



I tre filosofi Particolare
Attribuito a Giorgione, fine XV secolo
(Vienna, Kunsthistorisches Museum)

EPISTEME

Physis e Sophia nel III millennio

An International Journal of Science, History and Philosophy

N. 2 21 dicembre 2000



David Hilbert

(Il grande matematico pose il problema dell'assiomatizzazione della fisica
nella sua celebre dissertazione al Convegno Internazionale dei Matematici, Parigi, 1900:

"6. Mathematical treatment of the axioms of physics

The investigations on the foundations of geometry suggest the problem: To treat in the same manner, by
means of axioms, those physical sciences in which mathematics plays an important part...")

I FONDAMENTI ASSIOMATICI DELLE TEORIE FISICHE

(Fabio Cardone)

Indice

Introduzione

Definizioni

Assioma metodologico

Prima teoria: la Meccanica

Seconda teoria: la Relatività Ristretta

Terza teoria: la Relatività Generale

Quarta teoria: la Meccanica Quantistica

Meccanica Quantistica Relativistica

Gli assiomi fondamentali

Introduzione

Tutti i fondamenti assiomatici delle teorie fisiche hanno una genesi induttiva ed un valore deduttivo a posteriori, se non altro per evidenza storica.

La sperimentazione fornisce le informazioni alla induzione, questa è la fisica sperimentale.

L'induzione fornisce gli elementi alla deduzione, questa è la fenomenologia in cui si mette ordine nei fenomeni noti.

La deduzione fornisce predizioni suscettibili di sperimentazione, questa è la fisica teorica.

Le teorie fisiche dalle quali si ottengono predizioni sino ad oggi verificate sono tre e vengono elencate in corrispondenza alle interazioni a cui si possono applicare.

TEORIA FISICA INTERAZIONE

Meccanica Gravità nel limite minkowskiano

Relatività Ristretta Elettrocità senza energia quantizzata

Relatività Generale Gravità senza energia quantizzata

Meccanica Quantistica Elettrocità con energia quantizzata

Definizioni

Si procede ora a dare le definizioni dei concetti che verranno usati limitatamente al loro significato in fisica.

Assioma : una qualsiasi assunzione su cui si basa una teoria matematica come ad esempio la geometria o i numeri reali, è altrimenti noto come postulato, pertanto assioma e postulato saranno usati come sinonimi.

Fisica Teorica: la descrizione dei fenomeni naturali in forma matematica.

Teoria: in fisica, un tentativo di spiegare una certa classe di fenomeni come conseguenze necessarie di altri fenomeni considerati come più primitivi e meno bisognosi di spiegazione.

Principio: una legge scientifica che è altamente generale o fondamentale e da cui altre leggi sono derivate.

E' dubbio se i principi in fisica possano essere considerati postulati, si pone quindi il problema di fronte ad un principio fisico se inserirlo tra i postulati di una teoria.

Assioma metodologico

- 1 - Tutto ciò che è razionale non sempre è reale.
- 2 - Ordo et connectio rerum idem *non* est quam ordo et connectio idearum.
- 3 - La logica della natura non è logica umana.

Prima teoria: la Meccanica

La Meccanica può essere fondata su base assiomatica utilizzando il principio di minima azione di Maupertuis, la conservazione dell'energia totale intesa secondo Hamilton ed il *principio di relatività* di Galilei, ovvero come è stato mostrato compiutamente da Galletto essa è la teoria della interazione gravitazionale nel limite minkowskiano o di spazio piatto. Tuttavia si preferisce illustrare una fondazione assiomatica della Meccanica basata su tre principi i quali in una visione a posteriori si applicano compiutamente a corpi con massa costante diversa da zero. Negli enunciati si intende per *moto naturale* quello soggetto a forze conservative, ossia gravità ed elettricità, per sistemi fisici adiabatici, ossia che non scambiano energia con l'osservatore.

1 - Principio di Hamilton.

