"Vecchia fisica quantistica" (1900 – 1927)

Alcuni "fatti" sul tappeto

Corpo nero: $E = h\nu$ (1900)

Effetto fotoelettrico (1905) ed effetto Compton (1923): il comportamento corpuscolare della luce

Il problema della stabilità atomica e i modelli atomici di Bohr (1913) e Sommerfeld (1915)

Relazioni di De Broglie (1924) e il comportamento ondulatorio delle particelle (Davisson e Germer, 1927)

Problemi di confine…

La profonda trasformazione dell'immagine del mondo prende il via, nei primi anni del XX secolo, quando le evidenze sperimentali mettono in luce contraddizioni tra le diverse strutture teoriche della fisica classica; in particolare quando in alcuni «problemi di confine» arrivano a scontrarsi i diversi modelli […]

[…] anche la genesi della MQ, così come la RR, è riconducibile ad una «crisi» determinata dall'indagine sui fenomeni di «confine» (tra meccanica e termodinamica, elettromagnetismo e meccanica, termodinamica ed elettromagnetismo), ovvero quando si scontrano i diversi modelli adottati. Nel caso particolare della genesi della MQ a scontrarsi sono innanzitutto termodinamica ed elettromagnetismo che mostrano come in fisica ci fosse una compresenza di modelli discreti e modelli continui che creavano difficoltà concettuali già riconosciute da Maxwell.

Tarsitani, 2004

Se le categorie di pensiero sono quelle classiche stiamo rispondendo alla domanda

«Che cosa è l’oggetto quantistico?»

o piuttosto alla domanda

«Che cosa *non* è l’oggetto quantistico?»

Obiettivo implicito: guidare gli studenti a cogliere che la domanda, per la sua intrinseca complessità, si presta ad essere ridefinita e analizzata su **diversi piani**.

A. Quale tipo di comportamento si considera nel pensare all'oggetto? (**piano fenomenologico**)

B. Quale tipo di strumento interpretativo occorre rivedere e/o costruirsi? (**piano simbolico-formale**)

C. Su quali assunti si basano tali strumenti? Qual è la loro natura (fisica o meta-fisica)? (**piano epistemologico**)

Letture di brani tratti da:

C. Tarsitani : Il dilemma onda corpuscolo
C. Tarsitani: Dalla fisica classica verso la fisica moderna (dispense)

“La problematica ricerca di significato”:
i primi dibattiti storici su
INDETERMINAZIONE e COMPLEMENTARITA’

- Il dibattito tra Heisenberg e Bohr sulla interpretazione del principio di indeterminazione
- Il dibattito tra Bohr e Einstein sul determinismo e il difficile rapporto tra conoscenza e realtà
- il dibattito tra Heisenberg e Schroedinger sul problema della visualizzazione dell’oggetto quantistico

L’analisi dei dibattiti “storici” è stata condotta con l’obiettivo <u>esplicito</u> di far emergere

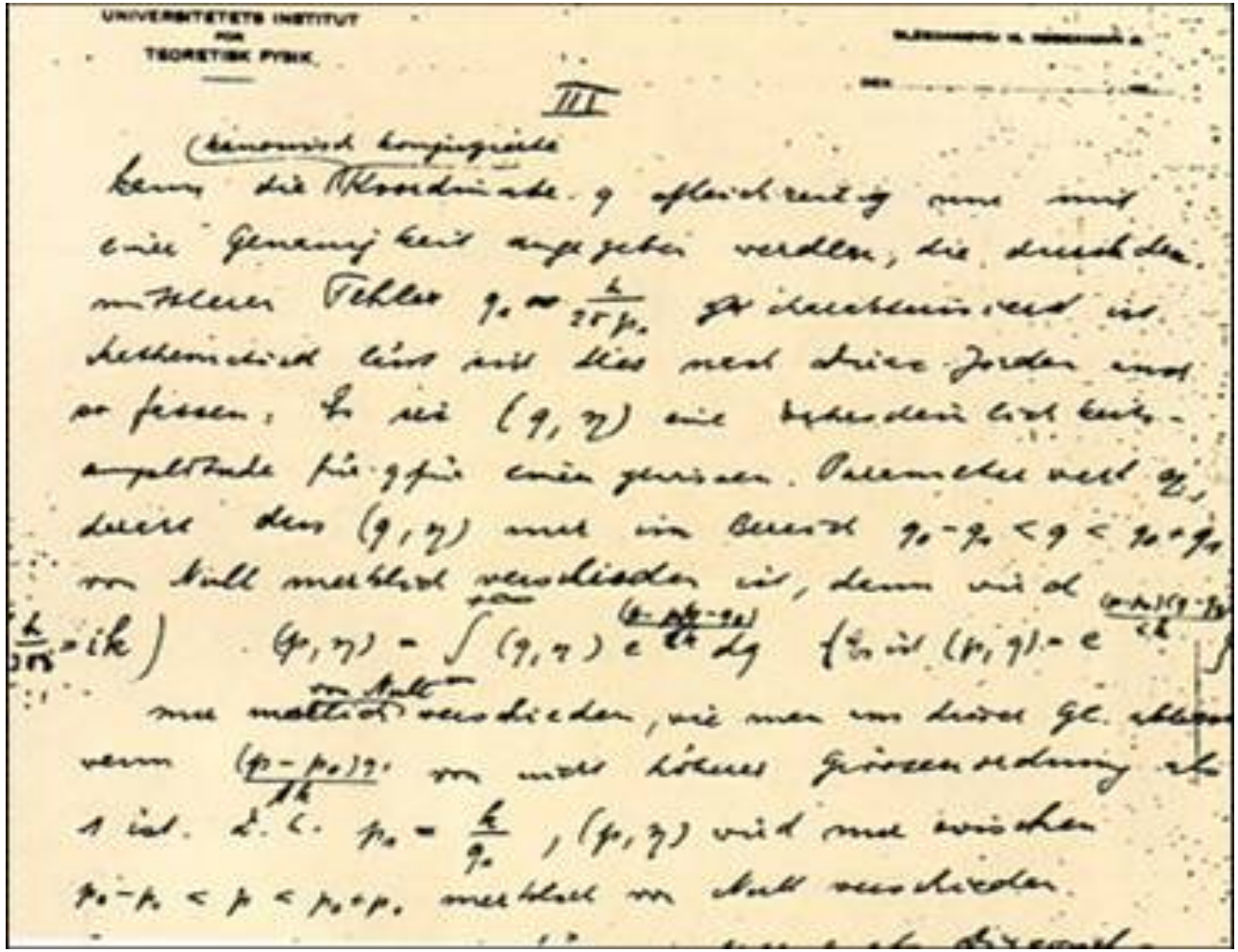
- i ***comportamenti*** tipicamente quantistici
- l’inadeguatezza degli ***strumenti interpretativi*** classici

