

# DAI PARADIGMI AL PLURALISMO NEI FONDAMENTI DELLA FISICA: UNA NUOVA STORIA PLURILINEARE

Antonino Drago  
Università "Federico II" di Napoli – [drago@unina.it](mailto:drago@unina.it)

Codice campo modificato

**Riassunto.** Nel secolo scorso la storiografia della fisica è diventata interpretativa. Essa però ha posto dei problemi fondamentali. Koyré: se la matematica in fisica possa essere idealistica; Kuhn: se e come le nozioni di paradigma, anomalia, crisi, rivoluzione scientifica e incommensurabilità siano importanti per una piena comprensione della fisica. Da parte loro i filosofi della scienza hanno suggerito come molto importante (in vista di una unificazione di tutta la scienza) il concetto di riduzione tra due teorie. Esso ha generato un grande dibattito; nel quale i fisici hanno sottolineato il caso della riduzione compiuta tramite il limite di un parametro fondamentale della teoria riducente. Ma Berry, Rohrlich e Batterman hanno evidenziato che questa riduzione è impossibile quando il limite è singolare; come quelli tra ad es. ottica fisica e ottica geometrica, meccanica statistica e termodinamica, meccanica quantistica e meccanica classica. Quindi l'attribuire una teoria finale ad un'operazione di limite singolare è far uso di matematica idealistica, ancor più di quanto aveva suggerito Koyré a proposito della matematica di singole leggi. Inoltre un limite singolare tra due teorie fornisce una definizione matematica di loro incommensurabilità; quindi, cade la tradizionale visione del progresso della fisica come una serie di cerchi concentrici di teorie sempre compatibili con quelle precedenti; come pure la visione storica di Kuhn di un paradigma successivo all'altro, ognuno unico al suo tempo. Come ha suggerito nel 1988 Rohrlich, in ogni tempo c'è una pluralità di fondamenti delle teorie; la storia della fisica è perciò plurilineare. Ho chiarito questo pluralismo di fondamenti suggerendo una precisa definizione di quattro modelli di teoria scientifica. In definitiva, nel secolo scorso la collaborazione a distanza di storici, filosofi e fisici ha portato ad una nuova visione della storia della fisica e, per la prima volta, ad una indicazione dei suoi fondamenti.

**Abstract.** Summary. In the last century, the historiography of physics was improved to be interpretative in nature. However, it posed fundamental problems. Koyré: whether in physics mathematics can be idealistic; Kuhn: whether and how the notions of paradigm, anomaly, crisis, scientific revolution and incommensurability are important for a full understanding of the history of physics. For their part, the philosophers of science have suggested a program for unifying all science, in which the concept of reduction between two theories plays a crucial role. A great debate tried to define this concept; the physicists have underlined the case of reduction through the limit of a fundamental parameter of the reducing theory. But Berry, Rohrlich and Batterman pointed out that this reduction is impossible when the limit is singular; such as between e.g. physical optics and geometric optics, statistical mechanics and thermodynamics, quantum mechanics and classical mechanics, etc. Hence, the attribution of a final theory to a singular limit operation is to make use of idealistic mathematics more than what Koyré had suggested with regard to the idealist mathematics of a single laws. Furthermore, a singular limit between two theories provides a mathematical definition of their incommensurability; therefore, the traditional view of the progress of physics, as a series of concentric circles of theories always compatible with the previous ones, fails; as well as Kuhn's historical vision of a paradigm following another one, each unique in its time. As Rohrlich suggested in 1988, at each time there exists a plurality of foundations of theories and the history of physics becomes plurilinear. I made clear it by suggesting a clear definition of four models of scientific theory. Ultimately, in the last century the long-distance collaboration of historians, philosophers and physicists has led to a new vision of the history of physics and, for the first time, a definition of its foundations

**Keywords:** New historiography of physics. Reduction between two scientific theories, The variety of definitions. Limit reduction. Incommensurability. Pluralism in science. Model of scientific theory.

## 1. Introduzione

Nel sec. XX c'è stato un implicito movimento di convergenza tra gli storici della fisica, che hanno cominciato ad interpretare la sua storia utilizzando categorie anche filosofiche, e i filosofi della fisica, che hanno cominciato ad interpretare formalmente teorie scientifiche storicamente date. Nel seguito confronterò i loro contributi che alla fine hanno portato ad una nuova visione della storia della fisica e alla scoperta dei suoi fondamenti.

Nel par. 2 presenterò una rapida rassegna della passata storia della fisica del XX secolo, allorché è nata la “nuova storiografia della fisica”; in particolare ricorderò: Alexander Koyré, Thomas S. Kuhn e Paul K. Feyerabend. Nel paragrafo seguente esaminerò come la passata filosofia della fisica ha incontrato e discusso il problema di come definire una riduzione tra due teorie. Questo concetto è di grande importanza perché potrebbe collegare tutte le teorie secondo una loro catena o una loro rete. Nel par. 4 fornirò una rapida retrospettiva storica delle proposte di riduzione tra teorie di fisica classica; essa mostra che questo concetto può essere applicato a poche teorie fisiche. Nel par. 5 riassumerò brevemente il dibattito avvenuto sulla definizione di questo concetto, che però è rimasto poco chiarito. Nei par. 6 esaminerò il concetto di riduzione al limite, che, utilizzando la matematica, prometteva di specificare al meglio la riduzione di due teorie e che invece ha posto ulteriori problemi (la singolarità del limite) alla applicabilità del concetto di riduzione, così come evidenziato da Rohrlich già nel 1988. Nel paragrafo 7 presenterò le più importanti proposte di riduzione al limite, che risulteranno quasi tutte con limiti singolari. Sulla base delle riduzioni impossibili nel par. 8 trarrò tutte le conseguenze per la storia e per la filosofia della fisica, per prima quella proposta da Rohrlich: il pluralismo nei fondamenti delle teorie fisiche. Nel par. 9 ricorderò che miei precedenti lavori hanno [precisato questo pluralismo secondo quattro modelli di teoria scientifica che sono stati applicati per ottenere sia una nuova interpretazione della storia delle passate teorie fisiche sia una nuova didattica delle scuole superiori e dell'università.](#)

## 2. La “nuova storiografia della fisica”

La storiografia della fisica ha compiuto un lungo cammino. E' iniziata tre secoli fa come semplice cronistoria delle scoperte e della vita degli scienziati più importanti. Negli anni '30 del secolo scorso è nata la “nuova storiografia” della fisica, quella che è *interpretativa* della storia della fisica mediante categorie anche filosofiche. Essa è stata inaugurata nel 1939 dagli *Studi Galileiani* di Koyré; poi nel 1969 *La Struttura delle rivoluzioni scientifiche* di Kuhn le ha dato celebrità nel mondo accademico ed anche nel mondo della cultura in generale.

Il primo studioso ha posto come fondamentali: la concezione del mondo di quel tempo in esame (in particolare le idee della cultura dominante) e il rapporto fisica-matematica. Il secondo ha utilizzato le categorie: scienza normale, paradigma, anomalie, incommensurabilità, crisi, rivoluzione scientifica, *Gestalt*)

Koyré ha ottenuto una interpretazione della nascita della scienza moderna e Kuhn una visione complessiva, vista per unti salienti, della fisica classica. Ma la nuova storia della fisica si è arrestata sul caso della rivoluzione del corpo nero, che è risultato irriducibile alle nuove categorie di Kuhn. Cosicché la nuova storiografia, avendo lasciato inspiegate la relatività ristretta e la meccanica quantistica, ha perso di rilevanza presso i fisici, perché essi non hanno ricevuto alcuna spiegazione del passaggio traumatico alla moderna fisica teorica.

Comunque la nuova storiografia ha il grande merito di aver posto dei problemi fondamentali, anche se lasciati irrisolti; essi possono essere così sintetizzati.

1) Koyré: in Galilei la matematica sarebbe platonica. E' ovvio chiedersi se sia mai possibile che la fisica teorica, basata su leggi strettamente sperimentali, si basi poi su idealizzazioni matematiche.

2) Kuhn: che significano concretamente nei vari periodi storici le sue categorie, che si sono dimostrate molto suggestive nella sua rapida interpretazione di tutta la storia della fisica classica? In particolare, che significa con precisione sia il concetto di paradigma, sia quello (suggerito anche da Feyerabend) di incommensurabilità di due teorie?

