di Poincaré ritiene quindi che “ *il problema se questo continuo abbia una struttura euclidea, riemanniana, o qualsiasi altra, è propriamente un problema di fisica, cui deve rispondere l'esperienza e non un problema di convenzione da scegliersi sulla base di una mera opportunità.* <sup>75</sup>.

A detta di molti scienziati e filosofi, in seguito alla teoria della relatività generalizzata, la teoria della gravitazione è stata sostituita dalla geometria pura. Questo è il giudizio dato da Robertson nel saggio in onore di Einstein, *La geometria come ramo della fisica*: “ *Il successo della teoria relativistica generale della gravitazione come geometria fisica dello spazio-tempo è attribuibile al fatto che le masse gravitazionali e inerziali di ogni corpo si riscontrano rigorosamente proporzionali per ogni tipo di materia....Dal nostro attuale punto di vista, il grande trionfo della teoria della relatività sta nell'aver assorbito la forza universale della gravitazione nella struttura geometrica;* <sup>76</sup>.

---

<sup>74</sup> A. Einstein, *Geometria ed Esperienza*, in *Idee e opinioni*, p. 222

<sup>75</sup> A. Einstein, *op. cit.*, p. 225

<sup>76</sup> H. P. Robertson, *La geometria come ramo della fisica*, in *Albert Einstein, scienziato e filosofo*, p. 276

# Capitolo secondo

## L'immaginazione scientifica in Einstein

### 2.1 Einstein e Mach

Come esordisce Holton nel suo saggio dal titolo *Mach, Einstein e la ricerca della realtà*, un compito interessante per chi si occupa di storia delle idee, in particolare di quelle attinenti alla fisica, potrebbe essere quello di ricostruire “ *il pellegrinaggio filosofico di Albert Einstein* “ la cui parabola inizia da una filosofia della scienza avente come centro la sensazione e l'esperienza e termina su posizioni di un realismo razionalistico.

Questo percorso ben si accorda con quanto afferma Philipp Frank, citando Max Planck, nel saggio *Einstein, Mach e il positivismo logico*: “ *Secondo Max Planck, nella filosofia della scienza possiamo distinguere, grosso modo, fra due concezioni opposte: la concezione metafisica e quella positivista. Tutte e due considerano Einstein come il loro principale sostenitore e il loro più illustre rappresentante.* “<sup>77</sup>.

---

<sup>77</sup>P. Frank, *Einstein, Mach, e il positivismo logico*, in *Albert Einstein scienziato e filosofo*, p.219

Risulta assodato che Einstein non tenne una posizione unica e costante per tutto l'arco della sua vita. Occorre semmai appurare quali elementi delle dottrine acquisite e sostenute in gioventù siano rimaste presenti nel pensiero adulto. Holton delinea quattro stadi nel rapporto<sup>78</sup> Mach-Einstein: il giovanile consenso di Einstein ai tratti principali della dottrina di Mach; la corrispondenza Einstein-Mach e il loro incontro; la sorpresa nel 1921 del vigoroso e inatteso attacco di Mach alla teoria della relatività; l'ulteriore sviluppo da parte di Einstein di una concezione in cui il fisico rigettava, se non tutte, buona parte, delle sue giovanili convinzioni machiane. La prima lettera che ci è nota di Einstein data 19 Marzo 1901, il suo contenuto, una prosaica richiesta di assunzione, è irrilevante, ma il destinatario è significativo. Si trattava infatti del famoso chimico, ma anche filosofo-scienziato, Wilhelm Ostwald che assieme a Helm, Stallo e Mach era tra i maggiori critici dell'interpretazione meccanicistica dei fenomeni fisici.

La concezione machiana della scienza si proponeva di essere assolutamente antimetafisica, “ *Il presente volume non è un trattato sull'applicabilità dei teoremi della meccanica. Esso si prefigge piuttosto un intento chiarificatore-o, per essere anche più espliciti, antimetafisico* ”<sup>79</sup>, e per ottenere questo fine prospettava la descrizione dei fatti piuttosto che la spiegazione. Secondo Mach la fisica è solamente una raccolta di asserzioni sulle connessioni tra le percezioni sensibili, e le teorie non sono altro che mezzi economici di espressione, usate allo scopo di compendiare tali connessioni. Così Mach si esprime: “ *Il fine delle scienze naturali sta nella scoperta di connessioni tra i fenomeni. Tuttavia le teorie sono*

---

<sup>78</sup>Un rapporto che al di là della divergenza di vedute sia circa teorie fisiche che dottrine epistemologiche, rimarrà sempre all'insegna di grande stima da parte di Einstein nei confronti del vecchio maestro Mach.

<sup>79</sup> E.Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, p. 27, Bollati Boringhieri, Torino 1977

*come le foglie secche, che cadono dopo aver permesso all'organismo della scienza di respirare per un certo tempo.* <sup>80</sup>. I fisici fenomenisti erano sostenitori di quelle entità misurabili attraverso l'osservazione come l'energia, la massa, la pressione, il volume, la temperatura, il calore mentre invece si scagliavano contro le quantità ipotetiche, in *primis* quelle atomiche. Il loro bersaglio polemico ben presto si allargò anche all'etere, dotato di proprietà non accessibili all'osservazione diretta, e ai concetti basilari della fisica newtoniana: la legge d'inerzia, il concetto di forza, i concetti di spazio e di tempo assoluti furono gli obiettivi della serrata critica di Mach che si proponeva di estirpare la metafisica dal cuore della fisica.

Frank sottolinea la componente illuministica della filosofia di Mach, che da parte sua rimase sempre nostalgico verso quel periodo *“ Il diciottesimo secolo soltanto vide la grande diffusione del pensiero illuminista. Le scienze umanistiche, filosofiche, storiche e naturali ebbero allora legami molto stretti e si prestarono mutuo incoraggiamento nella lotta a favore della libertà di pensiero. Colui che ha partecipato a questa lotta e a questa liberazione, sia pure soltanto rivivendole attraverso gli scritti, conserva per tutta la vita un sentimento di nostalgico rimpianto per il diciottesimo secolo.* <sup>81</sup>.

La funzione che Mach svolse a cavallo dei due secoli è analoga a quella degli illuministi: analizzò i concetti fondamentali della fisica dell'Ottocento, come massa e forza, e dichiarò che ogni asserzione contenente quelle parole deve essere interpretata come un asserto su osservazioni sensibili. Di contro l'atomo, l'elettrone e il quanto ritenuti da Mach poco adatti per essere le basi della scienza, vengono definiti concetti ausiliari perché ci offrono il mezzo per esprimere in

<sup>80</sup>E. Mach, cit. da P.Frank, *La scienza moderna e la sua filosofia*, p.78

<sup>81</sup> E. Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, p. 452, Torino 1968

maniera più conveniente e più pratica gli asserti sulle osservazioni, ” *Tutti questi concetti sono solo concetti ausiliari. Ciò che è importante è la connessione tra i fenomeni. Atomi, elettroni, e quanti sono solo anelli che rappresentano un sistema scientifico compatto e rendono possibile derivare logicamente, da pochi principi astratti, il sistema incommensurabile dei fenomeni collegati fra loro. Tuttavia questi principi astratti sono allora solo i mezzi per una rappresentazione economica e non la base epistemologica. La realtà della fisica non può mai essere scossa da nessuna critica ai concetti ausiliari.* “<sup>82</sup>.

Questo spirito iconoclasta risultò immediatamente in sintonia con le vedute di un giovane studente di fisica, piuttosto autodidatta, che amava considerarsi “ *un eretico* “<sup>83</sup>.

Come risulta dalle sue *Note autobiografiche*, il giovane Einstein lesse e apprezzò molto Mach, “ *Fu Mach a scuotere, nella sua Storia della meccanica, questa fede dogmatica: il suo libro, quando ero studente, esercitò una profonda influenza su di me. Oggi riconosco la grandezza di Mach nel suo scetticismo incorruttibile e nella sua indipendenza; ma negli anni della mia giovinezza rimasi influenzato molto profondamente anche dalla sua posizione epistemologica, che oggi mi sembra sostanzialmente insostenibile. Infatti egli non mise nella giusta luce la natura essenzialmente costruttiva e speculativa del pensiero, e più particolarmente del pensiero scientifico; condannò quindi la teoria proprio in quei punti in cui il suo carattere costruttivo-speculativo appare manifesto, come ad esempio nella teoria cinetica dell'atomo.* “<sup>84</sup>

---

<sup>82</sup> E. Mach, cit. da P. Frank, *La scienza moderna e la sua filosofia*, p. 83

<sup>83</sup> Questa testimonianza si deve al collega di Einstein, presso l'Ufficio brevetti di Berna, Joseph Sauter. Cit. da Holton, *L'immaginazione scientifica*, p.144.

<sup>84</sup> A.Einstein, *Note autobiografiche*, in *op. cit.*,p. 12

La “ *fede dogmatica* “ cui Einstein fa riferimento è quella nella concezione meccanicistica della natura. Fu infatti Mach il più grande critico della concezione newtoniana sul finire del XIX secolo. La conoscenza dell'opera di Mach da parte di Einstein si deve a Michelangelo Besso, il più vecchio e intimo amico di Einstein, suo compagno di studi e collega all'ufficio brevetti di Berna. Così Einstein ricorda in una lettera datata 8 aprile 1952 al suo biografo Carl Seelig: “ *Intorno all'anno 1897, ancora studente, la mia attenzione fu richiamata dal mio amico Besso su *Mechanik in ihrer Entwicklung di Ernst Mach*. Il libro ha esercitato su di me una profonda e durevole impressione...per il suo atteggiamento critico di fronte ai concetti e alle leggi fondamentali.*”<sup>85</sup>

Holton individua nella prima memoria cruciale del 1905 di Einstein sulla relatività l'influsso di Mach in due aspetti correlati: l'insistenza di Einstein sul fatto che i fondamentali problemi della fisica, in particolare quelli relativi allo spazio e al tempo, non possono essere compresi senza effettuare contemporaneamente un'analisi epistemologica; e, in secondo luogo, l'identificazione da parte di Einstein, della realtà con ciò che ci è fornito dalle sensazioni.

Holton coglie l'importante analogia tra gli “ elementi “ machiani e gli “ eventi “ einsteiniani. Gli eventi<sup>86</sup> einsteiniani sottendono una concezione strumentalistica della misura e dei concetti di spazio e di tempo vicina alla concezione machiana della sensazione su cui si basa la dottrina degli elementi.

---

<sup>85</sup> Cit. da G.Holton, *Mach, Einstein e la ricerca della realtà*, p.147

<sup>86</sup> Leopold Infeld nel suo volume su Einstein definisce come la proposizione più semplice che io abbia mai incontrato in un lavoro scientifico, il periodo in cui compare per la prima volta il termine evento: “ Tutti i nostri giudizi nei quali è implicato il tempo si riferiscono ad avvenimenti contemporanei. Se dico per esempio, “ Il treno arriva a le sette “, questo significa: la coincidenza della lancetta piccola del mio orologio col numero sette e l'arrivo del treno sono due avvenimenti contemporanei. L.Infeld, *Albert Einstein*, p.36

L'interesse reciproco tra il giovane Einstein e il vecchio Mach è testimoniato negli anni che vanno dal 1909 al 1913 da uno scambio epistolare tra i due; purtroppo non sono rimaste le lettere di Mach. Da queste preziose testimonianze emerge come Einstein si considerasse un “ devoto scolaro “ di Mach e come difendesse quest'ultimo nella disputa che lo vedeva impegnato contro Planck, un altro fisico cui Einstein deve molto<sup>87</sup>. Nei primi anni del Novecento si era aperta una disputa tra la concezione positivista della scienza e quella metafisica. Possiamo definire il positivismo attraverso una citazione tratta dal necrologio di Mach che Einstein pubblicò nel 1916: “ *La scienza altro non è che il confrontare e ordinare le nostre osservazioni secondo metodi e prospettive che impariamo praticamente attraverso il tentativo e l'errore...Come risultato di questa attività ordinatrice appaiono i concetti astratti e le regole che li collegano...I concetti hanno senso soltanto se possiamo indicare gli oggetti a cui si riferiscono e le regole mediante le quali son riferiti a questi oggetti...Egli concepì ogni scienza come il compito di mettere ordine nelle singole osservazioni elementari che egli descrisse come “ sensazioni “.* Probabilmente a questa denominazione si deve il fatto che questo pensatore rigoroso e prudente sia stato qualificato come un filosofo idealista o solipsista da persone che non avevano studiato abbastanza le sue opere. “<sup>88</sup>

Di contro si può citare Planck, il più autorevole oppositore di Mach: “ *Quando i grandi maestri del passato fecero dono alla scienza delle loro idee, Nicola Copernico togliendo la Terra dal centro del mondo, Giovanni Keplero*

---

<sup>87</sup> Occorre ricordare che fu Planck, nel 1905, come direttore degli “ *Annalen der Physik* “, accolse la prima memoria sulla relatività di Einstein e che in seguito tenne a Berlino un seminario critico su di essa. Fin dall'inizio, Planck difese l'opera del giovane fisico in pubblici incontri, e circa nel 1913 era riuscito a persuadere i suoi colleghi tedeschi a invitare Einstein al *Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft* di Berlino.

<sup>88</sup> Cit. da P. Frank, *Einstein, Mach e il positivismo logico*, pp. 219-20

*formulando le leggi che da lui prendono nome, Isacco Newton scoprendo la gravitazione universale...( e la lista potrebbe continuare ancora ), non furono certo i punti di vista economici quelli che soprattutto li fecero nella lotta contro concetti tradizionali e insigni autorità. No, fu la loro fede incrollabile nella realtà della loro immagine del mondo, fosse essa fondata su base artistica o su base religiosa. Questo fatto indiscutibile ci fa sospettare che se il principio dell'economia di Mach dovesse un giorno effettivamente diventare il punto centrale della teoria della conoscenza, il pensiero delle menti direttive di tal fatta ne sarebbe disturbato, il volo della loro fantasia paralizzato e il progresso della scienza ostacolato in modo nefasto.* <sup>89</sup>

Queste due posizioni erano ben note e delineate all'epoca, e un giovane fisico come Einstein, tra l'altro da sempre attento anche alle questioni più propriamente epistemologiche, non poteva non prenderne atto. Se dalla memoria del 1905 emergono chiari influssi machiani, è allo stesso tempo vero che le convinzioni epistemologiche dell'autore non si esauriscono in essi. Dalla memoria si traggono importanti indicazioni circa il tema dell'unificazione che grande importanza rivestirà nel pensiero del fisico maturo; senza tralasciare il criterio estetico posto a fondamento della memoria. Dopo anni di adesione alle idee machiane, le strade iniziano a divergere, le differenze si fanno sempre più profonde e in Einstein inizia a prevalere l'aspetto speculativo-costruttivo dell'impresa scientifica.

Inizia ad affiorare in Einstein la tendenza secondo cui il ruolo principale nella costruzione delle teorie fisiche fondamentali non consiste nel cogliere induttivamente da ogni frammento di esperienza la legge generale ma piuttosto si

---

<sup>89</sup>Cit. da P. Frank, *op. cit.*, pp.78-9



afferma una selezione creativa o sintesi intuitiva della totalità dell'esperienza fisica. Tuttavia il distacco dalla concezione empiristica avviene in maniera graduale infatti nella conferenza tenuta al *King's College* di Londra nel 1921 la concezione di Einstein è ancora saldamente legata all'esperienza: “ *Se si considera l'oggetto proprio della teoria della relatività, è bene attirare l'attenzione sul fatto che tale teoria non è di origine speculativa, ma che la sua scoperta è dovuta completamente e unicamente al desiderio di adattare nella maniera più conveniente possibile la teoria fisica ai fatti osservati. Non si tratta quindi di un atto rivoluzionario, bensì dell'evoluzione naturale di un indirizzo seguito da secoli. L'abbandono di talune nozioni, fino a oggi considerate come fondamentali, sullo spazio, il tempo e il moto, non è stato un atto arbitrario; al contrario, esso è stato imposto unicamente dall'osservazione di certi fatti.* ”<sup>90</sup> e qualche riga oltre “ *Uno dei tratti essenziali della teoria della relatività è rappresentato dal suo tentativo di elaborare più nettamente le relazioni tra i concetti generali e i fatti empirici. Essa ha conservato il principio che la giustificazione di un concetto fisico si fonda esclusivamente sulla sua relazione chiara e univoca con quei fatti.* ”<sup>91</sup> Nel testo di questa conferenza il riferimento alle esperienze sensibili è ancora solido tuttavia da altre fonti, non solo coeve ma persino anteriori,<sup>92</sup> viene espresso il tema dell'unificazione, tanto caro a Planck: “ *Il fine più alto del fisico è quello di pervenire a leggi elementari universali che permettano la ricostruzione*

---

<sup>90</sup> A. Einstein, *Idee e Opinioni*, p. 233

<sup>91</sup> A. Einstein, *op.cit.*, p.233

<sup>92</sup> A differenza di quanto farebbe pensare una interpretazione evolutiva delle idee epistemologiche di Einstein, per semplificare, da Mach a Planck; la coesistenza nei testi di Einstein di aspetti appartenenti ad entrambe le scuole non fa che confermare la sua indipendenza di vedute come la sua ambivalenza epistemologica nel corso degli anni.

*dell'universo per via deduttiva. Nessuna via logica conduce a queste leggi universali: soltanto l'intuizione, fondata sull'esperienza, può condurci ad esse.* “<sup>93</sup>

Risalta anche il ruolo dell'intuizione che deve astrarre dal molteplice caotico dell'esperienza le leggi generali il quanto più possibile semplici ed universali.

Attorno agli anni venti la posizione di Einstein è ambivalente: i fatti e l'empirismo di Mach costituiscono sempre un solido appoggiò ma si fa sempre più forte la tendenza alla via speculativa inaugurata da Planck.

Di certo un avvenimento inaspettato che diede una spinta decisiva al percorso epistemologico di Einstein in direzione di Planck fu la pubblicazione nel 1921 dei *Prinzipien der physikalischen Optik* di Mach a cinque anni dalla sua morte.

La prefazione di quest'opera datata Luglio 1913 contiene un passaggio molto significativo in cui Mach ritratta il suo precedente assenso alla teoria della relatività:

*“ Sono costretto, in quella che può essere la mia ultima occasione, a ritrattare le mie opinioni sulla teoria della relatività. Desumo dalle pubblicazioni che mi sono pervenute, e soprattutto dalla mia corrispondenza, che vengo a poco a poco considerato il precursore della relatività.*

*Fin da ora posso approssimativamente immaginare quali nuove esposizioni e interpretazioni riceveranno molte delle idee espresse nel mio libro sulla *Mechanik* da questo punto di vista. C'era da aspettarsi che filosofi e fisici conducessero una crociata contro di me, poiché, come ho più volte osservato, ero semplicemente un vagabondo senza pregiudizi dotato di idee originali in vari campi del sapere. Devo, tuttavia, negare di essere un precursore dei relativisti*

---

<sup>93</sup>A. Einstein, *Idee e Opinioni*, p.215

*tanto recisamente quanto rifiuto, da parte mia, la dottrina atomistica dell'odierna scuola, o chiesa. Tratterò in seguito la ragione per cui, e l'ambito in cui, io rifiuto l'odierna teoria della relatività, che ritengo stia diventando sempre più dogmatica, insieme con i motivi particolari che mi hanno condotto a tale affermazione- considerazioni basate sulla fisiologia dei sensi, su dubbi epistemologici, e soprattutto su giudizi risultanti dai miei esperimenti.* <sup>94</sup>

Questo inaspettato cambiamento di posizione da parte di Mach non lasciò indifferente Einstein che alcuni mesi più tardi, il 6 Aprile 1922, durante una conferenza a Parigi, discutendo con il filosofo antimachiano Emile Meyerson, ammise che Mach era “ *un bon mécanicien* “ ma un “ *déplorable philosophe* “.

Al di là di questa battuta che ovviamente ebbe una vasta eco, Einstein rimase sempre grato all'opera di Mach sebbene il distacco dal positivismo del fisico moravo si faccia via via più marcato. Durante la medesima conferenza Einstein espresse un giudizio alquanto duro nei confronti del vecchio maestro: “ *Il sistema di Mach esamina le relazioni esistenti tra i dati dell'esperienza; l'insieme di queste relazioni costituisce per Mach la scienza. Questo punto di vista non è accettabile; tutto sommato, ciò che Mach ha fatto è un catalogo, non un sistema.*

<sup>95</sup> Alla concezione della scienza di Mach, Einstein può ormai contrapporre la propria espressa nella conferenza dal titolo *L'influenza di Maxwell nell'evoluzione del concetto di realtà fisica*, pubblicato nel 1931 in un volume commemorativo di Maxwell: “ *L'idea di un mondo esterno indipendente dal soggetto che lo esplora è propria di ogni scienza naturale. La percezione dei sensi non consentendo altro che una conoscenza indiretta di quel mondo esterno,*

<sup>94</sup> Cit. da G. Holton, *L'immaginazione scientifica*, p. 154

<sup>95</sup> Cit. da G. Holton, *L'immaginazione scientifica*,

*o reale fisico, quest'ultimo non può essere compreso da noi che per via speculativa.* “<sup>96</sup>

Anche la conferenza dal titolo *Sul metodo della fisica teorica*, tenuta a Oxford nel giugno 1933, va nella medesima direzione: Einstein arriva ad affermare il “*carattere fittizio dei principi*” dimostrato dal fatto che principi diversi possono accordarsi col medesimo materiale tratto dall'esperienza.

La differenza rispetto alla conferenza di dodici anni prima è notevole: discostandosi dalla primitiva giovanile adesione al fenomenismo machiano Einstein si sta attestando su posizioni alquanto speculative: i concetti “*sono libere invenzioni del nostro intelletto e non possono essere giustificati a priori, né in base alla natura di quell'intelletto né in alcun altro modo.*”<sup>97</sup>.

Holton giustamente tende a sottolineare come questo cambiamento di veduta non sia soltanto frutto di una decisione repentina, magari acuita dalla ferita infertagli dalla prefazione di Mach, ma sia piuttosto il prodotto di un lento maturare i cui segni evidenti già comparivano nella memoria del 1905 dove i postulati della costanza della velocità della luce e l'estensione del principio di relatività costituiscono, a suo dire, due ipotesi tematiche non verificabili da un punto di vista empirico.

Significativa è pure la risposta del fisico tedesco all'obiezione dell'eminente fisico sperimentale Kaufmann che riteneva di aver trovato risultati sperimentali<sup>98</sup> non compatibili con gli assunti fondamentali di Lorentz-Einstein, “*A mio parere le*

---

<sup>96</sup> A. Einstein, *Idee e Opinioni*, p. 251

<sup>97</sup> A. Einstein, *Sul metodo della fisica teorica*, in *Idee e opinioni*, p.255

<sup>98</sup> In realtà poi risultò che l'attrezzatura sperimentale di Kaufmann era inadeguata. Occorsero poi dieci anni, e l'opera di Guey e Lavanchy per effettuare calcoli precisi che confermavano la teoria di Einstein.

( loro ) teorie<sup>99</sup> hanno una probabilità piuttosto bassa, perché i loro assunti fondamentali riguardo alla massa degli elettroni in moto non sono spiegabili nei termini di un sistema teorico che abbracci un più vasto insieme di fenomeni. <sup>100</sup>.

Questa risposta denota la differenza notevole tra Einstein e coloro che ritengono la corrispondenza con il fatto sperimentale il principale fattore di decisione pro o contro una teoria. Nonostante i fatti sperimentali a quel tempo sembrano dare ragione alle teorie dei suoi oppositori, Einstein ritiene che il carattere artificiale delle loro teorie sia maggiormente indicativo della loro erroneità rispetto al disaccordo tra la sua teoria e i dati sperimentali. Già a questo periodo si può far risalire il criterio di perfezione interna che informerà gran parte dei suoi lavori successivi.

Il punto controverso tra Einstein e Mach si incentra attorno alla funzione della scienza: economica e descrittiva o speculativa-costruttiva e intuitiva. Einstein è sempre più convinto che le idee di Mach, necessarie per debellare le “ *mostruosità* “ concettuali, siano però sterili.

Senza l'apporto creativo dell'immaginazione che sola può dar vita a nuove ipotesi, non si fanno progressi in fisica, “ *Io non insulto il cavallino di Mach; tu sai come la penso in proposito. Ma non può dar vita a niente di vivo, può soltanto sterminare parassiti nocivi.* ”<sup>101</sup>.

La parte finale del pellegrinaggio filosofico sta conducendo Einstein in modo sempre più spedito su posizioni già battute da Planck. Un ulteriore spinta in questa

---

<sup>99</sup> Le teorie del moto dell'elettrone elaborate da Abraham e da Bucherer forniscono predizioni notevolmente più prossime ai risultati sperimentali di Kaufmann.

<sup>100</sup> A. Einstein, cit. da G. Holton, *L'immaginazione scientifica*, p.159

<sup>101</sup> Estratto da una lettera di Einstein a Besso, datata 13 maggio 1917, cit. da G.Holton, *Mach, Einstein e la ricerca della realtà*, in *L'immaginazione scientifica*, p. 164

direzione si deve far risalire al compimento della relatività generale condusse sempre di più Einstein verso posizioni razionalistiche a discapito dei dati empirici. Una lettera scritta al vecchio amico Cornelius Lanczos il 24 gennaio 1938 è esplicita: “ *Partendo da un empirismo scettico pressoché simile a quello di Mach, divenni, a causa del problema della gravitazione, un credente razionalista, cioè, uno che cerca l'unica fonte attendibile di verità nella semplicità matematica. Ciò che è logicamente semplice non è detto che sia, naturalmente, fisicamente vero; ma ciò che è fisicamente vero è logicamente semplice, cioè, ha l'unità come fondamento.* ”<sup>102</sup>

Naturalmente, strettamente legata alla svolta razionalistica, è la rivalutazione della matematica vista come l'unico strumento in grado di rendere il mondo intelligibile, “ *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. Io sono convinto che per mezzo di costruzioni puramente matematiche è possibile scoprire quei concetti che ci danno la chiave per comprendere i fenomeni naturali e i principi che li legano tra loro. I concetti matematici possono essere suggeriti dall'esperienza, ma mai dedotti da questa. L'esperienza resta, naturalmente, l'unico criterio per utilizzare una costruzione matematica per la fisica, ma è nella matematica che risiede il principio creatore. Io sono portato a credere nella capacità, in un certo senso, del pensiero puro a dominare la realtà, proprio come pensavano gli antichi.* ”<sup>103</sup>.

Col trascorrere degli anni la rivalutazione della ragione e del suo potere esplicativo si tramutò in una vera e propria fede in un ordine cosmico.

---

<sup>102</sup>G. Holton, *L'immaginazione scientifica*, p. 165

<sup>103</sup> A. Einstein, *Idee e opinioni*, p. 257

A tale riguardo è significativa la corrispondenza con Max Born e il giudizio di quest'ultimo “ *Egli credeva nel potere della ragione di indovinare le leggi secondo cui Dio ha costruito il mondo.* ”<sup>104</sup>. Il distacco da Mach era ormai completo e l'approdo a Planck compiuto<sup>105</sup>.

## **2.2 Il credo epistemologico di Einstein**

### **a) Le libere invenzioni della nostra mente**

Scorrendo le pagine delle note autobiografiche, premessa indispensabile al bel volume di Schilpp, *Einstein scienziato e filosofo*, appartenente alla preziosa serie di *The Library of Living Philosophers*, Einstein ci rende partecipi del suo credo epistemologico.