Domanda <u>implicita</u>: “*quali assunti epistemologici stanno alla base del modello di oggetto?”*

Il principio di indeterminazione

Werner Heisenberg (1901, 1976)

Marzo 1927: “Sul contenuto osservabile della cinematica e della meccanica quantistiche”


UNIVERSITETETS INSTITUT FOR TEORETISK FYSIK

III

kann die (kanonisch konjugierte) Koordinate q gleichzeitig nur mit einer Genauigkeit angegeben werden, die durch den mittleren Fehler $q_0 \sim \frac{h}{2\pi p_0}$ gut charakterisiert ist. Mathematisch läßt sich dies nach Dirac-Jordan und so fassen: Es sei (q, η) eine Wahrscheinlichkeitsamplitude für q für einen gewissen Parameter wert η, derart dass (q, η) nur im Bereich $q_0 - q_1 < q < q_0 + q_1$ von Null merklich verschieden ist, dann wird

$\left(\frac{h}{2\pi i} = ik\right)$ $(p, \eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} (q, \eta)\, e^{\frac{(p-p_0)(q-q_0)}{ik}}\, dq$ $\left\{\text{Es ist } (p, q) = e^{\frac{(p-p_0)(q-q_0)}{ik}}\right\}$

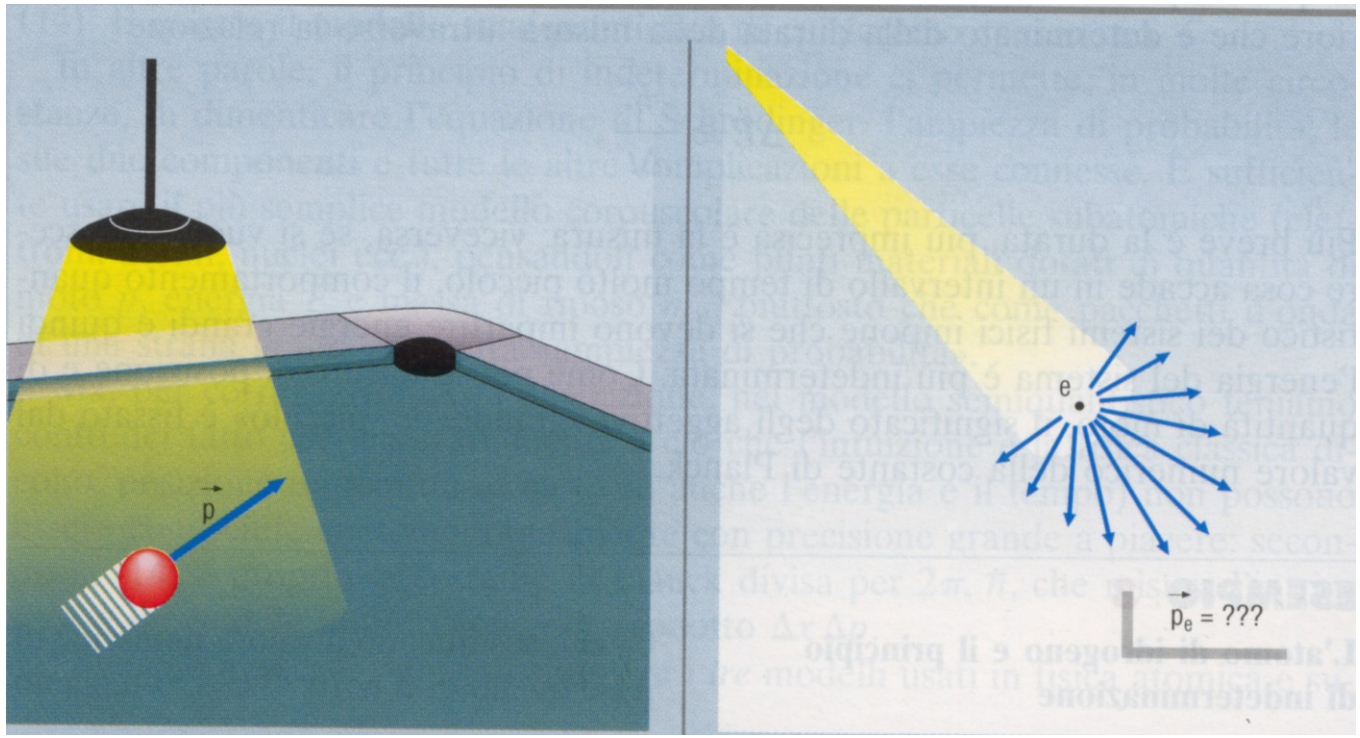
nur merklich von Null verschieden, wie man aus dieser Gl. ablesen kann, wenn $\frac{(p-p_0)q_0}{ik}$ von nicht höherer Grössenordnung als 1 ist. D. h. $p_0 = \frac{k}{q_0}$, (p, η) wird nur zwischen $p_0 - p_0 < p < p_0 + p_0$ merklich von Null verschieden.

Approccio operazionista

“Se si vuole chiarire il significato della locuzione ‘posizione di un oggetto’, per esempio di un elettrone, occorre descrivere un esperimento mediante il quale la ‘posizione dell’elettrone’ possa essere misurata: altrimenti tale locuzione non ha alcun significato”.

Dal libro di testo “U.Amaldi”

Per “vedere” una particella dobbiamo fare in modo che essa diffonda la “luce” che incide su di essa in maniera che una parte della “luce” diffusa giunga ai nostri occhi o agli strumenti di rivelazione. Per fare ciò è necessario che la lunghezza d’onda della luce utilizzata sia al più delle dimensioni dell’oggetto che si vuole “vedere”.



