

10 Paradossi di una teoria dei quanti “troppo ingenua” - *Marco Giliberti*

In questo paragrafo vogliamo dare alcune brevi indicazioni sul perché è necessario avere una **teoria di campo** e perché il concetto di particella non sembra veramente quello centrale. Fino ad ora abbiamo fatto un percorso molto circoscritto, che fondamentalmente si riassume in due sole cose.

- 1) **Qualunque propagazione libera, di “pennelli” materiali e non materiali, è regolata da un’equazione delle onde;**
- 2) **Quando delle sostanze interagiscono tra loro, cioè quando questi campi materiali o elettromagnetici interagiscono gli uni con gli altri, l’interazione è descritta in termini quantistici.**

Quello di cui vogliamo discutere adesso è la seguente cosa e cioè: perché non è corretto dire che un pennello di luce è fatto da fotoni, un pennello elettronico è fatto da elettroni, visto che ci viene così naturale pensarlo e visto che per descrivere le interazioni dobbiamo introdurre i quanti? Perché questo pensiero così naturale non va bene? Per capirlo analizziamo alcuni importanti fatti sperimentali e mostriamo gli aspetti paradossali di un’idea così ingenua.

10.1 Paradosso della doppia fenditura

Iniziamo con il famoso esperimento della doppia fenditura. Il significato concettuale dell’esperimento consiste nel mettere in luce le grosse limitazioni dell’interpretazione del quanto come oggetto.

Consideriamo un pennello materiale o un pennello elettromagnetico coerente che, emesso da una opportuna sorgente, va a incidere su una doppia fenditura. Per esempio, se la sorgente è un piccolo laser, quello che osserviamo è che la luce, diffratta da ciascuna fenditura, mostra le tipiche frange di interferenza sullo schermo posto al di là delle fenditure.

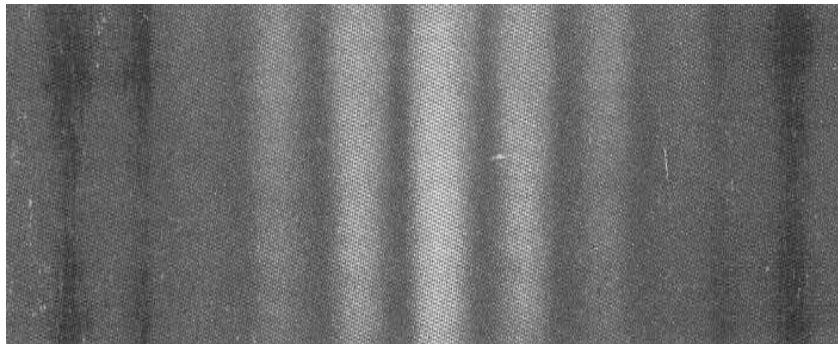


Fig. 5.7 Diffrazione da una doppia fenditure

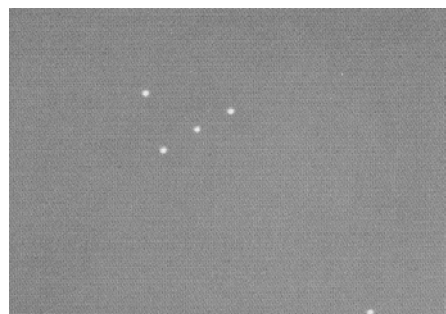
Adesso immaginiamo di diminuire moltissimo l’intensità della luce; quello che vediamo sullo schermo non è un’immagine sbiadita e diffusa delle frange di interferenza ma, invece, vediamo dei singoli puntini luminosi. Prima vediamo un puntino, poi un altro puntino, poi un altro ancora... e così di seguito. Alla fine vediamo che i puntini si sono distribuiti sullo schermo in modo da creare la figura delle frange di interferenza classiche, che si vedevano con luce sufficientemente intensa.