Nei moti naturali con uguali punti di partenza ed arrivo nello spazio considerati a tempi sincroni, cioè uguali, l'energia totale si conserva. Si noti che l'affermazione "a tempi uguali" è fondata poiché nelle trasformazioni di Galilei-Newton per la coordinata temporale si ha $t = t'$.

2 - Principio di Maupertuis-Hoelder o dell'azione stazionaria.

Nei moti naturali isoenergetici con uguali istanti di partenza ed arrivo nel tempo considerati a tempi asincroni, cioè diversi, il prodotto dell'energia per il tempo, detto azione, si conserva.

3 - Principio di minima azione o di Eulero.

Se il moto naturale è adiabatico il prodotto dell'energia per il tempo, l'azione, ha sempre il minimo valore possibile.

E' opportuna qui una digressione, sul terzo principio si può innestare l'ipotesi quantistica di

Planck e Sommerfeld ed indicare che tale valore minimo è sempre un multiplo intero di una quantità costante h per qualsiasi sistema fisico.

Sempre sfruttando una visione a posteriori, non storica, per corpi privi di massa a riposo si può ben estendere il fondamento assiomatico della Meccanica al principio del tempo minimo o di Fermat: il moto naturale della luce tra due punti nello spazio è tale che l'intervallo di tempo corrispondente ha sempre il minimo valore possibile. Questo principio è alla base della identificazione dell'Ottica Geometrica con la Meccanica corpuscolare i cui fondamenti sono stati prima enunciati.

Seconda teoria: la Relatività Ristretta

La Relatività Ristretta ha di fatto soppiantato la Meccanica conglobandola come suo limite come verrà esposto in seguito. Oltre alla sua fondazione assiomatica storica basata sui due postulati fenomenologici, è possibile dare una enunciazione assiomatica non fenomenologica della Relatività Ristretta basata sulla equivalenza dei sistemi inerziali, storicamente definito principio, e sulla covarianza (ossia le leggi della fisica hanno la stessa forma matematica in tutti i sistemi inerziali). Si presenta qui la struttura a tre assiomi come desunta da Mignani e Recami.

1° Assioma - Proprietà dello spazio-tempo.

Lo spazio ed il tempo sono omogenei e lo spazio è isotropo.

2° Assioma - Principio di Relatività.

Tutte le leggi fisiche sono covarianti quando si passa ad osservarle da un sistema inerziale ad un sistema in movimento a velocità costante rispetto ad esso.

3° Assioma - Principio di Reinterpretazione.

Il nesso di causalità è realizzato da segnali fisici che sono effettivamente trasportati da oggetti aventi solamente energia positiva finita.

Questa formulazione assiomatica esalta ancora di più le contraddizioni tra la Relatività Ristretta e la Meccanica Quantistica non relativistica che, a causa della sua equazione fondamentale di Schroedinger, viola tranquillamente il 1° e 2° assioma; come se non bastasse, la Meccanica Quantistica Relativistica violerebbe il 3° se non vi fossero l'evidenza sperimentale dell'antimateria secondo Dirac e la *tecnica della rinormalizzazione* secondo Feynman.

La conseguenza fondamentale di questa formulazione a tre assiomi è che esiste un invariante u avente le dimensioni fisiche di una velocità al quadrato e valore finito il quale però va identificato sperimentalmente, da ciò discende il *principio di corrispondenza* secondo cui se l'invariante assume un valore infinito si ottiene la Meccanica come conseguenza della Relatività Ristretta. E' interessante notare qui che anche la Meccanica Quantistica ha un suo proprio principio di corrispondenza con la Meccanica.

La conseguenza dell'esistenza di un invariante è l'introduzione nelle teorie fisiche del concetto di *invarianza* ovvero di *simmetria*. Infatti ad ogni invariante si può abbinare una simmetria la quale diviene sinonimo di invarianza.

Si indica con simmetria la proprietà di una quantità o legge fisica di rimanere inalterata per effetto di certe trasformazioni od operazioni.

Ne sono esempi la massa inerziale, la carica elettrica elementare, il teorema CPT coniugazione di carica (o inversione del segno della carica), coniugazione della parità (o riflessione spaziale), inversione temporale (o riflessione temporale).