Il sessantasettenne scienziato, cui non manca di certo il senso dell'umorismo, afferma di apprestarsi a scrivere un necrologio piuttosto che un'autobiografia<sup>106</sup> in cui emerge dai ricordi dell'infanzia il senso di meraviglia provocato in lui da fenomeni apparentemente incomprensibili quali il funzionamento di una bussola.

---

<sup>104</sup> Cit. da G. Holton, *L'immaginazione scientifica*, p. 166

<sup>105</sup> E' innegabile l'affinità con quanto scritto da Planck nella *Filosofia della fisica*: “ *I dati sconnessi dell'esperienza non possono mai produrre una vera scienza senza l'intelligente partecipazione di uno spirito mosso da una fede...Abbiamo il diritto di sentirci tranquilli abbandonandoci alla nostra credenza in una filosofia del mondo basata sulla fede nel suo ordine razionale.* ”

<sup>106</sup> Einstein esordisce così nelle sue note autobiografiche: “ *Eccomi qui seduto, all'età di 67 anni, per scrivere quello che potrebbe essere il mio necrologio.* ”

Aristotele nel libro introduttivo della sua *Metafisica* affermava che: “ *Tutti gli uomini per natura tendono al sapere* “ e qualche riga oltre affermava che “ *gli uomini hanno cominciato a filosofare, ora come in origine, a causa della meraviglia* “<sup>107</sup>. Certamente un uomo curioso come Einstein non si è sottratto al fascino dell'ignoto rappresentato da fatti banali apparentemente inesplicabili.

Da bambino Einstein vide nella religione una possibilità per placare la sua sete di conoscenza e il bisogno di certezza; ben presto però la contraddizione tra alcune pagine della Bibbia ed i libri di scienza popolare, lo spinsero ad abbandonare il “ *paradiso religioso della giovinezza* “ per rivolgersi al libero pensiero.

Ma che cos'è il pensiero, si domanda Einstein, nella sua autobiografia.

Le immagini che affiorano alla memoria sotto lo stimolo di impressioni sensoriali, non sono ancora pensiero, e neppure lo sono le lunghe successioni d'immagini che si richiamano l'un l'altra. Per Einstein si dà pensiero quando si può isolare un elemento comune tra diverse successioni d'immagini. Questo elemento diventa uno strumento ordinatore, un concetto, “ *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 “.* Non è affatto necessario che un concetto sia connesso con un segno riproducibile e riconoscibile coi sensi ( una parola ); ma quando ciò accade, il pensiero diventa comunicabile. “<sup>108</sup>. Secondo Einstein il pensiero altro non è che un libero gioco dei concetti volto al raggiungimento di una visione generale dell'esperienza dei sensi.

---

<sup>107</sup>Aristotele, *Metafisica*, Libro I

<sup>108</sup> A.Einstein, *Note autobiografiche*, in *op.cit.*, p5



La meraviglia scaturisce quando una qualche esperienza scuote lo stabile edificio dei concetti da noi pazientemente costruito. Einstein paragona quindi lo sviluppo del mondo intellettuale a una continua fuga dalla meraviglia.

Un tipo di meraviglia affatto diversa dalla prima, Einstein la sperimentò all'età di dodici anni quando gli capitò tra le mani il “ *sacro libretto di geometria* “. In esso erano contenute asserzioni tutt'altro che evidenti ma della cui certezza dimostrativa era impossibile dubitare. Einstein provò l'ebbrezza di poter acquisire una conoscenza certa degli oggetti dell'esperienza per mezzo del puro pensiero. Sin all'infanzia si può far risalir quindi quella fascinazione per il pensiero matematico che porterà Einstein adulto a compiere anche errori di sopravvalutazione del pensiero puro rispetto ai dati dell'esperienza, “ *da studente non capivo molto bene che la possibilità di conoscere più profondamente i principi fondamentali della fisica è legata ai metodi matematici più complicati* “<sup>109</sup>. A una progressiva rivalutazione del pensiero matematico farà da contraltare una progressiva perdita di interesse verso la componente sperimentale della scienza. Da diverse fonti biografiche possiamo delineare l'alternarsi in Einstein de “ *l'eterna antitesi tra le due inseparabili componenti della nostra conoscenza: l'empirico e razionale.* “<sup>110</sup>

Un interessante passaggio della biografia di Rudolf Kayser, genero di Einstein che lavorò con il suo tacito consenso, fa luce sugli interessi del giovane studente: “ *Si imbatte subito, nel secondo anno di collegio, con il problema della luce, dell'etere e del movimento della Terra. Questo problema non l'abbandonò mai. Voleva costruire un apparato sperimentale per misurare accuratamente il movimento*

<sup>109</sup> A. Einstein, *Note autobiografiche*, p. 10

<sup>110</sup> A. Einstein, *Il metodo della fisica teorica*, in *Idee e opinioni*, p.254

della Terra rispetto all'etere. Einstein non sapeva ancora che questa intenzione era condivisa da altri importanti teorici. In quel tempo non aveva familiarità con i contributi positivi di alcuni anni prima, del grande fisico olandese Hendrik Lorentz, e con il tentativo in seguito famoso di Michelson. Desiderava procedere in modo del tutto empirico, seguendo l'orientamento scientifico del tempo, e credeva che un apparato sperimentale quale egli ricercava lo avrebbe condotto alla soluzione di un problema, le cui conseguenze di vasta portata egli presentiva. Ma non ci fu alcuna occasione per costruire tale apparato. Lo scetticismo dei suoi insegnanti era troppo grande lo spirito di iniziativa troppo piccolo. Albert dovette così mettere da parte il suo progetto, ma senza abbandonarlo per sempre. Credeva ancora di affrontare i principali problemi di fisica con l'osservazione e l'esperimento. Il suo pensiero era più intensamente impegnato con la realtà. Come scienziato naturale era un empirista puro. Non credeva ancora del tutto nel potere di ricerca dei simboli matematici. Dopo diversi anni questo stato di cose mutò completamente.<sup>111</sup> Infatti Einstein arriverà a sostenere che “ la natura sia la realizzazione di ciò che di più matematicamente semplice è immaginabile.”<sup>112</sup>. Col tempo questa salutare rivalutazione della matematica<sup>113</sup> diventerà per Einstein quasi un'ossessione che lo condurrà al suo più grande successo, la relatività generale, ma anche alla sua più cocente delusione, la teoria unificata dei campi.

---

<sup>111</sup> Cit. da Holton, *L'immaginazione scientifica*, pp.218-219

<sup>112</sup> A. Einstein, *Il metodo della fisica teorica*, in *Idee e Opinioni*, p. 257

<sup>113</sup> Dalle sue *Note autobiografiche* emerge inoltre il rammarico per non essersi interessato prima in modo serio alla matematica: “ *Qui ( al Politecnico di Zurigo ) ebbi maestri eccellenti ( Hurwitz, Minkowski, ad esempio ), e avrei potuto farmi una preparazione matematica veramente solida. Invece, lavorai per la maggior parte del tempo nel laboratorio di fisica, affascinato dal contatto diretto con l'esperienza....D'altra parte, il mio interesse a conoscere la natura era indiscutibilmente più forte, e da studente non capivo molto bene che la possibilità di conoscere più profondamente i principi fondamentali della fisica è legata ai metodi matematici più complicati.*”

Abraham Pais è del parere che nell'ultima fase della sua vita Einstein sopravvalutasse abbondantemente le capacità dell'intelletto umano per la costruzione di teorie scientifiche rispetto ai dati sperimentali. Certamente per un fisico teorico sono essenziali il senso dell'eleganza matematica, della bellezza e della semplicità ma è altrettanto pericoloso affidarsi esclusivamente su argomentazioni di carattere formale.

Pais fornisce un illuminante aneddoto per mostrare quanto Einstein fosse convinto della validità della propria teoria della relatività generale a prescindere dall'esperienza. Nell'autunno del 1919, Einstein ebbe un colloquio con una studentessa, Ilse Rosenthal-Schneider che lo registrerà in seguito nel manoscritto dal titolo *Ricordi di conversazione con Einstein*, datato 23 luglio 1957: “ *Una volta ero in compagnia di Einstein per leggere insieme un'opera che conteneva molte obiezioni alla sua teoria...egli interruppe improvvisamente la discussione del libro, allungò la mano per prendere un telegramma posato sul davanzale della finestra, e me lo porse con le parole: “ Ecco, questo forse l'interesserà “. Era il cablogramma di Eddington con i risultati delle misure compiute dalla spedizione di rilevamento dell'eclisse ( 1919 ). Mentre stavo esprimendo la mia gioia per la coincidenza dei risultati con i suoi calcoli, egli disse del tutto calmo: “ Ma sapevo che la teoria è corretta “; e quando chiesi che cosa avrebbe detto se non ci fosse stata conferma della sua predizione, egli replicò: “ Allora mi sarebbe dispiaciuto molto per il buon Dio- la teoria è corretta “. <sup>114</sup>.*

Einstein si sentiva chiamato a svolgere il ruolo di strumento del Signore, e il Signore- Einstein ne era intimamente convinto- “ è sottile ma non malizioso “<sup>115</sup>.

<sup>114</sup> Cit. da Holton, *L'immaginazione scientifica*, p.160

<sup>115</sup>Cit. da A. Pais, “ *Sottile è il Signore...* ”, p.48

Nelle sue *Note autobiografiche* Einstein ci svela il suo credo epistemologico maturo affermando di distinguere tra la totalità delle esperienze sensibili e la totalità dei concetti e delle proposizioni che sono presenti nei libri. I concetti e le proposizioni sono legati tra loro da rapporti di natura squisitamente logica e acquistano significato o contenuto solo attraverso la connessione con le esperienze sensibili. Il sistema dei concetti è una creazione dell'uomo, “ *Il modo scientifico di formare concetti differisce da quello che usiamo nella nostra vita quotidiana non radicalmente ma solo nella maggior precisione con la quale si definiscono i concetti e le conclusioni; maggiore accuratezza e scelta sistematica del materiale sperimentale; e maggiore economia logica.* ”<sup>116</sup>. Il sistema dei concetti si presenta dunque come una pura convenzione, e solo all'interno di esso, dopo aver definito gli elementi e le regole del ragionare, si può parlare di verità.

Se dalla verità logica, meramente immanente al sistema dei concetti, ci volgiamo verso la verità del mondo fisico, occorre guardare al grado di certezza fornito dalla connessione intuitiva tra concetti e dati sensoriali, “ *La scienza è il tentativo di far corrispondere la caotica varietà della nostra esperienza sensibile a un sistema di pensiero logicamente uniforme. In questo sistema le singole esperienze devono esser poste in rapporto con la struttura teorica in modo che la coordinazione che ne risulta sia unica e convincente.* ”<sup>117</sup>.

La struttura dei sistemi concettuali risponde a due criteri: garantire una coordinazione quanto più completa e certa con la totalità dell'esperienza; fornire la maggior economicità possibile per i propri assiomi indipendenti da un punto di vista logico. Quest'ultimo aspetto risente chiaramente dell'influenza machiana

<sup>116</sup> A. Einstein, *Idee e opinioni*, p.302

<sup>117</sup> A. Einstein, *Idee e opinioni*, p.302

subita da Einstein nei primi anni del suo apprendistato scientifico. Era infatti stato il fisico-filosofo moravo a parlare per primo, nel 1883 nella sua *Meccanica nel suo sviluppo storico-critico* di economia nella scienza, affermando che “ *Tutta la scienza ha lo scopo di sostituire, ossia di economizzare esperienze mediante la riproduzione e l'anticipazione di fatti nel pensiero.* ”<sup>118</sup>. Per Mach la funzione economica della scienza coincide con la sua stessa essenza. Noi non riproduciamo mai i fatti dell'esperienza in tutta la loro ricchezza, sarebbe impossibile, ma li decodifichiamo in un linguaggio simbolico facilmente trasmissibile e comunicabile. Lo scopo di questa riproduzione, che non è altro che un'astrazione, è sempre di natura pratica. Attraverso i simboli, che costituiscono i linguaggi, secondo Mach siamo in grado di concentrare in un'unica parola un intero complesso di elementi delle cui variazioni facciamo astrazione. Tuttavia l'Einstein maturo non lesinerà critiche ad alcune posizioni epistemologiche del vecchio maestro che fu sempre profondamente avverso alla natura speculativa e costruttiva del pensiero.

E' noto invece come Einstein sostenga che i principi e i concetti che stanno alla base “ *sono libere invenzioni del nostro intelletto e non possono essere giustificati a priori, né in base alla natura di quell'intelletto né in alcun altro modo.* ”<sup>119</sup>.

In un passaggio significativo Einstein si sofferma sul genere di libertà richiesta per accordare i caotici dati dell'esperienza con i concetti e le proposizioni dell'intelletto: “ *La libertà di scelta tuttavia è di un tipo speciale; non è affatto simile alla libertà di un romanziere. E' piuttosto simile a quella di un uomo impegnato a risolvere un ben congegnato gioco di rebus verbali. E' vero che egli*

<sup>118</sup>E. Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, p.470

<sup>119</sup>A. Einstein, *Idee e opinioni*, p. 255

*può proporre qualsiasi parola come soluzione ma c'è solo una parola che può realmente risolvere il rebus in tutte le sue parti. E' argomento di fede che la natura, come è percettibile ai nostri cinque sensi, assuma il carattere di un rebus così ben formulato. I successi mietuti finora dalla scienza danno, è vero, un certo incoraggiamento a questa fede.* <sup>120</sup>

Nei *Principi della fisica teorica* Einstein afferma che : “ *Il metodo teorico si fonda sull'esigenza di prendere come base delle ipotesi generali, chiamati “ principi “, dai quali sia possibile dedurre delle conseguenze.* “.

Per la seconda parte, vale a dire sviluppare le conseguenze dai principi previamente stabiliti, bastano le conoscenze e gli strumenti tecnici forniti dalle università, ed ogni uomo in linea di massima è in grado di apprenderli attraverso una rigorosa applicazione allo studio. Nella prima parte “ *vale a dire la determinazione dei principi che devono servire di base alla deduzione* “ secondo Einstein si colloca l'originalità del modo di progredire della scienza, infatti “ *Qui non si tratta più di un metodo che possa essere appreso e che sia suscettibile, per via di sistematica applicazione, di condurre al fine stabilito. Il ricercatore deve piuttosto, ascoltando i segreti della natura, scoprire i principi generali, ponendosi come obiettivo di formulare gli elementi generali dei complessi dei fatti empirici.* <sup>121</sup>. Le ipotesi o principi che stanno al vertice del palazzo della scienza non si possono quindi ottenere per via induttiva dall'esperienza, ne tanto meno esiste un metodo per insegnare a crearli, “ *Comprendiamo ora con speciale chiarezza, quanto errino quei teorici persuasi che la teoria sorga induttivamente dall'esperienza. Anche il grande Newton non era esente da questo errore*

<sup>120</sup>A. Einstein, *Idee e opinioni*, p.276

<sup>121</sup>A. Einstein, *Idee e opinioni*, pp. 210-11

( *hypotheses non fingo* ). <sup>122</sup>. Emerge qui in modo chiaro la differenza con Newton e la scienza del passato che credeva ancora che le idee e le leggi fondamentali del suo sistema derivassero per via induttiva dall'esperienza. In un passo significativo citato da Pais, Einstein è molto chiaro a riguardo di quel modo di fare scienza appartenente al passato : “ *Oggi sappiamo che la scienza non può svilupparsi su una base puramente empirica, e che nelle costruzioni scientifiche dobbiamo fare uso di libere invenzioni di cui solo a posteriori nel confronto con l'esperienza, si può valutare l'utilità. Ciò poteva sfuggire alle generazioni passate alle quali la teoria sembrava procedere induttivamente dalla sola esperienza senza il contributo creativo di una libera costruzione di concetti. Quanto più primitivo è lo stadio di sviluppo della scienza, tanto più facilmente lo scienziato può vivere nell'illusione di essere un empirista puro. Nel diciannovesimo secolo, molti credevano ancora che la fondamentale regola newtoniana “ *Hypotheses non fingo* “ dovesse essere a la base di tutta la sana scienza naturale.* ” <sup>123</sup>.

Nei *Fondamenti della ricerca* Einstein fornisce invece a chiare lettere lo scopo dello scienziato moderno: “ *Il fine più alto del fisico è quello di pervenire a leggi elementari universali che permettono la ricostruzione dell'universo per via deduttiva. Nessuna via logica conduce a queste leggi universali: soltanto l'intuizione, fondata sull'esperienza, può condurci a esse. Una tale incertezza metodologica potrebbe far credere alla possibilità di un numero imprecisato di sistemi di fisica teorica, tutti ugualmente giustificati: opinione senza dubbio corretta dal punto di vista teorico. Lo sviluppo della fisica ha però dimostrato che, di tutte le costruzioni possibili, una soltanto, almeno per il momento, si è*

<sup>122</sup>A. Einstein, *Idee e opinioni*, p. 282

<sup>123</sup> Cit. da A. Pais, “ *Sottile è il Signore...* ”, p.26

*dimostrata decisamente superiore a tutte le altre. Nessuno di coloro che hanno studiato realmente il problema, potrà negare che il mondo empirico determina praticamente il sistema teorico, nonostante il fatto che non esista alcun ponte logico tra i fenomeni e i loro principi teorici; ciò che Leibnitz così felicemente chiamava l' " armonia prestabilita " .<sup>124</sup> .*

In questo passo Einstein nega la possibilità di un' " armonia prestabilita " tra oggetti e teoria, tuttavia sembra postularla quando parla del criterio di " perfezione interna " di una teoria fisica. Nelle sue *Note autobiografiche* Einstein fornisce due principi in base ai quali è possibile criticare le teorie fisiche. Il primo, piuttosto ovvio principio, afferma che la teoria non deve contraddire i fatti empirici, definiamolo " conferma esterna ". Questo principio si rivolge in particolare contro quelle ipotesi aggiuntive *ad hoc* che spesso vengono introdotte per garantire l'aderenza dei fatti alla base teorica previamente elaborata.

Il secondo principio suggerito da Einstein è invece del tutto interno alla teoria o meglio alle sue premesse che devono risultare quanto più in uno stato di " naturalezza " o " semplicità logica ". Lo stesso Einstein si scusa della vaghezza della sua indicazione e ammette di non saper meglio definire questo fondamentale criterio che possiamo definire di " perfezione interna ": " *Il secondo principio non ha per oggetto il rapporto tra teoria e materiale di osservazione, bensì le premesse della teoria stessa, o ciò che brevemente, se pur vagamente, potrebbe definirsi " naturalezza " o " semplicità logica " delle premesse ( ossia dei concetti fondamentali ) e delle corrispondenti relazioni reciproche poste a base di essi. Questa esigenza, che riuscirebbe molto difficile formulare con esattezza, ha*

---

<sup>124</sup>A. Einstein, *Idee e opinioni*, p.215



*avuto da tempo immemorabile una parte molto importante nella scelta e nella valutazione delle teorie. Non si tratta qui semplicemente di enumerare le premesse logicamente indipendenti ( ammesso che sia possibile fare qualcosa del genere in modo assolutamente inequivoco ), ma di soppesare, in una sorta di raffronto valutativo, qualità incommensurabili.* <sup>125</sup>.

Le ipotesi *ad hoc* costituiscono un importante caso in cui i due criteri di scelta per la validità di una teoria, quello esterno e quello interno sembrano interagire in modo proficuo.

Le ipotesi *ad hoc* come rivela il termine sono ipotesi artificiali introdotte appositamente in una teoria per spiegare dei dati sperimentali discordanti.

Il caso emblematico inerente la relatività speciale è la contrazione di Lorentz introdotta per spiegare l'assenza del rilevamento del vento d'etere la cui conferma sperimentale ( conferma di un'assenza ) avrebbe scardinato l'intera teoria elettromagnetica basata sull'etere. Lo stesso Lorentz provava disagio di fronte a quell'ipotesi che urtava con il senso estetico della sua teoria, tuttavia il suo forte attaccamento al tema dell'etere prevalse. Einstein invece, esente dall'attaccamento incondizionato verso l'etere ma mosso piuttosto da un forte senso estetico della scienza esprimibile nella naturalezza e nella semplicità teorica fu subito orientato alla negazione di quell'ipotesi ausiliaria. Per il giovane fisico tedesco il criterio della perfezione interna di una teoria era l'unico modo per decidere se un'ipotesi sia o non sia *ad hoc*. A detta di Einstein la miglior guida per decidere se un'ipotesi è o non è artificiale, non è la logica ma l'intuizione.

---

<sup>125</sup> A. Einstein, *Note autobiografiche*, in *op. cit.*, p.13

In altri luoghi Einstein ha parlato di un vero e proprio criterio estetico e di eleganza matematica della formulazione. Come già ricordato in precedenza, uno dei motivi che spinse il giovane fisico a formulare la teoria della relatività ristretta, fu un disagio di carattere estetico di fronte alla dissimmetria presente nel sistema delle equazioni di Maxwell, “ *Che l'elettrodinamica di Maxwell- così come suole essere interpretata presentemente- applicata ai corpi in moto, porti ad asimmetrie che non sembrano inerenti ai fenomeni, è cosa nota* ”<sup>126</sup>.

Questa insoddisfazione è di tipo estetico, e, per inciso, non era stata rilevata da altri fisici come un difetto tanto grave da dover richiedere una correzione.

Einstein non comincia la sua fondamentale memoria indicando un qualche conflitto tra teoria e fatti noti ma delinea la sua insoddisfazione verso la distinzione tra i tipi di calcolo per fenomeni simmetrici. Infatti viene indotta corrente in un conduttore sia quando, da una parte, il conduttore è in quiete nel campo di un magnete in moto ( si dice in tal caso che la corrente dipende da un campo elettrico nelle vicinanze del magnete ) e, d'altra parte, sia quando il conduttore si muove nel campo di un magnete in quiete ( in tal caso, non esiste alcun campo elettrico nelle vicinanze del magnete, ma, secondo Hertz, compare nel conduttore una forza elettromotrice che è responsabile della corrente elettrica ). Risulta che la grandezza e la direzione delle correnti rilevate nei due casi sono le stesse, dato lo stesso moto relativo.

Il giovane autore ne deduceva che la teoria fosse insufficiente a causa dell'asimmetria dei procedimenti di calcolo, e che perciò una riformulazione dell'elettrodinamica si rendesse necessaria per mutarne la comprensibilità

---

<sup>126</sup>A. Einstein, *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*.

mediante la rimozione dell'asimmetria. Esigendo che le equazioni di Maxwell siano covarianti, Einstein mostra che un campo di forza puramente elettrico ( o puramente magnetico ) in un sistema diviene un campo elettromagnetico in un altro sistema che si muove rispetto al primo.

Qualche anno più tardi la scoperta dell'applicabilità della geometria riemanniana allo spazio reale costituì per Einstein un fortissimo incentivo all'assunzione della matematica come guida per costruire teorie. Così si esprime in *Il metodo della fisica teorica* “ *Io sono convinto che per mezzo di costruzioni puramente matematiche è possibile scoprire quei concetti che ci danno la chiave per comprendere i fenomeni naturali e i principi che li legano tra loro. I concetti matematici possono essere suggeriti dall'esperienza, ma mai dedotti da questa. L'esperienza resta, naturalmente, l'unico criterio per utilizzare una costruzione matematica per la fisica, ma è nella matematica che risiede il principio creatore. Io sono portato a credere nella capacità, in un certo senso, del pensiero puro a dominare la realtà, proprio come pensavano gli antichi.* “<sup>127</sup>.

Abraham Pais sostiene l'ipotesi che le radici dell'atteggiamento di Einstein maturo nei confronti della scoperta dei concetti tramite la riflessione puramente matematica, si possano rintracciare, sia pure invisibili, già negli scritti del 1905, infatti la parte cinematica della memoria del giugno ha la struttura assiomatica tipica di una teoria completa.

Molti documenti dell'archivio Einstein testimoniano come lo scienziato fosse pervaso dalla necessità d'ordine e d'unità nella legge naturale; un sentimento talmente forte da far passare in secondo piano il dato sperimentale.

---

<sup>127</sup>A. Einstein, *Idee e Opinioni*, Schwartz, Milano, p.257

Infatti Einstein nel 1925 non si curò minimamente dei dati forniti oltreoceano dal fisico americano Miller che riteneva di aver misurato finalmente il presunto vento d'etere. Einstein non rispose al telegramma di Miller ma lo stesso giorno scrisse al suo più vecchio amico, Michele Besso: “ *Penso che gli esperimenti di Miller si fondino su un errore di temperatura. Non li ho presi sul serio nemmeno un minuto.* ”<sup>128</sup>. Come risultò in seguito, Einstein aveva ragione.

## **b) Einstein e l'esperimento cruciale di Michelson**

Generalmente le più importanti conquiste scientifiche sono di due tipi del tutto differenti: innovative generalizzazioni teoriche che stupiscono in virtù della loro estesa capacità di sintesi ed ingegnosi esperimenti il cui esito costituisce una svolta. Bacone, nel suo *Novum Organum*, definì “ *le istanze di croce, per metafora tratta dalle croci, che si mettono ai bivii delle strade, ad indicare la biforcazione* ” come quelle istanze in grado di far propendere l'intelletto, in bilico sull'attribuzione o meno di una proprietà a due diverse nature. Bacone aggiunge che “ *Tali istanze portano quindi una grandissima luce e hanno quasi una forte*

---

<sup>128</sup> Cit. da G.Holton, *L'immaginazione scientifica*, p.236

*autorità; così che il processo dell'interpretazione qualche volta, giunto ad esse, in esse si arresta.* <sup>129</sup>.

Nonostante la posizione centrale del problema del movimento della Terra rispetto all'etere nella fisica degli ultimi anni del XIX secolo, nessuno prima di Michelson fu capace di escogitare e realizzare un apparato per misurare l'effetto di secondo ordine ( relative al quadrato ) del presunto movimento dell'etere.

L'interferometro inventato dal ventottenne Michelson in risposta a un problema posto da Maxwell, era capace di rivelare un effetto dell'ordine di una unità su dieci miliardi.

L'ipotesi che la Terra si muovesse attraverso un etere inalterato e stagnante che la circondava era un invito alla verifica sperimentale diretta. Bisognava cercare il presunto effetto di secondo ordine estremamente piccolo, poiché il moto relativo Terra-etere , ( “ vento d'etere “ ), si sarebbe manifestato in un cambiamento dell'effettiva velocità della luce di un fattore che conteneva il quadrato del rapporto delle velocità della Terra e della luce. L'ingegnosa soluzione di Michelson fu di lasciare che due raggi di luce provenienti dalla stessa sorgente percorressero simultaneamente un tracciato chiuso, lungo due traiettorie che avevano effettivamente la stessa lunghezza del laboratorio ma erano inclinate di novanta gradi, in modo che i due raggi di luce fossero diversamente orientati nel loro moto relativo rispetto all'etere. Facendo partire simultaneamente i due raggi di luce per confrontare tramite la rispettiva figura di interferenza questi effetti relativi, l'interferometro sorprendentemente diede quel che di solito si dice un risultato negativo o nullo. L'esperimento diede nei limiti dell'errore sperimentale

---

<sup>129</sup>F. Bacone, *Novum Organum*, II, 36.

lo stesso risultato che si sarebbe atteso in base a un'ipotesi del tutto diversa di un etere non stagnante ma in qualche modo trascinato dalla Terra, in modo da non avere alcun moto o spostamenti misurabili rispetto ad essa. L'interferometro aveva fornito un risultato deludente, persino incomprensibile, nel contesto teorico allora prevalente.

