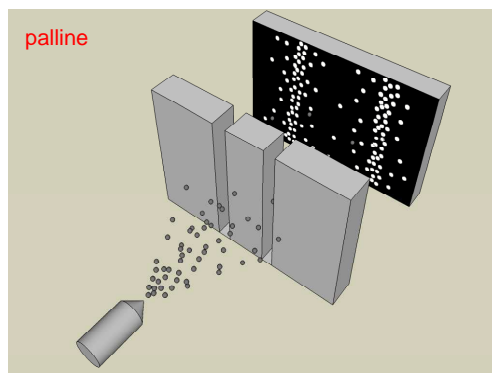


**Abbiamo visto il Dr. Quantum, descriverci l'esperimento. Puoi ripercorrerlo sottolineando che cosa c'è di strano/particolare nell'esperimento di interferenza di elettroni singoli?**

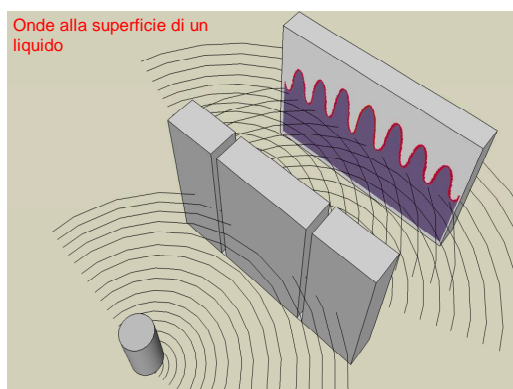
*Per cogliere le particolarità dell'esperimento, proviamo a ripercorrere le diverse situazioni prese in considerazione dal Dr. Quantum con questo criterio: proviamo a chiederci e a tener sotto controllo che cosa vediamo (i fatti) e che cosa, invece, immaginiamo che ricostruiamo col pensiero (quali sono i dati di realtà e quali le ipotesi che a partire da essi noi possiamo fare).*



Iniziamo col caso più semplice: le palline. Qui si “vede” tutto: si vede l'apparato sperimentale formato dal dispositivo che lancia le palline, lo schermo con le due fenditure e il secondo schermo colpito dalle palline; si vedono le tracce lasciate dalle palline sul secondo schermo e si vedono le palline mentre viaggiano dalla sorgente allo schermo.

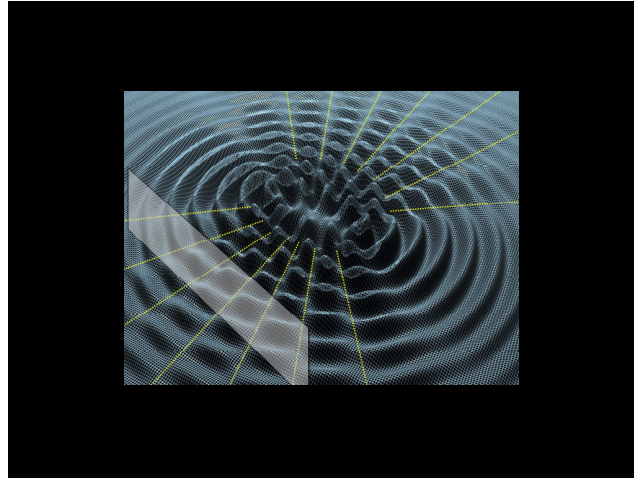
Non solo si vede tutto. Ma abbiamo anche le leggi del moto della meccanica classica che permettono di costruire la traiettoria di ogni pallina (se solo sappiamo le condizioni iniziali) e, quindi, possiamo SPIEGARE perché quello che registriamo sul secondo schermo, dopo tanti lanci, sono due “immagini” delle fenditure.

Cambiamo caso, prendiamo adesso in considerazione quello delle onde prodotte alla superficie di un liquido (una bacinella d'acqua).