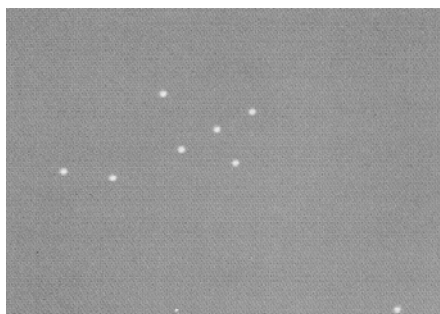
1 elettrone



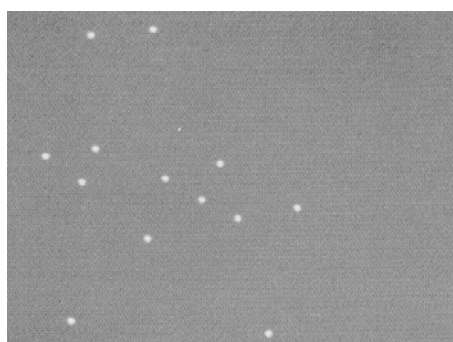
3 elettroni



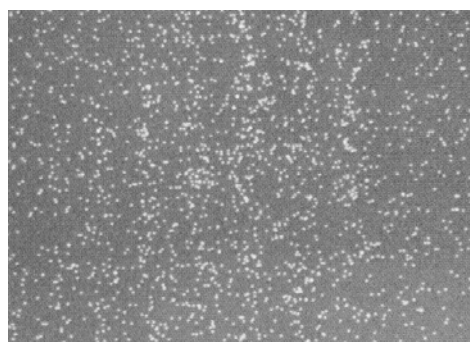
5 elettrone



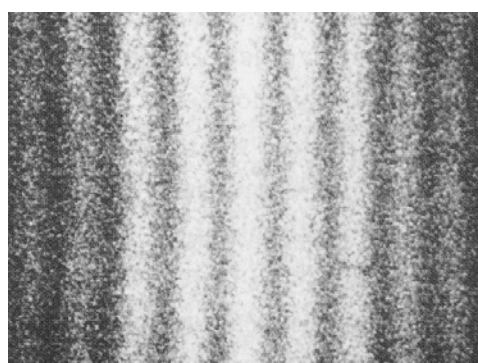
7 elettroni



13 elettroni



sempre più elettroni



50.000 elettroni

Fig. 5.8

Tre elettroni..., cinque elettroni..., sette elettroni..., 13 elettroni... aumentiamo il numero degli arrivi, aspettiamo... alla fine cominciano a vedersi davvero le frange quando ci sono migliaia di elettroni, e con 50.000 elettroni le frange di interferenza sono ben distinguibili.

Se rifacciamo l'esperimento ripartendo da capo, che cosa troviamo? Il primo elettrone sullo schermo **non** occupa la posizione che aveva il primo elettrone nell'esperimento precedente e, così, in generale sarà per la rivelazione di tutti gli elettroni sullo schermo. Ma alla fine,

dopo un numero sufficiente di rivelazioni, appariranno le frange di interferenza con la stessa struttura, dimensioni e posizione di quelle ottenute precedentemente.

Notiamo così uno dei primi aspetti importanti della teoria quantistica della materia e della radiazione: **il suo carattere statistico.**

Nella ripetizione di un singolo atto sperimentale non saremo, in generale, in grado di predire dove verrà rivelato un quanto ma, ripetendo un numero sufficientemente grande di volte l'atto sperimentale, otterremo una distribuzione degli arrivi ripetibile e prevedibile: una regolarità statistica. Sarà proprio su questa distribuzione statistica che la teoria saprà fare previsioni.

Tornando ora al tema principale del nostro discorso, che cosa ha di veramente strano e paradossale questo esperimento, tale da esser in un qualche senso il prototipo di tutti gli esperimenti che mettono in luce gli aspetti più stravaganti, tipici della fisica quantistica?

Immaginiamo, tanto per rendere concreto il discorso, di eseguire l'esperimento con un pennello elettronico di così bassa intensità da avere, di volta in volta un solo elettrone sullo schermo. Che cosa si è tentati di pensare? Che quando un puntino sullo schermo segnala un elettrone allora potremmo pensare che un elettrone è precedentemente uscito dal cannoncino elettronico, ha viaggiato nello spazio circostante, è passato da una delle due fenditure, ed è arrivato sullo schermo.