Michelson stesso definì il suo esperimento un “ fiasco “, essendo i ripetuti risultati nulli o quasi nulli contrari ad ogni aspettativa, vale a dire una conferma del misterioso etere.

A differenza dello stereotipo dello scienziato che accetta la prova sperimentale come falsificazione della teoria, Michelson si rifiutò di riconoscere l'importanza del suo risultato rimanendone profondamente deluso se non infelice.

In breve, con grande sconcerto di tutti, *in primis* lo stesso Michelson, l'esperimento era risultato, per esprimersi in termini duhemiani, una “ prova “ anziché una semplice “ applicazione “. Per i teorici dell'etere, il lavoro di Michelson minacciava di diventare un esperimento cruciale, il cui risultato opposto alle aspettative rischiava di demolire la fisica basata sull'etere e di minare le convinzioni della comunità scientifica. Per l'autore l'esperimento fu una fonte di dispiacere per tutta la vita, non solo a causa dell'esito nullo ma anche a causa delle diverse interpretazioni cui fu soggetto.

Queste diverse interpretazioni furono soltanto due: la contrazione di Lorentz-Fitzgerald e la relatività ristretta di Einstein. La spiegazione dell'esito nullo del vento d'etere, fornita in contemporanea da Lorentz e FitzGerald, due fisici che si muovevano ancora nell'alveo della tradizionale fisica dell'etere, fu di supporre una contrazione del materiale di supporto dell'interferometro sufficiente a compensare

la differenza teorica del percorso. In breve, questi due fisici non esitarono a ricorrere ad un'ipotesi ausiliaria alquanto paradossale pur di mantenere plausibile la presenza dell'etere supporto necessario e fondamentale per spiegare i fenomeni elettromagnetici. L'etere costituiva la chiave di volta della fisica di fine Ottocento e la comunità dei fisici non vi avrebbe rinunciato tanto a cuor leggero.

Oliver Lodge ebbe a dire: “ *La sola cosa che ostacola la semplice dottrina di un etere indisturbato dal moto è l'esperimento di Michelson, vale a dire l'assenza di un effetto di secondo ordine dovuto al movimento terrestre attraverso un etere libero. E' possibile che questo esperimento debba essere giustificato.*”<sup>130</sup>.

Tuttavia la soluzione escogitata da Lorentz non convinceva. Il giudizio di un fisico sperimentale come Michelson fu che l'ipotesi risultava alquanto artificiosa o per usare una terminologia altrui, troppo *ad hoc*.

Nella sua ultima pubblicazione, *Studies in Optics* ( 1927 ), Michelson espresse invece approvazione verso la relatività einsteiniana, tuttavia non fu un'accettazione piena e convinta perché lo scienziato americano rimase sino alla fine dei suoi giorni un amante deluso dell'etere, “ *Parlando nei termini del vecchio, amato etere ( che è ora abbandonato, anche se io personalmente aderisco ancora un poco ad esso )...*”<sup>131</sup>.

Alla luce di questo episodio viene subito in mente quanto dirà Kuhn nel suo *La struttura delle rivoluzioni scientifiche* alcuni decenni dopo discutendo il passaggio da un paradigma ad uno opposto: “ *Ma allora come vengono indotti gli scienziati*

---

<sup>130</sup> Cit. da G.Holton, *L'immaginazione scientifica*, p.187, Einaudi, Torino

<sup>131</sup>Cit. da G. Holton, *L'immaginazione scientifica*, p. 188

*a realizzare questo passaggio ? In parte, la risposta è che molto spesso essi non si lasciano affatto convincere a farlo.* <sup>132</sup>.

Poco oltre Kuhn cita una illuminante riflessione di Planck dalla sua *Autobiografia scientifica*, “ *una nuova verità scientifica non trionfa convincendo i suoi oppositori e facendo loro vedere la luce, ma piuttosto perché i suoi oppositori alla fine muoiono, e cresce una nuova generazione che è abituata ad essa.* ” <sup>133</sup>.

La presunta connessione genetica tra la teoria della relatività e gli esperimenti legati all'interferometro costituiscono uno degli argomenti più dibattuti da storici e filosofi della scienza. La relatività speciale di Einstein appartiene di diritto alle teorie innovative e come spesso accade la sua rilevanza non fu subito recepita dalla maggior parte dei fisici.

Gli esperimenti di Michelson per trovare l'effetto del movimento dell'etere sulla velocità della luce sono degli ottimi esempi di esperimenti cruciali, i cui esiti sconcertanti però spiazzarono la comunità scientifica,

Venne quindi spontaneo cercare di porre in un rapporto genetico, più o meno marcato, tra la teoria della relatività speciale e gli esperimenti di Michelson. Teoria e dati empirici sembravano chiaramente sostenersi a vicenda.

Con lo sguardo dello storico è facile capire il perché dell'accostamento inevitabile degli esperimenti di Michelson alla nuova teoria di Einstein nella prima decade dalla sua pubblicazione: i risultati certi degli esperimenti suffragavano per via empirica una teoria contraria al senso comune e, a sua volta, la teoria della relatività forniva una spiegazione migliore circa gli esperimenti di Michelson rispetto all'artificiosa contrazione di Lorentz-FitzGerald. Si aprì una contesa tra i

<sup>132</sup>T.Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, p.182, Einaudi, Torino

<sup>133</sup>Cit. da T.Kuhn, *op. cit.*, p.183



sostenitori dell'origine empirica della relatività e coloro che negavano un influsso genetico di origine empirica. Il fisico americano R.A. Millikan, sembra non aver dubbi circa l'origine empirica della teoria della relatività speciale, così scrive in un articolo per il settantesimo compleanno di Einstein: “ *La teoria speciale della relatività può essere considerata all'inizio come una generalizzazione dell'esperimento di Michelson. E proprio in questo si manifestò la caratteristica audacia dell'approccio di Einstein, poiché l'aspetto peculiare del pensiero scientifico moderno consiste nel fatto che inizia eliminando tutte le concezioni a priori sulla natura della realtà- o sulla natura ultima dell'universo- così come in sostanza era caratteristico di tutta la filosofia greca come dell'intero pensiero medievale, e assume invece, come punto di partenza, i fatti sperimentali ben convalidati e accuratamente provati non importa se tali fatti appaiano al momento ragionevoli. In una parola, la scienza moderna è essenzialmente empirica...*”<sup>134</sup>

Secondo Holton, al contrario l'opinione che Einstein fondasse il lavoro che lo condusse alla pubblicazione della teoria della relatività nel 1905 sui risultati di Michelson ha fatto parte troppo a lungo del folklore. Nella storia della scienza questa opinione ( la connessione genetica in termini di causa ed effetto ) è stata considerata generalmente come un evento importante largamente nota e creduta come la storia della caduta della mela nel giardino di Newton e dei due pesi lasciati cadere da Galileo dalla torre pendente di Pisa, altri due celebri casi in cui si è supposto che fatti empirici abbiano costituito la nascita di teorie sintetiche.

---

<sup>134</sup> Cit. da G.Holton, *L'immaginazione scientifica*, pp.181-2

Il punto di vista sostenuto da Millikan aveva un forte alleato nella filosofia sperimentalistica della scienza, contrassegnata dall'indiscutibile priorità assegnata agli esperimenti e ai dati sperimentali nell'analisi delle modalità dell'operare degli scienziati. L'alfiere di questa posizione filosofica è Joseph Petzoldt, lo spirito animatore del *Gesellschaft für positivistische Philosophie* di Berlino e del suo giornale, *Zeitschrift für positivistische Philosophie*.

Così scrive Petzoldt sul numero inaugurale del suo giornale: “ *L'esperimento di Michelson è la causa e il sostegno principale di questa ricostruzione, cioè la teoria della relatività elettrodinamica. Per rendere giustizia a questo esperimento, non si ha scrupolo di sottoporre i fondamenti della fisica teorica come sono esistiti fino ad ora, cioè la meccanica newtoniana, a una profonda trasformazione.* ”<sup>135</sup>.

In termini affini si espresse pure alcuni decenni più tardi, in un saggio presente nel volume curato da P.A. Schilpp, *Albert Einstein: scienziato e filosofo*, un epistemologo di area francese come Gaston Bachelard: “ *Come sappiamo, come è stato ripetuto migliaia di volte, la relatività è nata da uno shock epistemologico; è nata dal “ fallimento “ dell'esperimento di Michelson...Per parafrasare Kant potremmo dire che l'esperimento di Michelson svegliò la meccanica classica dal suo sonno dogmatico.* ”<sup>136</sup>

Significativo è il fatto che nelle repliche di Einstein poste a conclusione del volume non si faccia menzione del filosofo francese.

---

<sup>135</sup> Cit. da G.Holton, *op. cit.*, p.195

<sup>136</sup> G. Bachelard, *La dialettica filosofica dei concetti della relatività*, in *A. Einstein, Scienziato e filosofo*, p. 512

Bisogna ammettere che Einstein non si è mai preoccupato molto di fornire una risposta decisiva e conclusiva circa l'influenza e l'importanza degli esperimenti del fisico americano sulla genesi della teoria della relatività speciale; questo genere di preoccupazione non rientrava nelle sue corde. Einstein fu sempre una persona molto tollerante verso le critiche altrui e non fece mai nulla per difendere o incrementare l'originalità della sua opera.

Tuttavia se manca una risposta chiara e definitiva nell'ambito della scienza “ pubblica “, per dirla alla Holton, non mancano frequenti e coerenti risposte riconducibili all'ambito della scienza “ privata “<sup>137</sup>. Einstein non ha mai affermato un legame genetico tra la relatività speciale e gli esperimenti di Michelson.

Una serie di interviste rilasciate a Shankland nel corso degli anni cinquanta non sono che l'ennesima conferma di ciò: “ *La prima visita [ 4 febbraio 1950 ] a Princeton per incontrare il professor Einstein fu compiuta soprattutto per apprendere da lui ciò che pensava dell'esperimento di Michelson-Morley, e fino a che punto ne era stato influenzato nello sviluppo della teoria speciale della relatività...Inizii chiedendomi di rammentargli lo scopo della mia visita e sorrise con vero interesse quando gli dissi che desideravo discutere l'esperimento di Michelson-Morley compiuto a Cleveland nel 1887...Quando gli chiesi in che modo era venuto a conoscenza dell'esperimento di Michelson-Morley, egli mi rispose che ne fu informato dagli scritti di H. A. Lorentz, ma che solo dopo il 1905 vi prestò attenzione ! “ *Altrimenti-disse- lo avrei citato nella mia memoria “.**

---

<sup>137</sup>Alla scienza pubblica appartengono tutti gli articoli e le memorie redatte per essere comunicate alla comunità scientifica mentre alla scienza privata si possono ricollegare le corrispondenze private degli scienziati. Questa distinzione ricorda quella reichenbachiana tra contesto della scoperta e contesto della giustificazione. Per ricostruire il contesto della scoperta conviene attingere ai documenti privati che meglio descrivono come realmente funziona il cervello di un fisico.

“<sup>138</sup>. Tuttavia per capire che Einstein non fu influenzato dall'esperimento cruciale di Michelson non occorre una confessione pubblica del giovane fisico ma basta leggere la memoria dell'*annus mirabilis* 1905 sull'elettrodinamica dei corpi in movimento, dove subito risalta il motivo che ha mosso Einstein a questo lavoro: “ *Che l'elettrodinamica di Maxwell- così come suole essere interpretata presentemente- applicata ai corpi in moto, porti ad asimmetrie che non sembrano inerenti ai fenomeni, è cosa nota* “<sup>139</sup>. Questa insoddisfazione è di tipo estetico, e, se da molti fisici non era stata ritenuta un difetto sufficientemente rilevante da dover richiedere una correzione della teoria, per il giovane fisico la teoria risulta inadeguata a causa dell'asimmetria.

A sostegno dell'audace motivazione di Einstein si possono citare le parole del fisico Wilhelm Wien, che non fu convinto subito dalla teoria della relatività, ma la accettò in seguito ( 1909 ) non tanto per qualche netta e definitiva prova sperimentale, quanto per motivi estetici: “ *Ciò che parla a suo favore, tuttavia, è soprattutto la coerenza intrinseca che rende possibile gettare fondamenti che sono contraddittori, tali da applicarsi alla totalità dei fenomeni fisici, anche se con ciò le concezioni usuali subiscono una trasformazione.* “<sup>140</sup>

Nella memoria del 1905 non si fa menzione diretta del famoso esperimento di Michelson.

Dall'analisi delle fonti scritte che precedono la svolta einsteiniana si troverà poco o nulla circa l'esperimento di Michelson. Gli scritti di Lorentz che Einstein ebbe presente prima di formulare la relatività ristretta, risalgono infatti al 1892 e al

---

<sup>138</sup> Cit. da G. Holton, *L'immaginazione scientifica*, p. 202

<sup>139</sup> Cit. da G. Holton, *op cit.*, p. 209

<sup>140</sup> Cit. da G. Holton, *op. cit.*, p.189

1895 come risulta da un passo fondamentale che Einstein scrisse al suo ultimo biografo Carl Seeling: “ *Quanto a me, conoscevo soltanto l'importante opera di Lorentz del 1895- La théorie électromagnétique de Maxwell [ pubblicata in realtà nel 1892 ] e Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern [ 1895 ]- ma non l'ultima pubblicazione di Lorentz, né le successive ricerche di Poincaré. In questo senso la mia opera del 1905 fu indipendente.* ”<sup>141</sup>

Dallo scritto di Lorentz del 1895 emerge molto poco circa l'esperimento di Michelson che viene annoverato tra gli esperimenti i cui risultati non ricevono spiegazione senza ulteriore difficoltà. In altri termini Lorentz aveva cercato di ricondurre quel particolare esperimento alla struttura generale della sua teoria tramite una *Hulfshypothese* ( ipotesi provvisoria ) della cui natura ad hoc lo scienziato olandese era pienamente consapevole ed insoddisfatto, arrivando ad affermare che non c'era alcun fondamento per tale ipotesi.

Questa fonte indiretta rafforza notevolmente l'indipendenza della relatività da qualsivoglia legame di natura causale con l'esperimento. Per Einstein la teoria della relatività ristretta “ *è stata sviluppata a partire dall'elettrodinamica combinando e generalizzando in modo sbalorditivamente semplice delle ipotesi, prima indipendenti l'una dall'altra, sulle quali era costruita l'elettrodinamica.* ”<sup>142</sup>

Questa affermazione è coerente con quanto Einstein dirà nella sua autobiografia quarant'anni dopo: “ *A poco a poco disperai della possibilità di scoprire le vere leggi per mezzo di sforzi costruttivi basati su fatti conosciuti. Quanto più a lungo e accanitamente mi sforzavo tanto più mi convincevo che solo la scoperta di un*

<sup>141</sup> Cit. da G.Holton, *op. cit.*, p.220

<sup>142</sup> A. Einstein, *Relatività: esposizione divulgativa*, p.76

*principio formale universale poteva portarci a risultati sicuri. Avevo davanti agli occhi l'esempio della termodinamica. In essa il principio universale era contenuto nel teorema: le leggi della natura sono fatte in modo tale che è impossibile costruire un perpetuum mobile ( di primo e di secondo tipo ). Ma come trovare un tale principio universale ? Un tale principio risultò dopo dieci anni di riflessione, dal paradosso in cui mi ero imbattuto già all'età di sedici anni: se inseguissi un raggio di luce con la velocità  $c$  ( velocità della luce nel vuoto ), osserverei un tale raggio di luce come un campo elettromagnetico spazialmente oscillante in quiete. Tuttavia una cosa simile pare non verificarsi né in base all'esperienza né secondo le equazioni di Maxwell. Fin da principio mi sembrò intuitivamente chiaro che, giudicato da un tale punto di osservazione, tutto doveva accadere secondo le stesse leggi valide per un osservatore che fosse in quiete relativamente alla Terra. Come farebbe altrimenti il primo osservatore a sapere, o a poter constatare, che si trova in uno stato di rapido e uniforme movimento ? E' chiaro che in questo paradosso è già contenuto il germe della teoria speciale della relatività.* <sup>143</sup>

Holton sottolinea come l'originario paradosso concepito ad Arau nella giovinezza da Einstein e l'esperimento ( il fenomeno dell'induzione osservato da Faraday già nel 1831 ) all'inizio della memoria del 1905 sono, da un punto di vista fisico, esattamente dello stesso tipo: nel primo caso, il problema riguarda i campi elettrici e magnetici che un osservatore in movimento trova associati a un raggio di luce; nel secondo caso, riguarda i campi elettrici e magnetici rilevati da un conduttore in movimento; e la soluzione in entrambi i casi segue delle medesime equazioni di trasformazione.

---

<sup>143</sup> A. Einstein, *Note Autobiografiche*, p. 28

Analizzando le altre due fondamentali memorie del 1905, sebbene riguardino campi così differenti della fisica come la teoria dei quanti di luce e il moto browniano, Holton suggerisce che esse condividano lo stesso stile di costruzione: “ *Ciascuna inizia con l'affermazione di asimmetrie formali o altre incongruenze di natura prevalentemente estetica..., quindi Einstein propone un principio- di preferenza un principio avente una generalità quale, ad esempio, la seconda legge della termodinamica, per citare una ripetuta analogia di Einstein- che rimuove le asimmetrie, rimozione che costituisce una delle conseguenze dedotte da quel principio, e che alla fine produce una o più previsioni sperimentalmente verificabili.* “<sup>144</sup>

Le tre memorie sono concordi nel concedere pochissimo spazio ed importanza alla parte sperimentale che può coinvolgere la nascita di una teoria.

La conferma sperimentale della teoria di Einstein sull'effetto fotoelettrico sarà trovata non senza qualche stupore da Millikan: [ la spiegazione dell'effetto data da Einstein nel 1905 ] “ *ignorava all'epoca e sembrava veramente contraddire tutti i molteplici fatti di interferenza, costituendo così un aperto ritorno alla teoria corpuscolare della luce che era stata completamente abbandonata sin dal tempo di Young e di Fresnel intorno al 1800. Trascorsi dieci anni della mia vita a mettere alla prova l'equazione del 1905 di Einstein e, contrariamente a ogni mia aspettativa, fui costretto nel 1915 ad asserirne l'indubbia verifica sperimentale nonostante la sua irragionevolezza, poiché sembrava violare ogni nostra conoscenza sull'interferenza della luce.* “<sup>145</sup>.

---

<sup>144</sup> Holton, *L'immaginazione scientifica*, p. 217

<sup>145</sup> Cit. da G.Holton, *L'immaginazione scientifica*, p.217

Uno dei documenti più interessanti per ricostruire la vicenda Einstein-Michelson è il testo del discorso pronunciato agli inizi del 1931 dal fisico tedesco a Pasadena in California in occasione del suo primo e unico incontro col “ misuratore “ della luce. Nonostante l'occasione<sup>146</sup> richiedesse una naturale conferma da parte di Einstein della connessione genetica tra l'esperimento e la sua teoria, il suo discorso non fu di certo una resa incondizionata all'empirismo, come la maggior parte dei presenti avrebbe voluto che fosse: “ *Mio onorato dottor Michelson, avete iniziato questo lavoro quando io ero solo un ragazzino, alto appena tre piedi. Siete stato voi a condurre i fisici lungo nuove vie, e mediante il vostro meraviglioso lavoro sperimentale apriste la strada allo sviluppo della teoria della relatività. Scopriste un insidioso difetto nella teoria della luce fondata sull'etere, come allora sussisteva, e stimolaste le idee di H. A. Lorentz e FitzGerald, dalle quali si sviluppò la teoria speciale della relatività. Senza il vostro lavoro, questa teoria sarebbe oggi poco più di un'interessante speculazione; fu la vostra verifica che pose per la prima volta la teoria su un fondamento reale.* “<sup>147</sup>

L'interpretazione che offre Jaffe, biografo di Michelson, di questo discorso, è che nel 1931 Einstein attribuì pubblicamente la sua teoria all'esperimento di Michelson. Questo è un tipico cattivo esempio di tesi preconcepita. Einstein parla esplicitamente di “ verifica “, ai suoi occhi l'esperimento cruciale non ha altra funzione che rafforzare la teoria previamente elaborata.

La connessione tra esperimento e teoria sembra quasi per Einstein un utile strumento per convincere la comunità scientifica della validità della sua relatività,

---

<sup>146</sup> L'incontro veniva effettuato presso l'università di Michelson il quale per altro versava in pessime condizioni di salute e di lì a pochi mesi sarebbe deceduto.

<sup>147</sup>Cit. da G.Holton, *L'immaginazione scientifica*, pp. 238-239



come se una derivazione sperimentale rendesse più accettabile una teoria che sovverte le secolari concezioni di spazio e tempo. Sicuramente Einstein non aveva bisogno di dati sperimentali per sapere che la sua teoria fosse vera, forse, piuttosto, erano gli altri scienziati ad avere bisogno del confortante contatto con l'esperienza.

Attraverso un'analisi comparativa dei testi della conferenza tenuta da Einstein a Pasadena nel 1931, Holton è riuscito a dimostrare che la traduzione in inglese del discorso di Einstein, l'originale è in tedesco, presenta delle omissioni e delle inesattezze nella traduzione, volte ad agevolare una tesi preconstituita: quella del legame genetico sostenuta da Millikan, da Jaffe e dalla stragrande maggioranza dei manuali scientifici che hanno contribuito a fondare il mito della correlazione causale tra l'esperimento di Michelson e la teoria della relatività ristretta.

Una serie di documenti successivi all'incontro americano con Michelson, dalle osservazioni rilasciate al *Physikalische Gesellschaft* di Berlino in memoria di Michelson nel frattempo deceduto, a una lettera inviata a Jaffe, a una serie di interviste rilasciate per diverse riviste di fisica, testimoniano tutti, con qualche oscillazione, di una minima se non nulla influenza dell'esperimento sulla genesi della teoria.

Una ulteriore testimonianza si ricava da una lettera scritta da Einstein un anno prima di morire a F. C. Davenport, uno storico, che gli chiedeva ragguagli circa quella vecchia e spinosa questione dell'esperimento cruciale: “ *L'esito dell'esperimento di Michelson non ebbe una grande influenza sull'evoluzione delle mie idee. Tanto che non riesco neppure a ricordare se ne avessi già sentito parlare, allorché scrissi la mia prima memoria sull'argomento ( nel 1905 ).* La

*spiegazione di ciò sta nel fatto che ero, per ragioni di carattere generale, fermamente convinto che non esista il moto assoluto, e il mio unico problema era come ciò potesse conciliarsi con quello che sapevamo dell'elettrodinamica. Si può quindi comprendere per quale ragione, nella mia battaglia personale, l'esperimento di Michelson non abbia avuto alcun ruolo, o, per lo meno, alcun ruolo decisivo.* <sup>148</sup>

La posizione di Einstein, seppur non espressa a lettere di fuoco in alcun documento pubblico, è estremamente chiara e coerente. Coerente sotto un triplice rispetto: cronologico, testuale ed epistemologico. In tutte le sue opere che vanno dal 1905 fino praticamente alla morte, Einstein non ha mai sostenuto punti di vista diversi, neppure sotto la pressione di contesti ed ambienti che premevano verso una tesi predefinita, il riferimento è alla conferenza a Pasadena. Coerenza testuale perché dalle memorie scientifiche non compare il riferimento a Michelson e comunque quando compare la sua importanza è ritenuta irrilevante.

Coerenza epistemologica perché come indicato dal suo “ pellegrinaggio “ filosofico le posizioni di Einstein andarono sempre più verso una accentuazione dei poteri esplicativi della ragione a discapito dei dati empirici.

---

<sup>148</sup>A.Pais, *Sottile è il Signore...* p. 188

### **c) Il modello di teoria di Einstein**

Einstein inizia *Il metodo della fisica teorica* con un monito: “ *Se volete imparare qualcosa sul metodo impiegato dai fisici teorici, vi consiglio di osservare strettamente questo criterio: non ascoltate i loro discorsi, ma prestate invece attenzione alle loro azioni.* ”<sup>149</sup>.

Una prima impressione lascerebbe intuire un totale disinteresse, per non dire disprezzo, da parte del fisico verso ogni sorta di discussione epistemologica delegata al campo della discussione filosofica.

Tuttavia Einstein a differenza di molti altri scienziati ha sempre prestato grande attenzione alle implicazioni epistemologiche inerenti i concetti fisici, “ *Il rapporto reciproco tra epistemologia e scienza è molto importante. Esse dipendono l'una dall'altra. L'epistemologia senza contatto con la scienza diventa uno schema vuoto. La scienza senza epistemologia- se pure si può concepirlo- è primitiva e informe.* ”<sup>150</sup>. In questo pensiero dal sapore kantiano emerge chiaramente l'interesse di Einstein verso le questioni epistemologiche, che tuttavia non devono diventare delle condizioni troppo restrittive per la costruzione del mondo concettuale, rifiutando tutto ciò che non si adatta al loro sistema. Da questa considerazione deriva l'atteggiamento di Einstein che può apparire all'epistemologo sistematico “ *una specie di opportunisto senza scrupoli: che gli appaia come un realista, poiché cerca di descrivere il mondo indipendentemente dagli atti della percezione; come un idealista, poiché considera i concetti e le*

---

<sup>149</sup> A. Einstein, *Il metodo della fisica teorica* in *Idee e Opinioni*, p. 254

<sup>150</sup> A. Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori*, in *Albert Einstein, scienziato e filosofo*, p. 629

*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.* <sup>151</sup>

In un articolo scritto su richiesta del *London Times* e pubblicato nel novembre del 1919, Einstein fornisce una chiara indicazione sulle teorie scientifiche: “ *Si possono distinguere in fisica teorie di natura diversa. La maggior parte di esse sono teorie costruttive. Attraverso un sistema di formule relativamente semplice situato alla base, esse cercano di costruire un'immagine di fenomeni relativamente complessi....Quando si dice che si è pervenuti a comprendere un insieme di processi naturali, ciò significa sempre che si è trovata una teoria costruttiva che abbraccia i fenomeni in questione. Accanto a questa importante classe di teorie, ne esiste una seconda che chiameremo “ teorie dei principi “. Queste, anziché il metodo sintetico usano quello analitico. Il punto di partenza e la base non sono costituiti da elementi di costruzione ipotetica, ma da proprietà generali di processi naturali determinate empiricamente, dalle quali derivano in seguito criteri formulati matematicamente, ai quali i processi particolari o le loro immagini teoriche devono adeguarsi...I vantaggi della teoria costruttiva sono la*

---

<sup>151</sup> A. Einstein, *Replica alle osservazioni dei vari autori*, in *Albert Einstein, scienziato e filosofo*, p. 625

*completezza, l'addattabilità e la chiarezza, quelli della teoria dei principi sono la perfezione logica e la certezza degli stessi principi fondamentali.* <sup>152</sup>.

In questa divisione tra teorie costruttive e teorie di principio si può riscontrare la suddivisione dell'attività scientifica, rivolta da un lato verso l'analisi e la crescita, dall'altro verso la sintesi.

Il primo genere di attività viene così descritto da Pierre Duhem: “ *La fisica progredisce perché l'esperimento porta alla luce di continuo nuove discordanze tra i fatti e le leggi, e perché i fisici ritoccano e modificano costantemente le leggi in modo che rappresentino sempre più fedelmente i fatti.* ” <sup>153</sup>.

Il secondo genere di attività scientifica mira invece all'inclusività della spiegazione di un maggior numero di fenomeni sotto una teoria e alla semplificazione delle teorie tramite la riduzione delle ipotesi.

