Pavia, 2.4.2014

"Il problema non è solo capire ma anche accettare le conseguenze della teoria": Risultati di sperimentazioni sulla fisica quantistica.

Paola Fantini[1], Olivia Levrini[2]

[1]Liceo Scientifico "A. Einstein", Rimini
[2]Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna

IL PERCORSO IN BREVE

FILO CONDUTTORE:
Una riformulazione progressiva della domanda:

Come cambia il concetto di oggetto nel passaggio dalla fisica classica alla fisica quantistica?

Introduzione storica: la crisi della visione classica del mondo e la necessità di ripensare all'oggetto

Obiettivo: presentare/discutere situazioni problematiche nelle quali i modelli classici di oggetto presentano i loro limiti (es. effeto fotoelettrico, effetto Compton) o nelle quali i diversi schemi esplicativi si scontrano in problemi di confine (Tarsitani, PRIN F21, 2007).

Se le uniche categorie di pensiero disponibili sono quelle classiche, la domanda portante non può che essere forumata così: *Che cosa NON è l'oggetto quantistico*?

Prima parte: Analisi di importanti dibattiti "storici"

Obiettivo: mostrare quanto drammatico è stato rinunciare all'immagine classica del mondo e quante posizioni si possono trovare tra i fisici stessi che hanno dovuto affrontare i conflitti aperti dalla meccanica quantistica:

- **lo "scontro" tra Heisenberg e Bohr sull'interpretazione dell'indeterminazione;**

- **il dibattito tra Bohr e Einstein sul determinismo e sulla relazione tra conoscenza e realtà;**

- **il "dibattito" tra Heisenberg e Schrödinger sulla visualizzazione dell'oggetto quantistico.**

Seconda parte: la costruzione di un formalismo minimale

Analisi storico-epistemologica

↓

Analisi fenomenologica di situazioni sperimentali

↓

Formalizzazione (matrici di Pauli)

(i concetti di *stato quantistico, preparazione di uno stato, operatore, autostato, autovalore, principio di sovrapposizione, complementarità, processo di misura*)

La struttura formale come un modo sintetico e "semplice" di gestione della complessità della conoscenza e per mostrare una NUOVA LOGICA

Il senso del percorso –
La sfida concettuale

ovvero

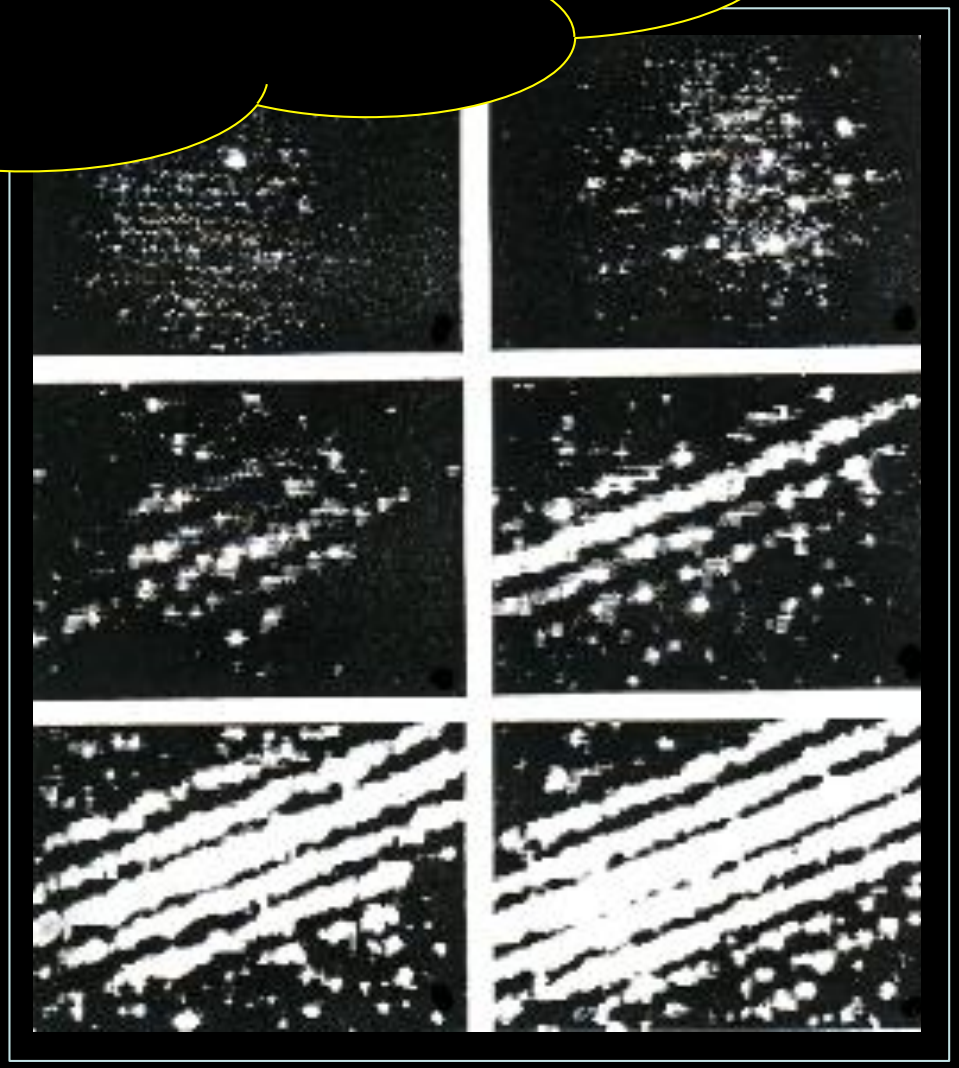
come la fenomenologia impone di liberarsi progressivamente da immagini e categorie di pensiero che sembrano ovvie…
…e di costruirsene delle nuove.