Questa interpretazione non è così naturale come sembra. Infatti se rifacciamo l'esperimento chiudendo una delle fenditure (per esempio chiudendo quella che abbiamo chiamato fenditura "2", fig. 5.9), troviamo che gli elettroni vengono rivelati sullo schermo in punti tutti vicini tra loro e che sono fondamentalmente di fronte alla fenditura 1 (a parte alcuni effetti di "diffrazione"). Analogamente, se chiudiamo la fenditura "1" e lasciamo aperta la "2", troviamo che gli elettroni sono tutti raggruppati di fronte alla fenditura "2".

Allora, **se gli elettroni passassero da una fenditura oppure dall'altra**, l'effetto ottenuto avendo prima chiusa una fenditura e poi chiusa l'altra e poi sommando i risultati ottenuti, **sarebbe** uguale a quello ottenuto con entrambe le fenditure aperte!

Gli effetti, però, sono differenti: l'esperimento effettuato con entrambe le fenditure aperte contemporaneamente fornisce risultati diversi da quelli ottenuti sommando i risultati con le fenditure aperte una alla volta.

Infatti, nel primo caso si ha la comparsa delle **frange di interferenza** e nel secondo **no**.

In un certo senso ancora più strano è il fatto che quando sono aperte entrambe le fenditure ci siano dei punti in cui non arrivano elettroni (ci riferiamo ai minimi della figura di interferenza); punti che invece sono raggiunti dagli elettroni quando le fenditure sono aperte a turno; è come se le due possibilità offerte agli elettroni, di passare dalla fenditura "1" o dalla "2" dessero luogo ad una impossibilità!

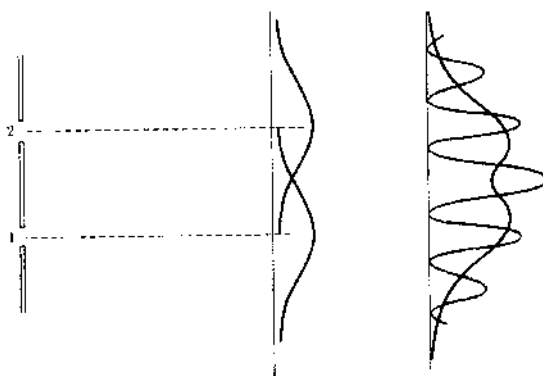


Fig. 5.9 In sequenza: intensità della luce diffratta separatamente da ciascuna fenditura; intensità della luce diffratta da due fenditure contemporaneamente sovrapposta alla somma delle due intensità precedenti.

La conclusione di questo discorso è che è difficile pensare che gli elettroni passino per una o l'altra delle due fenditure.

D'altra parte gli elettroni non passano nemmeno per entrambe le fenditure contemporaneamente, tanto è vero che **se mettessimo due rivelatori**, ognuno immediatamente dopo ciascuna delle fenditure, vedremmo che sempre uno soltanto dei due rivelatori darebbe un segnale. Non succede mai che l'elettrone si divida a metà.

Quindi l'elettrone non è passato dalla fenditura "1", non è passato dalla fenditura "2", non è neppure passato fuori dalle fenditure, perché mettendo dei rivelatori attorno all'apparato vediamo che non danno mai un segnale, e non è passato da entrambe. Non è passato da entrambe perché non scattano mai i rivelatori contemporaneamente. Non è passato fuori perché mai nessuno dei rivelatori messi fuori è scattato, e non è passato dalla fenditura "1" o dalla "2" perché altrimenti la figura che otterremmo quando è aperta solo una delle fenditure, sommata a quella che avremmo se fosse aperta solo l'altra sarebbe uguale alla figura che otterremmo quando sono aperte tutte e due.