## 3. I filosofi della fisica: la riduzione tra teorie

Nel 1902 David Hilbert lanciò il programma di rifondare tutte le teorie, comprese quelle fisiche mediante la loro assiomatizzare (problema n. 6 dei suoi celebri 23 problemi). La fama di Hilbert - dovuta sia alla sua nuova metodologia (assiomatizzazione formale), che sembrava poter risolvere il problema millenario dei fondamenti della scienza, sia ai suoi molto importanti contributi ai

progressi scientifici del 20° secolo - ha generato una generale aspettativa che entro pochi anni si sarebbero trovate le soluzioni di tutti i suoi problemi fondamentali, compreso il problema dell'assiomatizzare ogni teoria scientifica. Anticipando la realizzazione di questo grandioso programma, la riduzione tra due di teorie sembrava richiedere il semplice riconoscimento di una relazione deduttiva tra i due insiemi di assiomi delle due teorie in questione. Nacque così un'aspettativa generale che tutte le teorie scientifiche sarebbero state unificate attraverso riduzioni deduttive.

Tuttavia gli studiosi successivi hanno riconosciuto che una teoria sperimentale non può essere assiomatizzata completamente, perché nessun assioma fornisce le connessioni tra gli assunti teorici e i dati sperimentali, dato che questi ultimi chiaramente non possono essere formalizzati.<sup>1</sup> Inoltre nel 1931 è stato dimostrato che il programma di Hilbert non è realizzabile neanche per le teorie matematiche (teoremi di Goedel). Ma la maggior parte dei matematici, ritenendo che non ci siano alternative, continua su quella linea.

Inoltre, all'inizio del secolo scorso un nuovo movimento di filosofia della scienza sembrò rivoluzionare la concezione della fisica. I neo-positivisti logici proponevano di ricostruire ogni teoria scientifica sulla base dei dati sperimentali interpretati mediante la sola logica matematica (quella classica, ovviamente). Cosicché hanno lanciato il progetto di una "Scienza Unificata" sui loro criteri di analisi. Si noti la seguente dichiarazione del leader di questo gruppo di studiosi:

... la scienza è un'unità, [tale] che tutte le affermazioni empiriche possono essere espresse in una singola lingua, tutti gli stati di cose sono di un tipo e sono conosciuti con lo stesso metodo. (Carnap 1934, p. 32)

Rappresentando lo stesso metodo di comprensione della realtà fisica, le teorie scientifiche dovrebbero essere necessariamente riducibili tra loro. Ma, poco dopo aver lanciato il loro programma, i neopositivisti hanno ammesso di aver sottovalutato le difficoltà che dovevano essere superate per realizzare il loro progetto, né poi ne hanno suggerito una riformulazione. Ma tra la maggior parte degli scienziati il loro progetto è rimasto come linea di tendenza, che ancora propone la sue tesi in maniera autorevole:

Le seguenti due tesi [...] formano almeno parte di quanto asserisce il riduzionismo:

- (1) L'occorrenza di ogni singolo fenomeno che una scienza a livello più alto può spiegare può essere spiegata anche dalla scienza a livello inferiore.
- (2) Ogni legge della scienza al livello più alto può essere spiegata da leggi della scienza a livello inferiore.

Il "può" in queste tesi deve essere inteso "può in linea di principio", non "può in pratica". Ora la scienza non è completa; ci sono tante cose che la fisica attuale non riesce a dirci sulle società, menti ed esseri viventi. Ma non per questo la scienza dovrebbe essere limitata [...] (Oppenheim Putnam 1958). (Sober 1999, p. 543)

La definizione più accreditata di riduzione tra due teorie è stata quella di un neo-positivista logico, Ernst Nagel (1961): egli le vede come due vocabolari di concetti e leggi, i quali potrebbero essere deducibili uno dall'altro. Nel caso di disomogeneità delle teorie (cioè, alcuni concetti della teoria ridotta  $T'$  mancano nella teoria riducente  $T$ ), si aggiungono leggi-ponte di collegamento.

L'obiezione principale è stata quella di Feyerabend (1962): di regola le teorie sono fra loro incommensurabili perché i loro concetti comuni hanno variazioni radicali di significato; ogni aggiustamento delle due teorie rivolto ad ottenere la riducibilità è destinato a contrastare con la natura sperimentale delle teorie. Quindi le riduzioni, intese in maniera non idealistica, sono solo delle eccezioni. Ma il concetto di incommensurabilità non è stato chiarito dagli storici della scienza. Cosicché, invece di una collaborazione tra filosofi della scienza, che interpretavano teorie storicamente date, e gli storici della scienza che, per interpretare la loro storia, utilizzavano categorie filosofiche, è nata una conflittualità irrisolta sul concetto di incommensurabilità, rifiutato dai primi e molto problematico per i secondi.

<sup>1</sup> Il fisico-filosofo Mario Bunge (1972) si è ostinato in questo approccio più di altri. Nella matematica attuale, i logici matematici applicano una nozione di riduzione tra teorie matematiche secondo l'approccio della teoria della dimostrazione (ad esempio, vedi Hofweber 2000).

Da parte loro, gli scienziati sono rimasti affascinati dalla prospettiva riduzionista di una scienza unitaria, perché comporta il giungere ad una rete di teorie, che a coppie sono in collegamento (almeno parzialmente) deduttivo; e che alimenta la speranza di ricavare una (parte di una) teoria da un'altra.

Anche attualmente la maggior parte dei fisici mantiene una tensione verso l'unità; tutte le teorie dovrebbero essere ridotte in qualche modo a una sola: "la teoria di tutto". In più è nato un atteggiamento filosofico, il fisicalismo, che concepisce la intera scienza come un serie di livelli, dei quali il fondamentale è quello della fisica, perché questa è la teoria sperimentale che si riferisce agli enti più elementari ed è più consolidata. Un recente programma filosofico di questo tipo è quello di Oppenheim e Putnam (1958).

Così, sin dall'inizio, la discussione sui temi della riduzione è stata legata all'unificazione scientifica, all'epistemologia delle relazioni teoriche e alla pratica scientifica. (Van Riel 2014, p. 154).

#### **4. Un bilancio storico delle possibili riduzioni tra teorie fisiche**

Nel seguito considererò solo la riduzione di teorie completate; altri casi (parti di teorie, gruppi di leggi, concezioni), che purtroppo sono considerati da vari studiosi che discutono il tema della riduzione, renderebbero l'analisi imprecisa a priori.

Nella storia della fisica il primo caso di riduzione di una teoria all'altra è stato quello tra l'ottica geometrica la meccanica di Newton. Concependo i raggi luminosi come traiettorie di quanti materiali, egli ha interpretato le leggi di riflessione, rifrazione e persino diffrazione attraverso le leggi della meccanica; così con Newton l'ottica geometrica è diventata una parte della teoria meccanica. Alcuni decenni dopo l'equazione differenziale delle onde (1750) interpretò tutti i fenomeni di vibrazione riguardanti l'acustica come oscillazioni meccaniche dei corpi. Quindi la fisica dei fenomeni percepiti dai tre principali sensi umani, tatto, vista e udito, era stata tutta interpretata matematicamente dalla meccanica di Newton. La forza più rappresentativa, cioè la gravità, fu da lui dichiarata di natura universale, cioè che agisce, in linea di principio, in tutti i tipi di fenomeni, compresi quelli chimici. Per queste ragioni durante il XVIII secolo, i fisici concepirono la fisica teorica come un'unica teoria fisica, la meccanica (portando anche alla nascita di una metafisica meccanicistica).

Tuttavia, alla fine del XVIII secolo emersero teorie sorprendenti. La chimica classica nacque quando Lavoisier mise da parte la forza gravitazionale di Newton. Inoltre, nei primi anni del 1800 i fenomeni di polarizzazione e interferenza negarono l'ipotesi di Newton sulla costituzione materiale della luce a quanti materiali e quindi anche la suddetta riduzione tra le due teorie. Alcuni decenni dopo nacquero la termodinamica e l'elettromagnetismo; le quali avevano concetti fondamentali e leggi essenzialmente diversi da quelli della Meccanica. La precedente unità della fisica apparve perduta.

Tuttavia, l'elettromagnetismo di Maxwell incluse come suo caso particolare la ottica fisica, che a sua volta appariva riducibile all'ottica geometrica nel caso che le sue onde venivano considerate per i raggi dei loro fronti. Inoltre la concezione della teoria meccanica come modello universale per l'intera fisica teorica persistette. Nella seconda metà del XIX secolo Kelvin sosteneva con forza una spiegazione di ogni fenomeno non meccanico attraverso un opportuno modello meccanico; e Boltzmann voleva eliminare la termodinamica riducendola alla sua meccanica statistica.

Ma nel 1900, la nascita delle prime due teorie fisiche moderne, la relatività speciale e la meccanica quantistica (QM) - che hanno nozioni di base così diverse tra loro e così differenti da quelle della meccanica classica - ha reso la fisica teorica un'impresa teorica ancor più marcatamente pluralista perché, con le tante sue nuove teorie, va oltre la divaricazione di quelle due prime teorie moderne.