Mentre si indica con *principio di invarianza* o legge di simmetria qualsiasi principio per cui una quantità o legge fisica ha invarianza sotto certe trasformazioni, per cui è invalso l'uso di usare il nome di tali trasformazioni per indicare la simmetria, Ne sono esempi le trasformazioni di Galilei, le trasformazioni di Lorentz.

Non sempre una simmetria corrisponde ad oggetti reali, esempio ne siano i *quarks*.

Terza teoria: la Relatività Generale

Anche la Relatività Generale ha una sua agile fondazione assiomatica a tre assiomi ma di natura diversa dalla genesi di quelli della Meccanica e della Relatività Ristretta che è inizialmente fenomenologica ed in seguito di tipo più propriamente logico. Si potrebbe dire, con Einstein, che gli assiomi della Relatività Generale più che soddisfare una necessità fenomenologica vanno incontro ad un gusto estetico della logica.

1° Assioma - Principio di Equivalenza.

Gli effetti locali della gravità sono indistinguibili da quelli di un sistema di riferimento non inerziale.

2° Assioma - Principio di Covarianza.

Le leggi della fisica hanno la stessa forma matematica in tutti i sistemi di coordinate curvilinei concepibili.

3° Assioma - Principio di Invarianza.

Le leggi del moto sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento, siano essi a velocità variabile o a velocità non variabile.

Si vede facilmente nel 3° Assioma il ruolo cruciale dell'invarianza introdotta come conseguenza nella Relatività Ristretta, così come il gusto logico-estetico nel 1° e 2° Assioma, specie il 1° che eleva un fatto ritenuto accidentale in Meccanica al livello di Assioma fondamentale; d'altra parte il 3° continua a garantire la validità, *mutatis mutandis*, della Meccanica anche in questo nuovo ambito.

La conseguenza fondamentale di questa fondazione assiomatica è il *principio di*

solidarietà, che viene illustrato qui secondo Geymonat, e la conseguente negazione cartesiana del vuoto fisico da parte di Einstein.

Lo spazio-tempo non possiede ovunque la medesima struttura geometrica indipendente dal campo di interazioni ivi esistente (localmente), sono le masse e le energie ad incurvare (deformare) variamente lo spazio-tempo, stabilendo una solidarietà fra i fenomeni e lo spazio-tempo in cui essi si svolgono. Invece la Meccanica, la Relatività Ristretta e la Meccanica Quantistica attribuiscono una esistenza autonoma allo spazio-tempo. Questa ultima idea, secondo l'Einstein, può essere "drasticamente espressa in questo modo: se la materia dovesse scomparire, rimarrebbero ancora spazio e tempo, come una specie di palcoscenico (indeformabile) per gli eventi fisici". La Relatività Generale sostiene invece che lo spazio-tempo non ha un'esistenza separata da ciò che lo riempie, ossia che non esiste uno spazio-tempo senza campo.

Einstein ricollega esplicitamente la sua concezione a quella di Cartesio per il quale lo spazio, identificandosi con l'estensione, non può esistere senza corpi. Al riguardo Einstein sostenne: "Cartesio non era dunque così lontano dal vero, quando credeva di dover escludere l'esistenza di uno spazio vuoto. La sua concezione appare assurda, finché la realtà fisica viene vista esclusivamente nei corpi ponderabili. Solo l'idea del campo come rappresentante la realtà, in combinazione con il principio generale di relatività (il quale stabilisce l'invarianza delle leggi fisiche di fronte ad ogni cambiamento delle variabili spazio-temporali che lascia invariante il quadrato dell'intervallo infinitesimo spazio-temporale di un fotone od onda elettromagnetica, detto ds^2), riesce a rivelare il vero nocciolo dell'idea di Cartesio: non esiste spazio vuoto di campo d'interazione".

Il concetto di campo compare per la prima volta nella Relatività Generale conglobando e soppiantando al tempo stesso la questione dell'azione a distanza o attraverso un mezzo materiale o semi immateriale, esso sarà mutuato anche dalla Meccanica Quantistica Relativistica, ma era e continua ad essere un concetto che non è ancora oggi possibile porre in forma assiomatica o far discendere da assiomi, lo si può solo descrivere matematicamente mediante la sua azione sui corpi.