Quindi, se vogliamo proprio pensare che l'oggetto "elettrone" esca dalla sorgente e arrivi al rivelatore, sappiamo anche, però, che questo oggetto non passa dalla fenditura "1", non passa dalla "2", non passa fuori e non passa da tutte e due! E' questo un oggetto dotato di una cinematica "sensata"? Non ci sembra poi tanto...

L'idea per certi aspetti fallimentare della Meccanica Quantistica, fallimentare dal punto di vista interpretativo non certo dal punto di vista della capacità predittiva, è proprio quella di attribuire ai quanti una propria cinematica, magari inusuale, come se essi facessero qualche strana cosa nello spazio-tempo. Questo non è vero. Il quanto è un aspetto della dinamica dell'interazione tra campi. I campi interagiscono gli uni con gli altri e la dinamica dell'interazione è scritta dai quanti.

Insomma, nell'esperimento descritto sopra non ha senso pensare che un quanto abbia una propria traiettoria

E' per certi aspetti più utile pensare che sia il campo (elettromagnetico o materiale a seconda dei casi) che sta passando da entrambe le fenditure.

Questo campo interagisce con il rivelatore, in modo stocastico, tramite quanti e la distribuzione di questi quanti è prevedibile solo statisticamente.

Perciò l'idea, abbastanza naturale, di pensare che se in un certo punto del rivelatore è stato rivelato un quanto allora il quanto c'era anche prima, è del tutto inappropriata.

E' inappropriata per quanto sappiamo dagli esiti degli esperimenti, non per qualche strano motivo filosofico.

Vediamo un paradosso classico della **Meccanica Quantistica** (non della Teoria Quantistica dei Campi)

10.2 Il gatto di Schrödinger - Ovvero il concetto di misura in fisica quantistica – Ovvero il concetto si "stato" in fisica quantistica

"Le nostre prospettive scientifiche sono ormai agli antipodi fra loro. Tu ritieni che Dio giochi a dadi con il mondo: io credo invece che tutto obbedisca ad una legge, in un mondo di realtà obiettive, che cerco di afferrare per via totalmente speculativa. Lo credo fermamente, ma spero che qualcuno scopra una strada più realistica o meglio un fondamento più tangibile di quanto non abbia saputo fare io. Nemmeno il grande successo iniziale della teoria dei quanti riesce a convincermi che alla base di tutto vi sia la casualità, anche se so bene che i colleghi più giovani considerano questo atteggiamento come un effetto di arteriosclerosi. Un giorno si saprà quale di questi due atteggiamenti istintivi sarà stato quello giusto."

Albert Einstein

Alessandro Tomasiello Department of Physics, Harvard University, Cambridge,
Massachusetts (USA)

E' uno de "risponditori" del sito "Ulisse": <http://ulisse.sissa.it/chiediAUlisse/index.html>

Attenzione: chi risponde non ha un approccio "neutrale" ma fa parte di una corrente di pensiero ben precisa... Non di tutti so riconoscerla ma senz'altro il Prof. Tomasiello non considera interessante la Teoria quantistica dei Campi visto che non la cita, al momento di elencare possibili teorie esplicative (vedi più avanti) e lavora invece in stretto contatto col Prof. Ghirardi di Trieste che è un "grande nome" in Italia e anch'egli non si interessa di Teoria Quantistica dei campi...

"**Erwin Schrödinger** introdusse il suo famoso "esperimento pensato" nel 1935 per evidenziare in modo vivido le *difficoltà teoriche* del **processo di misurazione** in meccanica quantistica.

In una stanza perfettamente isolata dall'esterno, un *perfido fisico* chiude un atomo radioattivo, una fiala di un potente veleno e un gatto. L'atomo è in uno stato tale per cui, a una certa ora, avrà uguale probabilità di essere o no decaduto. Il fisico ha anche collegato l'atomo al veleno in modo che questo sia liberato se l'atomo decade. Il veleno è abbastanza potente da uccidere immediatamente il gatto.

All'ora convenuta il fisico aprirà la stanza. Cosa troverà?

