

2

IL PERCORSO CONCETTUALE

Presupposti didattici

L'introduzione storica del capitolo precedente si è brevemente soffermata solo su alcuni sviluppi della teoria dei quanti che sono stati raggiunti dagli anni '30 agli anni '50 del secolo scorso, accennando appena all'esistenza del modello standard e trascurando moltissimi contributi importanti come quelli del paradosso EPRⁱ o della disuguaglianza di Bellⁱⁱ. Da quegli anni fino ad oggi, insomma, molti progressi sono stati fatti nella conoscenza della fisica quantistica; alcuni di questi sono così importanti per "capire" il mondo in cui viviamo che li utilizzeremo in seguito per meglio argomentare la nostra presentazione.

Tuttavia, già da quello che abbiamo detto nel nostro primo capitolo, si intuisce quanto poco fondata sia una presentazione che ponga la meccanica quantistica come teoria di riferimento, in qualche modo come teoria fondamentale; visto che proprio negli anni in cui veniva formulata, se ne cercava il superamento (e proprio da parte degli stessi fisici che la stavano costruendo) per arrivare ad una teoria completa anche per il campo elettromagnetico. Come abbiamo detto tale teoria esiste nell'ambito generale della teoria quantistica dei campi, si chiama elettrodinamica quantistica e, nella sua formulazione "definitiva" risale alla metà degli anni '40 del secolo passato. Essa è da tutti ritenuta la migliore teoria mai sviluppata dall'uomo, anche se, come abbiamo già detto, negli anni '70 è stata inglobata in una teoria più ampia (il cosiddetto "modello standard" principalmente dovuto a Glashow, Weinberg e Salam) che però non ne altera gli aspetti epistemologici fondamentali e anche se, oggi, molti fisici pensano che essa sia solo una versione a "bassa energia" di una teoria più fondamentale. Dal punto di vista didattico, non dovendoci occupare della costruzione di teorie che ancora non conosciamo, riteniamo che la teoria quantistica dei campi debba essere presa come teoria di riferimento per l'insegnamento della fisica quantistica, soprattutto se pensiamo, con Weinberg, che "la ragione per la quale le teorie quantistiche dei campi descrivono la fisica alle energie ora accessibili è che ogni teoria quantistica relativistica a energie sufficientemente basse avrà l'aspetto di una teoria quantistica dei campi."ⁱⁱⁱ

Non è certamente questo che accade nelle presentazioni scolastiche usuali della fisica quantistica, quelle che chiamiamo presentazioni tradizionali, nelle quali non solo il riferimento non è certamente la teoria quantistica dei campi ma c'è anche grande disparità tra la metodologia di insegnamento della fisica classica e quella della fisica quantistica (con questo non intendiamo, però, dire che la fisica classica sia presentata in maniera didatticamente efficace...).

Infatti nei manuali in uso nelle nostre scuole, mentre la fisica classica risulta essere presentata in un assetto sufficientemente logico, che potrebbe consentire all'allievo l'acquisizione dei concetti fondamentali della disciplina, per quanto riguarda la fisica moderna la trattazione si fa per lo più discorsiva e inframmezzata da molte considerazioni di natura epistemologica, che, seppur importanti, risultano di solito poco comprensibili e generano negli studenti la sensazione che ci siano "due fisiche" una rigorosa e chiara, l'altra, quella moderna, ammantata di mistero e un po' incomprensibile.

Nell'insegnamento della fisica moderna la preparazione degli studenti non viene quasi presa in considerazione: gli argomenti sono trattati praticamente sempre nello stesso modo, quasi indipendentemente da qualunque precedente formazione degli alunni! Così che, ad esempio, c'è

“poca” differenza tra quello che viene spiegato degli atomi nella scuola superiore di primo grado e alla fine del liceo scientifico! Questa scelta viene spesso giustificata dicendo che la complessità della matematica necessaria impedisce, nel caso della fisica del nostro secolo, una trattazione “più rigorosa” (come se invece la matematica della fisica classica fosse banale!). Comunque questo riferimento alle difficoltà formali e concettuali è una delle obiezioni più diffuse sulla possibilità di introdurre a scuola la fisica moderna e, più in particolare, la fisica quantistica. In questo senso il discorso di fa certamente complicato perché il significato dei concetti, e delle loro interrelazioni e relazioni con gli aspetti fenomenologici, è fortemente correlato agli aspetti formali della teoria stessa.