N.B. La dinamica di “ripulitura” concettuale, terminologica e immaginativa come tipica della fisica…

“No new idea, whatever its domain, is born fully grown. Initial formulations of novel conceptions, being still tributary to the old views they are to replace, of necessity are awkward and inappropriate. Any scientific theory, following its inception, then has to undergo a **recasting** process through which its notions are clarified and its terms improved.”

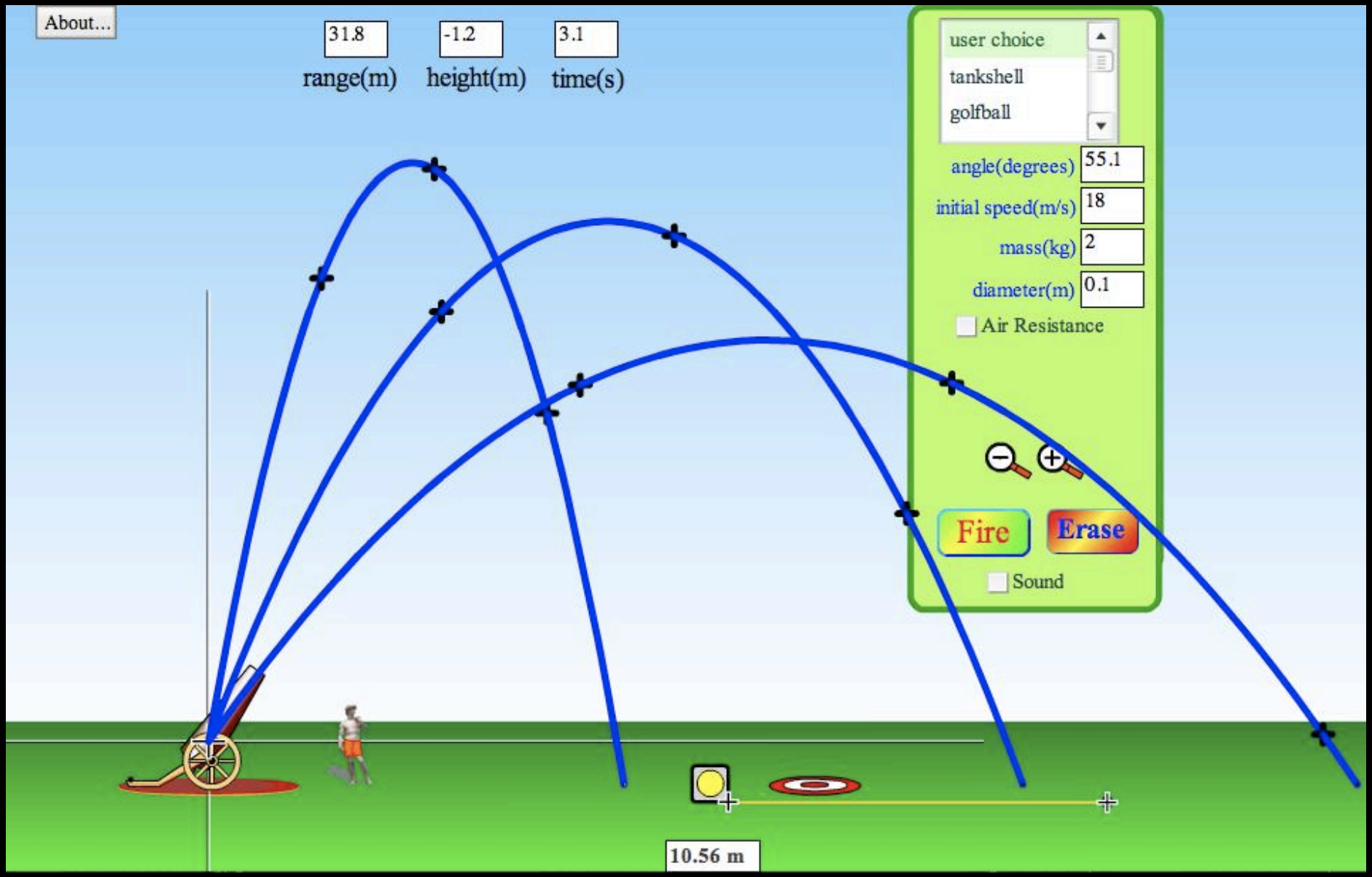
JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND, On the Nature of Quantons, 2003, *Science & Education*