[…] ma i fotoni che compongono un fascio di luce di piccola lunghezza d'onda […] sono molto energetici e interagiscono con le particelle materiali producendo l'effetto Compton.

In definitiva la particella che noi riusciamo a vedere, perché urtata da un fotone che poi è giunto fino al nostro rivelatore, ha subito un urto che l'ha accelerata in modo casuale. Dopo la misura possiamo quindi sapere qual è la sua posizione, ma nello stesso tempo abbiamo perduto ogni possibilità di determinare con precisione la quantità di moto.

E' interessante notare che si vuole diminuire l'indeterminazione Δx sulla posizione, utilizzando luce di lunghezza d'onda minore, aumenta l'energia dei fotoni incidenti e, di conseguenza aumenta l'indeterminazione sulla quantità di moto della particella.

“Al momento della determinazione della posizione dell’elettrone, quando il quanto di luce è diffuso, cambia la quantità di moto ***in modo discontinuo***. Questo cambiamento è tanto maggiore quanto minore è la lunghezza d’onda della luce cioè quanto maggiore è la precisione nel determinare la posizione. Quindi, nel momento in cui si sta determinando la posizione dell’elettrone la quantità di moto può essere conosciuta solo entro un valore che corrisponde al ***cambiamento discontinuo***; allora, ***più esattamente si determina la posizione, tanto più imprecisa sarà, nello stesso istante, la determinazione della velocità e viceversa”***

Heisenberg, 1927

“… in certo senso cessa di essere valida la legge di causalità”

“Nella formulazione rigorosa della legge causale - ***se conosciamo il presente possiamo calcolare il futuro*** - non è la conclusione ad essere sbagliata bensì la premessa.
Non si possono conoscere con certezza la posizione e la velocità iniziali per cui si può calcolare solo un intervallo di possibilità, per posizione e velocità, in ogni istante futuro.
[….] le leggi e le predizioni della meccanica quantistica ‘sono in generale solo di tipo statistico’. Non si può mai predire esattamente il risultato di una singola misura di un qualsiasi processo atomico, ma si può predire solo la probabilità di un risultato in un intervallo di possibilità.”

Heisenberg,1927

Dall’esperimento ideale di Heisenberg …

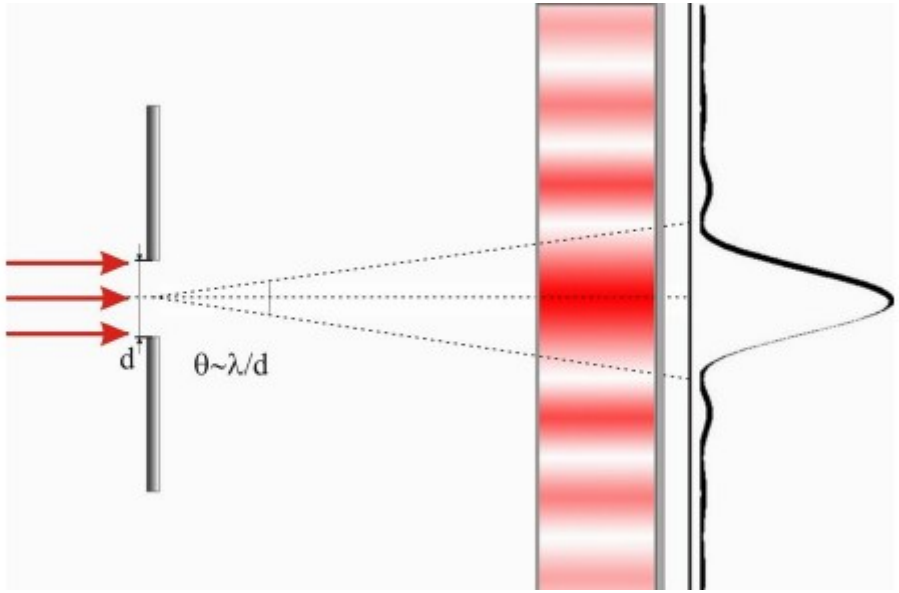
- Indeterminazione come “disturbo” o “perturbazione”

- L’esperimento è interpretato considerando la natura discreta del mondo microscopico

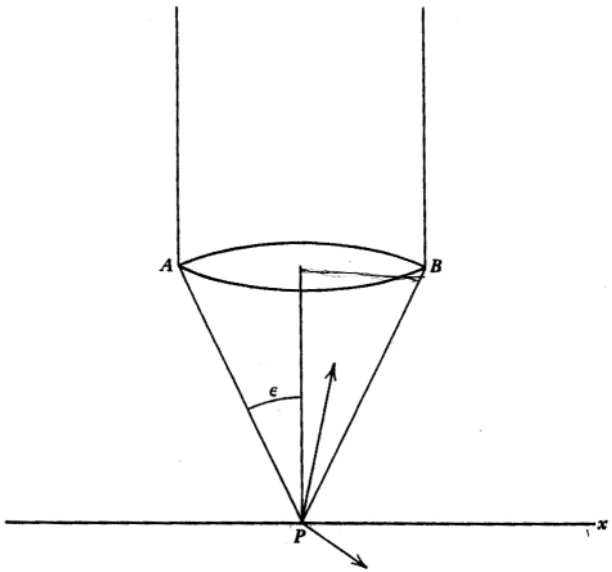
Niels Bohr e la sua obiezione all’esperimento del microscopio

L’obiezione di Bohr

Quando un fascio di luce monocromatica passa attraverso una fenditura di dimensioni confrontabili con la sua lunghezza d’onda, il fascio si allarga per in fenomeno di diffrazione



Il microscopio di Heisenberg



$$\Delta p_x = \frac{2h\sin\varepsilon}{\lambda}$$

Incertezza sulla quantità di moto dell'elettrone (effetto Compton)

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\varepsilon}$$

Incertezza sulla posizione dell'elettrone (potere risolutivo)

Per Heisenberg:

- Il principio di indeterminazione è un limite di applicabilità, a fenomeni microscopici, di concetti classici come posizione e quantità di moto

- La ragione della indeterminazione è ***nella discontinuità, nella natura corpuscolare del mondo microscopico***