Noi riteniamo che per una presentazione didattica culturalmente significativa di ogni importante teoria fisica, risultino elementi indispensabili:

- la comprensione degli aspetti assiomatici e formali fondamentali,
- la discussione di numerosi esempi fenomenologici, qualitativamente e quantitativamente interpretabili attraverso al teoria,
- la visione del mondo che quasi inevitabilmente la teoria comporta,
- il progresso nelle conoscenze apportato dalla teoria.

L'insegnamento della fisica classica è basato su alcune linee guida chiare che servono a porre le fondamenta della disciplina (per esempio i principi della dinamica, i principi di conservazione, ecc.). Tali linee non seguono, in generale, la complicata cronologia delle diverse scoperte succedutesi nel tempo ma, partendo da un'analisi storica complessiva, fanno emergere i grandi problemi e i grandi principi alla base della teoria.

La fisica quantistica, invece, viene presentata senza una cornice metodologica unitaria e facendo un uso abbondante di informazioni cronologiche non strutturate sufficientemente in un quadro logico che le interpreti. Si ottiene, così, una ricostruzione frammentaria e poco consistente della disciplina. Inoltre la fisica quantistica (in generale tutta la fisica “moderna”) viene insegnata spesso in maniera nettamente più divulgativa di quanto non accada alla fisica classica.

La situazione attuale è che, nonostante i suoi cento anni di vita, la rivoluzione operata dalla fisica quantistica non appartiene ancora al patrimonio culturale del cittadino medio e neppure fa parte della visione del mondo della maggior parte delle persone di cultura; (è possibile che questa lacuna sia dovuta, per alcuni aspetti, al paradigma epistemologico della meccanica quantistica degli anni '30, all'interno del quale viene divulgata?). Una cosa ci sembra comunque certa: una revisione culturalmente significativa dei percorsi di formazione su temi di fisica quantistica è ormai indispensabile.

Non c'è qui spazio per discutere in maniera approfondita sulle diversità delle scelte per superare la situazione oggi esistente (per esempio tra approcci storici, storico-logici, logici...) e sui relativi vantaggi e svantaggi dal punto di vista didattico. Ci limitiamo, quindi, a fornire direttamente le linee guida, il quadro concettuale e lo schema del nostro percorso, che verrà presentato per sommi capi nei capitoli seguenti, con alcune brevi motivazioni.

Linee guida

In sintesi, noi proponiamo un ripensamento della usuale (peraltro un po' approssimativa) distinzione tra fisica classica e fisica quantistica. Infatti, da un punto di vista didattico ci appare utile “collocare” le conoscenze acquisite dalla fisica più in base al tipo di fenomenologia e alla “profondità” della descrizione considerati che alla cronologia della loro formulazione. In questo senso il nostro approccio è per livelli (appunto, come dicevamo nel capitolo 0) e, siccome la teoria più fondamentale oggi a disposizione è una teoria quantistica, quantistico è il livello più profondo di interpretazione della realtà di cui vogliamo occuparci.

L'idea di livello di descrizione, in fisica, è strettamente legato a quello di modello ed ecco perchè l'insegnamento della fisica deve essere consapevole dell'uso e del significato di modello e modellizzazione in fisica (anche se su questo punto c'è una vastissima letteratura che esprime

posizioni anche molto diverse fra loro), però noi su questo spenderemo solo qualche parola^{iv}. L'idea di modello in fisica fa riferimento ad una idealizzazione di una situazione complessa allo scopo di fare una descrizione quantitativa di una fenomeno, selezionando aspetti ritenuti importanti e trascurando altri aspetti ritenuti meno o poco importanti. Risulta allora evidente che questa operazione rinvia immediatamente a due questioni fondamentali: quello del contesto in cui si opera e quello del livello di descrizione del fenomeno prescelto. Per esempio modellizzare la Terra come un punto andrà bene nel discutere il suo moto di rivoluzione attorno al sole ma sarà insufficiente per spiegare l'alternarsi del giorno e della notte, per modellizzare la qual cosa è utile pensare alla Terra come ad una sfera. Se, però, vogliamo spiegare i fenomeni atmosferici dobbiamo pensare di tenere in considerazione molti più "dettagli". E' importante capire che questi modelli sono in un certo senso disposti in una gerarchia di livelli di descrizione, sono modelli di differente "profondità". A nostro parere è dello stesso tipo (ma con alcune differenze) la relazione tra due teorie successive una delle quali "includa" la prima: anche se gli aspetti concettuali delle due teorie sono talvolta molto diversi (e qui stanno le differenze rispetto all'esempio precedente) è possibile immaginare una delle due come un opportuno caso limite dell'altra, pur di effettuare, per così dire, nel passaggio al limite, anche l'opportuna traduzione degli aspetti concettuali secondo uno specificato e ben definito codice di traduzione. E', questo, un aspetto fondamentale che ci mostra la fisica come una conoscenza costruita per modelli teorici di nostra costruzione, ovvero per teorie fatte dall'uomo che, però, sono non arbitrarie e, anzi, in continuo progresso nel senso sopra specificato di essere capaci di "spiegare" una fenomenologia sempre più ampia. E' banale dirlo, ma questo in didattica deve essere tenuto ben presente ed è particolarmente importante nella didattica della fisica quantistica.