Quali aspetti, qui osservabili, "non sono spiegabili" con criteri classici? A cosa dobbiamo rinunciare?



Come occorre interpretare queste vignette?

Sull'"ovvio" concetto di traiettoria…



La “relazione” di indeterminazione

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

“h tagliato”= $1{,}054 \times 10^{-34}$ Js

Apparentemente…

“[…] una formuletta - in sé piuttosto arida e arcana - che abbiamo imparato a recitare sui libri di Liceo, dal nome fastidiosamente indimenticabile: il principio di indeterminazione di Heisenberg.”

(M. Cattaneo, Heisenberg e la rivoluzione quantistica, I grandi della scienza, Le Scienze, 2000, ripubblicato luglio 2013)

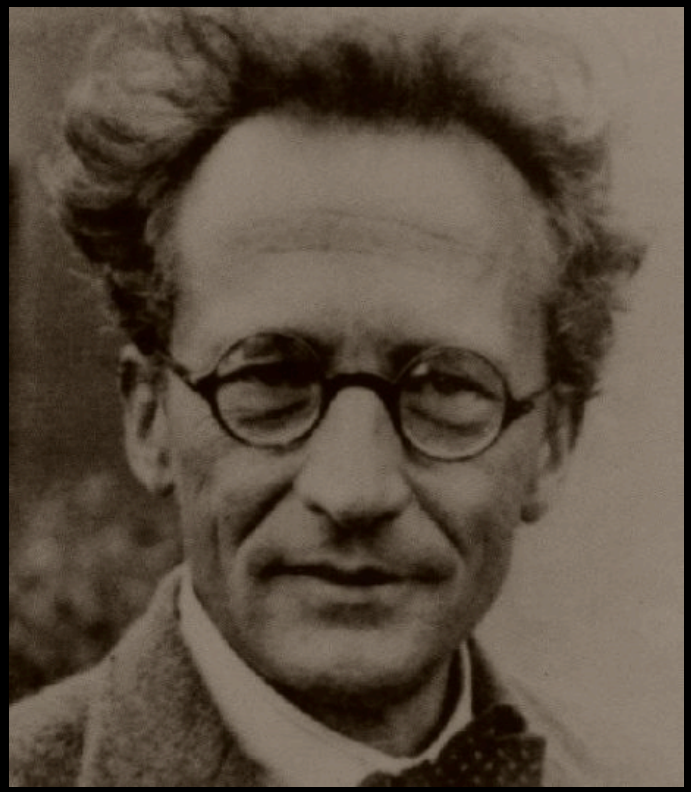
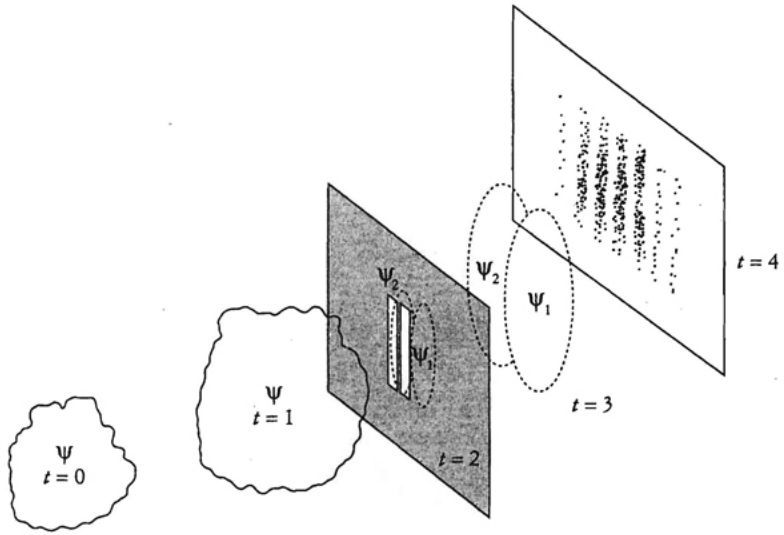