La predilezione di Einstein è diretta verso le teorie dei principi tra le quali annovera le sue due teorie della relatività. Lo scienziato ha proprio in mente una teoria dei principi quando espone in modo conciso in una lettera del 1952 al suo amico di lunga data Maurice Solovine, il suo modello di una teoria fisica. Gerard Holton analizza attentamente questa lettera nel suo saggio *La costruzione di una teoria: il modello di Einstein*.

Il punto di partenza di Einstein sono le esperienze, da esse tutto parte e ad esse tutto ritorna così come si era precedentemente espresso ne *Il metodo della fisica teorica* “ *Il puro pensiero logico di per sé non è atto a fornirci una conoscenza del mondo empirico: ogni conoscenza della realtà ha origine dall'esperienza e nell'esperienza si conclude.* ”. Einstein dà per scontato che le esperienze sensibili

<sup>152</sup> A. Einstein, *Che cos'è la teoria della relatività ?*, in *Idee e opinioni*, pp. 216-17

<sup>153</sup> Cit.da G. Holton, *La lezione di Einstein*, p. 151

o osservazioni non sono mai pure e semplici ma dipendono da una qualche teoria che le interpreta, così in *Induzione e deduzione in fisica*: “ *Se il ricercatore si accostasse al suo lavoro senza alcuna opinione preconcepita, come potrebbe essere capace di selezionare quei fatti entro l'infinità della più complessa esperienza e proprio quelli, poi, che sono abbastanza semplici da permettere che si rendano evidenti delle relazioni su cui basare la legge?* “<sup>154</sup>.

A questo riguardo è interessante una affermazione che Einstein fa nei *Remarks* ai saggi filosofici contenuti nel bel volume di Schilpp *Einstein scienziato e filosofo*: “ *Io non sono cresciuto nella tradizione kantiana, ma sono arrivato a capire l'aspetto veramente valido che si può trovare nella dottrina di Kant accanto agli errori che oggi, cioè molto tardi, sono considerati molto ovvi. Questo aspetto è contenuto nella proposizione: “ Il reale non ci è dato, ma ci è proposto ( come un indovinello ).* “<sup>155</sup>

Ritornando alle indicazioni espresse nella lettera a Solovine, il passo successivo alla presa d'atto dei dati esperenziali, è sicuramente quello più interessante ed indicativo del particolare modo di fare scienza di Einstein: dalle esperienze si procede direttamente al sistema di assiomi. Così indica la nota esplicativa che Einstein, nella lettera, affianca al diagramma esplicativo: “ *2) A sono gli assiomi dai quali traiamo le conseguenze. Psicologicamente le A si basano sulle E. Non c'è comunque una via logica dalle E ad A, ma solo una connessione intuitiva ( psicologica ), che è sempre “ soggetta a revoca “* “<sup>156</sup>.

---

<sup>154</sup> Cit. da G.Holton, *L'immaginazione scientifica*, p. 322

<sup>155</sup> A. Einstein, *Replica ai vari autori*, in *op. cit.*, p. 625

<sup>156</sup> G.Holton, *L'immaginazione scientifica*, p. 300

Nel passaggio dalle esperienze al sistema degli assiomi si collocano le discontinuità logiche inerenti la formazione dei concetti, vale a dire la loro arbitrarietà rispetto all'esperienza e la loro genesi dal libero gioco dell'intelletto. Holton ritiene che l'insistenza di Einstein verso la libertà della concettualizzazione sia da mettere in relazione con la sua crescente opposizione alla forma di positivismo allora imperante che identificava il fine principale della scienza nell'enunciazione di descrizioni economiche di relazioni tra osservabili.

Il fisico tedesco, di contro, era sempre più convinto che i principi generali non potessero che scaturire da una forma di intuizione, “ *nessuna via logica conduce a queste leggi elementari, ma soltanto l'intuizione che si fonda unicamente nell'immedesimarsi [ Einfühlung ] con l'esperienza* ”<sup>157</sup>.

I passaggi successivi del modello sono la deduzione per via logica di asserzioni particolari e il loro confronto con l'esperienza. Il confronto tuttavia presenta delle difficoltà: primo, previsioni esatte possono essere tratte da assiomi errati; secondo, è impossibile ritenere provata una volta per tutte una teoria, infatti richiederebbe un numero infinito di prove; terzo non bisogna riporre una fiducia incondizionata nelle conferme sperimentali, anch'esse sono passibili di errori di misurazione e di interpretazione. Bisognerebbe essere ragionevolmente scettici nei confronti degli esperimenti che smentiscono nella stessa misura in cui lo si è di quelli che confermano. Il criterio per controllare la validità di una teoria al vaglio dei dati empirici costituisce un principio di smentita o di falsificazione. Qualche discrepanza tra previsione teorica e misurazione empirica metterebbe in

---

<sup>157</sup>Cit. da G.Holton, *L'immaginazione scientifica*, p. 206. La traduzione di questo celebre passo tratto da I fondamenti della ricerca, un discorso per il sesantesimo compleanno di Planck, differisce dalla traduzione di Franco Fortini in *Idee e Opinioni*.

crisi la teoria mentre un'assenza prolungata di conferme lascerebbe immutata la fiducia nella teoria. La prima difficoltà, vale a dire il caso frequente in fisica in cui coesistono due teorie assiomaticamente diverse che forniscono previsioni egualmente precise a partire dal medesimo materiale empirico<sup>158</sup>, viene risolta da Einstein attraverso il richiamo al criterio di perfezione interna.

La scelta tra due teorie viene effettuata in base alla perfezione formale e all'eleganza matematica del sistema assiomatico piuttosto che rispetto alle discrepanze su dati sperimentali. Einstein ha sempre cercato una spiegazione quanto più comprensiva dei molteplici fenomeni reali a partire da un numero quanto più possibile ridotto di pochi assiomi elementari. Completezza e unificazione sono le sue idee orientative: “ *La vera essenza della nostra lotta per la conoscenza è costituita, da un lato, dal tentativo di abbracciare l'estesa e complessa varietà dell'esperienza umana, e, d'altro canto, dalla ricerca della semplicità e dell'economia nei loro fondamenti essenziali. Il convincimento che questi due obiettivi possano coesistere è, a causa dello stato primitivo delle nostre conoscenze scientifiche, un atto di fede. Privo di una tale fede io non saprei nutrire alcuna forte e tenace convinzione sul valore autonomo della conoscenza.* “. <sup>159</sup>

Un ideale molto ambizioso da realizzare, che tuttavia non ha ancora perso il suo fascino dato che la fisica contemporanea anela ad una grande sintesi di relatività e meccanica quantistica. Il frequente richiamo negli scritti einsteiniani all'unità, alla completezza, alla onnipervasività trova riscontro anche in fisici come Mach,

---

<sup>158</sup> Ci sono casi nella storia della scienza, il più famoso dei quali è la controversia tra sistema tolemaico e sistema copernicano, in cui teorie scientifiche affatto differenti relativamente alla parte assiomatica producevano previsioni simili circa i fenomeni osservabili.

<sup>159</sup> *Idee e opinioni*, p. 332



Planck e nell'intera generazione di scienziati-filosofi della prima parte del Novecento che avevano come scopo ultimo il *Weltbild* unificato.

Questi scienziati sembrano sospinti nella loro incessante ricerca da un afflato religioso o da uno spirito faustiano, che li rende fermamente convinti dell'ordine e dell'unità dell'universo: se per Newton “ *Bisogna ammettere solo quelle cause che sono necessarie per spiegare i fenomeni, giacché la natura non fa niente invano e farebbe cosa inutile se si servisse di un numero maggiore di cause per fare ciò che si può fare con un numero minore di cause* ”<sup>160</sup> per Einstein “ *Dio non gioca a dadi* ”.

Si può immaginare lo sviluppo di una teoria come la progressiva perdita di contatto dei concetti con l'esperienza. Einstein ha in mente una stratificazione del sistema scientifico: da un livello primitivo in cui i concetti sono ancora legati alle esperienze sensibili, si passa ad un livello successivo più redditizio per la sua alta unità logica in cui i concetti non sono più direttamente connessi con l'esperienza. Il sistema procede così in maniera piramidale, sovrapponendo uno sull'altro diversi gradi di astrazione e sperando di raggiungere “ *un sistema della massima unità concepibile e della massima povertà di concetti di fondamenti logici, compatibile tuttavia con le osservazioni ricavate dai sensi.* ”<sup>161</sup>. Ad esempio una teoria alquanto legata alle impressioni sensoriali come quella sul calore prima di Maxwell viene sostituita da un insieme di concetti e di assiomi maggiormente indipendenti dall'esperienza quali quelli della meccanica statistica e della teoria cinetica. Naturalmente un maggior grado di concettualizzazione e di astrazione viene pagato con la difficoltà di reperire esperimenti capaci di sondare la validità

---

<sup>160</sup> I. Newton, *Principi matematici di filosofia naturale* ( 1687 )

<sup>161</sup> *Idee e opinioni*, p. 275

degli assunti. Occorsero anni per trovare una relazione adeguata tra teoria della relatività generale ed esperienza, “ *La teoria della relatività è un superbo esempio del carattere fondamentale dello sviluppo moderno della scienza teorica. Le ipotesi di partenza divengono sempre più astratte e sempre più remote dall'esperienza. Ma per questa via sempre più ci si avvicina al grande fine di tutte le scienze che è di abbracciare per deduzione logica con il minimo di ipotesi e di assiomi il massimo di contenuti empirici.* “<sup>162</sup>

Lo stadio successivo del progresso storico della scienza si raggiunge quando viene prodotta una unificazione di due o più sistemi di teorie, come quando Newton unificò la fisica terrestre e celeste o quando Maxwell fece una sintesi di elettricità, magnetismo e ottica.

Prima dell'unificazione o sintesi, ciascun sistema teorico ha il suo proprio sistema di concetti e assiomi che risultano più vicini all'esperienza di quanto risulteranno poi successivamente all'unificazione. La maggior unità si conta con un allontanamento dall'esperienza. Così Einstein si esprime: “ *D'altra parte fin dagli inizi è stato sempre presente il tentativo di trovare una base teorica di unificazione per tutte quelle scienze distinte, consistente in un minimo di concetti e di relazioni fondamentali dai quali tutti i concetti e le relazioni delle singole discipline possano venir derivate logicamente. Questo è ciò che intendiamo quando si parla della ricerca di un fondamento per tutta la fisica. La fiduciosa credenza che questo fine ultimo può venir raggiunto è la principale scaturigine della devozione appassionata che ha sempre animato il ricercatore.* “<sup>163</sup>

---

<sup>162</sup> *Idee e opinioni* p.264

<sup>163</sup> A. Einstein, *Idee e Opinioni*, p. 303

Secondo Einstein: “ *Nessuna teoria fisica potrebbe avere in sorte un destino più benigno, che quello di indicare la strada per la costruzione di una teoria più ampia, in cui essa continua a vivere come caso limite.* ”<sup>164</sup>. Quando Einstein scriveva questa frase aveva in mente un paio di casi storici: il primo non molto lontano nel tempo era la situazione dell'elettrostatica, niente affatto demolita dalle equazioni di campo ideate da Maxwell per l'elettrodinamica, ma contenuta in quest'ultima come caso limite quando i campi risultano invariabili rispetto al tempo; l'altro caso era ancora di più stretta contemporaneità, riguardava infatti i rapporti tra le due teorie della relatività. L'esperimento sulla deflessione dei raggi di luce in prossimità del Sole comporta che la legge della costanza della velocità della luce nel vuoto, uno dei due postulati della relatività ristretta, non possa pretendere alcuna validità illimitata. Una curvatura dei raggi di luce può infatti scaturire soltanto quando la velocità di propagazione della luce varia con la posizione. Viene immediato pensare che a causa di questo dato sperimentale la teoria della relatività ristretta sia destinata a crollare rovinosamente e con essa venga compromessa anche la relatività generale. In realtà non avviene ciò, la teoria della relatività ristretta deve ridimensionare la sua pretesa di possedere un dominio illimitato di validità e diventare un caso limite all'interno della teoria della relatività generale. In zone dello spazio-tempo dove i campi gravitazionali risultano pressoché assenti, la relatività ristretta mantiene tutta la sua validità.

Einstein sa descrivere con gusto letterario l'avvicinarsi delle teorie scientifiche: “ *Ricorrendo ad un confronto potremmo dire che creare una nuova teoria non è come demolire una vecchia tettoia per sostituirla con un grattacielo. E' piuttosto*

---

<sup>164</sup> A. Einstein, *Relatività: esposizione divulgativa*, p.102

*come inerpicarsi su per una montagna, raggiungendo nuovi e più vasti orizzonti e scoprendo inattesi rapporti fra il nostro punto di partenza e le bellezze dei suoi dintorni. Tuttavia, il sito dal quale partimmo è sempre lì e possiamo tuttora scorgerlo, ancorché paia più piccolo e non sia ormai più che un dettaglio, nella vasta veduta, raggiunta superando gli ostacoli che si opponevano alla nostra avventurosa ascesa.*<sup>165</sup>

---

<sup>165</sup> A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*, p.162

## 2.3 L'immaginazione scientifica

### a) Tre strumenti nascosti

Di solito si ritiene che arte e scienza, data la diversità dei loro prodotti, dei loro scopi e dei loro metodi, non abbiano nulla in comune e appartengano a due aree distinte e pressapoco non comunicanti. Questa visione non solo è superficiale ma persino sbagliata. Infatti scienza, arte, musica sono soltanto i frutti diversi del medesimo albero, metafora dell'immaginazione umana.

Si possono tranquillamente rintracciare nelle più ardite teorie fisiche, rivestite da un robusto apparato di formule matematiche, i segni della creatività dello scienziato; lo stesso Einstein ammetteva, in una risposta al matematico francese Jacques S. Hadamard che condusse un'inchiesta psicologica tra i matematici al fine di determinare il funzionamento dei loro processi mentali, di pensare più attraverso immagini che parole “ *Le parole o il linguaggio, come vengono impiegati per scrivere o per parlare, non mi sembra che svolgano alcun ruolo nel meccanismo del mio pensiero. Le entità psichiche che paiono servire come elementi del pensiero sono taluni segni e immagini più o meno chiare che possono essere “ volontariamente “ riprodotti e associati.* “<sup>166</sup>.

Gerald Holton ha posto accanto agli elementi empirici ( fatti osservativi, esperimenti, misurazioni ) e ai contenuti analitici ( la logica e la matematica ) che caratterizzano l'impresa scientifica, una terza fondamentale componente che in generale si può definire immaginazione. Da storico della scienza Holton afferma

---

<sup>166</sup> A. Einstein, *La mente di un matematico*, in *Idee e opinioni*, p. 34

che se desideriamo osservare all'opera l'immaginazione degli scienziati, dobbiamo coglierli di sorpresa durante il loro lavoro,<sup>167</sup> perché difficilmente essi fanno emergere dai risultati pubblicati e dai libri di testo le loro convinzioni personali. Solo guardando negli appunti personali, nei quaderni di laboratorio e nelle raccolte epistolari, in una parola nella sfera privata della scienza, è possibile invenire quelle intuizioni tutt'altro che rigorose e logicamente fondate che la scienza pubblica e ufficiale tende a rimuovere. Holton individua tre strumenti tra loro affini nell'opera dei ricercatori: l'immaginazione visiva, l'immaginazione metaforica e l'immaginazione tematica. Holton illustra attraverso diversi casi disseminati nella storia della scienza come l'interpretazione dei dati osservativi vari a seconda dello sfondo culturale o della teoria abbracciata del ricercatore.

Nel 1609, due uomini, osservarono la luna con uno strumento di nuova invenzione, il cannocchiale. Il primo era il matematico, cartografo e astronomo Thomas Harriot, di Londra, il secondo era Galileo allora professore di matematica all'università di Padova. Come si evince dai loro disegni, entrambi gli studiosi colsero la linea frastagliata, definita “terminatore”, che divide l'area scura e l'area illuminata della luna.

L'aspetto interessante di queste osservazioni è che la linea divisoria risultava una curva frastagliata invece che una curva uniforme come avrebbe dovuto apparire se la luna in effetti fosse stata una sfera perfettamente liscia e incorruttibile<sup>168</sup> come si pensava sin dai tempi di Aristotele. Harriot non sapeva e non fece commenti a

---

<sup>167</sup> Questo suggerimento di Holton pare riecheggiare l'indicazione di Einstein posta all'inizio de *Il metodo della fisica teorica*: “Se volete imparare qualcosa sul metodo impiegato dai fisici teorici, vi consiglio di osservare strettamente questo criterio: non ascoltate i loro discorsi, ma prestate invece attenzione alle loro azioni.”

<sup>168</sup> La luna era il simbolo dell'universo incorruttibile al di là della Terra. Inoltre, sin dal Medioevo, nei dipinti la luna era un simbolo dell'Immacolata Concezione della Vergine Maria.

riguardo sul perché la linea risultasse frastagliata. Egli vide, ma le teorie del tempo sulla perfezione della luna gli ostacolarono la comprensione di ciò che aveva visto. Galileo invece vide e interpretò le linee frastagliate lungo il terminatore come irregolarità della superficie, dovute a montagne e crateri, e impiegò nei suoi disegni, la tecnica del chiaroscuro per rappresentare il buio e la luce, in modo da evidenziare protuberanze e depressioni. Per quali ragioni Galileo ed Harriot ebbero inizialmente un così diverso punto di vista, pur avendo osservato lo stesso oggetto ? Parte della risposta risiede nella maggior disposizione di Galileo ad accettare l'universo copernicano in cui tutti i pianeti e i satelliti possono essere simili. Un'altra porzione di spiegazione è che, osservando le variazioni nell'apparenza della luna causate dalla diversa illuminazione del sole in tempi diversi, Galileo rinforzò l'analogia tra la Terra e la luna. Tuttavia, secondo Holton, la chiave per comprendere la discrepanza tra le diverse interpretazioni sta nella diversa attitudine a visualizzare gli oggetti, nell'avere allenato i propri occhi a essere strumenti dell'immaginazione. L'ambiente culturale in cui si sono formati i due studiosi diventa determinante. Nell'Inghilterra di Harriot del 1609, il massimo risultato artistico rimandava alla parola, al teatro di Shakespeare; dal punto di vista delle arti figurative l'Inghilterra era di gran lunga più arretrata rispetto alle interpretazioni della prospettiva. Viceversa, nell'Italia di Galileo la pittura del Rinascimento aveva destato l'interesse di tutti gli intellettuali; non è un caso che la prima richiesta di lavoro fatta dal matematico pisano fosse un posto come professore di matematica presso l'accademia del disegno per insegnare geometria e prospettiva.

Altri due strumenti concettuali adoperati con grande perizia dagli scienziati nella genesi delle loro teorie sono la metafora e l'analogia. Un fatto alquanto insolito se si pensa che la metafora e l'analogia sono gli strumenti propri della poesia che opera attraverso l'illusione. A una prima analisi dovrebbe quindi risultare ovvio che gli scienziati le evitino accuratamente, invece i ricercatori impiegano analogie di continuo sebbene lo facciano di nascosto.

Il fisico dell'Ottocento Thomas Young è un caso esemplare di come si possa essere biasimati se si fa un aperto e pubblico riferimento all'uso di un'analogia nel processo di creazione di una teoria. La sua fama si deve soprattutto all'aver immaginato che la luce fosse ondulatoria, in antitesi alla teoria quasi-corpuscolare preferita al suo tempo. In una delle sue prime pubblicazioni Young scrisse: “ *La luce è la propagazione di un impulso trasmesso all'etere dai corpi luminosi.* ”<sup>169</sup>. Young aggiunge di avere avuto la conferma dell'idea che la luce sia una propagazione di un impulso nell'etere “ *dall'analogia tra i colori di un foglio sottile e i suoni di una serie di canne d'organo.* ”<sup>170</sup>.

George Peacock, suo carissimo amico e scienziato al Trinity College di Cambridge, pubblicò nel 1855 una raccolta degli scritti di Young, ventisei anni dopo la sua morte, dove si sentì in dovere di aggiungere una nota a piè di pagina in riferimento all'analogia tra colori e suoni: “ *Questa analogia è fantasiosa e al tempo stesso infondata.* ”<sup>171</sup>. Nel frattempo la teoria ondulatoria della luce si era consolidata ma il modo di procedere poco ortodosso da parte di Young nell'edificare una teoria non era passato inosservato ai suoi contemporanei.

---

<sup>169</sup> Cit. da G.Holton, *La lezione di Einstein*, p. 102

<sup>170</sup> Cit. da G.Holton, *op. cit.*, p. 102

<sup>171</sup> Cit. da G.Holton, *op. cit.*, p. 103



Il terzo strumento segreto degli scienziati è l'immaginazione tematica, vale a dire la pratica di consentire a un presupposto di fondo, un tema, di agire per un certo tempo da guida nella ricerca per quanto non avallato da valide dimostrazioni, e, talvolta, a dispetto di prove contrarie. Secondo Holton affidarsi ad un tema equivale “ *a una volontaria sospensione del dubbio, esattamente il contrario dell'attitudine scientifica allo scetticismo.* ”<sup>172</sup>.

L'espressione “ *sospensione volontaria del dubbio* ” rieccheggia la celebre discussione sulla poesia svolta da Samuel Taylor Coleridge nella sua *Biographia Literaria* dove riteneva di dover infondere nelle sue poesie “ *un'apparenza di verità tale da procurare a queste ombre dell'immaginazione la momentanea volontaria sospensione del dubbio, che è alla radice della fede poetica.* ”<sup>173</sup>.

Secondo Karl Popper il criterio di demarcazione di tutte le attività autenticamente scientifiche è la sospensione del giudizio, non del dubbio. Tuttavia se si spiano gli scienziati durante il loro lavoro è facile imbattersi in idee, convinzioni e temi tutt'altro che razionali. Un caso emblematico è quello relativo ad uno dei più grandi errori di Galileo, il mancato riconoscimento delle orbite ellittiche scoperte da Keplero, tra le altre cose suo grande estimatore. Una spiegazione convincente di questo errore, piuttosto grossolano, si deve allo storico dell'arte Erwin Panofsky. La sua attenta analisi iniziò dalla constatazione che Galileo, come molti intellettuali italiani dell'epoca, era un ammiratore e uno studioso delle arti. Per il nostro scienziato un criterio importante di pensiero scientifico rigoroso risiedeva nell'uso esclusivo di elementi concettuali che superassero l'esame dei canoni estetici.

---

<sup>172</sup> G. Holton, *La lezione di Einstein*, p. 104

<sup>173</sup> S.T.Coleridge, Cit. da G.Holton, *La lezione di Einstein*, p. 104

E fu proprio sul terreno estetico che Galileo trovò inaccettabili, per non dire repellenti, le idee di Keplero. Galileo crebbe in un ambiente umanistico più che scientifico, imbevuto degli ideali classici che animano il Rinascimento: nitore della forma, equilibrio, semplicità, razionalità. Dalla corrispondenza di Galileo con il pittore Cigoli, si evince la sua riluttanza verso lo stile manierista, caratterizzato da una forte tendenza anticlassicista che secondo Panofsky si esprimerebbe nel gusto dell'irrazionale, del fantastico, del complesso e del dissonante. L'elemento figurativo principe del manierismo era proprio quell'ellissi che Galileo, con grande miopia, rifiutò come orbita dei pianeti. Secondo Holton le idee estetiche influenzarono profondamente le idee scientifiche di Galileo o forse sarebbe più giusto dire che in Galileo idee scientifiche ed idee estetiche seguirono le medesime tendenze, i medesimi temi. Il primato del cerchio costituì per Galileo un irresistibile presupposto tematico, senza il quale la sua immaginazione scientifica non avrebbe potuto operare. L'ellissi era un cerchio distorto, una forma indegna dei corpi celesti ed accettarla significava introdurre il manierismo, sinonimo di disordine ed irrazionalità, nel sistema solare ciò che di più perfetto esisteva.

La presunta perfezione del sistema solare fu sentita come una necessità anche dall'enigmatico Keplero che nel suo modello di universo sovrappose tre modelli basilari: l'universo come macchina fisica, l'universo come armonia matematica e l'universo come ordine teologico.

È difficile trovare nella storia della scienza un caso migliore di quello legato all'opera di Keplero, la cui cultura è ancora fortemente radicata in un'epoca in cui animismo, alchimia, astrologia, numerologia e stregoneria presentavano problemi

seriamente presi in considerazione, dove componenti propriamente extra scientifiche rivestono un ruolo determinante nella costituzione di una teoria o di un sistema. In Keplero convivono un deciso attaccamento alla spiegazione fisica e una fede incrollabile nella metafisica platonica. Questa duplice formazione si riflette nella risposta al problema filosofico circa l'interpretazione della realtà, un problema divenuto cogente dopo la detronizzazione dell'universo aristotelico.

Il primo criterio di realtà di Keplero consiste nelle operazioni fisiche della natura: il mondo fisico è spiegabile in base a principi meccanici. Tuttavia accanto a questo criterio, cui solo Newton darà pieno compimento<sup>174</sup>, Keplero sostiene che il mondo reale dal punto di vista fisico è allo stesso tempo il mondo delle armonie espresse matematicamente che l'uomo può inventare nell'apparenza caotica degli eventi. Questo criterio dell'armoniosa regolarità delle leggi descrittive della scienza ha la stessa origine del suo interesse per l'astronomia e per la spiegazione matematica dell'universo: è un retaggio che gli deriva direttamente dalla metafisica di Platone e dei neoplatonici come Proclo di Costantinopoli. È interessante notare come in Keplero il sacrificio della circolarità dei moti orbitali venga compensato dalla scoperta di una legge, la costanza della velocità areolare<sup>175</sup>, considerata armoniosa per tre motivi: concorda con l'esperienza; mette in luce una costanza; fortifica la concezione eliocentrica perché il punto di riferimento fisso nella legge delle aree, il centro del moto planetario, è il centro

---

<sup>174</sup> Keplero vide come andava il mondo e scoprì le tre leggi che regolano il moto degli astri. Newton invece scoprì piuttosto il che cosa faceva andare il mondo in tale maniera, vale a dire la legge della gravitazione universale. Sarà in seguito Einstein a rimuovere le oscurità che per oltre due secoli hanno avvolto tale concetto.

<sup>175</sup> Keplero nella sua *Astronomia Nova* del 1609 annunciava le sue due prime leggi planetarie: 1) i pianeti si muovono intorno al Sole in orbite ellittiche aventi il Sole in uno dei fuochi, e 2) il raggio vettore che congiunge un pianeta con il Sole copre aree uguali in tempi uguali.

del sole stesso, mentre persino nello schema copernicano il sole risultava leggermente spostato dal centro delle orbite planetarie.

Il sole nella sua posizione fissa e dominante al centro del sistema planetario corrisponde all'immagine che emerge sempre dietro alle difficili tavole di dati di Keplero, il quadro di un universo centripeto diretto verso il sole e diretto da esso in tutti i suoi molteplici ruoli: centro matematico nella descrizione dei moti celesti; agente fisico centrale che assicura la continuità del movimento; centro metafisico e tempio della Divinità. La fisica dei cieli di Keplero è eliocentrica dal punto di vista cinematico, ma teocentrica dal punto di vista dinamico; e in essa le armonie basate sulle proprietà della divinità servono ad integrare le leggi fisiche basate sul concetto di specifiche forze quantitative.

Per gli antichi e per la maggior parte dei contemporanei dello scienziato tedesco la natura rivelava la mano della divinità attraverso leggi che erano armoniose in modo essenzialmente evidente di per sé; la stessa semplicità assiomatica dei cerchi, delle sfere e dei numeri interi dimostrava il loro rapporto con la divinità.