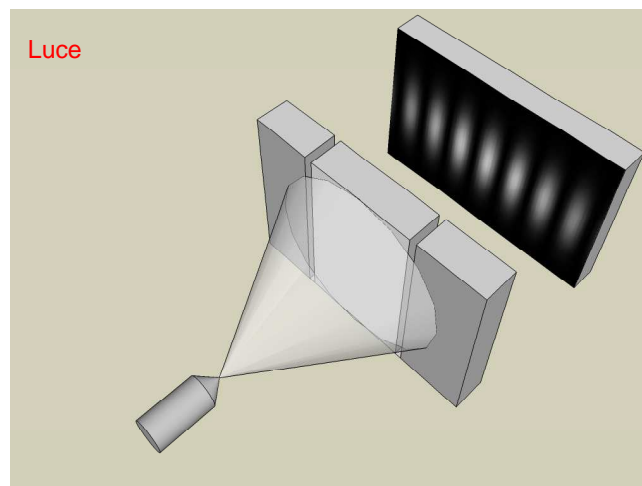
Anche in questo caso noi “vediamo” tutto: la sorgente, lo schermo con le due fenditure, il secondo schermo bagnato dalle onde e vediamo, anche qui, ciò che viaggia dalla sorgente allo schermo. Vediamo cioè le onde che, una volta prodotte, si propagano sulla superficie e, dopo aver attraversato le fenditure, assumono una particolare configurazione per cui sul secondo schermo ci sarà – si dice – una figura di interferenza: un alternarsi regolare di zone bagnate dal liquido in oscillazione e zone in cui il liquido è fermo.

E, anche qui, abbiamo la fisica classica che ci spiega ciò che accade sullo schermo.



E come ce lo spiega? La fisica ci spiega che le due fenditure funzionano come due sorgenti di onde circolari che vanno a *sovrapporsi*. Per cui le zone in cui il liquido è fermo sono quelle in cui le due onde interferiscono in modo distruttivo (le linee nodali) e le zone in cui la superficie del liquido oscilla sono le zone in cui le onde interferiscono in modo costruttivo.

Già con la luce un po' le cose si complicano:

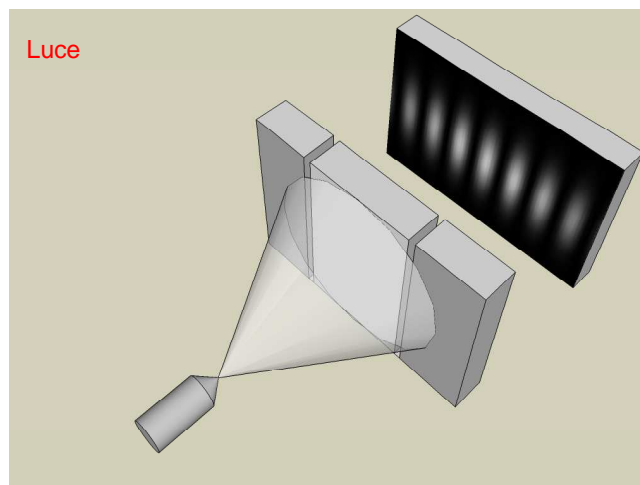


i “fatti” sono meno numerosi: abbiamo la sorgente e abbiamo la figura sullo schermo: una figura riconoscibile come figura di interferenza (un alternarsi regolare di zone chiare – colpite dalla luce – e zone scure – non illuminate).



QUESTO è QUELLO CHE YOUNG, GIÀ all'inizio del 1800, AVEVA OSSERVATO REALIZZANDO UNO DEGLI ESPERIMENTI CHE COMPARE AL QUINTO POSTO DELLA ROSA DEI 10 PIU' BELLI DELLA RIVISTA PHYSICS WORLD.

Dove sta qui la complicazione?

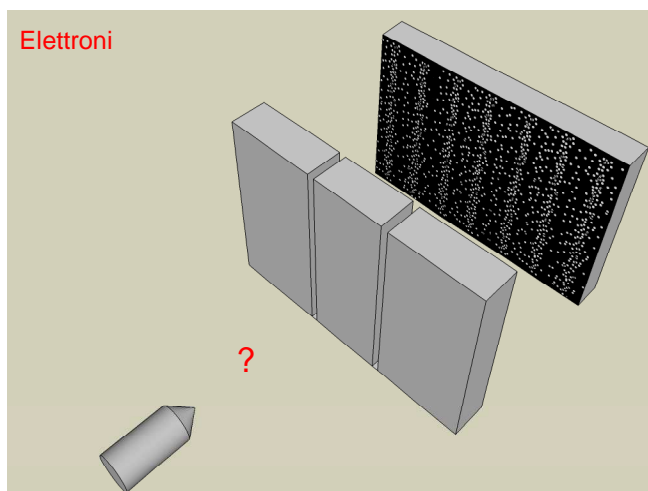


Il problema è che, a differenza delle onde alla superficie del liquido, non vediamo la luce viaggiare e oscillare. A rigore, di fronte ad una figura d'interferenza come questa prodotta da un fascio di luce, non possiamo dire “la luce è un'onda”. Possiamo dire la “luce si comporta come una onda”: la luce, come un'onda, produce figure d'interferenza.