Figura 35.

Una «nube» di funzione d'onda ψ che si avvicina a due fessure ($t = 0$ e $t = 1$), le attraversa, si divide in due ($t = 2$), si espande e si sovrappone ($t = 3$) e urta lo schermo ($t = 4$).



"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)**

Di che onda si tratta????

Neither Waves, Nor Particles, but Quantons!

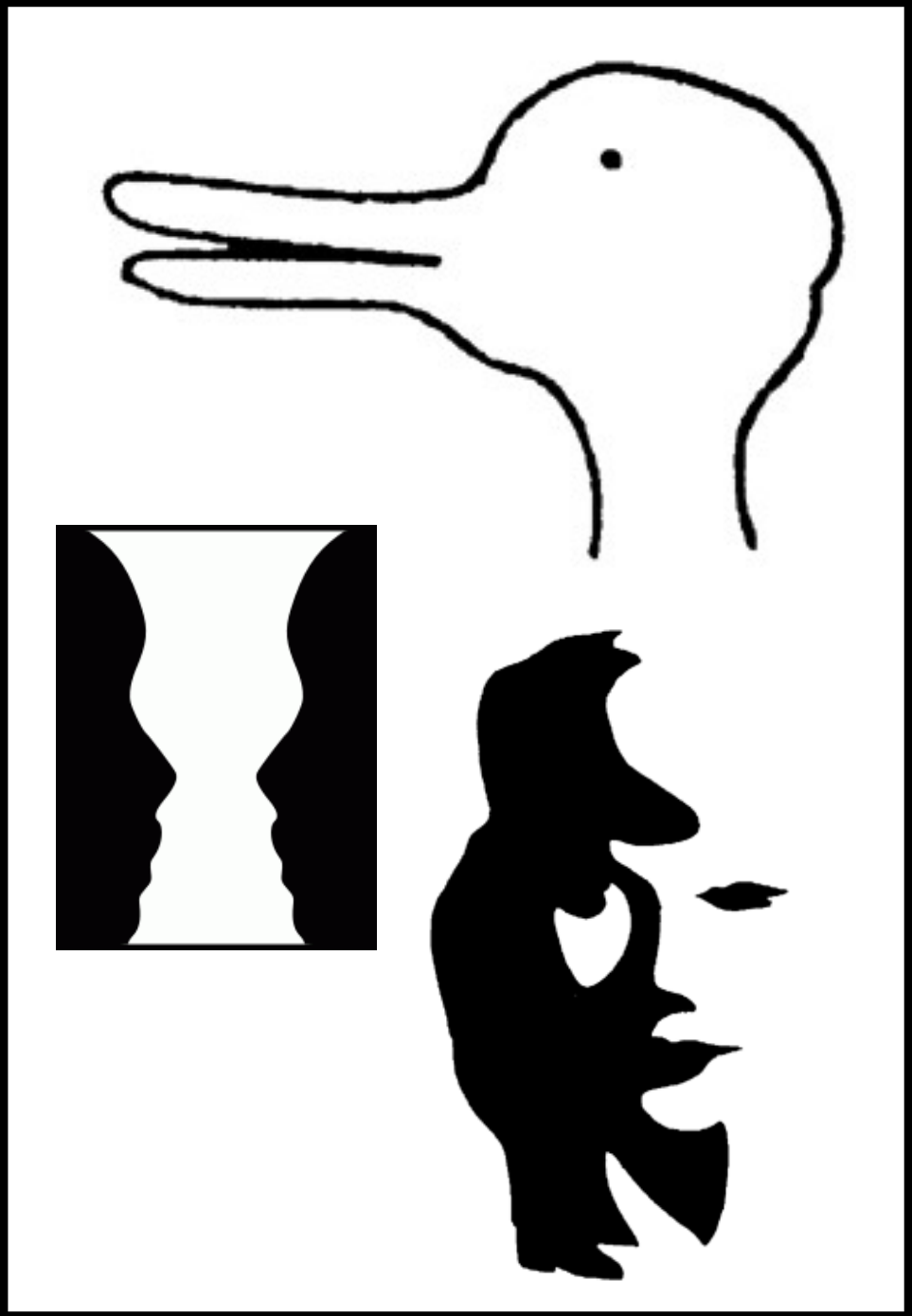
That the true nature of quantum objects has long been misunderstood is proved by their still all too common description in terms of an alleged "wave-particle duality". It must be remarked first of all that this formulation is at best ambiguous. For it may be understood as meaning either that a quantum object is at once a wave and a particle, or that it is sometimes a wave and sometimes a particle. Neither one of these interpretations in fact make sense. "Wave" and "particle" are not things but concepts, and incompatible ones; as such, they definitely cannot characterise the same entity. While it is true that quantum objects may in some cases look like waves, and in other cases like particles, it is truer still that in most situations, particularly the ones explored by the elaborate modern experiments, they resemble neither one nor the other. The situation here is reminiscent of that encountered by the first explorers of Australia, when they discovered strange animals dwelling in brooks. Viewed from the forefront, they exhibited a duckbill and webbed feet, while, seen from behind, they showed a furry body and tail. They were then dubbed "duckmoles". It was later discovered that this "duck-mole duality" was of limited validity, and that the zoological specificity of these beasts deserved a proper naming, which was chosen as "platypus". Bunge's proposal to call them "quantons", building on the common terminology (electrons, photons, nucleons, etc.) and extending it to a common categorisation, is most to the point, and it is to be hoped that this terminology gradually gains ground.

JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND, On the Nature of Quantons, 2003, *Science & Education*

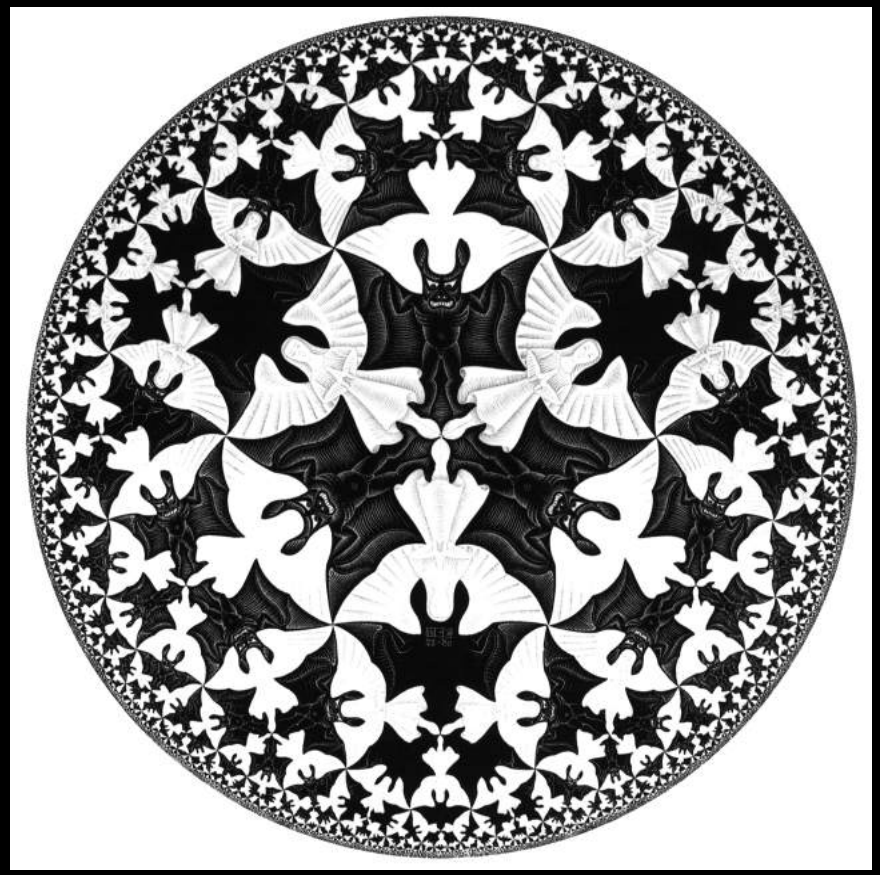
Niels Bohr

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)