In Keplero invece la ricerca dell'armonia in leggi quantitative segna uno spostamento in avanti verso una concezione moderna delle leggi matematiche applicate alla scienza:

*“ L'armonia non risiede più nei numeri che si possono derivare dall'aritmetica senza osservazione. L'armonia non è una proprietà del cerchio più che dell'ellisse. L'armonia è presente quando un gran numero di fenomeni è regolato unitariamente da una legge matematica che esprime un'idea cosmica. ”*<sup>176</sup>.

---

<sup>176</sup> Hedwig Zaiser, *Kepler als Philosoph*, cit. da Holton, *Le responsabilità della scienza*, p.19

Il motivo per cui Keplero colloca l'armonia nelle proprietà quantitative della natura si può far risalire in parte all'antica idea metafisico-religiosa dell'associazione tra quantità e divinità. Il grande astronomo credeva che la capacità di scoprire le armonie nel caos degli eventi fosse dovuto ad un rapporto diretto tra la realtà ultima, cioè Dio, e la mente dell'uomo.

Questa lettera è una testimonianza della sua fede profonda in un ordine cosmico stabilito da Dio “...Allora l'uomo misurerà finalmente il potere della sua mente sulla giusta scala e si renderà conto che Dio, che ha fondato tutto ciò che esiste al mondo sulla norma della quantità, ha anche dotato l'uomo di una mente che può comprendere questa norma. Poiché come l'occhio è stato creato per il colore e l'orecchio per i suoni musicali, così la mente dell'uomo è stata creata non per percepire entità arbitrarie, ma delle quantità; l'uomo comprende più correttamente una cosa quanto più essa si avvicina nella sua origine alla quantità pura.”<sup>177</sup>.

A differenza del platonismo che poneva gli archetipi delle cose fuori dall'uomo, Keplero ritiene che Dio invece li abbia posti all'interno dell'anima.

Lo studio della natura diventa quindi una ricerca delle armonie ( corrispondenze tra l'ordine percepito e l'archetipo innato ) che riflettono il pensiero di Dio.

Alla fine il principio unificante di Keplero per il mondo fenomenico non è più semplicemente il concetto delle forze meccaniche ma Dio stesso che si esprime attraverso le leggi matematiche.

---

<sup>177</sup> Lettera di Keplero a Mästlin, 19 aprile 1597, cit. da Holton, *Le responsabilità della scienza*, p. 20

## **b) I temi di Einstein**

Traendo spunto da un saggio di Einstein del 1933 *Zur Methodik der theoretischen Physik*, nel quale l'autore sottolinea di fare attenzione, per quanto riguarda il progresso scientifico “ *allo sviluppo del sistema teorico e, in particolare, al rapporto esistente tra i contenuti teorici e l'insieme dei fatti empirici. Si tratta dell'eterna antitesi tra le due inseparabili componenti della nostra conoscenza: l'empirico e il razionale.* ”<sup>178</sup>, Gerald Holton propone di definire la natura della scienza attraverso due assi ortogonali sui quali vengono poste rispettivamente le proposizioni fenomeniche e le proposizioni analitiche. Questo schema, definito da Holton concezione bidimensionale si rivela da subito insufficiente perché trascura altri meccanismi presenti nell'attività del ricercatore e non riesce a spiegare importanti problemi appartenenti alla storia della scienza.

Alcuni esempi chiariranno meglio la situazione: la ricezione della teoria della relatività o di qualsiasi altra nuova teoria scientifica generalmente varia da paese a paese; in uno stesso periodo storico ci sono scienziati che si dedicano per scelta personale a problemi e campi di ricerca in contrasto l'uno con l'altro, basti pensare a chi continuò a studiare la deriva dell'etere mentre Einstein aveva dimostrato la sua totale infondatezza. Inoltre, se la scienza potesse realmente ridursi a un modello bidimensionale, ben presto il lavoro degli scienziati dovrebbe risolversi in un rigido protocollo, mentre l'accertata esistenza del pluralismo delle prospettive sconfessa in maniera decisiva il modello bidimensionale.

---

<sup>178</sup> A. Einstein, *Il metodo della fisica teorica*, in *Idee e opinioni*, p 254

Tutte queste carenze non fanno che evidenziare la necessità di assumere un terzo meccanismo nella scelta operata dagli scienziati nella fase iniziale della loro ricerca: l'immaginazione tematica. Si può caratterizzare la componente tematica della scienza come un terzo asse z perpendicolare agli altri due x-y ( empirico ed analitico ). Secondo Holton “ *...i thémata hanno un'incidenza tanto legittima e necessaria nel farsi della scienza e nella comprensione di ciò che essa è, quanta ne hanno l'esperienza osservazionale e la costruzione logica...*”<sup>179</sup>. Questa terza dimensione è quella delle presupposizioni, nozioni, termini, giudizi metodologici e decisioni fondamentali, in breve dei temi che non scaturiscono né da osservazioni, né da ragionamenti logico-formale.

I temi rappresentano una sorta di introduzione dell'irrazionalità nell'impresa scientifica che ad un'analisi superficiale si ritiene essere il luogo privilegiato dove la razionalità e l'osservazione sperimentale s'incontrano in maniera esclusiva.

Holton distingue grosso modo tra tre diversi usi del concetto di théma: 1) i concetti puramente tematici sono assai scarsi nella storia della scienza, generalmente la componente tematica accompagna gli aspetti empirici e logici di un concetto come ad esempio in quello di forza<sup>180</sup> ed inerzia; 2) le posizioni tematiche o temi metodologici sono linee guida nello svolgimento dell'attività scientifica e si esplicano nella ricerca di leggi di costanza o di impossibilità;

3) la proposizione tematica o ipotesi tematica è un enunciato ad alto contenuto tematico.

---

<sup>179</sup> G.Holton, *L'intelligenza scientifica*, p.46

<sup>180</sup> Oltre alle componenti fenomeniche e analitiche del concetto fisico di forza, esiste una componente tematica, un principio di potenza, che attraversa tutta la storia della scienza: dall'energheia di Aristotele, attraverso l'anima motrix dei neoplatonici e la vis activa presente ancora in Newton. Il principio potente-attivo è precedente ed indipendente rispetto a qualsiasi scienza della dinamica.

I temi sorgono, tramontano e risorgono di nuovo sull'onda degli usi o delle mode intellettuali dei tempi. Rifacendosi allo schema proposto nella già citata e discussa lettera a Solovine del 1948, i temi devono essere posti come un filtro tra i dati dell'esperienza e le formulazioni assiomatiche poste al vertice della teoria: solo poche intuizioni riescono a superare l'azione filtrante dei temi. Spesso ad un tema è associato in maniera costante un antitema in opposizione.

Questa contrapposizione molte volte produce teorie assiomaticamente differenti in conseguenza del diverso orientamento tematico: in pratica si ottengono due o più sistemi di assiomi diversi a seconda dei temi che hanno agito da filtro sulle ipotesi intuite dal medesimo terreno esperenziale.

Questa situazione si manifesta sovente tra i fisici, impegnati in confronti per decidere quale tra due o più teorie, assiomaticamente diverse, ma dal pressoché identico potere esplicativo nei confronti dei fatti empirici, sia da preferire.

La scelta di una teoria rispetto ad un'altra avviene allora in base ad una predilezione tematica soprattutto quando non ci sono evidenti prove sperimentali a favore di una teoria nella disputa con un'altra, o quando le teorie non risultano in un rapporto d'inclusività l'una nell'altra, come ad esempio avviene per la teoria della gravitazione di Newton relegata al ruolo di caso limite nella teoria della relatività generale. Il fisico accorda la sua preferenza alla teoria che più lo soddisfa dal punto di vista tematico. Ad esempio, per un certo periodo iniziale, quando la relatività di Einstein non poteva essere nettamente distinta dalle teorie dell'elettrone proposte da Lorentz e Abraham grazie a qualche differenza significativa nelle previsioni, Max Planck fu indotto ad esclamare in un congresso scientifico, dopo esser stato costretto a rivelare perché prediligesse il sistema di



postulati di Einstein a discapito di quelli dei suoi rivali, “ *Lo trovo a me più congeniale* “ ( “ *Mir ist das...eigentlich sympatischer* “<sup>181</sup> ).

Ritengo che Einstein avesse proprio in mente una sorta di criterio tematico-estetico quando nelle sue *Note autobiografiche* tentava di definire uno dei principi in base a cui approvare o meno una teoria “ *Il secondo principio non ha per oggetto il rapporto tra teoria e materiale di osservazione, bensì le premesse della teoria stessa, o ciò che brevemente, seppur vagamente, potrebbe definirsi “ natura “ o “ semplicità logica “ delle premesse ( ossia dei concetti fondamentali e delle corrispondenti relazioni reciproche poste a base di essi ) . Questa esigenza, che riuscirebbe molto difficile formulare con esattezza, ha avuto da tempo immemorabile una parte molto importante nella scelta e valutazione delle teorie...Inoltre, fra teorie le cui premesse siano ugualmente “ semplici “, deve essere considerata superiore quella che definisce più nettamente le qualità dei sistemi in astratto ( cioè, che contiene le affermazioni più precise )...Il secondo principio, insomma, si può brevemente caratterizzare dicendo che si riferisce alla “ perfezione interna “ della teoria, mentre il primo si riferiva alla “ conferma esterna “. E un'altra cosa mi sembra di poter dire sulla “ perfezione interna “ di una teoria: noi apprezziamo maggiormente una teoria se, dal punto di vista logico, essa non è il risultato di una scelta arbitraria tra teorie che, confrontate fra loro sono di ugual valore e costruite in modo analogo. “<sup>182</sup>*

La perfezione interna delle teorie scientifiche tanto invocata dal fisico affonda le sue radici fuori dall'alveo della ricerca: il fatto stesso di prediligere alcuni particolari caratteri nelle leggi della natura è un segnale della credenza in un

<sup>181</sup> M. Planck, cit. da Holton, *L'immaginazione scientifica*, p. 325

<sup>182</sup> A. Einstein, *Note autobiografiche*, in AA.VV. *Albert Einstein scienziato e filosofo*, p. 13

qualche ordine cosmico. Ricercare la naturalezza non significa altro che sperare di costatare nell'universo un ordine in sintonia con l'immagine dell'universo prodotta dalla mente umana. Il supposto ordine dell'universo, riscontrabile in leggi ritenute universalmente valide, salvo smentita dei fatti, è frutto a mio avviso della nostra ragione che esplica il suo forte bisogno di razionalizzare, di rendere noto l'ignoto. Ricercare un ordine nell'universo ed accettare solo leggi che vadano in questa direzione<sup>183</sup> significa voler rendere comprensibile ciò che di fatto data la sua incommensurabilità nello spazio-tempo è inafferrabile dalla mente umana.

Holton attraverso l'attento studio degli scritti scientifici ed epistemologici di Einstein, ha individuato dieci presupposti che hanno regolato la costruzione delle sue teorie: “ *il primato della spiegazione formale ( piuttosto che di quella materialistica o meccanicistica ); l'unità o l'unificazione; la scala cosmologica di applicabilità delle leggi; la parsimonia e la necessità logica; la simmetria ( il più a lungo possibile ); la semplicità; la causalità ( essenzialmente nel senso newtoniano ); la completezza ed esaustività; il continuum; e, naturalmente, la costanza e l'invariabilità.* “<sup>184</sup>.

Questi temi, a cui lo scienziato fu tenacemente fedele, spiegano perché abbia perseverato nel proprio lavoro anche quando le verifiche dell'esperienza erano difficili o non accessibili o, addirittura smentivano i suoi risultati<sup>185</sup>. È altresì vero che un eccessivo attaccamento tematico indusse in seguito Einstein a rifiutare di

---

<sup>183</sup> Assumendo che esista un modello di universo ordinato le cui leggi risultino compatibili con la nostra esigenza di comprensione. A mio avviso ricercare un ordine nell'infinito è un atto temerario che può essere dettato soltanto da una cieca superbia o da una solida fede.

<sup>184</sup> G.Holton, *La lezione di Einstein*, p. 161

<sup>185</sup> Basta ricordare il caso legato alla presunta smentita sperimentale della teoria della relatività ristretta da parte dell'autorevole fisico sperimentale Kaufmann o dei risultati sulla preunta misurazione dell'effetto del vento d'etere da parte di Miller.

accettare teorie confermate dai fenomeni, come nel caso della meccanica quantistica di Bohr, ma basate su presupposti contrari ai suoi.

La fedeltà di Einstein al tema del *continuum*, espresso soprattutto nel concetto di campo inteso come il fondamento ultimo della spiegazione scientifica, prevalse sempre sul tema chiave della fisica quantistica, l'atomismo discreto.

Il favore accordato da Einstein a temi quali la costanza e la simmetria si possono rivelare sin dalla fondamentale memoria del 1905 dal titolo *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*.

È interessante notare che né in questa memoria né in titoli successivi viene impiegata l'espressione “ *teoria della relatività* “, né alcuno degli scritti di Einstein contiene questa definizione fino al 1911, dopo che il termine era stato impiegato da altri. Diventa rilevante sapere che per i primi anni Einstein preferiva definire nella sua corrispondenza privata la sua teoria come *Invarianten-theorie*, proprio l'opposto di come verrà definita in seguito.

Il proponimento di Einstein era di trovare delle leggi che fossero sempre valide, indipendentemente dal sistema di riferimento. Il fatto stesso di assumere al rango di postulato la costanza della velocità della luce assieme al principio di relatività era un chiaro segnale in direzione di una visione quanto più possibile uniforme dell'universo.

La prima proposizione stessa della memoria è estremamente significativa dell'orientamento di fondo di Einstein e del suo modo di fare e di intendere la fisica: “ *È noto che l'elettrodinamica di Maxwell- com'è oggi comunemente intesa- conduce ad asimmetrie che non sembrano inerenti ai fenomeni quando*

*viene applicata a corpi in movimento* <sup>186</sup>. Secondo il giovane e sconosciuto Einstein l'elettrodinamica di Maxwell non era in difetto, ma il modo di intenderla che conduceva non ad un rompicapo sperimentale né ad un'impasse teorica ma ad asimmetrie sgradevoli da un punto di vista estetico. Questo è il fatto che tanto sconcertò Einstein: per calcolare la corrente prevedibile quando un conduttore, cui è stata previamente indotta corrente, si muove rispetto ad un magnete stazionario, si deve usare un tipo di equazione; per calcolare invece la corrente mantenendo il conduttore stazionario e facendo muovere il magnete, si deve usare un tipo diverso di equazione, nonostante la corrente effettivamente prodotta risulti identica in entrambi i casi, come era noto fin dal tempo in cui Faraday per primo descrisse questo effetto nel 1831. Einstein non riusciva ad accettare che per questo fenomeno caratterizzato dalla simmetria venisse utilizzato un meccanismo di calcolo asimmetrico. Nel resto dell'articolo Einstein mostrò come relativizzare il problema in modo da poter utilizzare la stessa equazione in entrambi i casi. L'importanza di questo passo risiede nel rivelarci l'orientamento tematico di Einstein: il suo desiderio di rimuovere una asimmetria non necessaria non era superficiale o accidentale ma profondo ed importante. Holton è riuscito a scoprire una testimonianza quanto mai chiara di questo fatto in un manoscritto olografo di Einstein databile attorno al 1919 , dal titolo *Idee e metodi fondamentali della teoria della relatività, presentate nella loro genesi*, ora conservato negli Archivi Einstein all'Institute for Advanced Study di Princeton. Questo è il passo rivelatore del modo di sentire di Einstein: “ *Nella costruzione della teoria della relatività speciale, il seguente pensiero, non ancora riferito [ nella prima parte di questo*

---

<sup>186</sup> Cit. da G.Holton, *L'immaginazione scientifica*, p. 276

*manoscritto ] riguardo all' [ esperimento ] di Faraday sull'induzione elettromagnetica, ebbe per me un ruolo guida. Secondo Faraday, durante il moto relativo di un magnete rispetto a un circuito conduttore, una corrente elettrica viene indotta in quest'ultimo. È affatto la stessa cosa se viene mosso il magnete o il conduttore; conta solo il moto relativo, in accordo alla teoria di Maxwell-Lorentz. Tuttavia, l'interpretazione teorica del fenomeno in questi due casi è del tutto differente...*

*Il pensiero che si trattasse di due casi fondamentalmente differenti era per me insopportabile [ « war mir unerträglich » ]. La differenza tra questi due casi non poteva essere una differenza reale ma piuttosto, ne ero convinto, solo una differenza nella scelta del punto di riferimento. Giudicato dal magnete, non c'era certamente alcun campo elettrico, [ mentre ] giudicato dal circuito conduttore ce n'era certamente uno. L'esistenza di un campo elettrico era perciò relativa, dipendendo dallo stato di moto del sistema di coordinate in uso, e una specie di realtà oggettiva poteva essere riconosciuta solo al campo elettrico e magnetico insieme, del tutto indipendentemente dallo stato di moto relativo dell'osservatore o del sistema di coordinate. Il fenomeno dell'induzione elettromagnetica mi costrinse a postulare il principio di relatività ( speciale ).<sup>187</sup>.*

Nella mente del nostro fisico il termine asimmetria indica una mancanza di universalità e segnala complessità nei fenomeni mentre il suo intento è perseguire la semplicità riducendo le cause in eccesso. In questo orientamento Einstein è molto affine a Newton che nelle prime due *Regulae philosophandi* affermava di non dover ammettere più cause naturali di quelle che sono vere e bastano a

---

<sup>187</sup> Cit. da Holton, *L'immaginazione scientifica*, p. 277

spiegare i fenomeni e che le cause di effetti naturali dello stesso genere sono le medesime. Un vero e proprio invito alla parsimonia e all'uniformità che sarà proprio anche di Einstein, con particolare veemenza, nell'ultima fase della sua vita, contraddistinta dall'incessante ricerca di un *Weltbild* unificato che a tratti assume i caratteri di un vero e proprio oggetto di fede religiosa: “ *L'individuo è cosciente della vanità delle aspirazioni e dei desideri umani e, peraltro, riconosce l'impronta sublime e l'ordine mirabile che si rivelano nella natura e nel mondo del pensiero. L'esistenza individuale gli dà l'impressione di una prigione e vuol vivere nella piena conoscenza dell'universo, della sua unità e del suo senso profondo.* “<sup>188</sup>.

Per Einstein “ *la religiosità cosmica costituisce il più forte e nobile impulso alla ricerca scientifica.* “<sup>189</sup>.

---

<sup>188</sup> A. Einstein, *Religione e scienza*, in *Idee e opinioni*, p.48

<sup>189</sup> A. Einstein, *Religione e scienza*, in *Idee e opinioni*, p.49

# Capitolo terzo

## Il dibattito sulla relatività

### 3.1 Einstein filosofo implicito

Senza ombra di dubbio Einstein fu uno dei più grandi fisici teorici mai esistiti, la sua grandezza è paragonabile soltanto a quella di Newton. Dopo alcuni anni di relativa incomprendimento da parte della comunità scientifica, la fama di Einstein crebbe esponenzialmente, gli furono offerte diverse cattedre e si moltiplicarono i contatti con le personalità scientifiche di ogni parte del mondo. Possiamo collocare l'apice del successo del fisico della relatività il 6 Novembre 1919 quando si tenne a Londra una storica seduta congiunta della Royal Society e della Royal Astronomical Society. Sir Eddington annunciava al mondo l'esito positivo degli esperimenti per rilevare la leggera deflessione dei raggi luminosi provenienti da stelle lontane in prossimità della massa solare. L'occasione propizia per misurare tale effetto fu un'eclissi totale di Sole nel Maggio dello stesso anno, percepibile in maniera ottimale a Sobral in Brasile ed sulla piccola isola di Principe al largo della costa atlantica africana. I risultati erano in accordo con le previsioni di Einstein, Newton fu scalzato dal suo piedistallo. Il *Times* del 7

Novembre intitolava : *Rivoluzione nella scienza, Nuova teoria dell'universo, La concezione newtoniana demolita.*

Le idee di Einstein che fino ad allora erano considerate riservate a una cerchia di pochi eletti, coloro che padroneggiavano la complicata matematica che sottende la relatività generale, si aprirono al grande pubblico e furono in parte fraintese.

Tuttavia come sottolinea bene il titolo del quotidiano inglese, era impossibile sottrarsi al fascino di teorie che sovvertivano, dopo oltre un secolo di certezza nell'universo newtoniano, le nostre idee sui concetti più banali ma allo stesso tempo più astratti come lo spazio, il tempo, la gravità. Naturalmente anche i filosofi non rimasero immuni dall'interesse verso teorie che assestavano colpi mortali alle idee di spazio e di tempo, da sempre temi di competenza dei filosofi. L'invasione di campo einsteiniana suscitò pareri discordanti: ci fu chi arrivò a negare la relatività pur di salvare le proprie convinzioni, altri cercarono subito di estendere a modo di slogan la relatività al campo etico e morale, altri, per fortuna, compresero l'enorme portata delle idee di Einstein per quanto concerne la teoria della conoscenza. Hans Reichenbach ha delineato in un suo saggio dal titolo “ *Lo stato attuale della discussione intorno alla teoria della relatività* “ alcune delle posizioni filosofiche nei confronti delle teorie einsteiniane, ben consapevole che “ *È ovvio che ciascuna Scuola filosofica prende dalla teoria della relatività soltanto gli argomenti filosofici che le sembrano interessanti dal suo punto di vista particolare e accetta, rifiuta oppure interpreta la teoria fisica a seconda che questa si accordi o meno con le dottrine della Scuola. Questo non è un*



*atteggiamento favorevole alla comprensione del contenuto filosofico di una nuova dottrina fisica.* <sup>190</sup>.

Reichenbach è critico verso le posizioni sostenute dai seguaci di Vaihinger, il sostenitore della filosofia del “*Come se*”, soprattutto il suo parere è negativo verso Oskar Kraus il portavoce della scuola del finzionismo nei confronti della relatività. Secondo Vaihinger le finzioni sono strutture mentali che non corrispondono direttamente alla realtà. Tutte le costruzioni concettuali possono essere definite finzioni mentali in quanto non possono essere considerate specchi o descrizioni della realtà: esse scaturiscono dai nostri processi di pensiero e non sono altro che strumenti per la comprensione della realtà. Vaihinger distingue in modo chiaro finzione da ipotesi: “*Laddove ogni ipotesi cerca di essere un'espressione adeguata di qualche realtà ancora sconosciuta e di rispecchiare questa realtà oggettiva, la finzione viene presentata con la consapevolezza che si tratta di un modo di concepire le cose inadeguato, soggettivo e immaginifico, di cui si esclude fin dall'inizio la coincidenza con la realtà e che, quindi, non può venir in seguito verificato, come invece speriamo di fare con un'ipotesi.*” <sup>191</sup>

Quando conosciamo agiscono quindi due tipi di strutture mentali diverse a seconda della loro relazione con la realtà. Il problema che sorge è questo: quali asserzioni della relatività sono da considerarsi finzioni. E' ovvio ritenere una finzione quando Einstein, nelle sue esposizioni divulgative, parla di un osservatore che regola il suo orologio all'arrivo di un segnale luminoso.

---

<sup>190</sup> H. Reichenbach, *L'analisi filosofica della conoscenza scientifica*, p. 11, Marsilio editori, 1968 Padova.

<sup>191</sup> Cit. da H. Reichenbach, *L'analisi filosofica della conoscenza scientifica*, p. 14.

È impossibile eseguire questa operazione in quanto l'errore che risulterebbe dalla difettosa reazione sensoriale dell'osservatore sarebbe molto maggiore dell'esattezza degli orologi richiesta dalla teoria della relatività. Simili finzioni hanno uno scopo meramente pedagogico ed euristico. La scuola finzionista, al contrario, ritiene che la teoria della relatività contenga finzioni di fondamentale importanza il cui carattere, tutt'altro che ovvio, non è riconosciuto neppure dai fisici, incluso lo stesso Einstein. Per la teoria della relatività è fondamentale la teoria einsteiniana della misura degli intervalli spaziali e temporali che Kraus considera una finzione. Egli afferma: “ *La contrazione di Lorentz può essere interpretata soltanto come una conseguenza matematica risultante da certe operazioni di misura fittizie; più esattamente: il valore della contrazione di Lorentz viene ottenuto se si determinano quali sarebbero i risultati di certe operazioni di misura. In effetti una misura del genere non è mai stata eseguita, quindi il calcolo dei risultati di misura in certe condizioni fittizie viene confuso con misure effettive.* ”<sup>192</sup>.

Bisogna ammettere che una misura diretta in base ai metodi di Einstein non è mai stata eseguita, ma la misura diretta è certamente una delle ovvie finzioni da non prendere in considerazione. Reichenbach rimarca come Kraus trascuri la possibilità di giungere ad asserzioni relative al comportamento di regoli campione e di orologi, senza compiere misure dirette con questi oggetti. Kraus sbaglia nell'affermare che in base alla teoria della relatività, soltanto i corpi usati accidentalmente come strumenti di misurazione subirebbero le modificazioni previste da Einstein. Per la teoria della relatività, al contrario, ogni regolo è un

---

<sup>192</sup> *Ibid.* p. 15

regolo campione e la teoria contiene prove empiriche per ogni sua asserzione. Naturalmente queste asserzioni contengono ipotesi, dal momento che le nostre inferenze sono soltanto indirette, ma questo fatto non le trasforma in finzioni.

Per Einstein gli orologi, al pari dei regoli campione, sono oggetti fisici, non finzioni e per essi egli ha proposto esperimenti destinati a provare empiricamente il ritardo degli orologi. Le asserzioni di Einstein potrebbero essere false, ma questa è una questione empirica: Kraus non si accorge che anche le sue affermazioni circa i regoli campione e gli orologi sono empiriche e quindi potrebbero essere false. Kraus confonde finzioni ed ipotesi ed è meno sicuro circa questa distinzione di quanto lo sia il fisico. E' vero che la teoria di Einstein contiene asserzioni che non possono essere confermate empiricamente, ma quelle citate da Kraus sono empiriche. Egli chiama finzione il postulato di costanza della velocità della luce di Einstein mentre questa asserzione è essenzialmente fattuale. Kraus scrive: “ *L'asserzione secondo cui la velocità relativa della luce, non influenzata dal moto della sorgente luminosa, rimane la stessa rispetto a qualsiasi sistema in moto rettilineo uniforme, è falsa. Essa non viola le nostre abitudini di pensiero, viola giudizi necessari a priori* ”<sup>193</sup>. Questa affermazione si limita a constatare che se uso lo stesso metodo e gli stessi regoli campione e gli stessi orologi per misurare la velocità della luce in sistemi diversi, il risultato sarà sempre la costante  $c$ . È un'asserzione da venire provata nell'ambito della fisica sperimentale. Non possiamo conoscere a priori questa relazione più di quanto conosciamo la capacità della luce di penetrare la materia. Kraus non si rende

---

<sup>193</sup> *Ibid.* p. 16

conto che le sue polemiche sono rivolte contro un'asserzione semplice e fattuale, intuitivamente plausibile.

Come spesso accade nella storia della filosofia siamo di fronte al caso in cui il filosofo vuole prescrivere al fisico sulla base di conoscenze autoevidenti quali fenomeni possa osservare.

Sulla scorta di una filosofia aprioristica Kraus pretende di affermare qualcosa a riguardo degli oggetti fisici, vuole dedurre la fisica dalla filosofia. A prescindere dal fatto che il principio della luce sia fattualmente vero o meno e dal fatto che gli esperimenti futuri confermino oppure no questo principio ipotetico, bisogna respingere decisamente la critica di Kraus: al filosofo non è consentito non prender atto dei limiti della conoscenza.