Per Bohr:

- La ragione della indeterminazione è nel dualismo onda corpuscolo: il raggio γ "si propaga come un'onda e interagisce come un corpuscolo"

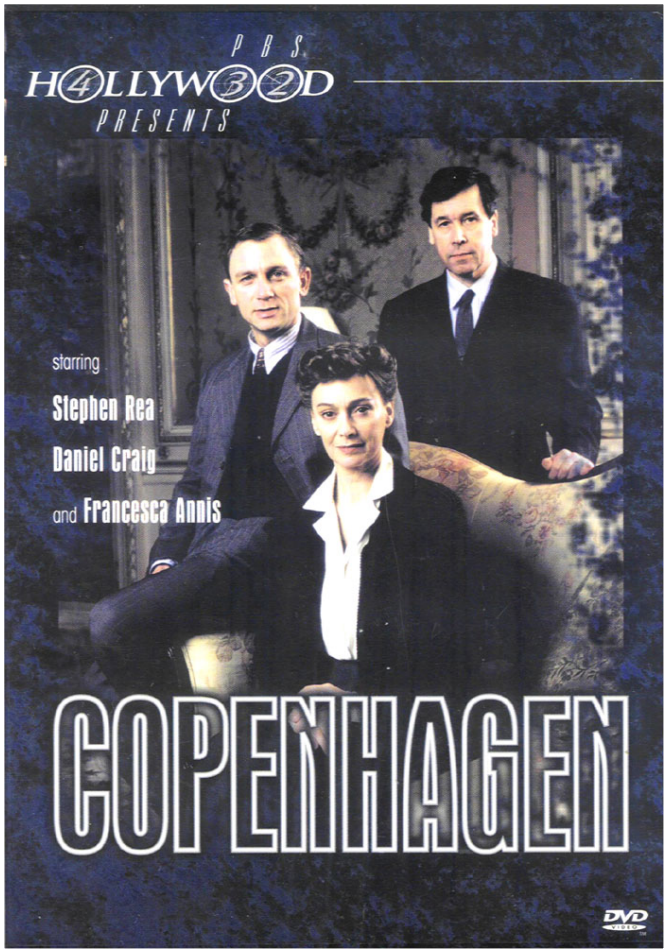
- Il principio dei indeterminazione come conseguenza del principio di complementarità

Dal dibattito Heisenberg-Bohr

- cade il principio di causalità, così come il concetto di traiettoria;
- la “complementarità” *spiega* il principio di indeterminazione (nella formulazione di Heisenberg);
- “complementarità” come dualismo onda-corpuscolo (il raggio γ “si propaga come un’onda e interagisce come un corpuscolo”) (Primo significato);
- l’apparato di misura svolge un ruolo “attivo” nel processo di misura.

Sottolineature culturali….

Michael Frayn, *Copenhagen (1989)*



Sottolineature culturali….

- Un dibattito “fisico” diventa anche conflitto “accademico” e conflitto “personale” tra allievo e maestro: l’efficientismo e l’ambizione di Heisenberg a confronto con la profondità di Bohr e la sua esigenza di interpretare le nuove conoscenze

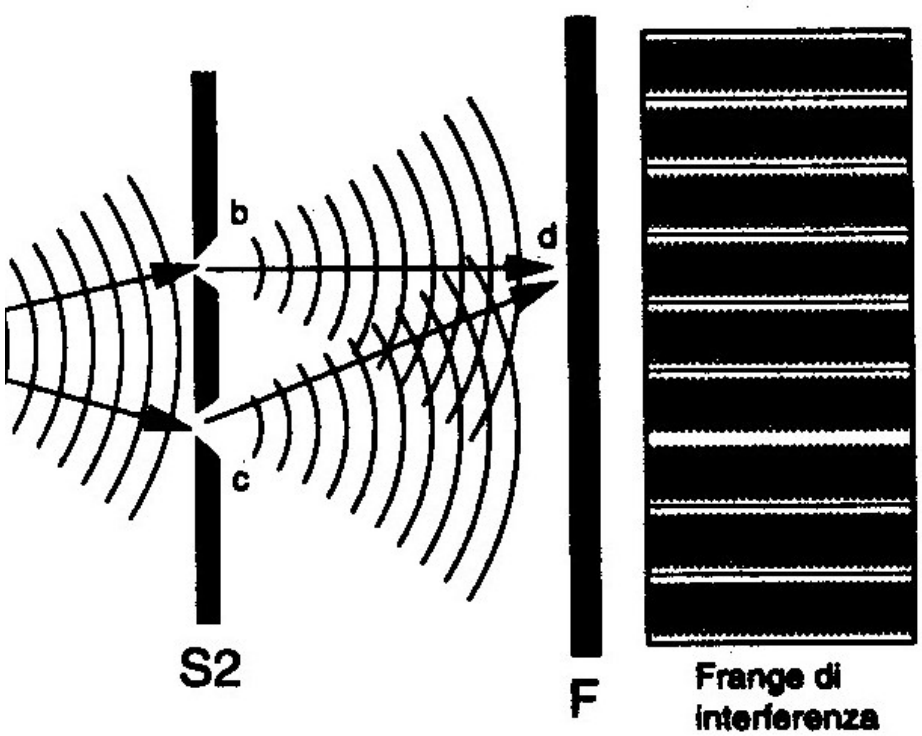
- Due maestri si confrontano: esiste un principio di autorità in fisica?