Quarta teoria: la Meccanica Quantistica

La Meccanica Quantistica trova il suo fondamento fenomenologico nel concetto di *dualità* espresso da De Broglie, la materia e la radiazione elettrica mostrano fenomeni in cui si comportano come onde ed altri in cui si comportano come corpi. A questo punto è bene dare in breve le definizioni di materia e di radiazione elettrica a livello elementare basate sulle loro proprietà.

Materia: ha carica (elettrica), ha massa anche a velocità nulla, ha velocità minore di quella della radiazione elettrica.

Ovviamente si intende per materia quella costituita dai corpi elementari stabili entro i limiti noti.

Radiazione elettrica: non ha carica (elettrica), non ha massa a velocità nulla, ha sempre la stessa velocità, quella della radiazione elettrica, tale velocità viene identificata con l'invariante della Relatività Ristretta u .

Il fondamento metodologico della Meccanica Quantistica ci viene fornito dalla cosiddetta *definizione operativa* secondo Heisenberg la quale potrebbe giustamente sembrare una evoluzione della definizione operativa delle grandezze fisiche data da Thompson nel 19° secolo: "le grandezze fisiche vengono definite mediante le operazioni con cui sono misurate quantitativamente".

Definizione Operativa di Heisenberg: Ogni concetto della fisica deve poter essere definito mediante una serie di operazioni fisiche almeno concettualmente possibili, viene meno la possibilità di rappresentare gli oggetti atomici (e subatomici) mediante un modello; la rappresentazione dei fenomeni fisici è astratta essa avviene solo mediante enti matematici, si devono quindi collegare tra di loro le sole grandezze fisiche osservabili senza l'uso di grandezze ausiliarie.

Partendo da quest'ultima parte della definizione operativa, Heisenberg introdusse come enti matematici le tabelle di numeri delle misure ovvero le matrici e ne ebbe come conseguenza una matematica non commutativa, l'algebra delle matrici appunto.

Finora abbiamo visto le prescrizioni a cui storicamente si è cercato di adeguare gli assiomi della Meccanica Quantistica, ma se il quadro metodologico è completo quello fenomenologico non termina con il concetto di dualità, bensì prosegue con il *principio di indeterminazione* di Heisenberg, il quale divide con esso la proprietà di mera constatazione fenomenologica.

Del principio di indeterminazione viene qui data una esposizione secondo Caldirola: è impossibile conoscere simultaneamente (e ciò nel suo senso letterale è in contrasto con la Relatività Ristretta che impedisce la simultaneità), attraverso una determinazione sperimentale, due grandezze coniugate nel senso della Meccanica (analitica), quali ad esempio la posizione e la quantità di moto di un ente fisico con una accuratezza grande quanto si voglia.

Tale principio ha avuto una funzione storica fondamentale nell'associare al formalismo matematico della Meccanica Quantistica, secondo la definizione operativa di Heisenberg, un'interpretazione fisica capace di conciliare, anche intuitivamente, la dualità onda-corpo. Su tale principio si poggia, in ultima analisi, l'interpretazione probabilistica di Born dell'equazione di Schroedinger.

Tuttavia nella formulazione assiomatica della Meccanica Quantistica non si ricorre esplicitamente al principio di indeterminazione. Infatti si può dimostrare come le relazioni di Heisenberg possono essere dedotte in modo generale dalle proprietà degli operatori che nella Meccanica Quantistica risultano associati alle grandezze osservabili.

A questo punto sorge spontanea la congettura se il principio di indeterminazione non sia un'altra forma equivalente del principio di inaccessibilità di Caratheodory, il quale altro non è che una espressione della seconda legge della termodinamica: in prossimità di qualsiasi

stato di equilibrio di un sistema ci sono stati che non sono accessibili da un processo adiabatico reversibile od irreversibile.