Comunque, negli stessi decenni un importante caso di riduzione fu rivendicato dalla maggior parte dei fisici. La serie di elementi di Mendeleev fu interpretata dalla teoria dell'atomo di Bohr e

poi dai successivi progressi teorici e computazionali della QM.<sup>2</sup> Questa riduzione diede una notevole importanza al "progetto della Scienza Unificata" dei neopositivisti logici di quel tempo. Per di più la relatività ristretta, apparentemente "rivoluzionaria" rispetto alla meccanica classica, sembrò potersi ridurre alla seconda per il limite di  $c \rightarrow \infty$ . Mentre poi il principio di corrispondenza di Bohr e infine calcoli più precisi per  $h \rightarrow 0$  sembrarono ridurre la meccanica quantistica alla meccanica classica.

Quindi ci sono stati casi di false riduzioni (di Newton, di Kelvin). Inoltre la riduzione della termodinamica alla meccanica statistica è stata fortemente contestata. Le altre riduzioni comunemente considerate riuscite sono poche. Tutto ciò suggerisce che nella fisica teorica il dibattito sulla riduzione, sebbene persista da tre secoli, può fare riferimento ad un numero ridotto di casi. Come dice un autorevole studioso:

le riduzioni nelle scienze fisiche ... sono rare e dipendono da requisiti speciali". (Schaffner 2006, p. 378)

Più in generale su tutta la scienza, un autore ha scritto:

Se si cercano esempi di riduzione dalla storia della scienza, le riduzioni strettamente derivazionali sono poche e lontane tra loro. (Sklar 1967, p. 110)<sup>3</sup>

Per cui

l'entusiasmo diffuso per la riduzione può difficilmente essere una semplice induzione dai suoi successi passati. (Fodor 1974, p. 97)

D'altra parte è sorta una opposizione al riduzionismo. L'articolo più famoso è quello di Philip Anderson del 1972, che contrapponeva le simmetrie rotte al riduzionismo, almeno nel suo campo della fisica dei molti corpi:

La ipotesi [ri]costruzionista [dei riduzionisti] si scontra con le due difficoltà appaiate, quelle della scala e della complessità. Risulta che il complesso di aggregati grandi e complessi di particelle elementari non deve essere inteso nei termini di una semplice estrapolazione delle proprietà di poche particelle. Invece ad ogni livello di complessità appaiono proprietà interamente nuove e la comprensione del nuovo comportamento richiede una ricerca che è di natura fondamentale come ogni altra ricerca.[...] Ad ogni livello sono necessarie leggi concetti e generalizzazioni interamente nuovi, i quali richiedono ispirazione e creatività come ad ogni altro livello. (Anderson 1972, p. 393)

Quindi la situazione attuale è molto lontana dall'obiettivo dell'unificazione della scienza. In questa situazione di incertezza è quindi di cruciale importanza chiarire la definizione di riduzione cui fare riferimento.

## 5. Il dibattito sulla definizione di riduzione

Sull'argomento della definizione precisa di riduzione è nata una grande letteratura di proposte, varianti e critiche.

L'idea che la realtà sia composta da particelle fisiche sembra portare direttamente alla riduzione della chimica classica alla meccanica quantistica. E' questo un esempio di riduzione *ontologica*, quella che si accontenta di spiegare una teoria riducendone i componenti a quelli elementari della teoria riducente. Di fatto il dibattito sulla riducibilità delle due teorie suddette è ancora acceso e non sembra pendere dalla parte affermativa. (Drago 2020) Un concetto più generale è quello di riduzione *epistemologica*, nella quale le teorie confrontate vengono considerate con ben di più che i costituenti materiali: astrazioni, concetti, leggi, tecniche matematiche, equazioni differenziali e loro soluzioni, ecc. Però la difficoltà di questa definizione di riduzione è che essa è troppo ampia per essere operativa.

I filosofi neo-positivisti logici, che speravano di descrivere ogni teoria scientifica con i dati sperimentali più la logica (classica), vedevano come riduzione ideale quella tra teorie omogenee per

<sup>2</sup> La chimica fisica, che alcuni studiosi considerano un caso di riduzione della chimica classica alla termodinamica, a io parere è una teoria autonoma, perché, ad esempio, non ha mezzi per indicare e spiegare la Tavola di Mendeleev.

<sup>3</sup> Un sostenitore dell'anti-riduzionismo della chimica alla MQ, Hans Primas, è andato oltre: "Non esiste un solo esempio fisicamente fondato e non banale per la riduzione della teoria nel senso di [...] Nagel". (1988, p. 83)

cui tutte le leggi della teoria T' sono deducibili da quelle della teoria T. Ma (a parte la completezza della descrizione neo-positivista di una teoria fisica) non esistono casi storici di questo genere. All'inizio del dibattito si presentava il caso della legge galileiana della caduta dei gravi, ridotta per deduzione logica e matematica dalla meccanica di Newton; ma (a parte che la legge di Galilei non è una teoria intera) poi Feyerabend fece notare che per Newton la accelerazione di gravità è (leggermente) variabile, invece che costante come supponeva Galilei.

Perciò fu necessario considerare coppie di teorie disomogenee. La più famosa definizione di riduzione è quella del neo-positivista Nagel (1961, p. 338; per un aggiornamento vedasi Sarkar 2015 e van Riel e van Gulick 2019): la quale colma la distanza tra le due teorie introducendo "leggi ponte" tra i termini di T' manchevoli in T, ad es. la legge per cui la corrente elettrica è un flusso di elettroni; oppure quella per recuperare la temperatura termodinamica nella meccanica statistica, la quale può definirla solo appositamente come la media della energia cinetica delle particelle, cioè con una legge ponte.

Ma anche questo non basta per ridurre due teorie tra loro. Ad es., c'è il caso della multi referenzialità: ad una situazione macroscopica in termodinamica corrispondono moltissime situazioni microscopiche (ad esempio quelle microscopiche corrispondenti alla legge  $S=k \ln P$ ).

Allora gli studiosi hanno suggerito molte varianti della definizione di Nagel, basandosi o su diminuzioni della condizione della deducibilità (ad es. solo spiegabilità descrittiva, omeomorfismo, analogia) o sulla introduzione di una opportuna teoria intermedia tra le due in esame.<sup>4</sup> Sin dall'inizio uno studioso ha osservato come sia grande questa varietà di significati di "riduzione":

le riduzioni sono un insieme molto diversificato di elementi [... perché] sono risultati scientifici distintivi di tipi molto diversi. Alcune sono omogenee, altre disomogenee. Alcune sono "totali", altre semplicemente "parziali"; alcune sono semplici derivazioni, altre elaborano identificazioni. Peggio ancora, alcune forniscono una conferma più profonda della teoria ridotta, mentre altre servono a eliminare la teoria ridotta come uno scomodo concorrente per lo status di verità scientifica nell'atto stesso di ridurla a un'altra teoria accettata ... (Sklar 1967, p. 124)

E' un fatto che oggi, dopo sessant'anni di inteso dibattito, non esiste una definizione comune di riduzione, né ce n'è una dominante. Anzi, la varietà di definizioni si è ampliata da quando si è allargato lo sguardo alle "teorie" di: biologia, neurofisiologia, scienze cognitive, teoria della mente, ecc., secondo una concezione fiscalista che vede tutte le teorie disposte su vari livelli, dei quali la teoria fisica sarebbe quella riducente tutte le altre. Con ciò la indeterminazione del concetto di riduzione, che ora vuole fare riferimento a "teorie" così disparate, è aumentata. Un autore ha concluso: "Il racconto unitario [della definizione iniziale] della riduzione si è dissolto, lasciando una disunione polifonica". (Wimsatt 2006, p. 447)

## 6. La riduzione al limite, ovvero la riduzione dei fisici: Rohrlich

Dal tempo di Newton che iniziò la teoria cinetica dei gas, i fisici, forti del sostegno della matematica alle loro teorie, hanno proceduto a utilizzare il concetto di riduzione tra teorie in termini solamente matematici, cioè mediante un limite; esso dà una chance in più della sola deduzione logica tra assiomi ed eventualmente quella matematica diretta tra le formule delle leggi. I più noti esempi storici sono i seguenti: Ottica fisica (ed Elettromagnetismo) e ottica geometrica; Meccanica statistica e Termodinamica; Relatività ristretta e Meccanica classica; Meccanica quantistica e Meccanica classica.