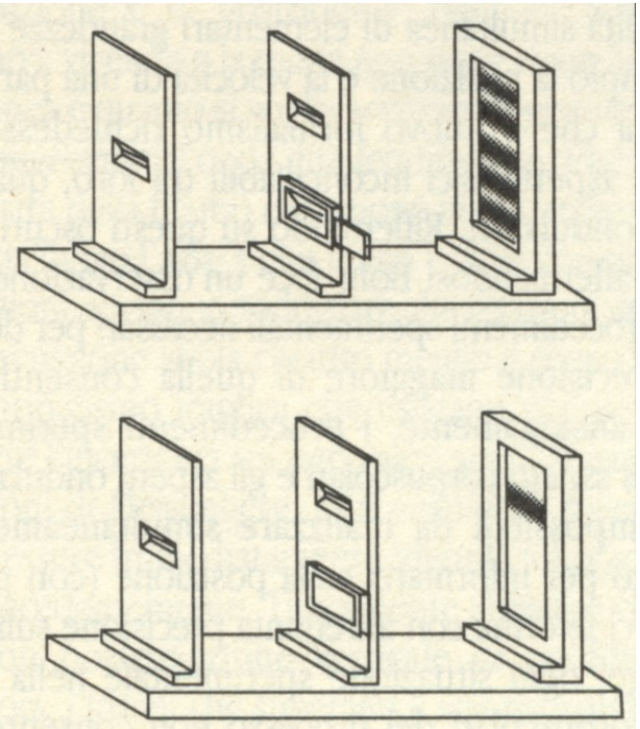
Dal Congresso di Solvay, 1927:

Bohr-Einstein

L’obiezione di Einstein
al principio di complementarità

Lo storico “esperimento mentale” di Bohr della doppia fenditura





La complementarità come “dualismo onda-corpuscolo”: Secondo significato

Non è possibile ottenere contestualmente l’informazione sul cammino percorso dal fascio e una figura d’interferenza: si tratta di “aspetti complementari”, riconducibili al dualismo onda-corpuscolo, qualora si associ:

- il formarsi di una figura d’interferenza alla natura ondulatoria del fascio;
- l’informazione del cammino percorso alla natura corpuscolare del fascio.

Nel micromondo non esistono più le “cosiddette particelle”

Il mondo microscopico è corpuscolare e discreto

Il mondo microscopico presenta aspetti complementari

“Salviamo i fenomeni”…

Il linguaggio con cui accedere al mondo microscopico non può essere quello della meccanica quantistica

Le letture che hanno accompagnato questa fase del percorso:

W. Heisenberg: Fisica e oltre in particolare il capitolo «discussioni sulla lingua(1933)»
W. Heisenberg: Fisica e filosofia in particolare il capitolo «sviluppo storico della teoria dei quanti»

E ancora estratti da
A. Einstein: Autobiografia scientifica
N. Bohr: I quanti e la vita
Heisenberg e altri: Discussione sulla fisica moderna

Domanda di fondo che ha attraversato l'analisi dei dibattiti:
"*quali assunti epistemologici stanno alla base di un modello di 'oggetto'?*"

Peculiarità della descrizione classica messe in particolare evidenza dalla descrizione quantistica:

- il concetto classico di traiettoria si basa su un particolare principio di causalità (*il determinismo classico*);
- il modello classico (così come il formalismo classico) si basa su un principio di *non contraddizione*;
- il mondo classico assume la *separabilità* tra le misure relative alle proprietà degli oggetti e l'apparato di misura;
- la modellizzazione classica dell'oggetto si basa spesso sulla possibilità di "proiettare" le costruzioni simboliche in uno "stesso spazio" (isomorfo a quello ordinario) (permettendo la *visualizzabilità*).

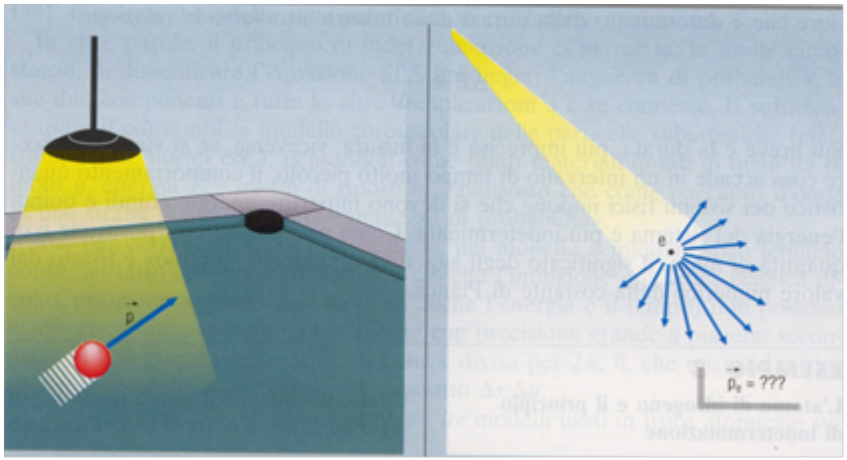
Le configurazioni elettronica degli atomi studiate in chimica……

Alla luce di quanto visto, quale significato ai 4 numeri quantici?

La verifica….

Nel tuo libro di testo (U. Amaldi, 2003) il principio di indeterminazione è presentato nel modo seguente:

[….]