Ma nel dire questo stiamo facendo un'operazione particolare: stiamo “completando i fatti col pensiero”. Stiamo costruendo un modello che, in questo caso funziona: ci interpreta ciò che vediamo: ma **“Confondere un modello con la realtà è come andare al ristorante e mangiare il menu”** (A. Bloch)

**E gli elettroni? Come si comportano, come onde o come palline?**

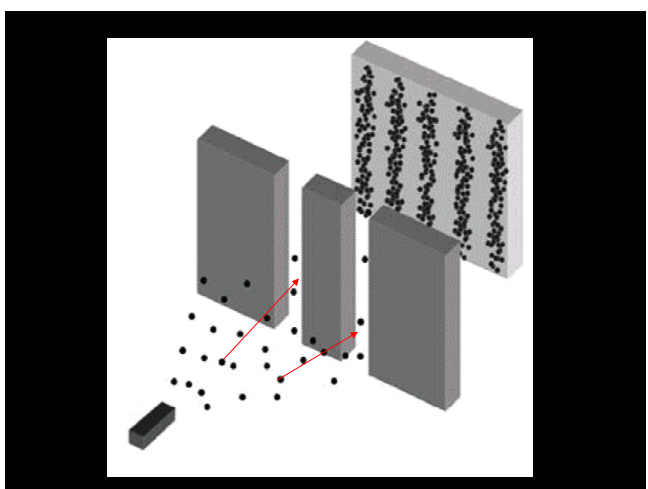
Ecco, giusto, passiamo agli elettroni e IMMAGINIAMO L'ESPERIMENTO NELLA SUA VERSIONE DI ESPERIMENTO MENTALE, esperimento PENSATO (o, come si dice, "GEDANKEN EXPERIMENT").



E immaginiamo che gli elettroni siano mandati uno per volta: anche quando l'esperimento era solo immaginato (non ancora realizzato da Merli, Missiroli e Pozzi), i fisici l'hanno preso molto seriamente e hanno assunto che i fatti fossero quelli rappresentati in questa figura: la presenza di una sorgente, di due fenditure e di uno schermo in cui, dopo l'invio di tanti elettroni, mandati uno per volta, si viene a formare una figura d'interferenza.

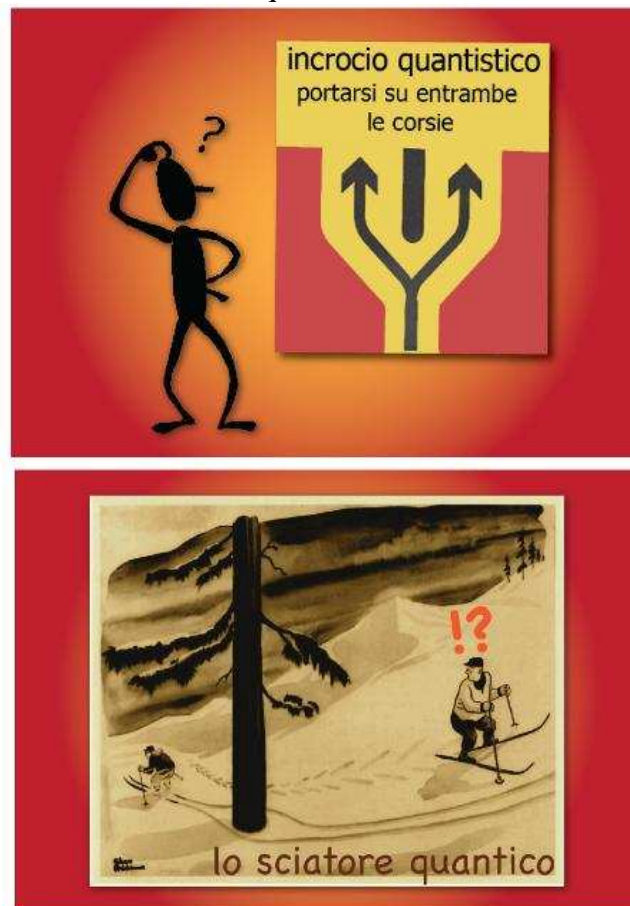
Prendiamo anche noi seriamente e *proviamo a completare questi fatti col pensiero.*