Nel contesto di tale congettura il sistema fisico osservato e l'osservatore sono un unico sistema termodinamico, quindi gli scambi di energia avvengono adiabaticamente ed in questo senso ricadono nell'inaccessibilità poiché sistema fisico ed osservatore sono in uno stato di equilibrio. Tutto ciò ci permette di eliminare il principio di indeterminazione dal novero degli assiomi fondamentali, nondimeno esso ci pone il grave problema delle relazioni tra variabili e variabili dinamiche che ad un certo punto non potremo eludere.

Anche della Meccanica Quantistica si può dare una fondazione assiomatica con struttura trinitaria ovvero a tre assiomi più il principio di corrispondenza o teorema di Ehrenfest, qui di seguito vengono elencati gli assiomi secondo Bohr-Heisenberg-Born.

1° Assioma - Sistema fisico.

Gli stati di un sistema fisico sono rappresentati da una tabella di elementi detta y in generale avente una dimensione ed infiniti elementi, la y è un vettore ad infinite dimensioni in uno spazio di vettori di Hilbert (retaggio, solo in senso matematico, delle matrici di Heisenberg), lo stato del sistema fisico non cambia se si moltiplica il vettore y per una costante.

2° Assioma - Grandezze fisiche.

Le grandezze fisiche misurabili sono rappresentate da operatori al primo ordine (lineari), ovvero tabelle di elementi aventi 2 dimensioni ed infiniti elementi, i quali hanno la proprietà di essere uguali al proprio trasposto complesso coniugato (hermitianicità) e con n autovalori reali i quali sono i possibili valori numerici misurabili della grandezza fisica che l'operatore rappresenta, i vettori y_n associati agli autovalori sono detti autovettori e per tali stati del sistema la grandezza è ben definita.

3° Assioma - La misura secondo Born.

I possibili risultati della misura di una grandezza fisica hanno ciascuno una probabilità di essere riscontrati, tale probabilità è data dal modulo al quadrato della proiezione dello stato del sistema fisico rappresentato dal vettore y , su cui si misura la grandezza, rispetto agli autostati y_n (autovettori) dell'operatore che rappresenta la grandezza fisica.

Gli assiomi elencati sono l'espressione, come indica Caldirola, della interpretazione probabilistica della Meccanica Quantistica (in contrapposizione a quella stocastica originariamente ispirata alle idee di Langevin per i fenomeni nucleari) o di Copenaghen o di Bohr-Heisenberg od ortodossa, a completamento di tali assiomi vi è il *principio di corrispondenza*: gli operatori in generale non commutano tra di loro e quindi non commutano le grandezze fisiche che rappresentano ma al limite per la costante di Planck h che tende a zero, azione non discreta, le grandezze sostituiscono gli operatori ed esse possono commutare e si riottiene la Meccanica (ove le grandezze sono variabili canonicamente coniugate).

Il 2° assioma sembra allontanarsi dalla definizione operativa di Heisenberg, poiché la y non rappresenta alcuna grandezza fisica osservabile ma solo un'entità matematica ausiliaria in parte interpretabile come grandezza fisica ausiliaria grazie al 1° assioma. Il 3° assioma risolve la contraddizione dando parziale significato fisico di osservabilità ad un uso ben definito della y ovvero mediante un'operazione matematica, la *proiezione* (in pratica il teorema di Pitagora). E' inutile dilungarsi nei meandri delle contraddizioni interne della Meccanica Quantistica, viene invece riportata un'altra fondazione assiomatica secondo Caldirola la quale ha il pregio di presentare una maggiore semplicità ed immediatezza nonostante l'alto grado di astrazione comunque imposto dalla definizione operativa di Heisenberg.

1° Assioma - L'osservabile.

Esiste uno scalare complesso y il quale contiene in sé tutte le informazioni che su di una particella si possono dare, precisamente esso permette di calcolare per ogni grandezza fisica, detta secondo Dirac *osservabile*, i valori possibili risultanti da una misura (che sono ovviamente reali) e le corrispondenti probabilità che la grandezza ha di assumere tali valori ad un generico istante di tempo.