Per essere un po' più specifici, nell'insegnamento della fisica quantistica riteniamo che sia importante stare attenti al fatto che al suo interno si trovano aspetti e idee molto diversi fra loro, perché provenienti da modelli e teorie differenti, che possiamo rozzamente schematizzare in tre parti, facilmente riconoscibili da quanto detto nel cap. 1.

La prima parte è costituita dalla "prima fisica quantistica" che è quell'insieme di fenomeni e loro interpretazioni che hanno rivoluzionato la fisica approssimativamente dal 1900 al 1925. In questa prima parte troviamo, ad esempio, la spiegazione di Planck dello spettro del corpo nero, la spiegazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico, il modello atomico di Bohr e la teoria di Compton... dell'effetto Compton. Questa prima parte, pur non essendo per nulla marginale, non costituisce di per sé ancora una teoria: è piuttosto un insieme di modelli, anche importanti, con la comune idea di fondo dell'esistenza dei cosiddetti "quanti".

La seconda parte, che nasce dalla prima, è, invece, una teoria ben strutturata: è la Meccanica Quantistica con il suo preciso formalismo datole da Heisenberg, Jordan, Born, Schrödinger e Dirac. Essa è una teoria non relativistica, con assiomi ben definiti e consistenti, che descrive il comportamento di un numero finito di particelle materiali in interazione fra loro (elettroni, protoni ecc.).

La terza parte è la "teoria quantistica dei campi". Essa è nata dalla necessità di rendere relativistica la meccanica quantistica ed è poi sfociata in una teoria che, per certi aspetti è differente da questa, ma che presuppone la meccanica quantistica per essere formulata. Essa descrive la materia e l'antimateria e la fisica studiata negli acceleratori di particelle. Parte centrale della teoria quantistica dei campi è l'elettrodinamica quantistica al cui interno, ad esempio, si ha una trattazione consistente del campo elettromagnetico e, quindi, del fotone che, nato con Planck nel 1900, riceve solo nel 1945 una descrizione consistente.

Noi riteniamo che, analogamente a quanto si fa ad esempio per la meccanica classica, nell'insegnamento della fisica quantistica ci si debba rifare a idee e concetti che fanno esplicito riferimento a una precisa teoria e non, quindi, come tanto spesso viene fatto, mescolando fatti e idee presi acriticamente sia dalla prima teoria dei quanti sia dalla meccanica quantistica (ma parlando poi anche di fotoni senza riferimento all'elettrodinamica quantistica...); infatti, spesso, molte interpretazioni, didattiche e divulgative della fisica quantistica, si riferiscono al generico insieme di queste tre parti senza distinguerle con chiarezza e anzi mescolandole con molta ingenuità.

Per progettare un percorso secondo queste idee, e che quindi faccia preciso riferimento ad una teoria fissata, che per noi sarà la teoria quantistica dei campi, scegliamo un punto di vista privilegiato che ci sembra naturale, quello di un osservatore che guarda l'intero corpo delle conoscenze fisiche a partire dalla fisica di oggi, all'inizio del III millennio, e che sceglie come sistema di riferimento, per sviluppare una didattica della fisica, una fra le possibili ontologie e visioni del mondo della fisica di oggi; e non, per esempio, un sistema di riferimento cronologico-storico; ciò non vuol dire che scegliamo di essere necessariamente in contrasto con la storia: anzi, in alcuni casi non trascurabili lo sviluppo storico delle idee coincide con la logica della nostra presentazione.