- il primo pensiero è che gli elettroni siano immaginabili "come palline" (questa è l'immagine che viene subito in mente quando si pensa agli elettroni nei modelli planetari dell'atomo rappresentati in molti libri sia di fisica sia di chimica, in cui gli elettroni sono quei "pezzetti di materia" diceva il Dr. Quantum che orbitano intorno al nucleo dell'atomo fatto di protoni e neutroni): pensiamo dunque che gli elettroni, in questo caso, siano "particelle" libere, estratte dagli atomi della materia, che seguono traiettorie, analoghe a quelle seguite dalle palline di prima: si capisce immediatamente che l'immagine, questo modello, è troppo semplicistica... non funziona.



o meglio, funziona per spiegare la traccia lasciata da ogni elettrone quando colpisce lo schermo, ma non per spiegarci perché sullo schermo si formi una figura d'interferenza, perché si abbia una serie regolare di zone dove gli elettroni arrivano e dove non arrivano mai. (a rigore, le particelle dovrebbero sullo schermo formare le immagini delle DUE fenditure e invece c'è una figura d'interferenza). Come fa una particella a formare una figura d'interferenza? Con cosa interagisce l'elettrone? Dirac, diceva, "interferisce con se stesso". Ma cosa significa?

La conclusione: l'immagine dell'elettrone come **particella che segue una traiettoria** porta a situazioni imbarazzanti, come queste.



Il guardare per trattoria porta anche a pensare a soluzioni come quella proposta dal Dr. Quantum, fantasiosa e alquanto bizzarra... forse suggestiva e divertente, ma... quanto mai oscura...

Abbandonare l'immagine degli elettroni come palline che seguono traiettorie non è affatto semplice. Studenti di Liceo, di fronte ai risultati dell'esperimento più bello, combattono con questa immagine e con i problemi che questa immagine pone:

*“Non è possibile che una particella sia contemporaneamente in due punti distinti e riesca ad interferire con se stessa, o è a destra o è a sinistra.” (Matteo)*

*“Ma ci sarà qualcosa che passa attraverso le due fenditure, o un quanto enorme, o un quanto spaccato a metà.” (Alessandro)*

*“Quello che non riesco a capire è, anche se io non riesco a vederlo ci sarà qualcosa che si muove, che ha un certo comportamento, che so che si trova a destra o a sinistra. Invece sembra di no!” (Chiara)*

*Non è possibile che una particella sia contemporaneamente in due punti distinti e riesca ad interferire con se stessa, o a destra o a sinistra. Ó (Matteo)*

*Ma ci sarà qualcosa che passa attraverso le due fenditure, o un quanto enorme, o un quanto spaccato a metà. Ó (Alessandro)*

*Quello che non riesco a capire è, anche se io non riesco a vederlo ci sarà qualcosa che si muove, che ha un certo comportamento, che so che si trova a destra o a sinistra. Invece sembra di no! Ó (Chiara)*

- cambiamo allora immagine e proviamo ad immaginare gli elettroni come a onde:

*Non si deve attaccare alcun significato speciale al cammino dell' elettrone... e ancor meno alla posizione di un elettrone nel suo cammino.... l'onda...non solo riempie tutto il cammino simultaneamente, ma si estende addirittura notevolmente in tutte le direzioni. (E. Schrödinger)*

Questa è la proposta che faceva Schrödinger

*Schrödinger: “Non si deve attaccare alcun significato speciale al cammino dell'elettrone... e ancor meno alla posizione di un elettrone nel suo cammino.... l'onda...non solo riempie tutto il cammino simultaneamente, ma si estende addirittura notevolmente in tutte le direzioni”.*