---

<sup>4</sup> I problemi sono molto semplificati se si definisce una teoria alla Suppes, mediante un predicato che rappresenta la teoria con un modello di teoria degli insiemi, applicato a modelli, ancora di teoria degli insiemi, delle situazioni sperimentali più rappresentative. In questo sistema artificiale si riescono a stabilire con una certa facilità riduzioni (pur di accontentarsi di una loro definizione approssimativa; Niebergall 2002) e infine stabilire una rete completa di teorie fisiche. (Balzer, Moulines, Sneed, 1986). Ultimamente si è cercato di definire una distanza topologica tra teorie intese in senso strutturalista e così ottenere definizioni più precise (e anche ampie) di riduzione. (Gutschmidt 2014)

Nel dibattito sul concetto di riduzione già nel 1973 Nickles ha sottolineato che i fisici riducono teorie tramite il passaggio al limite di un parametro base. Si può dire che egli abbia introdotto lo schema **R**:

$$\lim, \text{ per } \varepsilon \rightarrow 0, \text{ di } T = T';$$

ad es., dalla meccanica quantistica alla meccanica classica col limite  $h \rightarrow 0$ .<sup>5</sup>

Su questo tema è stato importante l'intervento di un fisico autorevole. (Rohrlich 1988)

Sulla base della sua conoscenza di una grande varietà di teorie fisiche, classiche e moderne egli parte da una considerazione cosmologica. Tutto il mondo è nato da un big-bang e poi si è specializzato in miriadi di oggetti diversi (particelle, molecole, organismi viventi, ecc.), che l'uomo ha concepito mediante diversi concetti (derivati da astrazioni ed approssimazioni rispetto alla realtà), che poi ha anche collegato in teorie particolari e differenti tra loro. Cioè, le specializzazioni sono nate secondo diversi livelli cognitivi, i quali in più agli specifici oggetti danno significati particolari e diverse ontologie. Dunque, nonostante tutte queste forme e tipi di descrizione, c'è una sostanziale unità dovuta alla evoluzione storica di tutto da pochi elementi primordiali; però questa unità è solo cosmologica; da essa la storia dell'universo ha dato origine di fatto ad un pluralismo anche ontologico, quale esso ci risulta nel nostro stadio di evoluzione del mondo. Quindi no al monismo ontologico, come vorrebbe il riduzionismo ad oltranza; sì ad un monismo solo in linea di principio ultimo.

Secondo Rohrlich, per definire una riduzione innanzitutto occorre escludere ipotesi, concezioni e modelli. In più occorre distinguere tre tipi di teorie: accettata, in quanto sostanzialmente concorde con i dati sperimentali; matura, in quanto verificata da una pratica sperimentale e teorica, e infine stabilizzata, in quanto se ne conoscono i limiti di validità. Egli giustamente esclude il primo tipo di teoria, perché, essendo instabile, non è un valido oggetto di studio. Inoltre riconosce in una teoria i seguenti elementi: 1) la struttura matematica e logica, **M**; 2) il dominio di validità, **D**; 3) il linguaggio, sia informale che formale, **L**; 4) le componenti epistemiche (concetti, ecc.), **E**; 5) le componenti ontologiche (la semantica), **O**. Quindi la matematica di una teoria fisica è molto importante, perché è la componente più chiara ed è maneggiabile con precisione; ma non rappresenta che una parte della teoria. Allora il concetto di riduzione, pur potendo partire dalla parte matematica della teoria, deve tener conto anche delle altre componenti.

Analizzando il concetto di riduzione Rohrlich nota che essa non significa (se non occasionalmente) la sostituzione di una teoria all'altra; la teoria ridotta può: avere una ontologia differente (ad es. chimica e meccanica quantistica), essere più pratica (ad es. meccanica newtoniana e relatività); essere più semplice (ad es. le leggi dei gas e la teoria cinetica dei gas). Tanto meno la teoria riducente è più vera di quella ridotta (ad es. i fenomeni cooperativi suggeriti dalla teoria ridotta possono non esserci nella teoria basata esclusivamente su componenti elementari, così come una fotografia eccessivamente sgranata non fa più riconoscere a figura).

Egli si chiede sotto quali condizioni una teoria "più raffinata" sia riducibile ad una teoria "più grossolana" passando al limite su un dato parametro; per essere più preciso si chiede (nel senso della riduzione dei fisici) se l'intero quadro matematico della teoria più fine **M** si riduca al quadro matematico della teoria più grossolana con una operazione di limite.

Egli osserva giustamente che: 1) il parametro deve essere adimensionale, perché non ha senso porre la *costante* di Planck  $h$ , come un ipotetico parametro (di che?) che va a zero, o la velocità della luce  $c$  come ipotetico parametro che va all'infinito: quindi non  $h$ , ma  $h/S$ , dove  $S$  è una opportuna azione; non  $c$ , ma  $v^2/c^2$ ; 2) non è sperabile che la riduzione possa essere rappresentata da una funzione matematica, né da un funzionale, perché le teorie fisiche sono troppo complesse rispetto a un semplice insieme di variabili (o funzioni) matematiche; 3) per mantenere la

<sup>5</sup> Qui c'è un cambiamento di dizione. Mentre i filosofi parlano ne in senso attivo per la teoria più generale (questa riduce un'altra teoria a suo caso particolare), i fisici, seguendo l'idea del limite matematico, ne parlano in senso passivo (la teoria più generale al limite si riduce ad una meno generale). Per una prima introduzione vedasi (Batterman 2016).

coerenza della teoria occorre che le energia venga limitata; ad es. quando una particella si avvicina alla sorgente di un campo, gravitazionale o elettrico, il potenziale  $1/r$  va all'infinito e ciò non ha senso fisico.

## 7. Limiti singolari

Implicitamente le riduzioni al limite sono state concepite solo nel caso più favorevole: che il passaggio al limite avvenga su una funzione analitica, cioè sviluppabile in serie di Taylor:

$$F(x_0 + \delta) = F(x_0) + \delta F'(x_0) + \delta^2/2 F''(x_0) + \dots$$

Ma il problema più serio che si incontra in questo studio è che il più delle volte le relazioni tra teorie al limite comportano limiti singolari. Già negli anni '80 [Berry \(1994; articolo che riassume i suoi lavori precedenti\)](#) aveva evidenziato situazioni in cui lo schema **R** non è più valido. In tal caso la riduzione è impossibile, perché sono stati esauriti tutti gli usuali strumenti logici e matematici disponibili per compararle mediante strumenti di ragionamento. (Rohrlich 1988, pp. 310-311; Berry 1994, p. 604)<sup>6</sup>

Molti sono i casi limiti singolari tra teorie (nel seguito ne vedremo i più salienti). E' molto interessante che queste singolarità non sono di rilevanti solo in matematica, perché ad esse corrispondono fenomeni fisici nuovi che portano nuove conoscenze e nuove tecniche; infatti le loro serie divergenti portano informazioni che hanno significato fisico. Il titolo di (Rohrlich 1990) annuncia "buona fisica" nuova.

### 7.1 Ottica delle onde e ottica geometrica

Per Rohrlich questo è uno dei casi paradigmatici di limiti singolari.

L'ottica geometrica dei raggi di luce può sembrare il limite dell'ottica fisica delle onde quando  $\lambda$ , la lunghezza d'onda, diventi trascurabile; ma la riduzione è impedita da singolarità. Infatti per ogni intervallo attorno a valori di  $x$  e di  $t$  la funzione  $\psi(x,t) = \cos(2\pi(x-vt)/\lambda)$  per  $\lambda \rightarrow 0$  oscilla infinite volte tra -1 e +1, senza avere un punto limite.

Può sembrare un rimedio il passare a considerare la energia e di essa calcolare la media temporale; essa dà  $2 \cos^2(2\pi(x)/\lambda)$ ; che però è ancora singolare al limite per  $\lambda \rightarrow 0$ . Solo mediando anche sullo spazio si ottiene una rappresentazione finita del semplice fenomeno della sovrapposizione di due raggi luminosi dell'ottica geometrica. (Berry 1994, p. 601; Batterman 2002, pp. 80-81). In corrispondenza in Fisica emergono nuovi fenomeni: le caustiche, dove l'energia diventa infinita; esse sono importanti per spiegare il fenomeno dell'arcobaleno. Inoltre anche le caustiche hanno singolarità, che possono essere studiate con la teoria delle catastrofi. (Berry 1994, p. 602; Berry 2002, p. 11; Batterman 2002, p. 81-94).

### 7.2 Meccanica statistica e Termodinamica

Nei testi si dice che la meccanica statistica si riduce alla termodinamica al limite di infinite particelle:  $N \rightarrow \infty$ . Ma questo limite non esiste vicino al punto critico ( $P_c, V_c, T_c$ ), quando emergono liquido e vapore; allora la compressibilità,  $\kappa = 1/(-V(\partial P/\partial V)_T)$ , va all'infinito perché le fluttuazioni statistiche non sono più piccole, ma avvengono su larga scala, così da generare "fenomeni critici". E' notevole che allora emergono strutture frattali a tutte le scale: lo stesso stato critico è un frattale.