Kraus critica pure la definizione di simultaneità data da Einstein, sostenendo che essa viola la legge logica di non contraddizione. Reichenbach replica a questa obiezione facendo notare che la simultaneità in luoghi diversi, è un concetto relativo, come destra e sinistra, e quindi non viola alcun principio della logica.

Il problema è al limite di natura epistemologica infatti bisogna decidere se si possa considerare la simultaneità un concetto relativo. Kraus considera autoevidente che la simultaneità non è un concetto relativo. Il problema però non può essere risolto con una dichiarazione del genere: ad alcuni risulta evidente ad altri no. Kant introdusse una nuova caratteristica per i principi sintetici a priori: egli mostrò che tali principi non possono semplicemente essere dati per scontati, ma si deve dimostrare che sono le condizioni dell'esperienza e solo allora potranno essere considerati verità oggettive. Questo requisito permette di sostituire le asserzioni basate sull'esperienza comune con assunzioni fondate

scientificamente. In nessun luogo Kraus cerca di dimostrare che la simultaneità assoluta è una condizione dell'esperienza, fa notare nella sua critica Reichenbach il quale rilancia affermando che la teoria della relatività ha dimostrato che l'esperienza è possibile sulla base della relatività della simultaneità. L'assunto della simultaneità assoluta è quindi basato sull'evidenza primitiva ed è facile mostrare che si tratta di un'assunzione insoddisfacente.

Altri due autori appartenenti alla scuola del finzionismo cui Reichenbach non lesina critiche sono Lipsius e Hopfner. Il primo sostiene che la teoria della relatività contraddice quella di Maxwell poiché nega l'esistenza di un etere materiale. Lipsius non si rende conto che la sua affermazione è corretta da un punto di vista storico ma erronea da un punto di vista logico dato che è del tutto ammissibile una teoria ondulatoria della luce senza presupporre un mezzo elastico materiale.

La posizione di Reichenbach è totalmente critica verso Kraus, infatti egli vede nelle scoperte di Einstein non solo contributi per la comprensione del mondo fisico ma anche risposte nuove e fondate ai più vecchi quesiti dell'uomo. Nel suo saggio dal titolo “ *Il significato filosofico della teoria della relatività* “, ribadisce che “ *sarebbe un altro errore credere che la teoria di Einstein non sia una teoria filosofica. Essa, che pure è la scoperta di un fisico, ha conseguenze radicali per la teoria della conoscenza: ci costringe a riprendere in esame certe concezioni tradizionali che hanno avuto una parte importante nella storia della filosofia, e dà una soluzione a certe questioni, vecchie come la storia della filosofia, che prima non ammettevano alcuna risposta.* “<sup>194</sup>. E ancora qualche riga sotto : “

<sup>194</sup> H. Reichenbach, *Il significato filosofico della teoria della relatività*, p.238, contenuta in AA.VV. *Albert Einstein, scienziato e filosofo*, 1958 Einaudi Torino.

*L'analisi della conoscenza è sempre stata la questione fondamentale della filosofia; e se la conoscenza è soggetta a revisione in un campo così fondamentale come quello dello spazio e del tempo, le conseguenze di questa critica non possono non interessare tutta la filosofia. Sostenere l'importanza filosofica della teoria di Einstein non significa però fare di Einstein un filosofo; o, per lo meno, non significa che Einstein sia soprattutto un filosofo* <sup>195</sup>.

Certo Einstein non ha mai scritto opere di filosofia e non ne ha parlato se non accidentalmente, “ *Di fatto, la filosofia di Einstein non è tanto un sistema filosofico quanto un atteggiamento filosofico; tranne qualche osservazione fatta incidentalmente, egli ha lasciato che fossero altri a dire quale filosofia corrisponda alle sue equazioni, cosicché è rimasto, per così dire, un filosofo implicito.*”<sup>196</sup>. Reichenbach ritiene che sia una caratteristica umana la divisione del lavoro tra un fisico ed un filosofo: il primo è troppo occupato con il ragionamento ipotetico deduttivo nella ricerca di soluzioni valide mentre il secondo ha il compito attraverso un atteggiamento analitico critico di chiarificare i problemi metodologici ed epistemologici suscitati dalle teorie, “ *Il cammino dei filosofi è indicato da quello degli scienziati: tutto ciò che il filosofo può fare è analizzare i risultati della scienza, trovarne il significato e definirne i limiti di validità. La teoria della conoscenza è un'analisi della scienza. Ho detto prima che Einstein è un filosofo implicito. Questo significa che il compito del filosofo è di esplicitare le implicazioni filosofiche della teoria di Einstein*”<sup>197</sup>.

---

<sup>195</sup> *Ibid.* p. 238

<sup>196</sup> *Ibid.* p. 239

<sup>197</sup> *Ibid.* p. 260

Il filosofo della scienza non si interessa al contesto della scoperta ma bada piuttosto al contesto della giustificazione, si occupa dell'analisi logica della teoria già completa.

Reichenbach sostiene che le soluzioni ai problemi dello spazio e del tempo non spettino al filosofo, bensì allo scienziato che tenta di combinare assieme i dati delle osservazioni con l'analisi matematica. Dal tempo di Kant la storia della filosofia presenta una frattura sempre più grande fra i sistemi filosofici e la filosofia della scienza. Kant edificò il suo sistema con l'intento di provare che la conoscenza è il risultato di due componenti: quella dell'intelletto e quella sensibile. Kant considerò la parte dell'intelletto costituita dalle leggi della ragion pura, intese come giudizi sintetici a priori, vale a dire proposizioni informative valide in maniera universale. Fra questi principi della conoscenza Kant include le leggi della geometria euclidea, del tempo assoluto, della causalità e della conservazione della massa. Il concetto di sintetico a priori definisce la posizione kantiana. Tuttavia lo sviluppo della scienza successivo a Kant minò da subito le basi del suo edificio infatti furono sviluppati altri principi per la costruzione della conoscenza. Questi nuovi principi non furono proposti come verità assolute, ma come tentativi di trovare una descrizione nella natura che si adattasse ai dati osservativi.

Fra la pluralità dei sistemi possibili, quello che corrispondesse alla realtà fisica poteva essere individuato soltanto dall'osservazione e dall'esperienza. In altri termini, i principi sintetici della conoscenza, che Kant aveva considerato a priori, furono riconosciuti come principi a posteriori, verificabili soltanto con l'esperienza e validi nel senso ristretto di ipotesi empiriche.

Se vogliamo giudicare in maniera corretta l'importanza della teoria della relatività per la storia della filosofia, dobbiamo collocarla nel processo di dissoluzione del sintetico a priori.

Una linea di sviluppo iniziata con l'invenzione delle geometrie non euclidee venti anni circa dopo la morte di Kant e protrattasi fino alle due grandi rivoluzioni nella scienza novecentesca: la teoria della relatività e la meccanica quantistica.

Le leggi della geometria, considerate da sempre come leggi della ragione, furono riconosciute come leggi empiriche, che si adattano al mondo circostante dell'uomo con una precisione estremamente elevata, ma che devono essere abbandonate per le dimensioni astronomiche. L'apparente auto evidenza di queste leggi, che le faceva sembrare come presupposti inoppugnabili di ogni conoscenza, risultò essere un frutto dell'abitudine; grazie alla loro adattabilità a tutte le esperienze della vita quotidiana, queste leggi avevano acquisito un grado di certezza erroneamente ritenuto assoluto. Helmholtz fu il primo a sostenere l'idea che se esseri umani vivessero in un mondo non euclideo, essi sarebbero capaci di sviluppare una forma di rappresentazione visiva attraverso la quale considererebbero necessarie e di per sé evidenti le forme della geometria non euclidea.

Solito discorso si può applicare per quanto concerne le concezioni di Einstein sullo spazio e sul tempo: se vi fossero esseri umani a cui le esperienze quotidiane rendessero apprezzabili gli effetti della velocità finita della luce, essi si abituerrebbero alla relatività della simultaneità e considererebbero le regole della trasformazione di Lorentz necessarie e di per sé evidenti, proprio come noi consideriamo di per sé evidenti le regole classiche del moto e della simultaneità.



Ciò che i filosofi avevano considerato come leggi della ragione si sono dimostrate essere un adattamento alle leggi fisiche dell'ambiente circostante; e vi è ragione di credere che, in un mondo differente, un adattamento corrispondente avrebbe portato l'uomo ad avere un'altra formazione mentale. Il processo di dissoluzione del sintetico a priori è il tratto saliente di buona parte della filosofia a cavallo dei due secoli. Il fatto che molti concetti a lungo ritenuti verità assolute si siano inconfutabilmente dimostrati come limitati o addirittura errati, non è da considerarsi come un fallimento delle nostre capacità conoscitive, anzi sottolinea la versatilità del nostro intelletto di sostituire concezioni oramai inutilizzabili con altre migliori che sembrano rispondere a tutti gli attacchi dell'esperienza. Reichenbach bolla come dogmatismo della ragion pura la concezione kantiana che prescriverebbe le sue leggi allo scienziato. I principi sintetici a priori vengono considerati come verità necessarie ed universalmente valide, questa considerazione di fondamentale importanza deriva dal concetto di esperienza in Kant. L'esperienza è da intendersi come un'unione di forma e materia. L'intelaiatura è costituita dai principi sintetici a priori ritenuti condizioni necessarie del nostro modo di accostarci al molteplice e disparato insieme dei dati sensoriali. Per Kant noi plasmiamo l'esperienza che non risulta perciò essere un oggetto neutro ma sempre un oggetto per noi. L'universo risulta euclideo perché così noi lo percepiamo, la luce si propaga in maniera rettilinea perché così ci indica il nostro occhio, i regoli e gli orologi non variano a seconda del loro stato, d'altra parte chi potrebbe dimostrare il contrario tramite un'osservazione diretta. Lo sviluppo delle teorie di Einstein dimostrano appunto che entro lo schema dei principi kantiani, la conoscenza non sarebbe possibile. Per un kantiano le nuove

acquisizioni di Einstein costituiscono una rottura della cornice interpretativa dell'esperienza.

I casi sono sostanzialmente due: o Einstein si sbaglia o l'edificio kantiano è minato alle fondamenta. Il fisico della relatività non era un kantiano e invece di abbandonare i suoi tentativi di ampliare la conoscenza, cercò il modo di riformare i così detti principi a priori.

Reichenbach afferma che “ *Con la sua capacità di usare relazioni spazio-temporali essenzialmente diverse dallo schema tradizionale della conoscenza, Einstein ha aperto la strada a una filosofia superiore alla filosofia del sintetico a priori* ”<sup>198</sup>.

Sempre seguendo le indicazioni di Reichenbach, la relatività di Einstein appartiene alla filosofia dell'empirismo. Certo è dissimile dall'empirismo di un Bacone o di un Mill i quali credevano che tutte le leggi della natura si potessero scoprire con semplici generalizzazioni induttive. L'empirismo di Einstein è quello del fisico teorico moderno, l'empirismo della costruzione matematica, concepita in modo da connettere i risultati dell'osservazione per mezzo di operazioni deduttive e in grado di formulare previsioni sperimentalmente verificabili. La fisica matematica resta sempre empiristica, finché basa sulla percezione dei sensi il criterio ultimo di verità. Oltre alle operazioni deduttive, la fisica delle ipotesi matematiche comporta, naturalmente, un aspetto induttivo; ma anche il principio dell'induzione, l'ostacolo di gran lunga più difficile per un empirismo radicale, si può oggi giustificare senza bisogno di credere in un sintetico a priori. Il metodo della scienza moderna si può completamente ridurre nei termini di un empirismo

---

<sup>198</sup> *Ibid.* p. 258

che riconosce soltanto la percezione dei sensi e i principi analitici della logica come sorgenti di conoscenza. Per Reichenbach la teoria di Einstein sullo spazio e sul tempo, nonostante l'enorme apparato matematico che la sottende, rappresenta il trionfo dell'empirismo radicale in un campo da sempre ad appannaggio della ragion pura.

## **3.2 Relatività e giudizi sintetici a priori**

### **a) Il sintetico a priori**

*“ L'influenza della filosofia di Kant giunge fino al nostro tempo. Non soltanto egli ha condizionato le dottrine di filosofi di indirizzi del tutto differenti; ma anche gli scienziati, compiendo una critica filosofica delle teorie della scienza naturale o costruendo sistemi di filosofia della natura, si sono confrontati con la sua filosofia. Sia che essi abbiano tentato di continuare il pensiero di Kant adattandolo ai mutamenti della scienza naturale- come ha fatto Helmholtz in relazione al problema della geometria- sia che abbiano completamente rifiutato le idee kantiane per porre in piena luce, proprio attraverso ciò, la specificità delle proprie concezioni filosofiche- come ha fatto Mach nella sua critica del concetto di “ cosa in sé “- tanto l'uno che l'altro atteggiamento sono indice della vastità dell'incidenza di questa filosofia che non può essere ignorata quando ci si*

voglia confrontare con il pensiero filosofico odierno. <sup>199</sup>. A questo elogio della filosofia kantiana, punto di riferimento obbligato per qualsiasi studio sulla conoscenza, Reichenbach fa seguire una breve analisi del contesto storico da cui essa è scaturita. L'autore mette in luce le radici scientifico-naturalistiche degli interessi di Kant e la sua predilezione per il modo di pensare delle scienze della natura, prototipo di ogni conoscenza. Tuttavia Reichenbach non manca di cogliere la profonda diversità che separa il modo di procedere della scienza dalla filosofia kantiana che abbandona il metodo induttivo per costruire un sistema filosofico arroccato nella ragion pura.

Kant capovolgerebbe la relazione induttiva fra la scienza naturale e la filosofia in una relazione deduttiva: il suo percorso non procede induttivamente dal concetto di conoscenza della scienza disponibile alla filosofia, ma inversamente deduce dal sistema filosofico il concetto di conoscenza della scienza. Secondo Reichenbach: “ *Tale sistema si raccoglie intorno al concetto di giudizio sintetico a priori, ossia di un giudizio che ha carattere di certezza e tuttavia non è vuoto, non è analitico o, come oggi si preferisce dire, non è tautologico.* <sup>200</sup>.”

Seguendo l'indicazione data da Carnap, ne *I fondamenti filosofici della fisica*, le distinzioni tra analitico e sintetico e fra a priori e a posteriori sono rispettivamente di ordine logico ed epistemologico. La distinzione logica coinvolge soltanto le relazioni di significato dei termini. Invece la distinzione epistemologica marca la differenza tra due specie di conoscenza. Per a priori Kant intendeva un tipo di conoscenza indipendente dall'esperienza benché non in senso genetico o

---

<sup>199</sup> H. Reichenbach, *Kant e la scienza della natura*, in *Da Copernico ad Einstein*, p. 107, Laterza Roma-Bari 1985

<sup>200</sup> H. Reichenbach, *Kant e la scienza della natura*, in *Da Copernico ad Einstein*, p. 114, Laterza Roma-Bari 1985

psicologico. Da ciò consegue che tutti gli enunciati analitici sono a priori. Viceversa, gli enunciati a posteriori sono affermazioni che non possono essere giustificate senza riferirsi all'esperienza che ne è il fondamento. Il problema che Carnap solleva è se la linea di demarcazione fra l'a priori e l'a posteriori coincide con quella tra analitico e sintetico. Secondo Kant queste due linee non coincidono e delimitano una ragione sintetica e a priori che costituisce l'idea chiave di tutta la sua teoria della conoscenza. La geometria euclidea insieme all'aritmetica era considerata da Kant l'esempio supremo di conoscenza sintetica a priori: da pochi assiomi intuitivamente certi venivano derivati logicamente tutta una serie di teoremi che descrivono la struttura reale del mondo senza bisogno di ricorrere all'esperienza.

L'esistenza o meno di questa regione, sintetica e a priori, ha costituito uno dei temi più controversi attraverso cui si è sviluppata per decenni la discussione filosofica. Nel manifesto programmatico del 1928, *La concezione scientifica del Mondo*, gli autori sintetizzano così il loro credo: “ *Così, mediante l'analisi logica viene superata non solo la metafisica nell'accezione stretta, classica, del termine, in particolare la metafisica scolastica e quella dei sistemi dell'idealismo tedesco, bensì anche la metafisica latente dell'apriorismo kantiano e moderno. Nella concezione scientifica del mondo non si danno conoscenze incondizionatamente valide derivanti dalla pura ragione, né “ giudizi sintetici a priori “, quali ricorrono alla base sia della gnoseologia di Kant, sia, ancor più di tutte le ontologie e metafisiche pre o post kantiane. I giudizi dell'aritmetica, della geometria, nonché certi principi fondamentali della fisica, adottati da Kant come esempi di conoscenza a priori, costituiscono oggetto di discorso successivo.*

*Comunque, la tesi fondamentale dell'empirismo moderno consiste proprio nell'escludere la possibilità di una conoscenza sintetica a priori.* <sup>201</sup>.

Sulla presenza di Kant nelle discussioni filosofiche e scientifiche del primo Novecento ci offre una testimonianza diretta P. Frank nella sua opera *La scienza moderna e la sua filosofia*, dove ricorda come già nel 1907 esistesse un embrionale circolo di Vienna: “ *Ero solito frequentare un gruppo di studenti, che si riunivano ogni giovedì sera in un antico caffè viennese. Vi restavamo fino a mezzanotte, e anche più tardi, discutendo problemi di scienza e di filosofia...Il matematico Hans Hahn e l'economista Otto Neurath, oltre a me, erano i componenti più assidui e attivi del gruppo.* ”<sup>202</sup>. Il racconto di Frank prosegue citando le maggiori fonti delle loro discussioni: “ *Noi approvavamo senza riserve l'indirizzo antimetafisico di Mach e accettavamo volentieri come punto di partenza il suo empirismo radicale...Ci sentivamo attratti anche da alcuni punti della teoria della conoscenza di Kant, particolarmente dai Prolegomeni a ogni metafisica futura che vorrà presentarsi come scienza.* ”<sup>203</sup>. Quegli studenti sostenevano che il divario esistente tra la descrizione dei fatti e i principi scientifici generali non fosse stato riempito né da Mach né da Kant, bensì da “ *il matematico e filosofo Henry Poincaré, che per noi era una specie di Kant liberato dai rimasugli della scolastica medievale e unto con il crisma della scienza moderna.* ”<sup>204</sup>.

Qualche pagina dopo Frank introduce l'avvenimento più importante di quel periodo: “ *l'avvenimento che a quel tempo influenzò massimamente lo sviluppo*

---

<sup>201</sup> H. Hahn, O. Neurath, R. Carnap, *La concezione scientifica del mondo*, pp.78-79

<sup>202</sup> P. Frank, *La scienza moderna e la sua filosofia*, p.15

<sup>203</sup> P. Frank, *op. cit.*, p.21

<sup>204</sup> *Ibid.* p. 23

della filosofia della scienza fu la nuova teoria generale della relatività, avanzata da Einstein dopo il 1916. In questa teoria lo scienziato derivava le leggi del moto e del campo gravitazionale da principi molto astratti e generici, i principi dell'equivalenza e della relatività. Tali principi e leggi erano connessioni tra simboli astratti: le coordinate generali spazio-tempo e i dieci potenziali del campo gravitazionale. <sup>205</sup>. Paolo Parrini in molti dei suoi studi ha cercato di approfondire le indicazioni di Frank ricostruendo i rapporti che intercorrono tra il neopositivismo e il convenzionalismo di Poincaré, la fisica relativistica e lo sfondo kantiano. Ai legami fondamentali ed ampiamente associati tra empirismo logico e concezione machiana da un lato, e pensiero di Russell e Wittgenstein dall'altro, occorre affiancare l'influenza subita da Einstein e da Poincaré.

Alcuni degli scritti di Schlick e Reichenbach precedenti la costituzione del neoempirismo logico trattano dei notevoli mutamenti avvenuti nella fisica contemporanea: negli anni venti del Novecento la relatività è il centro del dibattito. Una concezione fisica che sovvertiva l'apparentemente imperitura meccanica newtoniana non poteva non entrare prepotentemente nelle discussioni di filosofi, scienziati ed epistemologiche<sup>206</sup> che intrapresero un dibattito incentrato soprattutto sulla possibilità o meno di mantenere il sintetico a priori kantiano.

Da una lettera di Einstein a Born, senza data ma presumibilmente dell'estate 1918, veniamo a conoscenza che anche il padre della relatività s'interessò, nel clima del crescente interesse attorno alla questione, della dottrina kantiana: “ *Sto leggendo*

---

<sup>205</sup> *Ibid.* p. 33

<sup>206</sup> L'articolo, dal titolo *lo Stato attuale della discussione intorno alla teoria della relatività*, pubblicato da Hans Reichenbach su *Logos* X, nel 1921, cita oltre sessanta fonti.

*fra l'altro i Prolegomeni di Kant e comincio a capire l'enorme potere di suggestione che quest'uomo ha avuto e continua ad avere. Per cadere nelle sue mani è sufficiente concedergli l'esistenza di giudizi sintetici a priori; per poter essere d'accordo con lui, dovrei attenuare questo " a priori " in " convenzionali ", ma anche così non andrebbe bene nei particolari. Tuttavia è delizioso da leggersi, sebbene non sia bello quanto il suo predecessore Hume che fra l'altro era dotato di un istinto molto più sano.* <sup>207</sup>

I maggiori protagonisti di questa interessante *querelle* furono Schlick e Reichenbach che si assestarono rispettivamente su posizioni negazioniste " forti " e " deboli " del sintetico a priori contrapposti a Cassirer, che da neokantiano, mantenne una posizione difensiva, soprattutto nei confronti del metodo critico.

Il dibattito raggiuse l'apice attorno al 1920, probabilmente a causa della grande eco internazionale destata dalla conferma empirica di Eddington dell'anno precedente, quando pressoché in contemporanea vennero pubblicate *Relatività e conoscenza a priori* di Reichenbach e la *Teoria della relatività di Einstein* di Cassirer a cui fece seguito un anno dopo la replica di Schlick *Interpretazione criticistica o empiristica della nuova fisica ?*.

---

<sup>207</sup> Einstein-Born, *Scienza e vita, lettere 1916-1955*, p. 11, Einaudi Torino 1973



## b) Schlick e Reichenbach

Un preludio del dibattito degli anni venti si può ricostruire attraverso le prime occorrenze della relatività nelle opere di alcuni esponenti del neokantismo e del positivismo.

La prima ricezione della relatività ristretta si deve al neokantiano Natorp, che nella prima edizione, nel 1910, del libro sui fondamenti logici delle scienze esatte (*Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften*), rifacendosi soprattutto alla conferenza di Minkowsky sullo spazio-tempo<sup>208</sup>, aveva sostenuto che la dottrina kantiana dello spazio e del tempo non veniva smentita dalla relatività ristretta, ma riceveva al contrario una sorprendente conferma. La teoria della relatività poteva rientrare nell'alveo dell'idealismo critico perchè riguardava soltanto la misurazione dello spazio empirico e non andava minimamente ad interferire con la natura ideale dello spazio e del tempo puri. Per Kant, come del resto già per Newton, spazio e tempo assoluti sono puri costrutti ideali, non oggetti della percezione. Questa è stata la più utilizzata strategia di immunizzazione utilizzata dalle interpretazioni neokantiane per aggirare il conflitto tra la concezione assolutistica dello spazio e quella relativistica che scaturiva dagli evidenti dissidi tra *Estetica trascendentale* e relatività ristretta.

I neokantiani si rifugiarono dietro l'idealità dello spazio e del tempo, ultimo baluardo per difendersi da una rivoluzione fisica che sconfessava le loro

---

<sup>208</sup> Il 21 Settembre 1908 Hermann Minkowski, tenne a Colonia un'importante conferenza dal titolo *Raum und Zeit*. Questa è una delle frasi più significative: " *D'ora innanzi spazio e tempo per sé presi devono decadere completamente al rango di ombre e dovrà sussistere autonomamente solo una sorta di unione di entrambi* "

convinzioni. Contro questa posizione intraprese ben presto una battaglia polemica Moritz Schlick con l'articolo *Die philosophische Bedeutung des Relativitätsprinzips* ( 1915 ).

Per Schlick, Natorp è incorso nell'errore di postulare l'assolutezza ideale dello spazio e del tempo come condizione delle determinazioni empiriche. Secondo Schlick questa distinzione è infondata perché la teoria della relatività mostra come spazio e tempo si risolvano nella loro misurazione, senza alcun rinvio a una dimensione assoluta che la giustifichi.

Secondo Schlick bisogna pertanto riconoscere che la filosofia kantiana rimane chiusa in un *impasse* difficilmente risolvibile perché il suo retroterra newtoniano la pone in conflitto con i progressi della fisica odierna, e d'altra parte l'abbandono di tale retroterra comporta la trasformazione della dottrina dell'intuizione pura in una prospettiva non più epistemologica, ma al limite psicologica. L'importanza di questo nodo cruciale fu colta immediatamente anche da Einstein che in una lettera si dichiarò del tutto convinto dalla magistrale analisi di Schlick.

Nell'opera successiva, *Spazio e tempo nella fisica contemporanea*, Schlick dedica grande spazio alla neonata teoria della relatività generale i cui risultati sembrano fatali per la dottrina kantiana del sintetico a priori. Nell'ultimo capitolo, *Relazioni con la filosofia*, Schlick formula una netta distinzione tra spazio e tempo fisici “ oggettivi “ e spazio e tempo psicologici “ soggettivi “, sottolineando che di questi ultimi ve ne sono di parecchie specie collegati alle varie intuizioni sensibili ( ottiche, tattili, acustiche ). La critica che Schlick muove alla dottrina kantiana è di non distinguere tra lo spazio e il tempo della fisica e quelli intuitivi e soggettivi

della psicologia. Infine come naturale conseguenza della relatività generale, Schlick contesta lo statuto di aprioricità dello spazio fisico euclideo.

Schlick non manca di criticare neppure il rigoroso positivismo di Mach ed in particolare la sua dottrina degli elementi: “ *Questa concezione, però, non è l'unica interpretazione possibile dello stato di fatto della scienza. Se eminenti scienziati del campo delle scienze esatte continuano ad affermare che l'immagine positivista rigorosa del mondo non li soddisfa, il fondamento di ciò sta indubbiamente nel fatto che tutte le grandezze che compaiono nelle leggi fisiche non indicano “ elementi “ nel senso di Mach; le coincidenze che vengono espresse mediante le equazioni differenziali della fisica non sono immediatamente accessibili all'esperienza, esse non indicano direttamente una coincidenza dei dati dei sensi, ma anzitutto di grandezze non-intuitive, come intensità di campi elettrici e magnetici e simili.* ”<sup>209</sup>.

Con l'aumentare della fama mondiale di Einstein durante gli anni venti, andò di pari passo la fioritura di opere dedicate allo studio delle implicazioni epistemologico-gnoseologico della teoria della relatività. Tra queste un posto di spicco è occupato da “ *Relatività e conoscenza a priori* ” di Hans Reichenbach, il maggior esponente del futuro Circolo di Berlino.

La produzione giovanile di Reichenbach rivela una vasta gamma di temi che vanno dalla filosofia dello spazio e del tempo alla teoria della probabilità e dell'induzione, dalla questione del realismo alla natura e al ruolo della semplicità nella formulazione delle ipotesi e delle teorie scientifiche. Nel denso saggio “ *Relatività e conoscenza a priori* ”, pubblicato per la prima volta nel 1920,

---

<sup>209</sup> M. Schlick, *Spazio e tempo nella fisica contemporanea*, p. 92.