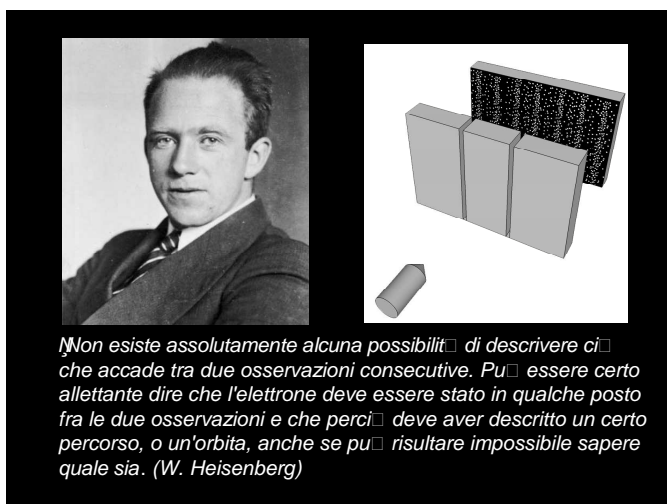
Già questa immagine sembra più ricca... dà conto della figura d'interferenza.

Ma che cosa significa l'espressione “il singolo elettrone è un'onda”? **Che cos'è quest'onda?** E soprattutto, come spieghiamo i puntini sullo schermo? Anche il guardare per onde non ci permette di “completare col pensiero *tutti* i fatti” osservati...

Il conclusione: ognuna di queste due immagini (l'immagine di un elettrone come una pallina, un corpuscolo, e quelle che pensa all'elettrone come ad un'onda) ci permette

di “dare un significato” soltanto ad alcuni fatti: nessuna delle due abbraccia tutti i fatti noti: esse sono parziali e “complementari”. Ad una conclusione come questa la fisica classica non era mai arrivata...

III conclusione, ancora “più drammatica” in relazione al passaggio dalla fisica classica alla fisica contemporanea:



W. Heisenberg: “Non esiste assolutamente alcuna possibilità di descrivere ciò che accade tra due osservazioni consecutive. Può essere certo allettante dire che l'elettrone deve essere stato in qualche posto fra le due osservazioni e che perciò deve aver descritto un certo percorso, o un'orbita, anche se può risultare impossibile sapere quale sia”.

Tutto quello che possiamo dire è che l'elettrone, una volta emesso, colpirà lo schermo con una certa probabilità. Non possiamo più prevedere con certezza dove esso andrà. Cade quel determinismo (il sapere con certezza, date le condizioni iniziali, come evolverà un sistema) su cui si basava la fisica classica. Così come cade la possibilità di immaginare il mondo microscopico in una cornice spazio-temporale... gli oggetti microscopici vivono in mondi astratti.

E QUESTO LASCIA UN PO' ESTERREFATTI...

*Non è ] era tutto così chiaro fino a prima che ora sono confuso. È ma, possibile che cambino le leggi solo perché faccio un cambio la scala? Forse si deve aspettare che arrivi un altro Newton che faccia rientrare tutto in un'unica legge, come per la gravitazione. (Marco)*

*Secondo me qui bisogna che gli scienziati si diano una mossa, perché non hanno ancora scoperto tutto. Per ora hanno creato solo una grande confusione, manca qualcosa, questa, l'unica spiegazione, che ancora dobbiamo scoprire per riuscire a spiegare quello che succede. (Tiago)*

*“[...] era tutto così chiaro fino a prima che ora sono confuso... ma è possibile che cambino le leggi solo perché faccio un cambio la scala? Forse si deve aspettare che arrivi un altro Newton che faccia rientrare tutto in un'unica legge, come per la gravità” (Marco)*

*“Secondo me qui bisogna che gli scienziati si diano una mossa, perché non hanno ancora scoperto tutto. Per ora hanno creato solo una grande confusione, manca qualcosa, questa è l'unica spiegazione, che ancora dobbiamo scoprire per riuscire a spiegare quello che succede” (Tiago)*



## FEYNMAN

*[...] Decidemmo di esaminare un fenomeno che è impossibile, assolutamente impossibile spiegare in modo classico e che sta al cuore della meccanica quantistica. In realtà contiene l'unico mistero. Non possiamo eliminare il mistero raccontando come l'esperimento funziona. Nel raccontarvelo dovremo raccontarvi le caratteristiche fondamentali di tutta la meccanica quantistica.*