2° Assioma - L'operatore.

Ad ogni osservabile si fa corrispondere, nella formulazione matematica, un operatore hermitiano il quale ha autovalori reali, l'insieme di tutti gli autovalori costituisce l'insieme di tutti i valori numerici che si possono trovare in una misura dell'osservabile corrispondente, mentre l'insieme degli autovettori corrispondenti rappresentano gli autostati del sistema (la particella) relativi a tali risultati di un processo di misura.

3° Assioma - L'evoluzione.

L'evoluzione spazio-temporale di un sistema fisico è regolata dall'equazione di Schroedinger, purché all'istante iniziale lo stato di un sistema fisico sia determinato mediante una osservazione del maggior numero possibile di osservabili tra loro compatibili ed indipendenti; tale osservazione è detta osservazione massima.

Questa formulazione assiomatica non è scevra di contraddizioni interne che per brevità si omette di discutere e parzialmente risolvere, tuttavia permette di mostrare il principio di corrispondenza con la Meccanica in una forma migliore quella del teorema di Ehrenfest. Considerando per una particella intesa come sistema fisico la sua generica coordinata ed il relativo momento coniugato si dimostra che le relazioni le quali permettono di calcolare le loro variazioni nel tempo sono ottenute mediante l'operatore di Hamilton; poiché tali relazioni si dimostra valgono anche per i valori medi delle corrispondenti osservabili, valgono dunque per il moto medio del pacchetto d'onde associato alla particella le equazioni del moto di Hamilton e quindi tutta la Meccanica.

Ovviamente tutto questo è dovuto al fatto che l'azione discreta h , la quale compare nelle definizioni degli operatori, al limite tende a zero.

Sarebbe interessante indagare se i principi di corrispondenza della Relatività Ristretta e della

Meccanica Quantistica siano collegati in qualche modo, certamente la formulazione assiomatica delle due teorie non è di grande aiuto in questa indagine. In pratica potremmo solo affermare che la Meccanica è la teoria fisica la quale, in contrasto con l'evidenza sperimentale, si fonda sull'approssimazione di una misura della velocità causale massima u non limitata (in particolare grande a piacere) ed una misura dell'azione h non limitata (in particolare piccola a piacere), se poi u infinita implichi h infinitesima è un'altra questione legata alla natura stessa del fotone e dell'interazione elettrica.

Meccanica Quantistica Relativistica (QED)

La Meccanica Quantistica Relativistica si applica con successo all'interazione elettrica e con opportune modifiche anche all'interazione leptonica (o nucleare debole), essa si fonda sui medesimi assiomi già elencati con il completamento di un assioma unico derivato dal 2° assioma della Relatività Ristretta (non il 2° della Relatività Generale poiché non vengono contemplati spazi diversi da quello piatto di Minkowski) ossia la covarianza applicata agli operatori.

Assioma Unico: Applicazione della Covarianza.

Le equazioni che descrivono un sistema fisico sono composte di operatori in cui le operazioni rispetto allo spazio e rispetto al tempo sono ripetute lo stesso numero di volte, ossia tutti gli operatori dell'equazione hanno lo stesso ordine e quindi sono applicati allo stesso ente variabile (la y per intendersi) un ugual numero di volte rispetto alla stessa variabile.

In pratica questo assioma unico è un mero completamento del 2° assioma nella forma secondo Caldirola, ma di fondamentale importanza nel determinare il definitivo successo della Meccanica Quantistica unita alla Relatività Ristretta come teorie in grado di descrivere compiutamente l'interazione elettrica e l'interazione leptonica come sua più prossima parente.