Un attimo prima dell'apertura, lo **stato** che descrive il sistema totale della stanza (atomo più fiala più gatto) sarà con **probabilità** del cinquanta per cento nella configurazione in cui l'atomo non è decaduto, la fiala di veleno è intatta e il gatto è illeso. Ma con altrettanta probabilità il fisico si troverà davanti l'atomo decaduto, il veleno liberato e il gatto morto.

Quando il fisico apre la stanza, la meccanica quantistica dice (nella sua interpretazione più usuale) che avviene un processo di *misurazione*. In generale, questo processo forza il sistema misurato a "*compiere una scelta*". Se per esempio il fisico avesse più convenzionalmente deciso di osservare il solo atomo, gli avrebbe imposto, al momento convenuto, di compiere una scelta. Un attimo prima della misura l'atomo si sarebbe trovato in uno stato di sovrapposizione tra l'essere decaduto o meno. Un attimo dopo la misura, l'atomo si sarebbe trovato nello stato "decaduto" o in quello "intatto": senza sovrapposizione.

Questo postulato della meccanica quantistica può sembrare strano al neofita. Ma trasferirlo al mondo macroscopico dell'esperienza quotidiana eleva questa stranezza al rango di paradosso. Torniamo infatti al nostro gatto.

La **sovrapposizione in due stati** dell'atomo è adesso trasferita -- sembrerebbe -- anche a un oggetto macroscopico di esperienza quotidiana. È l'intero sistema della stanza (atomo più fiala più gatto) a essere in uno stato di sovrapposizione di due possibilità. Se anche il fatto che questo sia vero per un atomo non sciocca più il fisico, che in questa peculiare condizione si trovi un gatto sembra assurdo anche al più entusiasta esperto di meccanica quantistica.

Il vero problema è, a che punto di tutta la procedura si debba considerare che è avvenuta una **misurazione**. La risposta classica, che ho subdolamente suggerito sopra, è: quando il fisico apre la stanza. È più o meno la cosiddetta "**interpretazione di Copenhagen**", secondo cui la scienza è fatta dagli uomini, e non tratta che delle misurazioni che questi compiono.

Di più non è lecito chiedersi: domande su cosa sia dello stato prima della misura sono senza significato. (La maggior parte dei fisici ha in effetti rinunciato a queste domande accontentandosi pragmaticamente degli spettacolari risultati sperimentali della teoria: un approccio che il famoso fisico americano **Richard Feynman** battezzò come "zitto e calcola").

Schrödinger fece notare col suo paradosso le difficoltà di questo punto di vista. Il momento della misurazione è, come ricordato più sopra, quello in cui lo stato cessa di essere in una sovrapposizione di più possibilità, e "compie una scelta". Se si svuota questo processo di connotazioni umane o psicologiche (ragione per cui alle volte si parla semplicemente di

"riduzione dello stato" invece di "misurazione"), non è più così naturale pensare che la misurazione o riduzione avvenga quando la coscienza umana entra in gioco. La fisica non dovrebbe trattare in fin dei conti gli esseri umani in modo speciale.

Perché non sarebbe per esempio il gatto stesso a "compiere una misurazione"? Oppure a questo punto, la fiala di veleno?

Scartiamo ovviamente queste due possibilità, ancora più arbitrarie di quella proposta dall'interpretazione di Copenhagen. Ma quale punto, allora, del processo dal microscopico al macroscopico messo in scena da Schrödinger non ci sembrerà arbitrario?

Mai. Nemmeno al momento in cui il fisico apre la stanza. Entrambe le possibilità potrebbero in fin dei conti essere vere: il gatto è morto e il fisico che ne vede il cadavere, e il gatto è vivo e fisico che ne prende atto. Questa è più o meno l'interpretazione dei "**molti mondi**" proposta da **Everett** nel 1957.

Ad ogni simile biforcazione, tutte le possibilità coesistono in "universi paralleli" che non interagiscono. Questa proposta ha, non sorprendentemente, attirato enormemente l'attenzione dei mezzi di comunicazione. Ma anche di qualche fisico: recentemente il fisico **Max Tegmark** ha proposto provocatoriamente un "suicidio quantico" in cui uno sperimentatore sottopone se stesso, invece di un gatto, a un esperimento potenzialmente fatale, magari con possibilità molto alte a proprio sfavore. Se la teoria dei molti mondi è corretta, non c'è da avere paura: in almeno uno dei mondi paralleli lo sperimentatore rimarrà vivo.