## **Ma è stato eliminato il mistero? Come risponde la fisica? Si è data una mossa, come auspicava Tiago?**

La meccanica quantistica è oggi una teoria consolidata e accettata: una teoria che negli anni 30 (intorno al 1927) ha trovato una sua formulazione coerente, grazie al contributo di molti fisici, Bohr, Schroedinger, Heisenberg, Pauli, Jordan, Born, Dirac e altri... e, come vedremo, anche grazie allo “speciale” contributo dato da Einstein (e le sue critiche acute). Esiste oggi un formalismo ed esistono assiomi che lo regolano e lo conciliano con la realtà: questo formalismo spiega la realtà microscopica ma la spiega “a modo suo”, “a modo suo” nel senso che assorbe dentro di sé (eleva a principi) l'idea che si debba rinunciare ad alcune categorie su cui si basava la spiegazione dei fenomeni della fisica classica, come il principio di causalità (il determinismo), la rappresentabilità dei fenomeni nello spaziotempo, il principio di non-contraddizione (un oggetto o è una cosa o un'altra).

Oltretutto, a partire da un lavoro di Einstein del 1905, si è scoperto che anche la luce non sempre si comporta come un'onda, si comporta anche come una particella: se,



invece di mandare contro due fenditure un fascio di luce, come avevamo immaginato prima, emesso da una sorgente “normale”, diciamo, mandiamo un fascio a bassissima intensità, succede che, come gli elettroni, la figura di interferenza si forma per spot successivi, “fotone dopo fotone”, si usa dire (Questo è stato osservato per la prima volta Geoffrey Ingram Taylor nel 1909). Anche la luce, dunque, così come gli elettroni mostra comportamenti “complementari”: le due immagini di onda e di particella come parziali perché nessuna delle due permette di spiegare tutto quello che avviene.

Dicevamo, la fisica, sì, si è data una mossa e ha prodotto teorie come la meccanica quantistica raffinatissime dal punto di vista formale per spiegare tutto questo.

Ma la costruzione del formalismo è stata tutt'altro che semplice: essa è stata accompagnata da dibattiti accesi nei quali ogni fisico coinvolto proiettava la propria visione della fisica nonché le proprie aspettative sulla teoria stessa. E comunque accettare un formalismo e vedere che funziona non significa che la sua interpretazione sia immediata e, soprattutto, univoca. Anche perché, come diceva il Prof. Missiroli nel filmato mostrato all'inizio qui non si tratta di decidere se la terra è piatta o tonda (e una volta osservato che la terra è tonda quelli della terra piatta sono tranquilli). Qui accettare i risultati e la teoria che li spiega significa fare i conti con domande di fondo che il formalismo e i risultati sperimentali non chiudono e sulle quali rimane parecchio spazio per l'interpretazione e per assumere posizioni diverse.

### Domanda 3: ci dai qualche esempio di temi dibattuti?

Sì, faccio qualche esempio prendendo in considerazione i dibattiti che hanno coinvolto i padri della meccanica quantistica... questi esempi sono interessanti, secondo me, perché toccano domande di fondo sulla fisica, ancora oggi attuali, aperte o riaperte dalla meccanica quantistica:

- che spazio rimane in fisica per l'intuizione quando il formalismo si fa sempre più astratto? Che cosa vuol dire "capire una teoria" quando non è più possibile formarsi immagini visualizzabili nello spaziotempo e occorre invece immaginare gli oggetti in spazi astratti?

- che cosa significa, per la fisica, dover rinunciare al determinismo (ad un principio di causa-effetto) e assumere il caso, la probabilità, come parte integrante della spiegazione fisica? E che cosa significa rinunciare all'idea di poter racchiudere tutti i fatti in un'unica immagine e assumere la complementarità?

- e ancora, su un piano forse più estetico: una teoria fisica "bella" (convincente) può ammettere al suo interno aspetti di ambiguità o deve essere armoniosa?

Vediamo alcune posizioni molto diverse in relazione a queste domande assunte tra alcuni padri della meccanica quantistica.

Iniziamo da Bohr.