Reichenbach, che fu tra i primi a rendersi conto della enorme portata filosofica della fisica relativistica, istituisce un confronto fra la dottrina kantiana della conoscenza e la teoria della relatività per valutare se, ed eventualmente in quale misura, la prima possa considerarsi superata dalla seconda, “ *Si danno pertanto solo due possibilità: o la teoria della relatività è falsa, o la filosofia kantiana va modificata nelle parti che sono in contrasto con Einstein* ”<sup>210</sup>. Reichenbach è consapevole che le affermazioni della teoria della relatività concernono rapporti fisici di misurabilità e relazioni fisiche di grandezza, ma si deve parimenti ammettere che queste affermazioni particolari contrastano con i principi filosofici generali. Secondo il filosofo della scienza “ *Da lungo tempo gli assiomi filosofici, anche nella loro forma critica, venivano concepiti in modo tale da rimanere immutati di fronte ad interpretazioni particolari; nondimeno essi escludevano sempre in maniera definitiva un particolare gruppo di asserzioni di carattere fisico. La teoria della relatività è andata in cerca proprio delle possibilità così escluse, facendone il filo conduttore delle proprie assunzioni fisiche.* ”<sup>211</sup>. Reichenbach è deciso nel rifiuto della distinzione operata dai neo kantiani tra un tempo fisico ed uno tempo fenomenologico attraverso il richiamo al fatto che il tempo come esperienza vissuta di carattere soggettivo rimane sempre una successione irreversibile.

Reichenbach pare sostenere l'ortodossia kantiana di fronte a coloro che la modificano ingiustamente infatti “ *...una distinzione siffatta non è certamente nello spirito del kantismo. Per Kant, infatti, ciò che è essenziale in una forma conoscitiva a priori è proprio che essa costituisce una condizione della*

<sup>210</sup> H. Reichenbach, *Relatività e conoscenza a priori*, p. 62.

<sup>211</sup> H. Reichenbach, *op. cit.*, p. 59.

conoscenza della natura e non semplicemente una qualità soggettiva delle nostre sensazioni. <sup>212</sup>. Un ulteriore pericolo per la tradizionale dottrina kantiana si deve inoltre alla recente teoria della relatività generale che viene addirittura ad affermare che la geometria euclidea non è applicabile alla fisica.

Alla luce dei brillanti risultati della relatività, la dottrina kantiana del sintetico a priori sembra destinata a disgregarsi almeno che non si intervenga modificando quelle parti che sono in palese contrasto.

La strategia di Reichenbach sostenuta in *Relativitätstheorie und Erkenntnis apriori* quanto in altri scritti dei primi anni Venti ( *Der gegenwärtige Stand der Relativitätsdiskussion* e *La signification philosophique de la theorie de la relativité* ), consiste nel distinguere tra due significati del concetto di a priori: a priori, nel senso di sempre vero, o necessariamente e universalmente vero, o vero indipendentemente dall'esperienza; a priori, nel senso di principi che costituiscono il concetto di oggetto della fisica.

Reichenbach è determinato nel rifiutare in maniera definitiva la prima accezione del concetto di a priori mentre non è ancora disposto a rinunciare alla seconda accezione “ *Il secondo significato del concetto di a priori è in ogni modo il più importante. Infatti esso conferisce a questo concetto la posizione centrale che esso ha posseduto da Kant in poi nella teoria della conoscenza. La grande scoperta di Kant è stata che l'oggetto della conoscenza non è completamente dato, ma è costruito, che esso contiene elementi concettuali i quali non sono contenuti nella pura percezione.* ”<sup>213</sup>

---

<sup>212</sup> H. Reichenbach, *Relatività e conoscenza a priori*, p. 60.

<sup>213</sup> H. Reichenbach, *op. cit.*, p. 102

Reichenbach non si propone di provare la falsità empirica di questo o di quel principio generale classificabile tra i giudizi sintetici a priori nel senso di Kant, per esempio, l'assunzione del nesso causale o del carattere euclideo dello spazio, ma cerca di mettere in luce i due risultati di importanza filosofica rilevante che la teoria della relatività ha conseguito: l'esistenza di una contraddizione implicita nel sistema dei principi della ragion pura; la possibilità di rimpiazzare tale sistema con una costruzione teorica nuova che non presenta le difficoltà riscontrabili in quella vecchia, i cui principi restano per altro approssimativamente validi.

Il primo passo di Reichenbach consiste in una nuova formulazione del concetto di conoscenza fisica. Ciò che caratterizza la fisica moderna è la rappresentazione di tutti i processi tramite equazioni matematiche. Tuttavia, la matematica e la fisica, così strettamente connesse, variano per quanto riguarda il concetto di verità: nel caso dell'enunciato matematico verità significa una relazione interna tra i suoi termini; nel caso invece dell'enunciato fisico verità significa relazione a qualcosa di esterno connesso con l'esperienza. L'enunciato matematico gode di una validità assoluta, mentre l'enunciato fisico gode soltanto di una validità probabile.

Al sistema delle equazioni fisiche si deve garantire la validità di applicazione alla realtà a differenza della matematica che è completamente immanente. Questo rapporto che lega le equazioni fisiche alla realtà, viene definito da Reichenbach coordinazione: “ *le cose reali vengono coordinate ad equazioni.* ”<sup>214</sup>.

Esprimendosi in termini di insiemi, Reichenbach paragona la conoscenza ad una coordinazione tra un insieme di termini ben definiti ( le equazioni matematiche ) e un insieme di termini non definiti ( il reale ) dove “ *constatiamo il fatto singolare* ”

---

<sup>214</sup> H. Reichenbach, *Relatività e conoscenza a priori*, p.90

*che il lato definito determina le singole cose del lato non definito e che, inversamente, il lato non definito prescrive l'ordine del lato definito. E' in questa reciprocità della coordinazione che trova espressione l'esistenza del reale.* <sup>215</sup>

Reichenbach è debitore di questa posizione a Schlick, che qualche anno prima nella sua *Teoria generale della conoscenza* si esprimeva così circa la verità e la coordinazione: “ *Tutte queste coordinazioni, che noi effettuiamo continuamente in tutte le circostanze della vita, hanno quindi lo scopo di fare, dei simboli, validi rappresentanti del designato. Per raggiungere tale scopo esse devono soddisfare un'importante condizione. Poiché si deve sapere esattamente quale oggetto pertiene ad un determinato segno, la coordinazione deve essere univoca. In altre parole: un solo e medesimo segno non deve mai poter significare oggetti diversi...E un giudizio che designa univocamente uno stato di fatto si dice vero.* <sup>216</sup>.

Per Reichenbach la correttezza o meno della coordinazione è data dal fatto che non sorgano contraddizioni tra elementi teorici ed elementi osservativi.

Se la verità, viene definita seguendo Schlick, come univocità della coordinazione, il criterio per riscontrare questa univocità della coordinazione diventa la percezione che non è in grado di definire gli elementi della realtà ma decide circa l'univocità della coordinazione. Bisogna rimarcare che per univocità della coordinazione riferita alla conoscenza fisica non si può intendere come nel caso di due insiemi la coordinazione univoca tra due elementi ma bisogna piuttosto riferirsi allo stesso risultato ottenuto in misurazioni differenti.

---

<sup>215</sup> H. Reichenbach, *Relatività e conoscenza a priori*, p.96

<sup>216</sup> M. Schlick, *Teoria generale della conoscenza*, p.79

Il problema che Reichenbach si pone, “ *come è possibile in generale una tale coordinazione ?* “, è lo stesso che si pose Kant “ *come è possibile la conoscenza della natura ?* “<sup>217</sup>.

Reichenbach è convinto di aver trovato attraverso i principi di coordinazione<sup>218</sup> ( *Zuordnungsdefinitionen* ) che sono regole generali per connettere le equazioni matematiche ai dati esperenziali, la via per perseguire l'univocità di coordinazione.

A detta di Reichenbach i giudizi sintetici a priori kantiani e i suoi principi di coordinazione svolgono l'analoga funzione di costituire l'esperienza. La teoria kantiana esclude però il mutamento dei suoi principi di ordinamento attraverso l'esperienza perché quest'ultima viene costituita dalla ragione, “ *Ciò che la sua teoria esclude è solo il mutamento della ragione e dei suoi principi di ordinamento attraverso le esperienze; in questo senso è da intendere l'apoditticamente valido.* “<sup>219</sup>. Dal carattere costitutivo dei giudizi sintetici a priori kantiani, a detta di Reichenbach, deriverebbe la validità apodittica. Infatti non si darebbe mai il caso di una qualche esperienza in contraddizione con i principi della ragione che l'hanno costituita. Invece nella dottrina reichenbachiana i principi di coordinazione non risultano immutabili ma possono essere sostituiti in quanto definiscono il materiale dell'esperienza ma non lo determinano. Il criterio per l'univocità della coordinazione non è una proprietà dei principi della coordinazione ma risiede nella percezione, del tutto indipendente ed esterna alla ragione. Michael Friedman sostiene nel suo *Reconsidering Logical Positivism* che

---

<sup>217</sup> H. Reichenbach, *Relatività e conoscenza a priori*, p.99

<sup>218</sup> Come esempi di principi della coordinazione Reichenbach cita il principio di probabilità, il principio di genidentità, lo spazio e il tempo.

<sup>219</sup> H. Reichenbach, *Relatività e conoscenza a priori*, p. 108



la grande innovazione filosofica realizzata dagli empiristi logici sarebbe non una nuova versione dell'empirismo radicale, ma una nuova concezione della conoscenza a priori e del ruolo che essa svolge nella conoscenza empirica. Friedman sostiene che la concezione kantiana dei principi sintetici a priori, principi che sono necessari, certi e non rivedibili ma altresì applicabili al mondo naturale dato nella nostra esperienza sensibile, sia stata irrimediabilmente infranta dalle rivoluzioni avvenute in matematica e nella fisica matematica. Tuttavia, prosegue Friedman, nonostante nessun principio a priori in senso kantiano sia stabilito una volta per tutte in modo assoluto, i positivisti hanno sostenuto che “*noi continuiamo ad avere bisogno di principi tipicamente non empirici, i quali, nonostante la loro tendenza ad andare soggetti a revisione in periodi di profonde rivoluzioni concettuali, sono in ciascun momento costitutivi della intelaiatura della ricerca nelle scienze naturali ( delle regole del gioco, per così dire ). Infatti è a tali principi vigenti al momento che la conoscenza scientifica deve la sua validità oggettiva e la sua comunicabilità intersoggettiva.*”<sup>220</sup>. Micheal Friedman ha battezzato questo tentativo compiuto dai positivisti logici come la concezione dei principi a priori relativizzati ( *relativized a priori principles* ). Una espressione ambigua perché se da un lato rimanda volutamente alla teoria della relatività di Einstein, che ha sancito la definitiva dissoluzione dell'a priori kantiano, dall'altro lato sfrutta il potere attrattivo della parola relatività in un senso opposto a quello voluto da Einstein, l'invarianza. Inoltre l'idea di principi a priori rivedibili ( un termine molto più sobrio rispetto al più impegnativo relativizzati ) era già chiara a Reichenbach che nel successivo articolo su *Lo stato attuale della discussione*

---

<sup>220</sup> M. Friedman, *Reconsidering Logical Positivism*, citato da P.Parrini, *L'empirismo logico*, p.19

intorno alla teoria della relatività afferma che: “ *La ragione ha il compito di adattare all'esperienza i principi dell'intelletto. Sebbene alcuni principi costitutivi debbano essere sempre presupposti per fondare la conoscenza empirica, tale adattamento potrà essere effettuato per mezzo di un “ metodo di approssimazioni successive “, in cui si assume che i principi usati in precedenza valgono approssimativamente. È, quindi, possibile un cambiamento dei principi costitutivi stessi. A questo modo l' a priori perde il suo carattere apodittico, ma conserva la sua proprietà più importante, quella di essere “ costitutivo di oggetti “.* “<sup>221</sup>. Secondo il filosofo della scienza, i due significati del concetto di a priori in Kant poggiano sull'ipotesi “ *che non può esistere alcun sistema implicitamente contraddittorio dei principi della coordinazione per la conoscenza della realtà. Siccome questa ipotesi è equivalente all'asserzione che si può giungere ad una coordinazione univoca delle equazioni con la realtà con qualsivoglia sistema esplicitamente non contraddittorio di principi della coordinazione, noi la chiameremo ipotesi dell'arbitrarietà della coordinazione.* “<sup>222</sup>

Secondo Reichenbach la pretesa di Kant è falsa ed è possibile imbattersi in contraddizioni fra i principi costitutivi e l'esperienza ed è inoltre “ *logicamente ammissibile e tecnicamente possibile scoprire in modo induttivo nuovi principi di coordinazione che rappresentino un continuo ampliamento dei principi impiegati sino ad allora...Indicheremo questo procedimento induttivo come procedimento dell'ampliamento continuo* “<sup>223</sup>

---

<sup>221</sup> H. Reichenbach, *Lo stato attuale della discussione intorno alla teoria della relatività*, in *L'analisi filosofica della conoscenza scientifica*, p.54, Marsilio editori Padova 1968.

<sup>222</sup>H. Reichenbach, *Relatività e conoscenza a priori*, p. 112

<sup>223</sup> H. Reichenbach, *op. cit.*, p. 120

Questo procedimento costituisce per Reichenbach il cuore della confutazione della dottrina kantiana dell'a priori perché esso indica sia la via per confutare i vecchi principi, sia quella per giustificarne di nuovi. Reichenbach introduce il metodo di analisi della scienza nella teoria della conoscenza: scopo della filosofia è scoprire i principi presupposti dalle scienze positive, “ *vi sono certamente principi a priori che rendono univoca la coordinazione del processo della conoscenza. Ma non ci è concesso dedurre tali principi da uno schema immanente. Non ci rimane che scoprirli attraverso il lavoro graduale di analisi della scienza e rinunciare alla questione di quanto a lungo la loro forma specifica resterà valida.* “<sup>224</sup>

L'acquisizione di Reichenbach secondo cui i principi a priori della conoscenza sono determinabili solo induttivamente e possono essere sempre confermati o confutati dall'esperienza, “ *a priori significa: prima della conoscenza, ma non: per ogni tempo, e neanche: indipendente dall'esperienza.* “<sup>225</sup>, comporta una frattura con la filosofia critica.

Allo stesso tempo Reichenbach vuole evitare però di scivolare nella “ *filosofia empirista che crede di poter trattare sbrigativamente tutti gli enunciati scientifici allo stesso modo con l'osservazione tutto è esperienza* “<sup>226</sup>.

Per Reichenbach il rifiuto parziale del kantismo e l'ammissione di un a priori storicamente mutevole non segnano la fine dell'indagine epistemologica, bensì la riqualificazione dei suoi metodi e dei suoi scopi: il compito dell'epistemologia non consiste più nel giustificare un sistema di giudizi della ragion pura

---

<sup>224</sup> H. Reichenbach, *Relatività e conoscenza a priori*, p. 128

<sup>225</sup> *Ibid.* p. 152

<sup>226</sup> *Ibid.* p. 142

apoditticamente certi, ma nell'esplicitare, mediante l'analisi del sapere scientifico via via dato, quali principi della conoscenza valgono in un certo tempo.

Diversa è la posizione di Schlick che rifiuta il sintetico a priori kantiano in tutti i suoi aspetti. Schlick parte dalla convinzione che la caratteristica essenziale del sintetico a priori kantiano sia la congiunzione, nel medesimo concetto, della certezza apodittica e del valore costitutivo, “ *Ora, a mio modo di vedere, il punto essenziale della concezione critica sta nell'affermazione che quei principi costitutivi sarebbero giudizi sintetici a priori, ove al concetto di a priori è attribuito, come da esso inseparabile, il contrassegno dell'apoditticità ( della validità universale, necessaria, inevitabile ). Sono assolutamente convinto di aver reso esattamente, con questa spiegazione, la vera posizione di Kant...*”<sup>227</sup>.

A fronte di questa considerazione il filosofo viennese non è disposto ad accettare la distinzione tra i due a priori operata da Reichenbach e la sua riformulazione secondo cui “ *A priori significa: prima della conoscenza, ma non: per ogni tempo, e neanche: indipendente dall'esperienza.* “. Schlick appoggia una forma di negazione forte del sintetico a priori kantiano e rigetta la distinzione operata da Reichenbach attraverso cui viene “ *...del tutto abbandonato il terreno del criticismo;* “. Schlick rimprovera a Reichenbach di aver male interpretato la dottrina kantiana ed in particolare i principi a priori che a detta di Schlick sarebbero da considerare convenzioni nel senso di Poincaré.

La posizione di Schlick emerge in tutta la sua chiarezza nell'articolo *Interpretazione criticistica o empiristica della nuova fisica ?* Dove gli viene chiesto di rispondere al saggio cassireriano *La teoria della relatività di Einstein*

<sup>227</sup> M. Schlick, *Interpretazione criticistica o empiristica della nuova fisica ?*, In *Forma e contenuto*, p.153

uscito un anno prima. Alla basilare questione se la dottrina kantiana sia in grado di adattarsi ai risultati dell'odierna teoria della relatività, Schlick risponde in modo negativo sostenendo invece “ *...che i principi necessari al chiarimento filosofico e alla giustificazione teoria potessero essere trattati assai meglio dalla teoria empiristica della conoscenza che da quella kantiana;* ”<sup>228</sup>.

Alla questione posta dal Cassirer “ *se nella sua origine e nel suo sviluppo la teoria ( della relatività ) valga da prova e testimonianza del concetto critico o del concetto sensistico di esperienza* ”<sup>229</sup>, Schlick risponde che “ *Tra i due rimane la concezione empiristica, secondo la quale quei principi costitutivi sono ipotesi o convnzioni; nel primo caso non sono a priori ( poiché manca ad essi l'apoditticità ), nel secondo non sono sintetici.* ”<sup>230</sup>

A una posizione di negazione forte del sintetico a priori giunge anche Reichenbach in scritti degli anni trenta come nel breve saggio *Kant e la scienza della natura* e nell'articolo *L'empirismo logico e la disgregazione dell'a priori*. Nel saggio del 1933 Reichenbach non distingue più tra un a priori in senso di apoditticamente valido ed uno in senso di costitutivo il materiale dell'esperienza. Reichenbach sostiene che “ *il procedimento dimostrativo di Kant è di fatto insostenibile. Esso si fonda su un'erronea sopravvalutazione del contributo della ragione alla conoscenza.* ”<sup>231</sup>. Reichenbach giunge alla conclusione che i presupposti della conoscenza non si possano dare una volta per tutte ed essere considerati gli ultimi ma vadano piuttosto considerati come enunciati empirici di

---

<sup>228</sup> M.Schlick, *Interpretazione criticista o empiristica della nuova fisica ?*, p. 151

<sup>229</sup> E. Cassirer, *Sostanza e funzione, Sulla teoria della relatività di Einstein*, p. 485, La nuova italia, Firenze 1973

<sup>230</sup> M.Schlick, *Interpretazione criticista o empiristica della nuova fisica ?*, p. 154

<sup>231</sup> H. Reichenbach, *Kant e la scienza della natura*, in *Da Copernico ad Einstein*, p. 126, Laterza Roma-Bari 1985

portata generale dati di volta in volta, “ *La concezione kantiana dei presupposti necessari della conoscenza è così caduta; i presupposti della conoscenza non sono necessari, ma vengono ottenuti per via empirica e sono soggetti a una continua regolamentazione da parte dell'esperienza.* “<sup>232</sup>.

Nell'articolo del 1935 in occasione del Congresso internazionale di filosofia scientifica tenuto a Parigi, la presa di posizione di Reichenbach contro il sintetico a priori è ancora più decisa “ *...lo sviluppo della scienza, da Kant in poi, può essere considerato come una decomposizione costante dei fondamenti del razionalismo; esso significa invero la disgregazione dell'a priori.* “<sup>233</sup>.

Reichenbach, successivamente al contatto con il pensiero di Russell e di Wittgenstein, si è definitivamente sganciato dall'influenza kantiana: “ *Kant dà al razionalismo la sua forma più perfetta, ma dopo la sua epoca, il corso della filosofia trova un letto nuovo nello sviluppo della scienza che mette capo alla disgregazione dell' a priori sintetico....La scienza dei nostri giorni non crede più alle capacità legislative di una ragion pura. Tutto quello che sappiamo del mondo è tratto dall'esperienza, e le trasformazioni dei dati empirici sono puramente tautologiche, analitiche. Quelle che avevamo preso per leggi a priori sintetiche non sono che leggi empiriche molto generali: la legge della conservazione della sostanza e tutte le altre. E le trasformazioni matematiche che avevamo creduto a priori sintetici non sono che analitici; il concetto di numero, innanzitutto, è rivelato come una costruzione logica che non fa che abbracciare, nella sua forma abbreviata, operazioni tautologiche, analitiche. Per dimostrare ciò, l'empirismo si*

---

<sup>232</sup> H. Reichenbach, *Kant e la scienza della natura*, in *Da Copernico ad Einstein*, p. 129, Laterza Roma-Bari 1985

<sup>233</sup> H. Reichenbach, *L'empirismo logico e la disgregazione dell'a priori*, in *Filosofia scientifica ed empirismo logico* a cura di Gaspare Polizzi, p. 63, Edizioni Unicopoli Milano 1993

*è unito alla logistica e questo empirismo logico è la forma contemporanea di quella corrente filosofica nata dalla critica delle scienze.* <sup>234</sup>.

### **3.3 Cassirer e il metodo critico**

#### **a) Il neokantismo di Cassirer**

Col nome di neokantismo si intende quel vasto movimento filosofico europeo di ritorno a Kant nel quale si colloca l'opera di Cassirer. Giulio Raio, nella sua *Introduzione* a Cassirer, sottolinea come i due problemi nonché chiavi di volta dell'interpretazione del neokantismo siano costituiti dalla storia filosofica della filosofia secondo Kant e dalla nascita e sviluppo di una disciplina filosofica, di derivazione kantiana, denominata teoria della conoscenza.

In Cassirer il concetto di storia filosofica della filosofia è incluso nella stessa teoria della conoscenza, ponendosi come principio genealogico. La connessione problematica di storia filosofica e teoria del problema della conoscenza configura, allo stesso tempo, un criterio di strutturazione interna e di partizione tematica dell'opera di Cassirer in progetto storiografico di ricostruzione della storia teleologica del kantismo, che si concretizza nella vasta opera

---

<sup>234</sup> *Ibid.* p. 63

sull'*Erkenntnisproblem*, e progetto metodologico di fondazione di una nuova teoria generale della conoscenza, che si sviluppa in *Sostanza e funzione* e nella monumentale *Filosofia delle forme simboliche*.

I cardini di svolta teorica che emergono dall'Introduzione all'*Erkenntnisproblem*, sono la contrapposizione tra la concezione popolare e ingenua della conoscenza, secondo la quale essa consiste nella ripetizione, riproduzione o rispecchiamento nel soggetto degli oggetti postulati di fronte, e la concezione critica della conoscenza, secondo la quale essa consiste nella scelta e nell'ordinamento critico degli oggetti della percezione. Altro punto chiave è costituito dall'interpretazione critica o neocritica dei concetti scientifici, non come imitazioni di cose, principi mimetici, ma come creazioni del pensiero, principi simbolici, simboli dell'ordinamento, “ *I concetti della scienza non appaiono più allora come imitazioni di cose che abbiano una loro esistenza oggettiva, ma come simboli degli ordinamenti e delle connessioni funzionali che si presentano all'interno del concreto.* ”<sup>235</sup>.

La storia della teoria della conoscenza, la storia del problema della conoscenza, è per Cassirer l'intero campo della ricerca filosofica, infatti “ *il compito della filosofia in ogni singola fase del suo sviluppo consiste nel mettere costantemente in rilievo, in un concreto complesso storico di determinati concetti e principi scientifici, le funzioni logiche generali della conoscenza* ”<sup>236</sup>.

Kant, a differenza di un Cartesio o di un Leibniz non partecipa all'ampliamento o alla sistemazione della matematica e della filosofia naturale, ma concentra i suoi sforzi sul modo in cui avviene la conoscenza. La sua convinzione di fondo si

<sup>235</sup>E. Cassirer, *Storia della filosofia moderna volume I*, p.19, Einaudi Torino 1952.

<sup>236</sup> *Ibid.* p. 32



rivela “ *nell'affermare che esiste una forma universale e necessaria del sapere, e che la filosofia è chiamata ed è resa idonea a scoprire e accertare questa forma. E' quanto fa la critica della ragione, riflettendo, invece che sui contenuti, sulla funzione del sapere.* ”<sup>237</sup>.

Kant non è il punto di arrivo della speculazione precedente, rappresenta piuttosto un nuovo inizio perché pone problemi sempre attuali. Osserva Cassirer nell'Introduzione all'*Erkenntnis problem* che “ *La filosofia critica, alla sua origine, è legata e imparentata molto più strettamente di quanto le precedenti esposizioni del suo sviluppo lascino supporre alla scienza del XVIII secolo.* ”<sup>238</sup>.

In questa stretta relazione tra scienza e impostazione critica molti hanno ravvisato il tallone di achille della filosofia kantiana, infatti la critica trascendentale arresterebbe il processo storico della conoscenza tenendolo indissolubilmente legato al fatto storico della scienza newtoniana. Cassirer tuttavia è di diverso avviso e sostiene che “ *Quanto più chiaramente siamo in grado di arrivare a distinguere in quale formulazione concettuale della critica della ragione la cultura scientifica del tempo sia giunta all'espressione e alla coscienza di sé medesima, tanto più chiari risulteranno per noi, dalle particolarità della costruzione, i tratti universalmente validi della metodica kantiana. Proprio con l'attenerci all'idea fondamentale del metodo, cerchiamo di lasciare aperta la via alla deduzione particolare e alla fondazione dei principi. La critica trascendentale sarebbe condannata a rimanere infruttuosa, se le fosse interdetto di seguire liberamente il progresso dei fondamentali concetti scientifici e di*

---

<sup>237</sup> E. Cassirer, *Storia della filosofia moderna volume VI*, p. 21, Club del libro fratelli Melita, La Spezia 1983.

<sup>238</sup> E. Cassirer, *Storia della filosofia moderna volume I*, p.30, Einaudi Torino 1952.

*esprimerlo nei suoi risultati e nelle sue definizioni particolari. Quanto più versatile e mobile essa si mantiene a questo riguardo, tanto più nettamente si dimostrerà l'universalità e l'unità sistematica della sua impostazione del problema.* <sup>239</sup>.

Il proponimento di mantenere il metodo kantiano nonostante le evidenti scosse subite dall'*Estetica trascendentale* da parte della neonata relatività speciale e dalle geometrie non euclidee è uno dei temi di *Sostanza e Funzione*.

L'oggetto teorico di *Sostanza e funzione* è la stessa funzione concettuale che assume una connotazione nuova e problematica dopo l'irrompere sulla scena intellettuale della teoria dei principi della matematica e delle scienze esatte.

Nella prefazione Cassirer sottolinea come il primo stimolo a svolgere ricerche in questo ambito derivi dai suoi precedenti studi di filosofia della matematica e come questo interesse si sia rafforzato alla luce dei concetti presenti nelle scienze esatte.

La forma del concetto tra fine Ottocento e inizio Novecento risulta inadeguata rispetto ai problemi sollevati dalla teoria dei principi della matematica ed è evidente il ritardo della concettualizzazione rispetto al reale sapere matematico e scientifico.