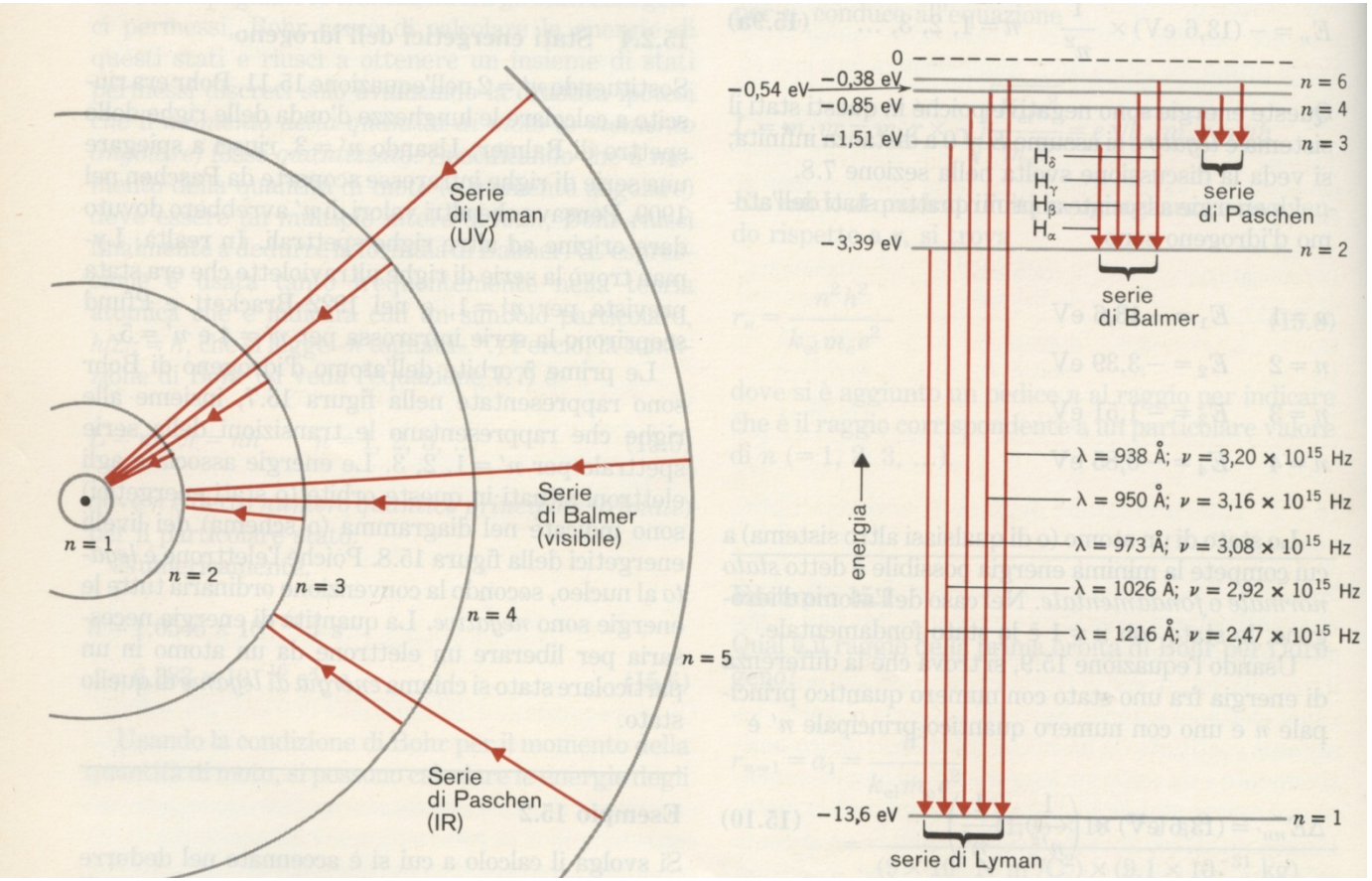


- Commenta tale presentazione individuando i punti oggi non più accettabili come scientificamente corretti, proponendone una modifica;
- Commenta tale presentazione supponendo di sostenere prima la posizione di Heisenberg (articolo del marzo 1927) e poi quella di Bohr (autunno 1927).

“*La fisica è un tentativo di afferrare concettualmente la realtà fisica, quale la si concepisce indipendentemente dal fatto di essere osservata. In questo senso si parla di “realtà fisica”. Nella fisica prequantistica, non c’era alcun dubbio sul modo di intendere queste cose: nella teoria di Newton, la realtà era rappresentata da punti materiali nello spazio e nel tempo; nella teoria di Maxwell, dal campo nello spazio e nel tempo. Nella meccanica quantistica, la rappresentazione della realtà non è così facile. […]” (Einstein, “Autobiografia scientifica”)*

Alla luce di quanto studiato fino ad ora, indica per quali aspetti è cambiata, con la Meccanica Quantistica, la rappresentazione della realtà fisica e argomenta perché tali aspetti rappresentano secondo te, un cambiamento rispetto alla rappresentazione classica.

L'atomo di Bohr



Le due "immagini", molto diverse tra di loro, possono essere considerate rappresentazioni di proprietà dell'"oggetto quantistico".

- Quali "proprietà" fondamentali del mondo microscopico essere rappresentano?
- Alla luce di quanto discusso in classe, quali limiti e quali potenzialità riconosci ad esse?
- Quale delle due ti sembra più "fedele" o più "efficace" per rappresentare un oggetto microscopico

“Tale rappresentazione dell'atomo di Bohr è discutibile in quanto non esistono traiettorie ben rappresentabili […]. Nonostante questo però tale rappresentazione è indispensabile perché si sforza di mostrare qualcosa che noi non possiamo conoscere e si pone quasi come un freno al processo di astrazione causato dal formalismo.”

(Matteo)

“Le immagini dell'atomo di Bohr sono ormai inaccettabili ma continuano ad essere riprese perché, in fisica atomica, si è giunti ad astrazioni profonde, impossibili da descrivere con parole e immagini. Queste immagini, dunque, derivano dal bisogno umano di darsi una rappresentazione tangibile della realtà.
Alla luce delle discussioni effettuate in classe l'atomo non risulta altro che una serie di numeri quantici (n,l,m,s).”

(Stefano)

Verso l’individuazione di fenomenologie genuinamente quantistiche

Dalla crisi del concetto di traiettoria …….

All’introduzione di una probabilità “non epistemica”

Il principio di indeterminazione come primo passo di un processo che ha mandato in crisi una visione classica dell'oggetto microscopico:

"dalle ceneri, frammenti incerti e vaghi della realtà" (Schrödinger).

Peculiarità della descrizione quantistica:

- il modello quantistico si basa su categorie come indeterminazione e complementarità assunti a principi base;
- l'oggetto quantistico non ammette nessuna visualizzabilità;
- esiste un serio problema di demarcazione tra micro e macro.

L’oggetto quantistico
e…..
Il gioco delle venti domande

Da "Il velo di Einstein" di Anton Zeilinger

"[…] il fisico John Archibald Wheeler ha proposto un interessante gioco concettuale che dovrebbe illustrare chiaramente questa idea.
Si tratta del noto gioco delle venti domande. Un giocatore viene fatto uscire da una stanza e gli altri si mettono d’accordo su una parole che questi deve indovinare. È permesso solo fare domande cui si possa rispondere sì o no, e il numero massimo di domande ammesse è venti. Per esempio:
[….]

Si trattava di trovare un termine già concordato prima delle domande: lo scopo del gioco era trovare qualcosa di già esistente.