Vi è anche un'altra possibilità. Che il passaggio dalla meccanica quantistica al mondo classico della nostra esperienza avvenga in modo graduale, controllato da modifiche alle regole matematiche della meccanica quantistica. La meccanica quantistica è matematicamente "**lineare**", una caratteristica non condivisa dalla meccanica classica. Su scale più grandi interverrebbero "non linearità" che *interpolerebbero* tra la meccanica quantistica e quella classica. La riduzione della *funzione d'onda* avverrebbe spontaneamente e senza l'intervento umano.

Questa possibilità avrebbe il pregio di eliminare la strana dicotomia *classico/quantistico* con cui siamo attualmente costretti ad andare avanti. L'idea è per adesso in corso di elaborazione; un primo modello concreto di come ciò possa avvenire è stato trovato nel **1986** da **Ghirardi, Rimini e Weber**. È bene però sottolineare che si tratta di un modello fenomenologico, non inserito all'interno di una teoria più generale.

Vi sono naturalmente altre proposte di risoluzione: per esempio la cosiddetta *meccanica di Bohm*, l'interpretazione transazionale ecc. Il meno che si possa dire però è che per adesso il problema rimane aperto"

Vedete che modalità differenti d'interpretazione?!?

La trattazione approfondita della questione sollevata dal cosiddetto "paradosso del gatto di Schrödinger" è complessa: afferisce i concetti di **probabilità** in FQ, di **misura**, di **stato quantistico**.

Nella Teoria Quantistica dei Campi il ragionamento di Schrödinger non è più paradossale per due motivi:

1) perché l'idea classica (che sopravvive in alcune interpretazioni della MQ) che una "misura" corrisponda ad una condizione precedente è inappropriata se ribadiamo che la misura è il risultato di un'interazione che può avvenire con modalità differenti dalla fase (di propagazione?) che la precede.

2) perché non ha senso attribuire una situazione quantica ad uno stato **macroscopico** com'è quello del gatto!

Nel caso di *oggetti microscopici* non ha senso chiedersi "in che situazione si trovino" **prima della misura** perché è nella misura, cioè nell'interazione, che si manifestano certe proprietà che possiamo rozzamente chiamare "**corpuscolari**" che, prima della misura semplicemente non c'erano! Di un'onda non ha senso chiedersi se e come abbia

caratteristiche corpuscolari perché non ce le ha, così come di un oggetto macroscopico non ha senso chiedersi se abbia o meno caratteristiche quantistiche che sono "facili" da rilevare in oggetti elementari, costituenti anche il gatto stesso, ma la cui individuazione in un oggetto composto da una quantità esorbitante di tali oggetti elementari, com'è il gatto, dà un esito interpretativo o di misura, "statisticamente" più vantaggioso, oltre che sensato, solo nella sua "interezza", cioè solo se trattato come oggetto MACROSCOPICO!

Andare a fondo nella disamina dei concetti evidenziati in grassetto nelle righe precedenti sarebbe interessante ma esula dagli scopi e dai mezzi che ci guidano in questo percorso insieme. Aggiungo solo poche parole, tratte dal lavoro già citato del *Prof. Giliberti*, riguardo il concetto di misura in FQ:

10.3 Conclusioni

La propagazione libera, ovvero in assenza di interazione, *di pennelli elettromagnetici o di pennelli materiali non autointeragenti* può essere descritta dalle vibrazioni di opportuni campi classici obbedienti ad un'equazione delle onde che viene detta equazione di Klein-Gordon. Da essa si può ricavare il limite per il caso di campi lentamente variabili ed ottenere, così, l'equazione di Schrödinger per campi materiali classici.