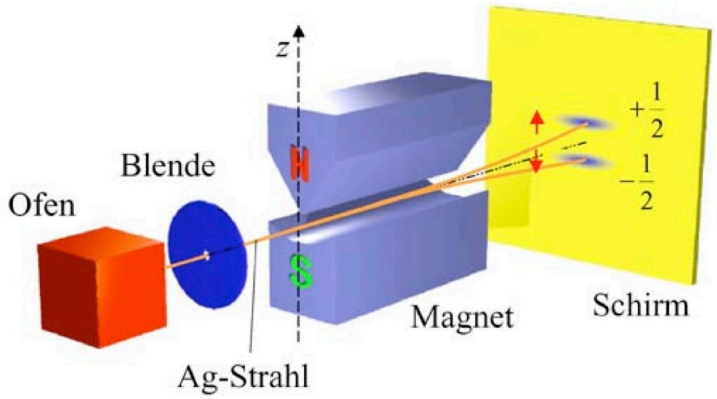


ambiguità

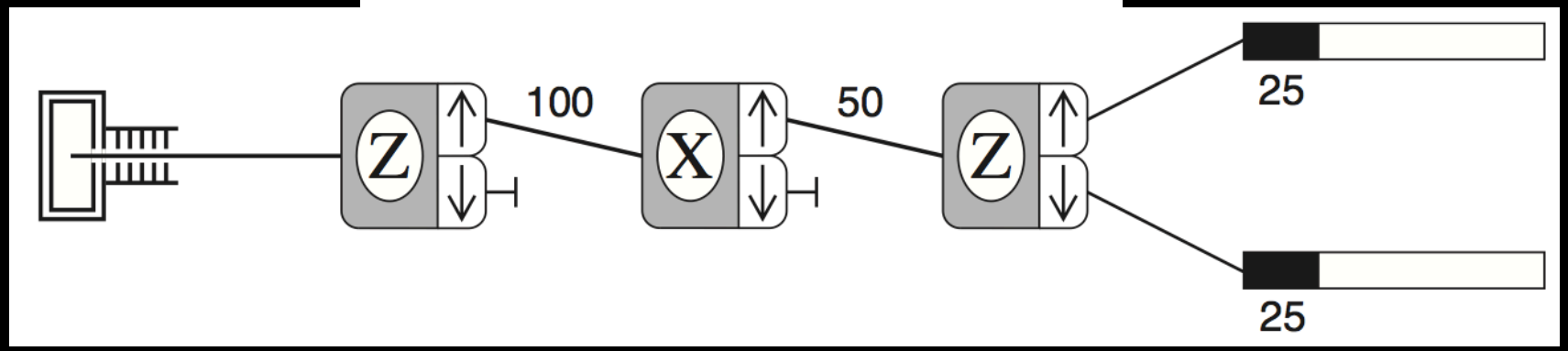


Contraria sunt complementa.

Il QUANTONE e gli ESPERIMENTI STERN E GERLACH con atomi d'argento



$$F_z = \frac{\partial}{\partial z}\left(\vec{\mu}\cdot\vec{B}\right) \approx \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z}$$



PROLOGO: I calzini di Erwin*

“Erwin aveva una collezione di calzini molto semplice – bianchi o neri, per andare a scuola o per giocare a pallone, corti o lunghi a seconda che li portasse coi pantaloni o con pantaloncini.
Erwin teneva i calzini in due cassetti. In uno teneva i calzini bianchi e nell’altro quelli neri. Riteneva di poter capire se erano lunghi e corti semplicemente toccandoli.
Sfortunatamente questo modo di organizzare i calzini non funzionava. Ogni volta che dal cassetto “dei calzini bianchi”, estraeva due calze lunghe o due calze corte, c’era una probabilità del 50% che ognuno dei due fosse nero o bianco. I risultati dal cassetto “nero” erano gli stessi. I calzini sembravano aver dimenticato la proprietà che Erwin aveva determinato precedentemente di essere bianchi o neri.
Erwin quindi decise di organizzare i calzini nei cassetti a seconda della lunghezza. C’era in cassetto dei calzini lunghi e quello dei calzini corti. Quando però da uno dei due cassetti andava a prendere due calze bianche o due calze nere, la probabilità che ognuna di esse fosse lunga o corta era del 50%. Avevano “dimenticato” la proprietà di essere lunghi o corti.”
*liberamente tratto da McIntyre, Manogue, Tate “Paradigms in Physics: Quantum Mechanics”, Oregon State University