Questo ci sembra un punto essenziale che caratterizza la nostra proposta; infatti, ad esempio, nessuno oggi penserebbe di insegnare la meccanica newtoniana come l'avrebbe insegnata Newton (...senza l'utilizzo dei vettori, senza il concetto di energia, senza principi di conservazione...!). Tutto il nostro insegnamento della meccanica classica è per noi (quasi automaticamente) riletto alla luce di quello che è importante oggi, è vista con gli occhi di oggi. Perché questo modo di procedere così naturale dovrebbe essere abbandonato per la fisica del '900?

Nella nostra proposta non parleremo della cosiddetta "crisi della fisica classica", ma certamente sarà importante discutere dei limiti intrinseci (cioè strutturali, interni alla teoria e alla sua visione del mondo) ed estrinseci (cioè dettati dalla scoperta di nuove fenomenologie) di validità delle teorie e della necessità di un loro superamento per raggiungere una maggiore capacità di spiegazione e predizione e un livello di comprensione "più profondo".

Come abbiamo già detto, lo studio della fisica quantistica non è terminato nei primi trent'anni del secolo scorso e nemmeno negli anni '50. Molte conoscenze acquisite negli anni successivi sono utili per chiarire alcuni punti, altrimenti oscuri, delle teorie quantistiche. Perciò prendiamo in considerazione, per quanto possibile, tutto il '900, e persino alcuni esperimenti effettuati nel XXI secolo.

Avere in mente questo traguardo comporta un nuovo modo di guardare la fisica e obbliga a ridisegnare, almeno in parte, il panorama delle conoscenze. Perciò proponiamo una ricostruzione logica della fisica quantistica "per" l'insegnamento:

1. che parta dalle conoscenze di "oggi",
2. che ponga grande attenzione alle conoscenze acquisite in fisica in tutto il XX secolo e oltre,
3. che scelga la teoria quantistica dei campi come teoria di riferimento.

Per quanto riguarda il terzo punto, osserviamo che le visioni del mondo che scaturiscono dalla meccanica quantistica e dalla teoria quantistica dei campi sono diverse. La meccanica quantistica è l'adattamento del mondo newtoniano delle particelle puntiformi ai fenomeni quantistici mentre la teoria quantistica dei campi è l'evoluzione della teoria dei campi classica per rendere conto della quantizzazione. L'oggetto primario di quest'ultima teoria è il campo, non le particelle, e gli aspetti statistici e "particellari" della fisica quantistica sono principalmente concentrati nella descrizione delle interazioni. Come dice il famoso fisico Freeman Dyson "noi siamo campi piuttosto che particelle".

La meccanica quantistica fu di straordinaria importanza nella comprensione della fisica quantistica e, ovviamente, è utilissima ancora oggi in molti casi: ogni volta che il sistema studiato può essere considerato come "fatto da" un piccolo numero di ben specificate particelle non relativistiche (di questo ci occuperemo meglio in seguito) e risulta addirittura indispensabile, almeno per quanto ne sappiamo oggi, per spiegare i sistemi legati e, più in generale, la struttura delle cose intorno a noi. Questi fatti importanti, però, da soli, non bastano per fare dalla meccanica quantistica "la" teoria di riferimento, quella che dà "forma" alla nostra visione del mondo, anche perché solo in teoria quantistica dei campi è possibile parlare "coerentemente" di fotoni..

Quadro concettuale

Riteniamo importante dare il quadro concettuale complessivo prima di discuterne più a fondo i contenuti, infatti pensiamo che così sia più facile riconoscere le interrelazioni fra gli argomenti

presentati (certamente correndo, però, il rischio di essere fraintesi...). Qui di seguito descriviamo sommariamente tale quadro concettuale.

La descrizione dei sistemi fisici viene data in termini di campo che diventa il concetto chiave. “Questo punto di vista ... forma il dogma centrale della teoria quantistica dei campi: la realtà fondamentale è un insieme di campi ... tutto il resto è derivato come conseguenza” (Steven Weinberg).

A livello macroscopico i sistemi fisici sono descritti in termini continui per mezzo di campi di pressione, di temperatura, di densità ecc. che soddisfano precise leggi fenomenologiche come quelle della termodinamica e della fluidodinamica. Le interazioni tra questi sistemi, con scambi di quantità di moto, di energia, di momento angolare ecc. vengono descritti per mezzo di altri campi che sono campi di forza, come il campo elettromagnetico e quello gravitazionale. In tale contesto parliamo di continui materiali e di continui dei campi di forza.