L'oggetto quantistico
e…..
Il gioco delle venti domande

Da "Il velo di Einstein" di Anton Zeilinger

Immaginiamo ora che a fine serata i giocatori rimasti nella stanza decidano di movimentare il tutto introducendo una novità. Chi torna nella stanza si accorge subito che c'è qualcosa sotto […]

Contrariamente alle partite precedenti i giocatori hanno deciso di non scegliere nessuna parola, fissando solo la regola che ogni risposta non dovesse contraddire quelle precedenti. Quindi ognuno, al suo turno, doveva avere in mente almeno un esempio di un concetto che potesse soddisfare tutte le risposte già date. Così si è man mano formato un concetto, basato sulla serie delle risposte date, che sicuramente all'inizio non era lo stesso per tutti, ma che poi è stato definito sempre meglio. In questo modo, con un'osservazione continua, cioè con una serie di domande, nella mente dei giocatori si è formato qualcosa di nuovo, che alla fine è diventato reale – o irreale – proprio come il coccodrillo su cui si erano messi d'accordo iniziando il gioco [….]"

Lettura in collaborazione con l’insegnante di filosofia del capitolo

«Meccanica quantistica e filosofia kantiana (1930-1934)»

in Fisica e oltre di W: Heisenberg

Verso la costruzione di un formalismo e di una teoria

Obiettivo: riorganizzare in una struttura “intelligibile” e coerente molti concetti già introdotti (sistema quantistico, stato, probabilità non epistemica, principio di sovrapposizione, processo di misura, indeterminazione e complementarità).

E’ possibile esprimere formalmente gli aspetti essenziali analizzati fino a questo momento a livello fenomenologico, concettuale ed epistemologico?

- Dispositivi di Stern e Gerlach come “scatole nere” focalizzando l’attenzione sugli stati dell’atomo.

- Introduzione “assiomatica” degli enti matematici e della loro associazione a enti fisici (seguendo i testi di Dirac e Ghirardi).

- Ancoraggio all’esempio specifico: rappresentazione matriciale dello spin utilizzando le matrici di Pauli (matrici 2X2).

La costruzione dello schema matematico, ovvero l'individuazione degli enti matematici a cui associare le entità fisiche che caratterizzano la descrizione quantistica:

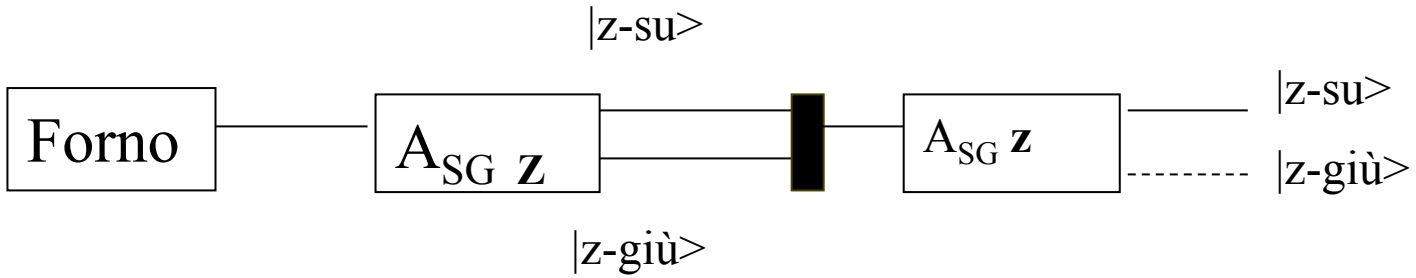
- Sistema fisico;
- Stato di un sistema;
- Variabile dinamica (o osservabile).

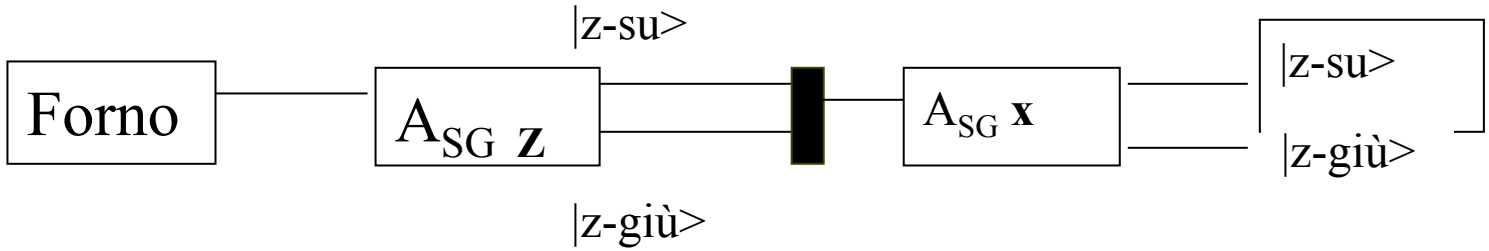
L'associazione a proprietà formali di: indeterminazione, complementarità, probabilità non-epistemica, operazione di misura, risultato di una misura.

Riflessioni su brani tratti da:

G. Ghirardi: Un’occhiata alle carte di Dio in particolare il capitolo «Il principio di sovrapposizione e la struttura concettuale della nuova teoria»

La verifica….





Descrivi (anche formalmente) gli esiti degli esperimenti di Stern e Gerlach schematizzati in fig.1 e fig. 2. Quali aspetti caratteristici della Meccanica Quantistica gli esperimenti di Stern e Gerlach permettono di evidenziare?

L'esperimento di Stern e Gerlach consiste nello scaldare in un forno degli atomi di argento e farli successivamente passare in uno o più apparati di Stern e Gerlach. Ogni apparato di Stern e Gerlach ha un asse privilegiato ed è costituito da due magneti sagomati. Il funzionamento è basato sull'interazione fra il campo magnetico all'interno dell'apparato e lo spin dell'ultimo elettrone dell'atomo di argento. ***Una volta uscito dal primo apparato di Stern e Gerlach, l'elettrone è stato " preparato" nello stato zsu, abbiamo infatti bloccato tutti gli elettroni con stato zgiù impedendo loro di entrare nel secondo apparato***. Nella figura I osserviamo che nessun elettrone esce dal secondo apparato di Stern e Gerlach nello stato zgiù. Nel secondo caso (fig. 2) il primo apparato di Stern e Gerlach prepara gli elettroni nello stato zsu (gli elettroni aventi stato zgiù sono nuovamente bloccati) e li fa passare attraverso un secondo apparato con asse privilegiato x, dalla figura 2 osserviamo come, dal secondo apparato, escano sia elettroni in stato xsu che in stato xgiù, con probabilità uguali.