Al termine di questo excursus negli assiomi della Meccanica Quantistica è doveroso notare che in qualunque modo li si consideri essi violano la definizione operativa di Heisenberg pur cercando disperatamente di adeguarvisi, visto che da essa nascono. Coerenza avrebbe voluto che argomento delle equazioni fossero state solo le grandezze misurabili, in pratica i livelli di energia o le frequenze della radiazione emessa od assorbita dai sistemi fisici, il che è lo stesso. Sfortunatamente un formalismo matematico che avesse tali variabili come incognite e conciliasse la dualità essendo al tempo stesso ragionevolmente agevole da usare, cosa che non guasta mai, non è stato storicamente disponibile. Quindi le grandezze misurabili compaiono solo come parametri delle soluzioni delle equazioni della Meccanica Quantistica gli autovalori appunto, mentre l'oggetto delle equazioni resta la y , la vera incognita che pur non avendo la caratteristica di esistere fisicamente, ha il pregio di essere l'utile strumento (sic!) con cui salvaguardare la dualità.

Gli assiomi fondamentali

Dopo questa simpatica corsa tra i fondamenti assiomatici delle teorie fisiche è corretto a conclusione domandarsi quali assiomi possano essere considerati utili se non irrinunciabili nella formulazione di successive teorie fisiche.

Per quanto possa essere sorprendente la *simmetria*, pur giocando un ruolo fondamentale, non può esser presa *sine cura* come uno dei fondamenti assiomatici, poiché essa riposa sulla evidenza sperimentale della *conservazione* (come è ben messo in evidenza dal teorema di Noether). Tutto ciò che è conservato ha una evidenza sperimentale basata su limiti superiori, e non potrebbe essere altrimenti, e nulla ci garantisce da future possibili evidenze di violazioni della simmetria, quantunque piccole in grandezza rispetto ai limiti noti. Infatti volendo evitare di far dipendere troppo gli assiomi dalle necessità delle evidenze fenomenologiche è opportuno concentrarsi su alcune necessità logiche, ben consapevoli che si deve contemplare negli assiomi anche il fatto di dover fare i conti con le necessità sperimentali. Gli assiomi verranno elencati e subito dopo commentati.

1° Assioma - Indipendenza.

Le proprietà dello spazio-tempo sono indipendenti dalle proprietà delle interazioni.

Questo assioma si applica compiutamente alla Meccanica, alla Relatività Ristretta, alla Meccanica Quantistica includendo la sua evoluzione nel cosiddetto *modello standard* che descrive interazione elettrica e leptonica.

2° Assioma - Solidarietà.

Lo spazio-tempo è solidale con le interazioni cosicché le loro rispettive proprietà si influenzano reciprocamente.

Questa è la versione secondo Finzi del principio di solidarietà come lo enunciò nel contesto della Relatività Generale (ovvero della interazione gravitazionale); è lecito qui domandarsi se esso possa avere un valore generale ed applicarsi a tutte le interazioni, nel qual caso comporterebbe una sorta di conseguenza o lemma: ogni interazione con le sue peculiari caratteristiche determina localmente la sua propria struttura spazio-temporale.

3° Assioma - Causalità.

La causalità è il postulato il quale afferma che una situazione fisica dipende dall'altra (univocamente) e la ricerca causale si propone la scoperta di questa dipendenza (identificazione).

Tutto ciò rimane vero anche nella fisica (meccanica) quantistica sebbene gli oggetti della osservazione, per i quali si sostiene esservi una dipendenza, siano differenti; essi sono costituiti dalla probabilità di eventi elementari, non dai singoli eventi in sé.

Questa è la formulazione secondo Born della causalità e nella sua prima parte si applica in

modo formidabile a tutte le teorie fisiche. La seconda parte è costruita molto saggiamente per tenere conto del 3° assioma della meccanica quantistica nella formulazione data da Born stesso, per dare un qualche significato fisico alla γ necessaria alla dualità, ma anche per prevenire da violazioni della causalità dovute alla identificazione univoca della dipendenza, come si commenterà in seguito.

Il 3° assioma apre il problema della identificazione della dipendenza univoca tra almeno due situazioni fisiche; questo problema è stato storicamente risolto per via fenomenologica, come era inevitabile e come era stato preannunciato, e viene qui enunciato nel seguente assioma.

4° Assioma - Identificazione.

La velocità causale massima per tutte le teorie fisiche è la velocità della radiazione elettrica in assenza di materia ed in presenza dei soli campi elettrico e gravitazionale.