Se passiamo ad una descrizione più raffinata dei sistemi fisici, ci accorgiamo che le leggi fenomenologiche si spiegano molto bene in termini di interazioni elementari locali ed universali: eventi nello spazio-tempo nei quali si ha lo scambio quantizzato di alcune grandezze (carica elettrica, massa, momento angolare ecc.). Abbiamo in mente innanzitutto la chimica e le sue leggi delle proporzioni multiple, dei rapporti costanti, degli equivalenti, così bene interpretate dall’idea di interazione locale (in un punto preciso, tra singoli atomi e molecole) e universale (che avviene cioè sempre allo stesso modo). Ecco nascere le prime idee di quanto, cioè quelle di atomo, di molecola, di ione. I sistemi in interazione chimica si “scambiano” singoli ioni, in precise posizioni spaziali e determinati istanti di tempo; ecco perché diciamo che lo scambio di uno ione è un evento nello spazio-tempo.

Anche in dinamiche differenti da quelle della chimica, l’idea vincente ed unificante, che è servita a spiegare le leggi osservate, è stata quella di descrivere le interazioni in termini di scambio di quanti. E’, infatti, nella dinamica che nasce il concetto di quanto che, a seconda del tipo di interazione considerato, prende nomi differenti: così si hanno gli atomi, le molecole e gli ioni che sono i quanti della chimica, i nucleoni che sono i quanti della fisica nucleare e le particelle elementari che sono i quanti della fisica delle alte energie.

L’ente centrale della descrizione è, ripetiamo, il campo; parlare di quanti è solo un modo efficace per descrivere certe caratteristiche della dinamica dei sistemi. In modo pittresco possiamo dire che i quanti nascono e muoiono nelle interazioni obbedendo a regole che dipendono dalla dinamica del campo di cui essi sono il quanto.

Si hanno così il fotone, che è il quanto del campo elettromagnetico, l’elettrone, che è il quanto del campo elettronico, il protone, che è il quanto del campo protonico, e così via.

Non stupisce, a questo punto, che ci siano degli aspetti statistici, nella descrizione delle interazioni, che sono, però, regolati da leggi generali comuni a tutti i sistemi; di questo tipo sono, per esempio, i principi di conservazione. Risulta, però, anche evidente l’inconsistenza di alcune domande relative, ad esempio, alla distinguibilità dei quanti o alla traiettoria da essi seguita che, legittime in meccanica quantistica, perdono gran parte del loro significato in teoria quantistica dei campi. Infatti detto in modo grossolano e un po’ impreciso: la realtà fisica è attribuita ai campi mentre i quanti sono connessi alla discretizzazione delle eccitazioni dei modi normali del campo in interazione. Per taluni aspetti questa distinzione somiglia a quella sulla natura del calore, che non è una cosa che fluisce da un corpo ad un altro ma è, in certo senso, solo una modalità di scambio di energia.

Nelle interazioni la struttura quantistica diventa evidente, al contrario, per i campi liberi essa è nascosta. Quest’ultima è, però, una situazione limite ideale; infatti tutti i campi, perché se ne possa fare un’analisi fisica, devono poter interagire e questo significa che devono essere accoppiati tra loro tramite campi “di forza”.

Così, tanto per fare due esempi: il campo elettronico è accoppiato al campo elettromagnetico e il campo neutronico al campo elettrodebole. Lo studio di ogni campo materiale è sempre così associato allo studio dei campi di forza ad esso accoppiati.

Non tutti i campi hanno, però, lo stesso “status” epistemologico; alla luce delle nostre conoscenze attuali, infatti, alcuni campi appaiono più “fondamentali” o “elementari” di altri. Per esempio il campo elettromagnetico e il campo elettronico sono campi fondamentali, mentre il campo protonico non lo è, nel senso che la dinamica delle interazioni del campo protonico può essere spiegata in termini di campi di quark e di gluoni; ma la dinamica, diciamo, del campo elettronico, non è riducibile, per quanto ne sappiamo ora, a quella di altri campi più elementari. Sono tali campi elementari che, nella nostra visione del mondo, costituiscono l’universo fisico. E, in un certo senso, tutta l’evoluzione della fisica si può rileggere in termini di continue unificazioni di campi che prima erano pensati separati o di riduzioni a campi sempre più “elementari”.