Successivamente, a partire dall'analisi delle interazioni chimiche, e proseguendo per analogia con l'analisi delle interazioni radiazioni-materia, si nota che le leggi fenomenologiche di tali interazioni si possono spiegare come risultato di **interazioni elementari**, che sono **eventi elementari nello spazio-tempo**, nei quali vengono scambiati energia, quantità di moto, momento angolare, massa, carica elettrica ecc. in maniera quantizzata.

La somma di un numero molto grande di questi eventi elementari riproduce la situazione classica, nel senso che, dopo un numero sufficientemente grande di rilevazioni di quanti, la figura che si ottiene è uguale a quella che conosciamo dalla fisica classica, quando non ci si preoccupa dell'analisi delle interazioni un quanto alla volta ma si considera l'effetto globale prodotto, per esempio, da un fascio di alta intensità.

E' abbastanza evidente che questi eventi presentino un **carattere aleatorio**, nel senso che non ci possiamo aspettare che siano riproducibili esattamente quando si prepara più volte nello stesso modo la stessa situazione iniziale studiata. In ogni caso, qualunque siano le nostre aspettative, gli esperimenti mostrano proprio quanto qui osservato, nel senso che, ad esempio, ripetendo più volte nello stesso modo l'esperimento della doppia fenditura un quanto alla volta otterremo che la rivelazione del quanto avviene in generale in punti diversi dello schermo.

D'altra parte se non fosse così non otterremmo mai la figura di interferenza, anzi saremmo in grado di distinguere l'evento n-esimo di rivelazione all'interno di un singolo esperimento a singolo quanto,.

Tornando alla distribuzione statistica delle rivelazioni dei quanti, osserviamo che sappiamo già qualcosa di importante; per esempio sappiamo che **la loro distribuzione media deve fornire il risultato classico**.

Vogliamo a questo punto trovare una teoria che spieghi quanto sappiamo e cioè che la propagazione libera sia descritta da una teoria delle onde mentre le interazioni siano descritte in termini quantistici.

Come abbiamo già detto nell'introduzione storica, questa teoria è la **teoria quantistica dei campi**, una teoria basata fundamentalmente sul concetto di campo, che soddisfa alle equazioni del moto classiche (quando si è in assenza di interazione) e che incorpora al suo interno la quantizzazione.

In situazioni particolarmente semplici, però, possiamo anche ragionare in modo diverso. Supponiamo che la perturbazione del campo in oggetto sia di così debole intensità da potersi considerare interagente tramite un solo quanto. Allora, da un lato la sua propagazione libera sarà esattamente descritta dall'equazione delle onde precedentemente

trovate, perché ci mettiamo sicuramente in una situazione di non autointerazione e, dall'altro, l'aspetto statistico emergerà nella maniera più semplice possibile perché l'interazione avverrà un evento alla volta o, come diremo comunemente, con un singolo quanto o una singola particella. Possiamo, allora, in qualche modo, confondere la fisica di quella perturbazione del campo che interagisce tramite un solo quanto con la fisica del quanto *tout court* (proprio questa seconda strada è stata quella che storicamente si è sviluppata per prima e che ha condotto alla meccanica quantistica; ricordiamo, però, che questa è una strada un po' stretta e un po' corta, infatti è non relativistica e questo modo di procedere non può arrivare a costruire una teoria del campo elettromagnetico). Infatti, per quanto detto fin qui sulla natura probabilistica dell'interazione fra quanti, non è difficile reinterpretare la teoria di campo libera prima sviluppata, pensandola riferita ad un solo quanto (ma attenzione ad alcune difficoltà interpretative e concettuali cui andiamo incontro...).

Possiamo, cioè, interpretare la teoria come teoria statistica relativa ad una singola particella.

Si può effettuare un confronto puntuale fra i postulati della MQ e le rispettive interpretazioni in TOC, confronto che prevede però l'utilizzo di concetti matematici veramente complessi. Soffermiamoci soltanto sull'analisi del concetto di MISURA:

Postulati 4 e 5

Osserviamo ancora che, per sua stessa natura, un esperimento di fisica deve essere riproducibile e che la teoria che lo spiega è riferita a questa riproducibilità: si capisce così che solo la funzione d'onda pensata come riferita ad un *ensemble* statistico è un "oggetto" "ragionevole" della teoria ed è suscettibile di verifiche sperimentali. Non lo è, invece, se pensata come riferita ad un singolo atto elementare, alla rivelazione di un solo quanto.