Questo assioma è usualmente e storicamente accettato acriticamente ed altrettanto acriticamente viene automaticamente esteso agli altri due campi noti quello dell'interazione adronica (o nucleare forte) e quello dell'interazione leptonica (o nucleare debole). Si è usata l'espressione in assenza di materia ed in presenza dei soli campi elettrico e gravitazionale per evitare l'espressione "nel vuoto". Infatti essa concorda sia con la definizione cartesiana data da Einstein per il quale il vuoto è pieno di campo, sia con la conseguenza del principio di Heisenberg e della QED per cui il vuoto è pieno di oggetti virtuali (rinormalizzabili secondo la QED). Ovviamente le concezioni di vuoto alla Einstein ed alla Heisenberg (o se si preferisce alla Feynman) pur in contrasto tra di loro si scontrano entrambe con la necessità di determinare il livello di energia del vuoto, questione che non viene qui affrontata, avendo anche conseguenze sull'*invarianza di Lorentz*.

Ma la vexata quaestio sollevata dal 4° assioma è se la *velocità causale massima*, la quale viene identificata tramite un ente fisico, e che rispetta così anche il 3° assioma della Relatività Ristretta, possa prescindere dal 2° assioma, ossia dalla struttura spazio-temporale di ciascuna interazione.

Questo ci porta a considerare tre evidenze sperimentali generali con cui fare i conti nella costruzione delle teorie fisiche.

I Evidenza.

Le distanze possono essere misurate solo scambiando energia con una interazione.

Vedasi a tal riguardo il 3° assioma della Relatività Ristretta.

II Evidenza.

L'osservatore è in grado di scambiare energia solo con l'interazione elettrica.

Vedasi a tal riguardo il principio di indeterminazione che ne è un luminoso esempio.

III Evidenza.

L'interazione elettrica è il paradigma (quindi) di tutti i fenomeni dovuti alle varie interazioni.

Quest'ultima evidenza meriterebbe in verità il titolo di *assioma della misura*, ed essere annoverato insieme agli altri quattro assiomi fondamentali.

La I e II evidenza insieme agli assiomi 2°, 3° e 4° ci riportano al problema di definire quali siano le entità variabili con cui descriviamo gli eventi fisici e primi fra tutti la misura delle distanze per la ricerca del nesso di causalità.

Concludiamo quindi introducendo i due postulati delle variabili.

I Postulato delle Variabili.

Esistono variabili statiche, le coordinate spazio-temporali, che non intervengono nella interazione.

Ciò ovviamente contraddice il 2° assioma fondamentale ovvero il principio di solidarietà.

II Postulato delle Variabili.

Esistono variabili dinamiche, gli impulsi spazio-temporali, che intervengono nelle interazioni (ma sono misurati solo elettricamente).

In conclusione possiamo porre il problema se l'estensione del principio di solidarietà a tutte le interazioni possa imporre di considerare tutte le variabili come dinamiche, in tal caso si avrebbe anche il problema di riconsiderare anche il significato del principio di indeterminazione almeno nell'uso alla Yukawa in cui non vi sarebbe più una relazione tra coordinate (variabili statiche) e momenti (variabili dinamiche), ma solo tra variabili dinamiche, con grande vantaggio della omogeneità logica.

- - - - -

Fabio Cardone è nato a Chieti, nel 1960. Laureato in fisica, perfezionatosi in fisica delle particelle elementari, ha studiato a Pisa, L'Aquila, Ginevra, Roma, e lavorato tra l'altro presso i Laboratori di Fisica dell'INFN, del CERN, della Wisconsin University. Docente di fisica presso la Syracuse University, le Università della Tuscia (Viterbo) e L'Aquila, le Università Gregoriana e San Tommaso. Vincitore del Premio Nazionale della Fisica Galileo Galilei, è attualmente membro del Gruppo Nazionale Fisica Matematica dell'INDAM, e consulente di uno dei gruppi parlamentari presso la VII Commissione, Istruzione e Ricerca,

del Senato della Repubblica.