(Andrea)

Secondo il formalismo far passare un elettrone di argento attraverso un apparato di Stern e Gerlach con asse privilegiato z corrisponde a vedere lo stato come combinazione lineare di Izsu> e Izgiù>, ovvero

Istato> = a Izsu> + b Izgiù>....

La probabilità di ottenere un determinato autostato all'atto dell'osservazione è uguale al quadrato del suo coefficiente…”

(Andrea)

Lo stato di un sistema è rappresentato con un vettore. L'osservabile è un operatore, cioè una matrice, […] Operatori Sz=[1/2ħ]δz Sx=[1/2ħ]δx

$$\sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \qquad \sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Autovalori: +1,-1 Autovalori: +1,-1

$$\text{Autovettori} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{Autovettori} \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

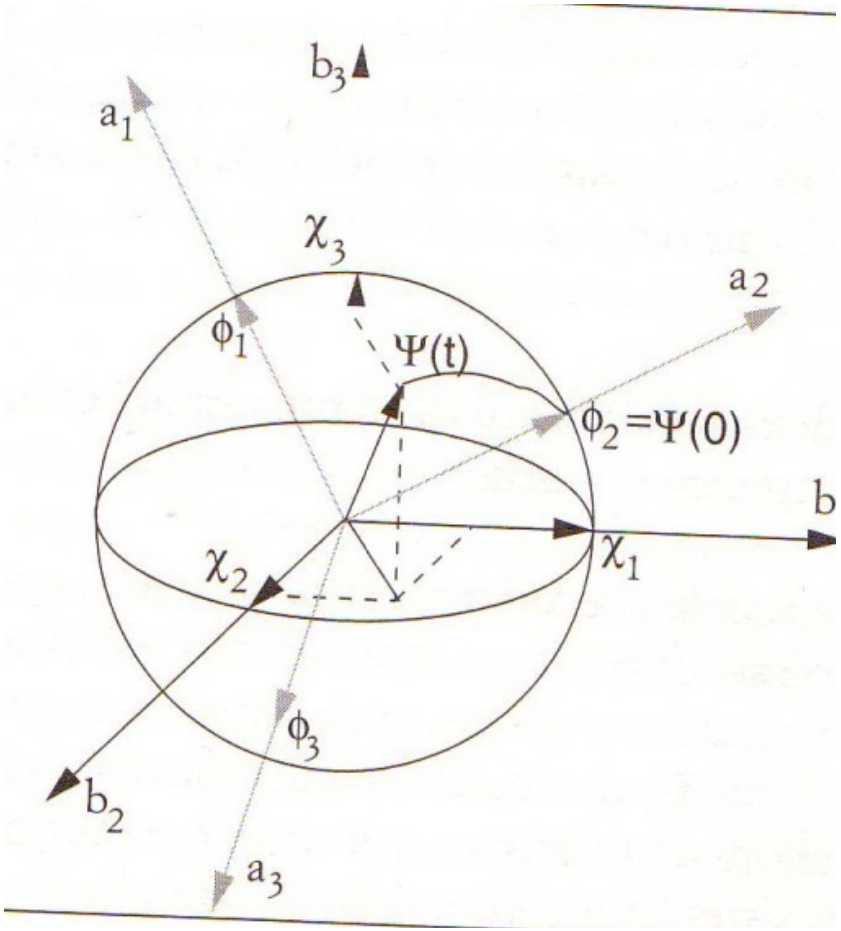
$$\begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} = a\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + b\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} = a\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + b\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Istato> = a |zsu> + b |zgiù> |stato> = a |xsu> + b |xgiù>

Un generico stato quantistico risulta quindi la combinazione lineare di 2 autostati. Ritornando al fascio atomico, dopo essere transitato attraverso l'Asg2 si trova in uno stato che chiamo Istato1> = a|zsu> + b|zgiù>. Le ampiezze a e b risultano uguali a , cioè si ha il 50% di probabilità che escano atomi |zsu> e altrettanta che escano atomi | zgiù>. A questo punto si blocca il fascio zgiù e si prepara un nuovo stato.....“

Stefano

Per *visualizzare geometricamente la preparazione*, l'*evoluzione* e la *misura* di un *sistema fisico* si può far riferimento ad una situazione molto semplificata e considerare lo spazio euclideo tridimensionale di figura.



L'osservabile A è rappresentata dall'operatore α che individua tre versori ortogonali indicati in figura 3 con Φ_i associati agli autovalore a_i con i=1,2,3.
L'osservabile B è rappresentata dall'operatore β che individua tre versori ortogonali indicati in figura 3 con χ_j j=1,2,3, associati agli autovalori b_j con i=1,2,3.

Molti libri divulgativi, ma anche alcuni testi didattici, scelgono di introdurre il formalismo della meccanica quantistica facendo riferimento alla fenomenologia della polarizzazione della luce che è, per molti aspetti, **analoga** a quella che abbiamo considerato del comportamento degli atomi d'argento fatti passare attraverso apparati di Stern e Gerlach.
Di seguito è riportata una descrizione della fenomenologia della polarizzazione. Leggila attentamente al fine di individuare i termini di questa analogia.
[…]
a) A partire da queste descrizioni fenomenologiche cerca di schematizzare le due situazioni relative alla polarizzazione, esplicitando la corrispondenza "analogica" tra la polarizzazione e i seguenti "componenti" degli esperimenti di Stern e Gerlach:

- Forno;
- Apparato di Stern e Gerlach;
- |z-su> e |z-giù>.

b) Sei in grado di "ri-leggere" le due descrizioni "con il linguaggio della meccanica quantistica", ovvero utilizzando i seguenti termini?

- Preparazione di un sistema;
- Osservabile;
- Autostati e autovalori;
- Stato del sistema;
- Misura: previsioni sulla misura ed esiti di misura.

c) Supponiamo di voler "misurare" lo "stato di polarizzazione a 45°" di un fotone che esce dalla situazione 2, utilizzando un polaroide con asse di polarizzazione orientato a 45°.
Quali previsioni si è in grado di fare circa gli esiti della misura?