Bohr: il "papa" della fisica di inizio '900, il "danese tranquillo", anima conciliante e pensatore profondo. Fonda l'istituto di fisica teorica a Copenaghen, un riferimento per la fisica dei primi decenni del '900 e per la costruzione della meccanica quantistica. E' lui che introduce nella fisica la complementarità e l'idea dell'oggetto fisico abbia elementi di "ambiguità": l'elettrone, il fotone, come il coniglio-papera di Wittgenstein, a seconda di come li osservi se ne coglie un aspetto (la papera e il coniglio, il suonatore di sax e un viso di signora...). Come questi oggetti, secondo Bohr, anche l'elettrone e il fotone, contengono un aspetto di ambiguità: seconda di come si pone su di loro l'attenzione li si vede come particella o come onda.

BOHR

"I dati ottenuti in condizioni sperimentali diverse non si possono racchiudere in una singola immagine, ma debbono essere considerati complementari. Stando così le cose, l'attribuzione di qualità fisiche tradizionali agli oggetti atomici implica un elemento essenziale di ambiguità, come si vede immediatamente nella contraddizione relativa alle proprietà corpuscolari e ondulatorie degli elettroni e dei fotoni, in cui ci troviamo di fronte a immagini contrastanti, ognuna delle quali si riferisce a un aspetto essenziale dei dati sperimentali."

(Discussione con Einstein sui problemi epistemologici della fisica atomica, 1949, in Autobiografia scientifica, pp. 113- 114)

Contraria sunt complementa.

SCHRÖDINGER

Schrodinger è un altro fisico importante che ha dato grandi contributi alla nascita della meccanica quantistica, anche se ha sempre mantenuto un atteggiamento critico, piuttosto scettico, nei confronti della teoria. Per Schroedinger capire vuol dire "vedere", "intuire" e questi sono strettamente legati alla possibilità di descrivere i fenomeni in una cornice spaziotemporale che metta "in armonia" le diverse proprietà

osservate. Non gli piacevano i formalismi astratti e non ha mai accettato la complementarità di Bohr: per Schrodinger accettare una teoria che ammetta “**elementi essenziali di ambiguità**” e rinunciare ad una descrizione “intuitiva” e “visualizzabile” (armoniosa) significa rinunciare a far progredire la scienza.

[Qui sembra che] l'ultima parola della scienza sia questa: né la teoria corpuscolare, né quella ondulatoria, prese singolarmente, sono capaci di rendere conto dei fatti, esse rivelano due aspetti del tutto diversi dei fenomeni, due aspetti che non abbiamo ancora imparato a **mettere in armonia tra loro in modo soddisfacente**. (1932)

La complementarità... c'è questo concetto – la complementarità – che Niels Bohr e i suoi discepoli diffondono e di cui tutti fanno uso. **Devo confessare che non lo comprendo. Per me si tratta d'un'evasione**. Non d'un'evasione volontaria. Infatti si finisce per ammettere il fatto che abbiamo due teorie, due immagini della materia che non si accordano, di modo che qualche volta dobbiamo far uso dell'una, qualche volta dell'altra. Una volta, settanta o più anni fa, quando si verificava un tale fatto, si concludeva che la ricerca non era ancora finita, perché si riteneva assolutamente impossibile far uso di due concetti differenti a proposito d'un fenomeno o della costituzione d'un corpo. Si è inventata ora la parola "complementarità", e ciò mi sembra voler giustificare quest'uso di due concetti differenti, come se non fosse necessario trovare finalmente un concetto unico, un'immagine completa che si possa comprendere. La parola "complementarità" mi fa sempre pensare alla frase di Goethe: "Perché proprio dove mancano i concetti, si presenta al momento giusto una parola."

## HEISENBERG

Heisenberg è il padre dell'indeterminazione, di quel principio d'indeterminazione che ha fatto crollare il determinismo della fisica classica. E' stato uno degli studenti più brillanti di Bohr e il “rivale” di Schrodinger. La sua antipatia per Schrodinger era ben nota, oltre che ben corrisposta: per Heisenberg, del resto, a differenza di Schrodinger l'efficienza del calcolare e la fiducia nella **matematica** erano la strada maestra per non impantanarsi in problemi interpretativi e *superare* le **limitazioni del linguaggio** naturale e della visualizzazione mediante immagini “familiari”. Capire per Heisenberg vuole dire saper gestire il formalismo anche quando esso si fa astratto, anche quando esso proietta la spiegazione in spazi astratti (spazio di Hilbert) molto lontani dallo spaziotempo di cui facciamo comunemente esperienza.