Abbiamo, così, una sorta di stratificazione della realtà: alla base ci sono i campi fondamentali, l’interazione di questi genera materia che, ad un livello di descrizione meno fine ci appare costituire altri campi meno fondamentali, che a loro volta interagiscono e generano sistemi descritti da campi ancora diversi e così via. Per esempio i campi fondamentali dei quark e dei gluoni interagiscono a dare i campi protonico e neutronico, questi interagiscono con i campi di forza nucleari a dare i campi nucleari. Questi ultimi si “combinano” con il campo elettromagnetico a dare i campi atomici che, tramite le forze di Van der Waals, costituiscono la materia che cade direttamente sotto i nostri sensi ecc. E’ in questo modo che differenze quantitative (per es. nelle energie) generano aspetti qualitativi.

Il sogno di tutta la Fisica è poter ricondurre tutta la realtà nota ad un principio unico. Così le forze elettriche e magnetiche appaiono manifestazioni dello stesso campo elettromagnetico che a sua volta è manifestazione “a bassa energia” del campo elettrodebole. Le stesse forze di Van der Waals altro non sono che un “residuo” di forze elettromagnetiche accoppiate ai campi atomici. Abbiamo così l’unificazione del campo elettrico e di quello magnetico in un unico campo elettromagnetico e tutta la “riduzione” della chimica a campi materiali interagenti tramite il campo elettromagnetico.

Schema

Nei prossimi capitoli proveremo a dare una descrizione del mondo e della fisica basata sul concetto di campo, a partire da alcuni campi ben noti, quali quelli tipici della fluidodinamica; e rileggendo, in termini di una non consueta fisica non quantistica dei campi materiali, alcune esperienze (certe anche molto recenti) che vengono normalmente interpretate in termini di proprietà ondulatorie delle particelle e, di norma, “incasellate” nel quadro della meccanica quantistica.

Introdurremo, quindi, il concetto di quanto quale strumento indispensabile per interpretare le interazioni fra campi. Cercheremo, inoltre, di capire come e perché, in opportune condizioni limite, è opportuno passare alla descrizione data dalla meccanica quantistica, caratterizzeremo le proprietà fondamentali dei sistemi quantistici confinati, e discuteremo perché, in alcuni casi è lecito parlare di particelle che seguono una determinata traiettoria, come accade negli acceleratori di particelle. La mappa della presentazione è visualizzata in Fig. 2.1. Essa non è una mappa concettuale in senso tecnico (per esempio non ci sono frecce di connessione tra un riquadro e l’altro e neppure parole di collegamento tra le scritte nei rettangoli), ciononostante riteniamo che possa servire per avere una visione non soltanto lineare delle connessioni che abbiamo in mente mentre scriviamo.

PERTURBAZIONI NEI CAMPI CONTINUI

CAMPIDI FORZA CONTINUI

LA MATERIA COME UN CONTINUO

OTTICA ELETTRONAGNETICA

PACCHETTI D'ONDA

OTTICA DEI CAMPI MATERIALI

QUANTIZZAZIONE E CAMPI QUANTISTICI

INTERAZIONI ELETTRONAGNETICHE E
QUANTI ELETTRONAGNETICI

INTERAZIONI CHIMICHE E
QUANTI MATERIALI

ASPETTI PARADOSSALI DI UNA TEORIA DEI QUANTI TROPPO INGENUA

QUANTIZZAZIONE SEMICLASSICA DEI CAMPI

TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI

IL LIMITE DELLA MECCANICA QUANTISTICA, IL LIMITE SEMICLASSICO DELLA TEORIA DEI CAMPI E GLI STATI LEGATI

INTERPRETAZIONE STATISTICA

PARTICELLE COME QUANTI DEI CAMPI

RELAZIONI DI DE BROGLIE E DI HEISENBERG

MECCANICA QUANTISTICA

STATI LEGATI

IL LIMITE CLASSICO

APPROXIMAZIONE CLASSICA

IL LIMITE DELL'OTTICA GEOMETRICA

PARTICELLE E ACCELERATORI

Fig 2.1 Mappa del percorso concettuale qui presentato

NOTE CAPITOLO 2

ⁱ Einstein A., Podolsky B., Rosen N.: Phys. Rev. **47**, 777 (1935).

ⁱⁱ Bell J.: Physics **1**, 195 (1964).

ⁱⁱⁱ Weinber S. *The Quantum Theory of Fields. Volume I. Foundation.*, Cambridge University Press, New York pag. xxi (1995), pag. xxi.

^{iv} Cfr.: Prosperi G. M. et al. *Fisica* editrice La Scuola, Brescia (2000).