<sup>6</sup> Jeremy Butterfield (2011) contesta l'analisi di Batterman opponendogli quattro casi in cui egli concludere diversamente da Batterman (v. anche Norton 2012). Ma queste conclusioni riguardano più i problemi dell'emergenza e della supervenienza, che non sono decisivi per le questioni di natura matematica di cui ci occupiamo. Inoltre un solo caso, il quarto, riguarda una riduzione tra teorie fisiche, il limite della meccanica statistica alla termodinamica. Qui Butterfield sostiene l'opinione che l'uso di limiti infiniti non dia particolari preoccupazioni perché è giustificato da considerazioni pragmatiche; cioè l'uso dei limiti continui rappresenta una semplice preferenza dovuta alla convenienza dell'usare l'infinito nella matematica della fisica. Batterman ha risposto con (2013). Sulla base di una analisi, non di una teoria, ma dell'oscillatore lineare di van der Pol, Wayne ha sostenuto che "La presenza di un limite singolare è meno rilevante all'argomento delle relazioni interteoretiche di quanto abbiano sostenuto Batterman e Rueger." (Wayne 2012, p. 354)

Qui non ci può essere continuità, per quanto ci allontaniamo dalle particelle o esse siano numerose. Inoltre comunemente viene indicato come impedimento alla riduzione la non additività dell'energia per come questa è definita dalla meccanica statistica. (vedasi anche Rueger 2006)<sup>7</sup>

### 7.3 Relatività ristretta e Meccanica classica

Di solito si considera un legame tra relatività ristretta e meccanica classica prendendo come funzione  $p = mv\beta$  e la si sviluppa in serie di Taylor. Qui la funzione è analitica e quindi il limite non singolare. Allora si ha una riduzione riguardante gran parte del quadro matematico delle due teorie.

Ma ciò non vale per le particelle non massive, ad es. i fotoni (le interazioni elettromagnetiche sono escluse perché questa teoria non ha limite galileiano). Né vale per  $E = mc^2$  perché al limite la relazione tra massa ed energia non appartiene alla meccanica classica. Inoltre il limite non ridà l'azione a distanza classica della meccanica classica newtoniana (già notato da Goldstein 1980, p. 332).

Inoltre le simmetrie cambiano. Ad esempio il cono luce dello spazio di Minkowsky, allargato fino alla base, non differisce dallo spazio classico, che ha  $c = \infty$ ; ma ciò non si ottiene con il limite di  $v^2/c^2 \rightarrow 0$ . Così la simmetria spazio temporale della relatività ristretta viene persa. Inoltre il limite relativistico esclude l'elettromagnetismo, che non ha una invarianza galileiana. (Rohrlich 1990, p. 1401)

Può cambiare anche la semantica **O**: il tempo comune della meccanica classica passa a tempo "privato" dell'osservatore nella relatività ristretta. Ciò indica che con la operazione di limite anche i concetti centrali della teoria possono cambiare radicalmente di significato e addirittura (spazio-tempo) scomparire.

### 7.4 Meccanica classica e meccanica quantistica

I libri di testo dicono che le due teorie si riducono per  $h$  (o meglio  $h/S$ )  $\rightarrow 0$ . Ma il limite è singolare! Se on altro perché la MQ è una meccanica delle onde (sia pure di probabilità) e quindi valgono le stesse singolarità viste nel caso della riduzione dell'elettromagnetismo alla ottica geometrica. Lo si può anche vedere con facili esempi.

Nel caso di particelle che incontrano una barriera di potenziale la meccanica quantistica indica sempre un superamento parziale, anche se minimo, della barriera: nella meccanica classica invece il superamento della soglia è netto.

Possiamo riconsiderare il caso della sovrapposizione di due fasci uguali, ora di particelle. L'intensità raddoppia classicamente; invece quantisticamente c'è interferenza, con frange proporzionali a  $h$ ; l'energia dipende da  $\cos^2\psi$  che al limite di  $\lambda \rightarrow 0$  oscilla all'infinito. Quindi il limite alla meccanica classica non c'è; lo si può recuperare solo prendendo le medie spaziale e temporale.

A supporto della riduzione da loro asserita, i manuali presentano il teorema di Ehrenfest, che ritrova le equazioni canoniche di Hamilton classiche facendo la media su quelle quantistiche. Ma in effetti quel teorema richiede l'ipotesi che i valori medi delle funzioni siano sostituibili con le funzioni dei valori medi; il che vale solo per piccole fluttuazioni. (Rohrlich 1990, p. 1408)<sup>8</sup>

Di fatto tra MQ e meccanica classica entra in gioco la meccanica quantistica semiclassica che spiega fenomeni quantistici che sono vicini al limite classico; ad es. nei casi: 1) lo stato base dell'atomo di elio; 2) lo spettro di livelli molto eccitati di atomi in forti campi magnetici; 3) chaos.

### 7.5 Relatività generale e meccanica classica

<sup>7</sup> Un'analisi più dettagliata si trova in (Dizdaji-Bahmani et al. 2010, p. 397). Inoltre si deve tener conto del fatto che i fondamenti stessi della meccanica statistica sono insoddisfacenti; per una analisi critica si veda (Uffink 2004).

<sup>8</sup> Alisa Bokulich (2008) ha dedicato un libro a questa pretesa riduzione. Sulle relazioni tra teorie ella propone un atteggiamento "interstrutturalista", che in effetti vorrebbe generalizzare l'approccio di Paul Dirac; il quale sulla relazione tra meccanica classica e meccanica quantistica si è basato su una analogia (tra commutatori e parentesi di Poisson); ma una analogia allenta di molto ancor la deducibilità che Nagel vorrebbe tra le due teorie in questione.

Il parametro su cui operare al limite non è chiaro. Ogni  $p=kG$  (con  $G$  costante di accoppiamento gravitazionale) al  $\lim \rightarrow 0$  dà una teoria senza sorgenti gravitazionali. Ma proprio per il legame spazio-massa-energia che popone la relatività generale, ogni limitazione di energia dà una limitazione sulle coordinate. Quindi nello spazio  $p$  non è universale. Allora si sceglie di rendere piccole le componenti del tensore deviazione  $h_{\mu\nu}$  purché siano piccoli sia il potenziale gravitazionale rispetto alle energie a riposo, sia la energia cinetica del punto rispetto alla energia a riposo; per la quale ultima occorre definire un nuovo parametro  $p' = v/c \ll 1$ . Ma non si può fare a meno di prendere in considerazione la domanda; essendo la relatività generale la teoria anche delle rotazioni e la ristretta quella senza rotazioni, può la prima ridursi al limite alla seconda? Approssimando a 0 la gravità, con  $p$  si ha una equazione del moto di una particella con una forza  $\neq 0$ , mentre con  $p'$  la forza è nulla. Questa incoerenza rende impossibile la riduzione della relatività generale alla relatività ristretta e indica che  $p$  e  $p'$  non sono indipendenti. (Rohrlich 1990, pp. 1402-1404)

Il tema è stato approfondito da un successivo articolo (Rohrlich 1989). La sua conclusione è la seguente:

Si conclude che non si può sostenere né un atteggiamento riduzionista né uno antiriduzionista. Strettamente parlando solo la struttura matematica è riducibile. La interpretazione (il modello i concetti centrali) della teoria sostituita  $T'$  può essere derivata direttamente dalla teoria sostituita  $T'$  al più solo parzialmente; essa è fortemente vincolata dalla struttura matematica e può comportare termini centrali che sono qualitativamente differenti che non possono essere collegati tra le teorie  $T$  e  $T'$ .

#### 7.6 Altri problemi

1) Rohrlich pone il problema della misura quantistica; esso comporta la riduzione della interazione di due sistemi quantici a quella di un sistema quantico con uno macroscopico. Questa riduzione "a tuttoggi non è completamente compresa"; anche se ci sono molti tentativi di soluzione "E' un problema irrisolto della teoria della riduzione". (Rohrlich 1990, p. 1409)

2) Ci possono essere due limiti e questi possono non commutare. Se nella meccanica quantistica si considera il  $\lim t \rightarrow \infty$  per i casi di caos, esso non è scambiabile con il limite di  $\hbar/S \rightarrow 0$ . Alcuni sistemi quantistici confinati possono simulare sistemi in evoluzione classica caotica; ma non sui tempi lunghi. Ad esempio questo avviene nei "biliardi quantici", cioè particelle confinate in un rettangolo piano, con funzioni d'onda corrispondenti a traiettorie caotiche classiche; allora ci sono regioni di alta intensità energetica, che sono centrate su orbite periodiche classiche, ma instabili.<sup>9</sup>

### 8. Conclusioni per la filosofia della riduzione e per la storia della fisica

Berry trae una importante lezione dalle riduzioni al limite quando il limite è singolare.