Non è affatto sorprendente che il nostro linguaggio sia incapace di descrivere i processi che avvengono negli atomi, visto che ce lo siamo inventati per descrivere le esperienze della vita quotidiana e queste **RIGUARDANO OGGETTI DI GRANDI DIMENSIONI**. Per di più, è molto difficile modificare il nostro linguaggio in modo tale da renderlo adatto a descrivere i processi atomici, visto che **le parole possono solo descrivere cose di cui possiamo formarci immagini mentali**; e anche questa è una capacità che ci viene dall'esperienza quotidiana. Per fortuna **la matematica non ha queste limitazioni** ed è possibile inventare uno schema matematico – la teoria quantistica – che sembra del tutto adatta alla trattazione dei processi atomici; per quel che riguarda la visualizzazione, quindi, ci dobbiamo accontentare di due analogie incomplete – l'immagine ondulatoria e quella corpuscolare.

## DUETTO SCHRÖDINGER e HEISENBERG

## SCHRÖDINGER

La mia teoria fu ispirata da L. de Broglie e da osservazioni brevi ma incomplete di A. Einstein. Non mi è nota alcuna relazione genetica con Heisenberg. Io sapevo, ovviamente, della sua teoria, ma mi sentivo scoraggiato, per non dire respinto, dai metodi dell'algebra trascendentale, che mi sembravano molto difficili, e dalla mancanza di visualizzabilità. (primavera 1926)

## HEISENBERG

'Più penso alla parte fisica della teoria di Schrodinger e più la trovo abominevole. Ciò che Schrodinger scrive sulla "visualizzabilità" [*Anschaulichkeit*] non ha alcun senso. In altre parole è spazzatura [*Mist*]. Il più grande risultato della sua teoria è il calcolo degli elementi di matrice.' (8 giugno 1926).

E poi c'è, ovviamente, Einstein: Einstein è Einstein.

"O, se io sono il papa, lui è Dio" (da Copenaghen)

Uomo libero ("Se mi si chiedesse una biografia di Einstein in un frase, direi: "Era l'uomo più libero che io abbia mai conosciuto".” Abraham Pais) che ha condotto battaglie culturali affinché la scienza potesse liberare l'umanità dai pregiudizi, dalle superstizioni "E' più facile distruggere un atomo di un pregiudizio". Uomo che ha rivoluzionato il mondo della fisica a partire comunque da sue *convinzioni profonde* (pre-giudizi di altra natura, pregiudizi che lui chiama "metafisici", tra cui il determinismo). Ed è proprio per salvare il determinismo che Einstein condusse molte battaglie contro la meccanica quantistica, anche in dialoghi serrati e, in questo caso, anche molto eleganti con Bohr.

## EINSTEIN

Alcuni fisici, tra cui ci sono anch'io, non possono credere che si debba abbandonare, ora e per sempre, l'idea che la realtà sia direttamente rappresentabile nello spazio e nel tempo; o che si debba accettare l'idea che gli eventi in natura siano analoghi a giochi del caso. Probabilmente mai prima d'ora una teoria era in grado di fornirci una chiave per interpretare e calcolare un gruppo così eterogeneo di fenomeni come la teoria quantistica. Nonostante questo, io credo che questa teoria ci induca in errore, perché, secondo me, è una rappresentazione incompleta delle cose reali.[...] L'incompletezza della rappresentazione porta necessariamente alla natura statistica (incompleta) delle leggi.

## BOHR vs EINSTEIN

### BOHR

"Non esiste un mondo quantistico. C'è solo una descrizione fisica astratta quantistica. E' sbagliato pensare che **lo scopo della fisica sia scoprire come è fatta la natura**. La fisica riguarda **solo quello che possiamo dire della natura**"

### EINSTEIN

Credo ancora nella possibilità di un modello di realtà – cioè una teoria – che rappresenti le cose di per sé, e non solamente la probabilità che esse accadano.

La meccanica quantistica è degna di ogni rispetto, ma una voce interiore mi dice che non è ancora la soluzione giusta. È una teoria che ci dice molte cose, ma non ci fa penetrare più a fondo il segreto del Gran Vecchio. In ogni caso sono convinto che Dio non gioca a dadi con il mondo.