L'opera si prefigge quindi il duplice scopo di effettuare un'analisi dei principi della formazione dei concetti e una reinterpretazione dei problemi della critica della conoscenza alla luce della nuova forma fondamentale del concetto.

La struttura dell'opera rispecchia gli obiettivi summenzionati: la prima parte, *Concetti di cose e concetti di relazione*, è interamente dedicata alla teoria della concettualizzazione o formazione dei concetti considerata sia come teoria

---

<sup>239</sup> E. Cassirer, *Storia della filosofia moderna volume I*, p.31, Einaudi Torino 1952.

filosofica del concetto, sia come teoria scientifico-naturale del concetto; la seconda parte, *Il sistema dei concetti di relazione e il problema della realtà*, è dedicata all'elaborazione di una teoria neocritica della conoscenza, definita come sistema dei concetti di relazione, il cui fondamentale carattere neocritico consiste nell'indissolubilità della correlazione logica di materia e forma della conoscenza. Cassirer contrappone alla logica del concetto-genere, inscritta nel punto di vista e nel dominio del concetto di sostanza, la logica del concetto matematico di funzione, il cui campo di applicazione non si limita alla matematica, ma si estende anche alla conoscenza della natura. La logica del concetto-genere o concetto ontologico, ottenuto attraverso l'astrazione e determinato dalle leggi dell'estensione e della comprensione, è la logica tradizionale che ha nell'*Organon* aristotelico la sua espressione compiuta. La logica del concetto-genere è definita anche come logica del concetto di sostanza infatti si basa su una metafisica sostanzialistica. Secondo una concezione che inizia con Aristotele, che fu poi elaborata in seno alle gnoseologie empiristiche moderne, da Locke in poi, il concetto è ottenuto per astrazione dall'esperienza, dove per astrazione si intende soprattutto scelta e quindi impoverimento del contenuto esperito. Il concetto è ottenuto scegliendo nelle rappresentazioni empiriche i dati comuni ed essenziali tralasciando i caratteri peculiari ed accidentali con la conseguenza che il grado di universalità estensionale del concetto è contraddistinto dalla povertà di contenuto connotativo.

Alla logica del concetto-genere si contrappone la logica del concetto-funzione operante nelle teorie matematiche. Anche il concetto-funzione è astratto, tuttavia si tratta di un altro tipo di astrazione nella quale le caratteristiche accidentali non

vengono omesse bensì sostituite da simboli, cioè da variabili. Si ottengono così formule, come le definì Gottlob Frege, insature, ossia parzialmente indeterminate. La scienza si configura quindi come una determinazione non di semplici rapporti di implicazione tra sostanze ma di rapporti di covarianza e in generale di correlazione tra simboli costanti e variabili delle funzioni, cioè le formule insature. Da queste nonostante la loro maggiore astrazione rispetto ai concetti-sostanza, saranno possibili previsioni, spiegazioni, descrizioni dei fatti concreti dell'empiria, mediante sostituzione delle variabili con i valori offerti dall'esperienza. Il matematismo della scienza moderna era un fatto oramai acquisito già da lungo tempo prima di Cassirer. Le scienze esatte e sistematiche, le primogenite, modelli per tutte quelle a venire, erano caratterizzate da una completa e profonda matematizzazione come l'astronomia e la meccanica.

Per Cassirer la ragione logico-metodologica di una tale matematizzazione è da ricercarsi nell'instaurazione del concetto-funzione al posto del concetto-sostanza, della legge come implicazione o nesso di covarianze funzionali al posto della mera, impossibile o inutile, implicazione analitica dal genere alle specie.

Cassirer interpreta il processo in atto della matematizzazione della matematica come un salto in avanti del processo di astrazione, vale a dire nella definizione dei concetti matematici come concetti-funzione ottenuti a partire da un linguaggio simbolico collocato ad un livello di astrazione superiore a quello dei normali linguaggi-oggetto delle discipline matematiche correnti.

E in quest'ottica naturalmente va letto il tentativo di condurre la teoria della relatività nell'alveo del procedimento kantiano rinnovato dal passaggio dal concetto sostanza al concetto funzione.

## b) Cassirer e la Relatività

Nell'articolo apparso su “ *Logos* “ del 1921 Reichenbach riconobbe francamente che lo studio di Cassirer *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie* aveva il grande merito di liberare il neokantismo dal suo sonno dogmatico. Di contro nella nota finale del suo saggio, Cassirer esprime un giudizio altrettanto favorevole nei confronti del lavoro reichenbachiano: “ *l'indicazione di tale saggio profondo e acuto, che nell'impostazione metodica del problema coincide spesso col presente studio, anche se poi io non posso aderire per intero alle sue conclusioni, specialmente riguardo al rapporto della teoria della relatività con la critica gnoseologica kantiana.* “<sup>240</sup>.

Secondo Massimo Ferrari soltanto con il saggio di Cassirer l'interpretazione marburghese acquista la ricchezza di un contributo decisamente originale, e non soltanto perché il filosofo prende ormai in considerazione la teoria generale della relatività per inserirla in un quadro filosofico complessivo, ma soprattutto perché si deve a Cassirer quella versione estremamente liberalizzata del kantismo che rappresenta l'esito più importante dell'intera tradizione neokantiana europea del primo Novecento e che non casualmente fu assunta a punto di riferimento privilegiato, nel dibattito susseguitosi negli anni venti, da parte del nascente empirismo logico di Schlick e Reichenbach.

Questo è il commento che Reichenbach scrive nel suo articolo su *Lo stato attuale della discussione intorno alla teoria della relatività*: “ *Nella critica kantiana della conoscenza bisogna distinguere il metodo di formulare i problemi, il “ metodo*

---

<sup>240</sup> E.Cassirer, *Sulla teoria della relatività di Einstein*, op. cit.,p. 613

*trascendentale “ dalle risposte specifiche a questioni particolari: è possibile rifiutare queste senza abbandonare il metodo critico. Il merito di Cassirer sta nell'essersi mosso in questo senso e nel non aver evitato, come gli altri kantiani, la fisica moderna. “<sup>241</sup>.*

Il volume di Cassirer esprime il desiderio di dissociarsi da qualsivoglia preoccupazione di custodire una supposta ortodossia kantiana e in ciò si rivela maggiormente consapevole rispetto ai suoi maestri delle trasformazioni radicali intervenute nel *factum* della conoscenza scientifica della natura, di cui la filosofia critica vuole essere, secondo l'imputazione tipica di Cohen, la fondazione e la giustificazione sul piano trascendentale. La piena fedeltà al metodo trascendentale, la trasformazione del fatto in un problema, e il rapporto mai interrotto che l'idealismo logico deve intrattenere con la sfera fattuale richiedevano insomma, nello spirito genuino del neokantismo marburghese, l'allargamento in una direzione nuova della fondazione trascendentale della conoscenza scientifica: “ *Nei confronti del sistema classico della meccanica la teoria della relatività impone dunque un nuovo problema scientifico di fronte al quale deve di bel nuovo provarsi anche la filosofia critica. Se- come hanno messo ripetutamente in rilievo e chiarito e dimostrato da tutti i lati gli scritti kantiani di Hermann Cohen- Kant non voleva essere null'altro che il sistematore filosofico della scienza newtoniana- allora anche la sua dottrina non condivide forse necessariamente la sorte della fisica newtoniana ? E tutte le variazioni che questa subisce non devono forse ripercuotersi immediatamente sulla strutturazione dello stesso corpus fondamentale della filosofia critica ? Oppure i principi dell'Estetica*

<sup>241</sup> H. Reichenbach, *Lo stato attuale della discussione intorno alla teoria della relatività*, in *L'analisi filosofica della conoscenza scientifica*, p. 39

*trascendentale offrono fondamenta abbastanza vaste e solide per reggere ora l'edificio della fisica moderna come già quello della meccanica newtoniana ? Dalla risposta a questa domanda dipenderà il futuro sviluppo della critica gnoseologica. Dove risultasse che le più recenti concezioni fisiche dello spazio e del tempo abbiano finito col condurre tanto oltre Kant quanto oltre Newton, allora sarebbe giunto il momento di procedere oltre Kant in base alle stesse premesse kantiane. La critica della ragione pura infatti non mirava a inchiodare la conoscenza filosofica una volta per sempre su un determinato sistema dogmatico di concetti, ma ad aprirle il “ sentiero sicuro di una scienza “ nel quale si possono dare soste e pause sempre soltanto relative, non assolute. “<sup>242</sup>.*

Secondo Cassirer il piano dell'a priori deve allora perdere ogni connotato di immobile rigidità per subire una specifica curvatura storica e dinamica, poiché le funzioni della conoscenza non sono mai relegate in una dimensione sovrastorica ma sempre si intrecciano con lo sviluppo oggettivo del sapere scientifico e ne registrano tutte le forme particolari.

Cassirer è consapevole che “ *la concezione fondamentale dello spazio e del tempo sviluppata dalla teoria della relatività è e rimane una dottrina dello spazio e del tempo empirici, non dello spazio puro e del tempo puro.* “<sup>243</sup>. Su questo punto Cassirer non ammette disparità di opinione e segue la scia degli scritti di alcuni neokantiani a lui precedenti quali Natorp e Hönlswald. Questa è anche l'opinione di Kurt Sternberg, espressa in un saggio pubblicato nel 1920 sulle “ *Kant-Studien* “ che passando in rassegna i compiti imposti alla filosofia di orientamento neokantiano dalla situazione culturale della Germania post-bellica, sottolineava la

<sup>242</sup> E. Cassirer, *Sulla teoria della relatività di Einstein*, op.cit., p. 467

<sup>243</sup> E. Cassirer, *ibid.*, p. 545

necessità di far valere la *questio iuris* trascendentale anche nei confronti del nuovo *factum* scientifico rappresentato dalla teoria della relatività di Einstein, dalla quale erano venuti stimoli inattesi per un ampliamento del problema dei costituenti apriorici dell'esperienza.

Secondo Sternberg lo spirito della metodica critica non doveva essere abbandonato, quanto se mai rinnovato di fronte allo sviluppo delle scienze.

Secondo Cassirer anzi la trasformazione subita dalla teoria della misurazione empirica dello spazio e del tempo non potrà che “ *tracciare più nettamente i confini tra quanto compete alla critica puramente filosofica, “ trascendentale “, dei concetti di spazio e tempo, e quanto appartiene invece esclusivamente alle applicazioni particolari di questi concetti.* “<sup>244</sup>.

Seguendo Cassirer, “ *...la filosofia trascendentale non ha a che fare in prima linea con la realtà dello spazio e del tempo- sia che questa realtà venga intesa in senso metafisico o in senso fisico- bensì chiede il significato oggettivo di questi due concetti per la costruzione complessiva della nostra conoscenza empirica. Essa non considera più spazio e tempo come cose ma come “ fonti di conoscenza “. In essi non vede più degli oggetti indipendenti che sussistono in qualche modo e che noi si possa acchiappare con l'esperimento e l'osservazione, ma “ condizioni della possibilità dell'esperienza “, cioè condizioni dello stesso esperimento e della stessa osservazione, le quali da parte loro non si possono più intuire in forma di cose...Quando dunque Einstein indica come il tratto fondamentale della teoria della relatività il fatto che essa toglie allo spazio e al tempo “ l'ultimo residuo di oggettività fisica “, evidentemente qui la teoria non fa*

---

<sup>244</sup> E. Cassirer, *Sulla teoria della relatività di Einstein*, op. cit., p. 546



*che dare al punto di vista dell'idealismo critico l'applicazione e l'attuazione più risolte all'interno della stessa scienza empirica.* <sup>245</sup>. Secondo Cassirer l'abolizione dell'unità cosale di spazio e tempo non ne abolisce anche la rispettiva unità funzionale, anzi questa vi trova piuttosto la sua prima autentica giustificazione e il suo rafforzamento: “ *Ciò che ora rimane dell'idea dell' " unità del tempo " è solo questa univocità della corrispondenza fra inquadramenti diversi, non l'identità [ Einerleiheit ] dei valori metrici trovati nei diversi sistemi: ma in ciò non fa che esprimersi tanto più rigorosamente quella concezione di fondo per cui tale unità non è rappresentabile nella forma di un unico contenuto oggettivo, bensì esclusivamente nella forma di un sistema di relazioni valide.* <sup>246</sup>.

Come scrive Giulio Preti, curatore dell'edizione italiana del volume *Sostanza e funzione*, il significato filosofico della rivoluzione einsteiniana consiste nel processo di allontanamento dall'intuizione e di trasferimento nel regno del simbolo. Solo attraverso le due teorie della relatività si realizza il passaggio dal concetto-genere al concetto-funzione. In particolare Cassirer si riferisce alle intuizioni di spazio e di tempo ancora intesi come *res* nella fisica galileo-newtoniana e dei rapporti metrici ancora considerati come intuizioni di rapporti reali tra parti o zone di tali enti.

Un secondo aspetto rilevante che emerge dal saggio di Cassirer è costituito dall'analisi del rapporto tra geometria fisica ed esperienza che sarebbe diventato il punto centrale degli attacchi dell'empirismo logico all'a priori kantiano: “ *Nello svolgimento della teoria si scopre che le determinazioni metriche euclidee fin qui*

<sup>245</sup> E. Cassirer, *Sulla teoria della relatività di Einstein*, pp.548-550

<sup>246</sup> E. Cassirer, *op. cit.*, p. 553

*usate divengono insufficienti: la teoria può attuarsi solo se dal continuo euclideo, che era ancora alla base della teoria della relatività ristretta, passiamo a un continuo spazio-temporale non-euclideo a quattro dimensioni per esprimervi tutti i rapporti dei fenomeni....Ora la fisica dimostra non solo la possibilità ma anche la realtà effettuale della geometria non-euclidea;* <sup>247</sup>. Cassirer vede in questo aspetto della teoria la vera rivoluzione nel modo di pensare. Alla luce del rendimento straordinariamente funzionale che i concetti e i teoremi della geometria riemanniana hanno avuto nel fondare e costruire la teoria einsteiniana della gravitazione viene meno l'argomentazione di Poincaré sulla presunta posizione di eccezionalità ricoperta dalla geometria euclidea nell'applicazione al mondo fisico.

Di fronte a “ *quell'indissolubile correlazione di spazio, tempo e oggetti fisicamente reali, alla quale la teoria della relatività si attiene come al dato ultimo* “, il problema gnoseologico di Cassirer diviene “ *se fra i simboli di una geometria non-euclidea e il molteplice empirico degli “ eventi “ spazio-temporali si possano stabilire un riferimento e una corrispondenza univoci.* <sup>248</sup>. Come in Schlick e in Reichenbach il problema della conoscenza sembra focalizzarsi attorno alla coordinazione tra concetti e fatti.

Nella sua replica allo scritto di Cassirer, Schlick in *Interpretazione criticistica o empiristica della nuova fisica ?*, afferma che “ *i principi necessari al chiarimento filosofico e alla giustificazione di quella teoria [ la relatività ] potessero essere trattati assai meglio dalla teoria empiristica della conoscenza che da quella kantiana;* “. Secondo Schlick: “ *Ogni tentativo di conciliare Einstein con Kant*

<sup>247</sup> E. Cassirer, *Sulla teoria della relatività di Einstein*, p. 575

<sup>248</sup> E. Cassirer, *op. cit.*, p. 579

*deve scoprire, nella teoria della relatività, dei principi sintetici a priori; altrimenti esso è fin dall'inizio da considerarsi fallito dato che non è neppure riuscito a impostare correttamente il problema.* <sup>249</sup>. A detta del filosofo della scienza, Cassirer ha individuato questa condizione nel concetto di coincidenza dei “ punti-universo “ cui la teoria della relatività generale riconduce tutte le leggi di natura.

Così scrive Cassirer: *“ In realtà si può indicare esattamente il punto stesso in cui la teoria della relatività generale deve per forza ammettere implicitamente quella premessa metodica che in Kant porta il nome di “ intuizione pura “. Tale punto si trova nel concetto di “ coincidenza “ a cui la teoria in ultima analisi fa risalire il contenuto e la forma di tutte le leggi di natura.* <sup>250</sup>. Per Schlick invece tale coincidenza non può essere intesa come *“ l'essenza pura e il punto nodale delle proposizioni a priori, bensì rappresenti in primo luogo un'esperienza vissuta di tipo psicologico del coincidere,... ”*<sup>251</sup>.

Schlick individua una seconda risposta alla questione di che cosa resti ancora valido delle proposizioni sintetiche a priori relative allo spazio nell'affermazione di Cassirer che *“ l'a priori dello spazio che la critica gnoseologica afferma essere la condizione di ogni teoria fisica, non implica, come già si è visto, alcuna affermazione intorno a una determinata struttura particolare dello spazio, ma porta soltanto a quella funzione della spazialità in generale... ”*, ma neppure questo aspetto pare soddisfarlo.

---

<sup>249</sup> M. Schlick, *Interpretazione criticistica o empiristica della nuova fisica ?*, In *Forma e contenuto*, p. 155

<sup>250</sup> E. Cassirer, *Sulla teoria della relatività di Einstein*, p.556

<sup>251</sup> M. Schlick, *Interpretazione criticistica o empiristica della nuova fisica ?*, In *Forma e contenuto*, p. 155

La conclusione di Schlick contro Cassirer è netta: “ *Alla domanda se l'idealismo logico, ponderato con tanta profondità da Cassirer, sia riuscito a dimostrare la correttezza dell'affermazione che solo sulla base della dottrina critica della conoscenza della teoria la relatività potrebbe trovare la sua fondazione filosofica e la sua giustificazione- a tale domanda, dato quanto precede, noi non possiamo dare una risposta affermativa proprio per quanto concerne il punto decisivo: la dottrina dei giudizi sintetici a priori come principi costruttivi della scienza esatta della natura non riceve dalla nuova teoria alcuna conferma chiara.*

*Le spiegazioni di Cassirer non mi sembrano fornire una indicazione convincente su come possa essere sanata la ferita inferta all'originaria concezione kantiana dal crollo della fisica euclidea.* <sup>252</sup>.

Anche Reichenbach nel suo saggio *Lo stato attuale della discussione intorno alla teoria della relatività* muove una critica alla posizione di Cassirer. Il futuro animatore del Circolo di Berlino sostiene che scorporando la metrica dall'intuizione pura, come fa Cassirer, certi assiomi della teoria dello spazio e del tempo, gli assiomi metrici, vengono privati del loro carattere di giudizi sintetici a priori. Questa è la stringata argomentazione di Reichenbach: “ *Se la ragione può accettare tanto un giudizio che la sua negazione- e la geometria reimanniana, ad esempio accetta la negazione dall'assioma euclideo delle parallele- allora tale giudizio non può più essere considerato sintetico a priori.* “. In seguito, fa notare il filosofo berlinese che Kant, “ *mosse dalla fiducia nel fatto che esistono giudizi sintetici a priori e considerò la dimostrazione della applicabilità eterna di tali giudizi alla scienza la principale conquista del suo metodo trascendentale.* “. 

---

<sup>252</sup> M. Schlick, *Interpretazione criticistica o empiristica della nuova fisica ?*, In *Forma e contenuto*, p. 158

Per Reichenbach è normale concludere che con il venir meno di alcuni giudizi sintetici a priori “ *la certezza del metodo trascendentale è stata minata e non vi è garanzia che gli assiomi finora intatti avranno validità eterna.* ”<sup>253</sup>.

## Conclusione

In questa tesi ho cercato di delineare, prima dal punto di vista delle idee fisiche, quindi dal punto di vista epistemologico e infine dal punto di vista filosofico l'importanza delle due fondamentali teorie della relatività di Einstein.

Per utilizzare la felice espressione di Reichenbach, Einstein fu veramente un filosofo implicito perché attraverso le sue grandi teorie fisiche provocò una nuova rottura dell'immagine del mondo. Se le grandi svolte di Copernico e Newton produssero una eco maggiore, ciò è dovuto soltanto alla maggiore recepibilità dei loro risultati: tutti grosso modo intendevano che cosa significasse porre il Sole al centro del sistema planetario anziché la Terra, o collegare la forza che fa cadere una mela con il moto orbitale; meno facile risultava capire che i raggi di luce non si propaghino in linea retta o che gli orologi non segnino lo stesso tempo se posti in sistemi in moto prossimo alla velocità della luce.

La teoria della relatività speciale allargò la cornice della fisica classica e a sua volta la teoria della relatività generale allargò la cornice della teoria della relatività

---

<sup>253</sup> H. Reichenbach, *Lo stato attuale della discussione intorno alla teoria della relatività*, in *L'analisi filosofica della conoscenza scientifica*, p.43

speciale. Einstein fu un continuatore e si dichiarò sempre appartenente alla linea della fisica del campo di Faraday e Maxwell, ma i suoi risultati furono rivoluzionari perché scalzarono le acquisite concezioni dello spazio, del tempo, dell'inerzia e della gravità. Tuttavia la sua costante ricerca di un'ampliamento della cornice, vale a dire di una sempre più grande gamma di fenomeni spiegabili sotto un'unica grande teoria, non lo portò a rigettare le teorie superate, ma ad inglobarle come casi ristretti e limitati della teoria generale. Einstein innovava e allo stesso tempo conservava.

Per quanto concerne la filosofia, a mio modo di vedere, le scoperte di Einstein costituiscono un duro colpo alla dottrina kantiana della conoscenza, per oltre un secolo modello privilegiato ed obbligato per quanti volessero confrontarsi circa le fondamenta del nostro sapere. La filosofia kantiana aveva istituito un rapporto privilegiato con la fisica newtoniana ed era innegabile che venendo meno quest'ultima, ad opera della fisica einsteiniana, anche la prima ne avrebbe patito le conseguenze. Il sintetico a priori, formula per identificare una conoscenza universalmente e perennemente valida per ogni essere umano, si rivela innaccettabile perché i suoi contenuti ritenuti immodificabili e perennemente veri, vengono sovvertiti. La dottrina kantiana dei giudizi sintetici a priori, a mio avviso, perde definitivamente le sue pretese conoscitive perché la trama della natura si rivela continuamente rivedibile alla luce di nuove osservazioni: non si può avere una conoscenza sintetica ( dove il predicato aggiunga qualcosa al soggetto ) prescindendo dall' avere contatto con il mondo fisico. Le scienze esatte diventano l'unica modalità di produrre conoscenza e alla filosofia non resta che il compito di riflettere su di esse e sui loro risultati.

La filosofia come dottrina della conoscenza viene spodestata dall'imponente avanzamento delle scienze particolari che contrappongono risultati concreti, misurabili e riproducibili in laboratorio ai verbosi apparati concettuali delle filosofie. Il Novecento può essere visto come il secolo del definitivo tramonto di alcune fondamentali pretese della gnoseologia che con Kant, sulla scia di Locke, era diventata un asse portante della riflessione filosofica.

Le tematiche legate allo spazio e al tempo non sono più campo esclusivo ad appannaggio della filosofia ma diventano materia di studio delle scienze particolari che obbediscono ai dettami del metodo scientifico ipotetico-sperimentale. Di fronte agli evidenti risultati che queste discipline producono alla filosofia non resta che farsi da parte e contemplare l'opera acquisita.

# **Bibliografia**

## **Opere di Einstein**

- A. Einstein, *Relatività: esposizione divulgativa*, Bollati Boringhieri, Torino, 1967
- A. Einstein, *Idee e opinioni*, Schwartz, Milano, 1958
- A. Einstein e L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*, Bollati Boringhieri, Torino, 1965

## **Altre opere in ordine alfabetico per autore**

- S. Bergia, *Einstein, quanti e relatività, una svolta nella fisica teorica*, Milano, Le Scienze 1998
- M. Born, *La sintesi einsteiniana*, Bollati Boringhieri, Torino, 1969
- R. Carnap, *I fondamenti filosofici della fisica*, Il Saggiatore, Milano, 1971
- E. Cassirer, *Sostanza e funzione, Sulla teoria della relatività di Einstein*, La nuova Italia editrice, Firenze, 1973
- A. D'Elia, *Ernst Mach*, La nuova Italia editrice, Firenze, 1971
- M. Ferrari, *Cassirer, Schlick e l'interpretazione "kantiana" della teoria della relatività*, in *Rivista di filosofia*/ vol. LXXXIII, n. 2, agosto 1991
- M. Ferrari, *Il neocriticismo tedesco e la teoria della relatività*, in *Rivista di filosofia*/ vol LXXXVI, n. 2, agosto 1995



P. Frank, *La scienza moderna e la sua filosofia*, Il Mulino, Bologna, 1973

P. Frank, *Einstein*, Garzanti, Milano, 1949

B. Greene, *L'universo elegante*, Einaudi, Torino, 2000

H. Hahn, O. Neurath, R. Carnap, *La concezione scientifica del mondo*, Laterza, Roma-Bari, 1979

M.B. Hesse, *Forze e campi*, Feltrinelli, Milano, 1974

G. Holton, *L'intelligenza scientifica*, Armando Armando editore, Roma, 1984

G. Holton, *La lezione di Einstein*, Feltrinelli, Milano, 1997

G. Holton, *L'immaginazione scientifica*, Einaudi, Torino, 1983

G. Holton, *Le responsabilità della scienza*, Editori Laterza, Roma-Bari, 1993

L. Infeld, *Albert Einstein*, Einaudi, Torino, 1952

A. Koyré, *Studi galileiani*, Einaudi, Torino, 1976

A. Koyré, *Studi newtoniani*, Einaudi, Torino, 1972

A. Koyré, *Dal mondo chiuso all'universo infinito*, Feltrinelli, Milano, 1970

A. Koyré, *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, Einaudi, Torino, 1967

T.S. Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Einaudi, Torino, 1969

E. Mach, *La Meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, Bollati Boringhieri, Torino 1977

A. Pais, << Sottile è il Signore...>>, Bollati Boringhieri, Torino, 1986

P. Parrini, *L'empirismo logico*, Carocci editore, Roma, 2002

P. Parrini, *Geometria e fisica dall'ottocento a oggi*, Loescher editore, 1979

H. Poincaré, *La scienza e l'ipotesi*, La nuova Italia, Firenze, 1950

H. Poincaré, *Il valore della scienza*, La nuova Italia editrice, Firenze, 1994.

- H. Reichenbach, *L'analisi filosofica della conoscenza scientifica*, Marsilio editori, Padova 1968
- H. Reichenbach, *Filosofia dello spazio e del tempo*, Feltrinelli editore, Milano, 1977
- H. Reichenbach, *Relatività e conoscenza a priori*, Laterza, Roma-Bari, 1984
- H. Reichenbach, *Da Copernico a Einstein*, Laterza, Roma-Bari, 1985
- H. Reichenbach, *L'empirismo logico e la disgregazione dell'a priori*, in *Filosofia scientifica ed empirismo logico* a cura di Gaspare Polizzi, Edizioni Unicopoli Milano 1993
- P.A. Schilpp ( a cura di ), *Albert Einstein, scienziato e filosofo*, Edizioni Scientifiche Einaudi, Torino, 1958
- M. Schlick, *Teoria generale della conoscenza*, Franco Angeli libri, Milano, 1986
- M. Schlick, *Tra realismo e neopositivismo*, Società editrice il Mulino, Bologna 1974
- M. Schlick, *Forma e contenuto*, Bollati Boringhieri, Torino, 1987
- M. Schlick, *Spazio e tempo nella fisica contemporanea*, Bibliopolis, Napoli 1983
- M. Schlick, *The philosophical significance of the principle of relativity*, in *Philosophical papers ( 1909-1922 )*, edited by H.L. Mulder and Barbara F.B. Van de Velde-Schlick, translated by P. Heath, Dordrecht, 1979