I limiti singolari portano un messaggio chiaro, che i filosofi stanno cominciando a sentire; la fisica dei limiti singolari è la filosofia naturale della rinormalizzazione e delle serie divergenti. Forse i filosofi stanno riconoscendo che alcuni problemi di riduzione della teoria possono essi stessi essere ridotti a domande spinose sulla matematica asintotica; con esse si estende il metodo filosofico tradizionale, quello di argomentare basandosi solo sulle parole. Di solito pensiamo ad "applicazioni" della scienza che vanno dal più generale al più specifico - dalla fisica all'oggettistica; ma questa è un'applicazione che va nel verso contrario: *dalla fisica alla filosofia*. (Berry 2002, p. 10; mio corsivo)

In effetti nel seguito trarremo conclusioni che possono essere considerate prettamente filosofiche; ma esse sono conseguenze di ben precisi problemi fisici e matematici, in particolare sono i problemi che sono stati posti dagli storici della scienza e dai filosofi della scienza del secolo scorso. Se finora queste conclusioni non sono state evidenziate al vasto pubblico è perché la dominante tensione filosofica alla unità della scienza - e quindi alle riduzioni generalizzate tra tutte

<sup>9</sup> Occorrerebbe molto spazio per trattare le questioni sollevate dall'idea che tra una teoria e l'altra emergano nuovi concetti o elementi (emergenza o anche supervenienza) i quali per molti studiosi rendono impossibile la riduzione tra le teorie.

le teorie, fisiche e di ogni altro tipo – ha interpretato le obiezioni e correzioni che alcuni autori hanno portato alle tesi esposte in precedenza come segno di un dibattito ancora in corso, quando invece esso ha ormai stabilito alcuni fatti incontrovertibili.

### 8.1 Fisica teorica e matematica idealistica

Da quanto indicato finora è chiaro che è matematica idealistica attribuire un valore finale ad un'operazione di limite singolare. Quando poi al valore finale di un limite singolare tra teorie si attribuisce una intera teoria (ad es. la meccanica classica) si fa uso massimamente idealistico della matematica. In tal caso tra le teorie i collegamenti matematici effettivi tra le teorie possono essere solo parziali; ma essi sono comunemente (e didatticamente) generalizzati a teorie intere; il che è del tutto idealistico.

Con ciò si dà una risposta precisa al problema posto da Koyré sul rapporto Fisica-Matematica. Poiché in fisica teorica di solito si accetta la matematica idealistica di attribuire un valore finale ad un'operazione di limite singolare, tanto che alle volte ci si vede una teoria, la tesi di Koyré (nata dallo studio della metodologia e delle poche leggi formulate da Galilei) viene confermata: in Fisica la matematica viene usata idealisticamente perché correntemente lo si fa pure nei collegamenti matematici a limiti singolari tra teorie ben note.

### 8.2 Incommensurabilità

Michael Berry, Erich Rohrlich e Robert Batterman hanno mostrato che molti limiti matematici delle relazioni di riduzione sono singolari. Allora questi casi offrono una definizione formale, cioè matematica, del concetto (suggerito in maniera intuitiva da Feyerabend e da Kuhn) di incommensurabilità tra due teorie riguardanti lo stesso campo di fenomeni. Quindi ora questo concetto è stato radicato nella fisica teorica in maniera sicura e ben definita. Questo fatto comporta che occorre considerare autonome gran parte di quelle teorie fisiche che in precedenza venivano spesso presentate come ridotte da teorie più generali.

### 8.3 Nuova visione della storia della Fisica

Con ciò viene a cadere la tradizionale visione del progresso della Fisica come una serie di cerchi concentrici, per cui ogni nuova teoria sarebbe sempre compatibile con le teorie precedenti, tanto da esserne una estensione. Mentre invece di fatto le teorie fisiche presentano un pluralismo di fondamenti sin dal tempo della nascita della termodinamica. Più in generale, Rohrlich già nel 1988 ha suggerito, sulla base della sua lunga esperienza di fisico teorico, che in ogni tempo c'è stata una pluralità di fondamenti delle teorie. Quindi la storia della fisica è rappresentata non da una evoluzione di tipo unilineare, salvo sviluppi laterali minoritari e caduchi; ma da una evoluzione plurilineare, secondo un pluralismo di linee storiche.

Ciò ridimensiona radicalmente la visione di Kuhn perché nega una unica linea di sviluppo di paradigmi successivi, ognuno che nasce subito dopo l'altro. per successione immediata (*Gestalt*) del nuovo al vecchio. Piuttosto vede la nascita di un paradigma quando una linea di sviluppo riesce a dominare culturalmente sulle altre; e una crisi avviene quando le teorie delle linee minoritarie suggeriscono anomalie destabilizzanti. Casomai il cambiamento di tipo gestaltico che Kuhn vede tra due paradigmi successivi può rappresentare in termini intuitivi la esistenza di limiti singolari nella relazione tra le teorie rappresentative del vecchio e del nuovo paradigma.(ad es. tra meccanica classica e meccanica quantistica; tra meccanica classica e relatività ristretta).

### 8.4 Svalutazione del programma di unificare tutte le teorie

Notando le variazioni di significato che avvengono tra due teorie simili, Rohrlich (1988, p. 308) ha concluso:

Si conclude che una [nageliana] riduzione logica di **L** (il linguaggio della teoria più grossolana) a **L** (il linguaggio della teoria più raffinata) non è possibile!

Se per questa ragione si vuole negare [in toto] la riducibilità [così come fa Feyerabend] o accettare la riduzione matematica [almeno] della parte **M** di una teoria, come sufficiente per dire che una teoria è riducibile ora è una questione di definizione. (Rohrlich 1988, p. 308)

Comunque per la parte **M** delle teorie occorre che il concetto di riduzione tenga conto dei limiti singolari. Perciò egli ha poi aggiunto:

Ho mostrato altrove che la componente semantica della riduzione delle teorie (cioè la sua interpretazione) non funziona in molti casi, cioè il modello fisico della teoria **S** non segue da quella di **T** ma comporta una interpretazione della matematica di **S** che è indipendente dalla interpretazione di **T**. Se poi anche la componente matematica della riduzione tra teorie [con una relazione di limite singolare] è ora considerata inadeguata (almeno per certi tipi di sistemi fisici), resta poco spazio alla generalità del riduzionismo. (Rohrlich 1990, pp. 1410-1411)

Anche Batterman conclude negativamente verso la tradizionale concezione della riduzione: [gli esempi del capitolo specifico sulla riduzione al limite relativi alla meccanica] servono ad indicare che (1) le relazioni neo-nageliane di riduzione sono malauguratamente inadeguate e che (2) l'insuccesso dello schema **R** porta a investigare quella che possiamo chiamare una "nuova fisica". (Batterman 2002, p. 111).

Più recentemente ha svalutato ulteriormente il programma riduzionista. Alla fine di un suo articolo che ha controbattuto le tesi di Sober (citato nel par. 3) egli afferma:

Ho argomentato che [le sue] tesi sono essenzialmente prive di significato.

[...] penso che è in gran parte errato l'ideale di derivazioni "in linea di principio di comportamenti di sistemi (o leggi, o teorie) da dettagli (o leggi o teorie) più fondamentali di scala inferiore. Qualsiasi esame della pratica effettiva degli scienziati interessati alla modellazione di sistemi su scale diverse non rivelerà nulla di quelle semplici derivazioni che i sostenitori di questo ideale credono siano possibili. Il richiamarsi [di Sober] ad una fisica ideale completata - la caratteristica principale che li sostiene e loro tesi in linea di principio - è puramente speranzoso e speculativo. Non abbiamo alcuna idea di qualcosa di simile ad una fisica del genere, né abbiamo alcuna prova che questa esista. (Batterman 2018, p. 871)

Quindi la lunga storia della pretesa di ridurre le teorie fra loro in funzione di una unità della scienza oggi dovrebbe essere considerata mitica, perché una analisi dei loro quadri matematici, le cui relazioni a due possono comportare limiti singolari, solo occasionalmente può realizzare una riduzione e spesso questa riguarda parti di una teoria fisica, parti che non si sa se siano teorie autonome, o modelli matematici non del tutto definiti, o teorizzazioni aperte.

Già Mach (1896) invitava a studiare i rapporti tra teorie nei loro omeomorfismi matematici: ad es. un circuito elettrico RC è rappresentato da per equazione differenziale che è la stessa per un oscillatore meccanico smorzato. Questo collegamento tra teorie è importante e porta a molte considerazioni. Ma sarebbe fantasioso ricavarne un collegamento tra la intera teoria dell'elettromagnetismo e la teoria meccanica. Quindi il riduzionismo che enfatizza le poche occasioni di collegamenti parziali dei quadri matematici di due teorie si pone un traguardo che appare chiaramente irraggiungibile.