La procedura consistente nell'effettuare una **misura** al tempo t va, così, interpretata come una procedura atta ad una *nuova preparazione del sistema*; e cioè quella ottenuta selezionando la *sottocollezione statistica che, sottoposta alla misura, ha fornito un certo valore della grandezza o delle grandezze misurate*.

Dal punto di vista della teoria questo postulato, detto di **precipitazione dello stato**, è uno dei punti più oscuri perché impone di considerare il mondo, in un certo senso, diviso in due: da un lato il sistema quantistico microscopico e dall'altro l'apparato di misura; apparato che per sua natura risponde in un modo ben preciso ed è macroscopico.

Si hanno così **due principi di evoluzione**: uno regolato dall'equazione di Schrödinger, che è deterministico, lineare e reversibile; l'altro, rappresentato dal postulato di precipitazione dello stato, che è stocastico, non lineare e irreversibile.

Per capire dove si nasconde il problema quando si considerano due diversi principi di evoluzione, supponiamo, come è ovvio se la meccanica quantistica si pone come teoria fondamentale, che anche l'apparato di misura, diciamo dell'osservabile M , possa essere descritto in termini quantistici.

Supponiamo che esso sia nello stato M_0 prima della misura. Subito dopo la misura l'apparecchio avrà dato il risultato k per la misura effettuata

L'apparecchio di misura, se si vuole considerarlo come separato dal sistema in esame, non sarà in uno stato definito, contrariamente a quanto si suppone perché esso possa funzionare appunto come apparato di misura e si possa leggere un qualche risultato sullo strumento.

Da queste considerazioni, tra l'altro, appare come, stando così le cose, non si riesca a capire come possa avvenire la cosiddetta *precipitazione dello stato del sistema quantistico*.

Ci si può domandare allora se c'è, per così dire, un parametro di macroscopicità che permetta di stabilire quando un sistema cessa di obbedire alle leggi della meccanica quantistica, ma tale parametro nella teoria non c'è e, d'altra parte non è neppure ragionevole che ci sia, perché sappiamo che ci sono anche alcuni sistemi macroscopici, per

esempio i superconduttori, il cui comportamento può essere spiegato solo per mezzo della meccanica quantistica.

Attualmente alcuni esperimenti nell'ambito dell'ottica materiale si stanno muovendo proprio nella direzione di esplorare i limiti a cui si può osservare il comportamento quantistico di sostanze materiali poste in opportune condizioni; e per capire quale possa essere il ruolo della struttura interna della sostanza utilizzata o delle sue eventuali simmetrie. Per esempio il gruppo di Zeilinger sta facendo esperimenti di interferenza con una molecola organica, chiamata tetrafenilporfirina (TPP), che è il cuore di molte biomolecole complesse come la clorofilla o l'emoglobinaⁱ. Sappiamo che il fluorofullerene, di formula chimica $C_{60}F_{48}$, è (almeno fino al 2003) la molecola chimicamente più grossa che abbia mostrato un comportamento ondulatorio, quando messa in condizioni opportune.

In entrambi i casi il pennello materiale viene creato sublimando le sostanze in un forno alla temperatura di circa 560K. Lo schema sperimentale non si discosta da quelli che abbiamo precedentemente presentato nel caso dell'interferenza di fullerene. L'interferometro è costituito da tre reticoli in oro identici tra loro: il primo reticolo prepara il fascio con una coerenza trasversale, il secondo reticolo è responsabile della diffrazione e dell'interferenza, mentre il terzo reticolo è in pratica una parte del sistema di rivelazione e serve per dare un'elevata risoluzione spaziale.

ⁱ L. Hackermüller et al. Phys. Rev Lett. **91** 9 (29 August 2003).