## **9. La dicotomia sui due tipi di limite vista più in generale: la dicotomia tra i due tipi di matematica**

Rohrlich ha considerato due tipi di limite, regolari o singolari, all'interno della matematica classica, da lui considerata l'unica per la fisica teorica. Ma dal 1967 è nata una matematica rigorosa che esclude l'idealismo dell'infinito in atto, il quale viene usato dai fisici teorici sia in funzioni (la  $\delta$  di Dirac), sia in assiomi (il principio d'inerzia di Newton richiede  $F=0$  esattamente, al di là di ogni approssimazione di misura).

Di fatto varie teorie - la meccanica di Lazare Carnot, la termodinamica di Sadi Carnot-Kelvin-Clausius, la prima teoria dei quanti di Einstein, la prima formulazione di Heisenberg della meccanica quantistica usano la matematica dell'infinito potenziale, quella senza idealismi

, cioè costruttiva (perché costruisce ogni ente di cui parla). Quindi la fisica teorica può usare uno di due tipi di matematica, con o senza l'idealismo dell'infinito in atto. (Drago 2017, capp. 3 e 5)<sup>10</sup> Gli enti idealistici non possono essere costruiti con i mezzi di costruzione degli enti matematici finiti (numeri razionali, riga e compasso, ecc.); pertanto vengono dichiarati indecidibili. Queste indecidibilità quindi distinguono le teorie con la matematica basata sull'infinito in atto dalle teorie con la matematica basata sul solo infinito potenziale).

Questa matematica costruttiva riprende idealmente la critica di Du Bois-Raymond al limite  $\varepsilon$ - $\delta$  della secolare didattica del calcolo differenziale di Cauchy-Weierstrass-Dedekind: solo per un miracolo i due punti dell'intervallo di ogni approssimazione  $\varepsilon$ - $\delta$  possono andare a coincidere in un punto solo, il punto limite; infatti, secondo Cantor, tra due punti di un intervallino comunque piccolo esistono tanti punti quanti in un grande segmento e in una intera linea. (Kogbetliantz, App. 2) Quindi la matematica, se vuole essere costruttiva, deve definire il limite solo per una serie di numeri che intanto sono loro stessi costruttivi e che poi non necessariamente raggiungono un risultato finale (salvo condizioni aggiuntive).<sup>11</sup>

In questa matematica esiste un teorema che caratterizza tutti i limiti singolari come problemi indecidibili (Aberth 1980, Teorema 6.1) e quindi le sue soluzioni idealistiche non appartengono alla matematica costruttiva. Allora due teorie collegate da un limite singolare rappresentano una incommensurabilità a causa della diversità dei loro tipi di matematica.

Due casi ben noti di relazione tra due teorie realizzano questa incommensurabilità: la meccanica statistica, che è legata all'infinito in atto (per il teorema ergodico e altro), non può, per  $N \rightarrow \infty$ , ottenere la termodinamica, che utilizza la matematica costruttiva; ad es., in termodinamica il concetto di reversibilità è espresso da questa matematica in maniera adeguata, mentre la matematica classica (anche se estesa agli infinitesimi) può esprimere solo la quasi staticità, un concetto che è idealistico rispetto al primo, perché ignora l'attrito, la viscosità, ecc., i quali fenomeni rendono non uniforme una trasformazione, per quanto essa sia piccola. (Drago 2017, cap. 1) La meccanica quantistica, che si basa essenzialmente sull'infinito in atto a causa dello spazio di Hilbert, non può ottenere per  $h \rightarrow 0$  la chimica classica (tabella di Mendeleev) che utilizza numeri interi e razionali, perché ad es. non può riconoscere la proprietà della periodicità di elementi discreti e finiti, gli atomi. (Drago 2020)

### 9.1 La ulteriore dicotomia sulla organizzazione

E' opinione comune che per completare la formulazione di una teoria significa occorre organizzarla con pochi principi assiomi dai quali discendono tutte le sue proposizioni, secondo ragionamenti di logica classica.

Il confronto tra i testi originali di quelle teorie fisiche di tutti i tempi che dai loro autori sono state presentate in maniera non deduttiva-assiomatica ha indicato una organizzazione alternativa, che è basata su un *problema* fondamentale di cui viene cercata la soluzione mediante ragionamenti di logica non classica, quella che usa proposizioni doppiamente negate non equivalenti alla affermative corrispondenti. Questa organizzazione è presente in: termodinamica di S. Carnot, teoria dell'articolo di Einstein del 1905 sui quanti, teoria della relatività ristretta nell'articolo di Einstein del 1905, teoria del libro di Dirac (1° e 2° ediz.). (Drago 2012, Drago 2017, capp. 1 e 5)

<sup>10</sup> Batterman (2011; 2018) approssima questa dicotomia tra tipi di matematica quando pone in contrapposizione le teorie basate sul continuo (che tradizionalmente sono legate alla matematica degli infinitesimi e in generale dell'infinito in atto) e le teorie basate sul discreto microscopico (cioè quelle che nel passato si sono basate sul discreto (chimica) o lo hanno introdotto (quanti)),

<sup>11</sup> In effetti le considerazioni "pragmatiche" di Butterfield (2011) riguardano proprio quello che richiede la matematica costruttiva: considerare non tanto il limite finale di una serie (che può ben essere singolare), ma la sua approssimazione sempre più spinta (che secondo lui può prendere il significato fisico di teoria finale). A questa idea (chiamata addirittura "principio di Butterfield"), Palacios (2018, p. 538) impone ulteriori criteri che di fatto corrispondono anche essi alla costruttività della matematica utilizzata. In questo senso la riflessione sul limite singolare ha fatto rinascere la problematica sull'idealismo del limite, denunciata da Du Bois-Raymond, ma sistematicamente ignorata dalla paradigmatica didattica universitaria.

Questa è un'altra dicotomia fondamentale, indipendente dalla prima.<sup>12</sup> A causa di essa, la meccanica statistica, che è una assiomatica perché assume a priori la meccanica newtoniana, non può ridurre la teoria termodinamica, che è basata sul problema di trovare la massima efficienza delle macchine termiche, perché non può rappresentare il principio metodologico (doppiamente negato) base che è servito per costruire gran parte della teoria: "E' im-possibile un moto che non ha fine". Così la MQ, che è assiomatica per presupporre la funzione d'onda, non può ridurre la chimica classica perché non può rappresentare il principio base della tabella di Mendeleev: "Due elementi dello stesso gruppo hanno proprietà non dissimili" ( che non vuole dire uguali, perché in chimica l'uguaglianza esatta è rarissima),

### Pluralismo di linee nella storia della Fisica

Affrontando il tema della riduzione tra teorie, Rohrlich (1988, p. 299) ha affermato: "Purtroppo ci sono molte discussioni sulla riduzione della teoria senza una chiara spiegazione di che cosa si intende per teoria scientifica" rispetto a, ad es., concezioni e modelli. In effetti, sembra che proprio la mancanza di una chiara definizione di una teoria scientifica permetta agli studiosi che hanno cercato di generalizzare la definizione di riduzione tra due teorie di creare infinite varianti alla definizione di Nagel. Ma su ogni dicotomia ogni scelta è incompatibile con l'altra; due teorie con scelte diverse sono quindi incommensurabili. Perciò le tante varianti della definizione cercano di abbracciare concetti di riduzione che sono incompatibili tra loro; quindi sono destinate a essere inefficaci.

Le suddette due dicotomie, sui due tipi di matematica e sui due tipi di organizzazione: chiariscono che cosa è una teoria: *un campo di fenomeni misurabili, interpretati secondo due scelte sulle due dicotomie.*

Allora con le due dicotomie possiamo chiarito il suddetto pluralismo dei fondamenti secondo Rohrlich. Le possibili coppie di scelte sono quattro.<sup>13</sup>

Questo quadruplice pluralismo è stato applicato sia a reinterpretare la storia delle passate teorie fisiche (Drago 2017), sia a concepire in modo nuovo la didattica delle scuole superiori e dell'università.( Drago 2018)

### 10. Conclusioni

I problemi lasciati in eredità dagli storici e dai filosofi della Fisica del XX secolo sono stati risolti da studiosi che si sono impegnati su campi di ricerca che fuoriuscivano dal loro campo specifico: 1) dai filosofi che hanno focalizzato l'attenzione su particolari (rapporti tra) teorie scientifiche; 2) dai fisici, che hanno studiato in matematico i limiti singolari (tra teorie), 3) dai matematici che hanno chiarito tutte le pretese filosofiche di usare l'infinito in atto in matematica; 4) dagli storici della fisica che hanno scoperto le categorie anche filosofiche utili alle loro interpretazioni; tra queste, anche la categoria organizzazione (e la logica) di cui è stata trovata la alternativa a quella che aveva dominato il pensiero scientifico per più di due millenni.

E' stato questo impegno pluridisciplinare di ciascun gruppo di filosofi, matematici, fisici e storici, e dalla loro collaborazione – sia pure indiretta e da lontano – che si è arrivati a riconoscere un pluralismo nella storia della Fisica, il quale è stato precisato fino a indicare i fondamenti della fisica.

Quindi oggi la storia e i fondamenti della Fisica si presenta in modo molto diversa da come sono presentati (o solo accennati) dalla didattica universitaria. La quale perciò dovrebbe essere ripensata a fondo, a incominciare dalla sua maniera disinvolta di presentare come onnicomprensive le riduzioni tra teorie con limiti, i quali in effetti sono singolari e comunque parziali.(Drago 2018)

<sup>12</sup> Questa dicotomia è approssimata da Batterman (2011; 2018) quando oppone "le teorie fondamentali", cioè quelle del mondo microscopiche che farebbero da assiomi alle teorie macroscopiche) alle "teorie fenomenologiche" che sono nate da problemi della vita quotidiana

<sup>13</sup> Un quadruplice pluralismo dei fondamenti della scienza è già stato proposto da (Lowe 2006). Ma le sue categorie sono di tipo elementare: oggetti, generi, attributi, modalità.

## Bibliography

- Aberth O. (1980), *Computable Analysis*, New York: Mc-Graw-Hill.
- Anderson P.W. (1972), "More is different", *Nature*, 177, n. 4047, pp. 393-396.
- Balzer W., Moulines C.U., Sneed J.D. (1986), *An Architectonics of Science*, Dordrecht: Reidel.
- Batterman R. (2002), *The Devil in the Details*, Oxford: Oxford U.P.
- Batterman R. (2013), "The Tyranny of Scales", in *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics*, Oxford: Oxford University Press. pp. 255-286 (2013)
- Batterman R. (2016), "Intertheory Relation in Physics", in Zalta E.N. (ed.), *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, [https://plato.stanford.edu/search/r?entry=/entries/physics-interrelate/&page=1&total\\_hits=2688&pagesize=10&archive=None&rank=1&query=inter%20theory%20in%20physics](https://plato.stanford.edu/search/r?entry=/entries/physics-interrelate/&page=1&total_hits=2688&pagesize=10&archive=None&rank=1&query=inter%20theory%20in%20physics).
- Batterman R. (2018), "Autonomy of theories: an explanatory problem", *Nous*, 52, n. 4, pp. 858-873.
- Berry M.V. (1994), "Asymptotic, singularities and the reduction of theories", in D. Prawitz et al. (eds.), *Logic Methodology and Philosophy of Science IX*, New York: Elsevier, pp. 597-607.
- Berry M.V. (2001), "Chaos and the semiclassical limit of quantum mechanics (Is the moon there when somebody looks?)", in R.J. Russell, P. Clayton, K. Wegter-McNelly, and J. Polkinghorne (eds.) *Quantum Mechanics: Scientific Perspectives on Divine Action*. Vatican Observatory: CTNS Publications, pp. 41-54.
- Berry (2002), "Singular Limits", *Physics Today*, 55 (5), pp. 10-11.
- Bokulich A. (2006), *Re-examining the Quantum-Classical relations. Beyond Reductionism ad Pluralism*, Cambridge: Cambridge U.P.
- Bunge M. (1982), "Is Chemistry a Branch of Physics?" *Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie / Journal for General Philosophy of Science*, 13 (2), pp. 209-223.
- Butterfield J. (2011), "Emergence, Reduction and Supervenience: A Varied Landscape", *Found. Physics*, 41, pp. 920-959.
- Carnap R. (1934), *The Unity of Science*, London: Kegan.
- Dizadji-Bahmani F. et al. (2010), "Who's afraid of Nagelian reduction?", *Erkenntnis*, 73, pp. 393-412.
- Drago A. (2012), "Pluralism in Logic. The Square of opposition, Leibniz's principle and Markov's principle", in *Around and Beyond the Square of Opposition*, edited by J.-Y. Béziau and D. Jacquette, Basel: Birkhauser, pp. 175-189.
- Drago A. (2017), *Dalla Storia della Fisica ai Fondamenti della Scienza*, Roma: Aracne.
- Drago A. (2018), "Suggestion for Teaching Science as Pluralist Enterprise", *Transversal International Journal for the Historiography of Science*, n. 5, 2018, pp. 66-83.
- Drago A. (2020), "A new definition of reduction between two scientific theories: no reduction of chemistry to quantum mechanics", *Foundations of Chemistry*, 22, 2020, pp. 421-445.
- Feyerabend P.K. (1962), "Explanation, reduction and empiricism", Feigl H. and Maxwell G. (eds.) *Scientific Explanation, Space And Time*, Minneapolis: U. Minnesota P., pp. 28-97.
- Fodor J.A. (1974), "Special sciences (or: the disunity of science as a working hypothesis)", *Synthese*, 28, pp. 97-115.
- Goldstein H. (1980), *Classical Mechanics*, New York, Addison Wesley.
- Gutschmidt R. (2014), "Reduction and the neighborhood of theories: a new approach to the intertheoretic relations of Physics", *Journal of General Philosophy of Science*, 45, pp. 49-70.
- Hofweber T. (2000), "Proof-theoretic reduction as a philosopher's tool". *Erkenntnis*, 53, pp. 127-146.
- Kogbetliantz F.G. (1968), *Fundamentals of Mathematics from an Advanced Point of View*, Gordon & Breach, New York, App. 2.
- Koyré A. (1986), *Etudes Galiléennes*, Paris: Hermann.
- Lowe E.J. (2006), *The Four-Category Ontology. A Metaphysical Foundation for Natural Science*, Oxford: Oxford U.P.
- Mach E. (1896), *Principles of the Theory of Heat*, Dordrecht: Reidel, 1986.
- Nagel E. (1961), *The Structure of Science*, London: Routledge and Kegan.
- Niebergall K.-G (2002), "Structuralism, model theory and reduction", *Synthese*, 130, pp. 135-162.
- Oppenheim P. and Putnam H. (1958) "Unity of Science as a Working Hypothesis", Feigl H., Scriven M., Maxwell G. (eds.). *Concepts theories and the mind-body problem*, Minnesota Studies in the Philosophy of Science, Minneapolis: University of Minnesota Press, 2, pp. 3-36.
- Palacios P. (2018), "Had We But World Enough, and Time... But We Don't!: Justifying the Thermodynamic and Infinite-Time Limits in Statistical Mechanics", *Found Phys.*, 48, pp. 526-541.
- Primas H. (1988), "Emergence in the exact sciences", *Acta Polytechnica Scandinavica*, 91, pp. 82-98.
- Rohrlich F. (1988), "Pluralistic Ontology and Theory Reduction in Physical Sciences", *Brit. J. Phil. Sci.*, 39, pp. 295-312.
- Rohrlich F. (1989), "The logic of reduction. The case of gravitation", *Foundations of Physics*. 19, n. 10, pp. 1151-1170.

- Rohrlich F. (1990), "There is good physics in theory reduction", *Foundations of Physics*, 20, n. 11, pp. 1399-1412.
- Rueger A. (2006), "Functional reduction and emergence in the physical sciences", *Synthese*, 151, pp. 335-345.
- Sarkar S. (2015), "Nagel on reduction", *Studies in History and Philosophy of Science, Part A*, 53, pp. 43-56.
- Schaffner K. (2006), "Reduction: the Cheshire cat problem and a return to roots", *Synthese*, 151, pp. 377-402.
- Sklar L. (1967), "Types of inter-theoretic reduction", *Brit. J. of Phil. of Sci.*, 18, pp. 109-124.
- Sober E. (1999), "The multiple realizability argument against reductionism", *Phil. Sci.*, 66, pp. 342. 354.
- Uffink J. (2004), "Boltzmann's Work in Statistical Physics", in Zalta, N. (ed.) *Stanford Encyclopaedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/statphys-Boltzmann/>
- Van Riel R. (2014), *The Concept of Reduction*, Berlin: Springer.
- van Riel R. e van Gulick R. (2019), "Scientific reduction", in Zalta E.N. (ed.), *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <https://plato.stanford.edu/entries/scientific-reduction/>
- Wayne A. (2012), "Emergence and singular limits", *Synthese*, 212, pp. 341-356.
- Wimsatt W.C. (2006), "Reductionism and its heuristics: Making methodological reductionism honest", *Synthese*, 151, pp. 445-475.