Sintesi
(*pars destruens* con le prime indicazioni di direzione)…

"Vecchia fisica quantistica"

(modelli atomici, corpo nero, effetto fotoelettrico, effetto Compton…)

- Che cosa *non* è l'oggetto quantistico: non è un'onda, non è un corpuscolo (qualcosa che interagisce scambiando quantità discrete di energia e q.m)

"La problematica ricerca di significato":

i primi dibattiti storici su INDETERMINAZIONE e COMPLEMENTARITA'

- Che cosa *si assume* (mediante esperimenti mentali) *non* avere l'oggetto quantistico? (non una traiettoria, visualizzabilità in uno spazio ordinario, non un comportamento determinabile con certezza)

Verso l'individuazione di fenomenologie genuinamente quantistiche

- Quali *comportamenti/ fenomenologie* sembrano 'genuinamente' quantistici*? Come metterli in evidenza? Come raffinare via via gli argomenti e metterli alla prova dei fatti?

Verso un formalismo minimale per mostrare la logica della fisica quantistica (pars construens)

Verso la costruzione di un formalismo e di una teoria

- **Quale nuova logica permette di interpretare fenomenologie tipicamente quantistiche?**

PAOLA…

A.S. 2005-2006:

"Il problema non è stato capire ma accettare i risultati della teoria" **(Michele)**

Il contesto

- “classe VG” (19 studenti, 10 ragazzi e 9 ragazze)
- “classe VH” (20 studenti, 11 ragazzi e 9 ragazze)

Durata del lavoro: circa 25 ore (in ciascuna classe)

Le sorgenti dei dati

- Questionario iniziale sui “modelli classici” di oggetto;

- Compiti in classe svolti in itinere (problemi qualitativi e quantitativi) su concetti affrontati rispettivamente nella prima e nella seconda parte del percorso;

- Discussioni video-registrate (alla fine del percorso)

- Questionario finale relativo alle “reazioni” degli studenti sull’intero lavoro svolto.

Obiettivi dello studio

Interpretare due evidenze:

1. **Spostamento delle difficoltà d'apprendimento dall'intelligibilità alla accettabilità della fisica quantistica (in entrambe le classi)**

   "*il problema non è stato capire ma accettare i risultati della teoria*" (Michele)

   "*Ho trovato questo percorso molto stimolante ed interessante (veramente!); facile SOLO dal punto di vista tecnico (calcoli, esercizi), poiché per la parte teorica richiede molta riflessione e, io credo, personale interpretazione*." (Francesco)

   Quali problemi hanno incontrato gli studenti nell'accettare la fisica quantistica?

Obiettivi dello studio (continua..)

2. Diversi ruoli attribuiti al formalismo dalle due classi:

   - FONDAMENTALE per tutti gli studenti della VG;

   - non particolarmente UTILE per la maggior parte degli studenti della VH.

Alcuni risultati

L'emergere di un tema dominante in ogni classe (probabilmente a causa degli interessi degli studenti leader) :

- ***Linguaggio e pensiero* (classe VG)**
- ***Conoscenza e realtà* (classe VH)**

Linguaggio e pensiero (classe VG)

Tutti gli studenti della VG concordano sul fatto che:

- **il formalismo quantistico è la chiave per "*entrare in un nuovo meccanismo*"" (Stefano)**

- **entrare le meccanismo della fisica quantistica implica un radicale cambiamento di prospettiva:**

  "*la parte riguardante il formalismo, seppur complicata, è stata utile per […] sancire un forte distacco dalla visione classica della realtà"* (Giacomo)

Il formalismo rafforza l'idea che, nella fisica quantistica, la *visualizzazione* è impossibile

Le figure sono roba da bambini, non per scienziati… e la matematica è sufficiente per descrivere il mondo microscopico

E’ impossibile parlare di qualcosa senza cercare di rappresentare ciò di cui stiamo parlando

Il problema dell'accettabilità

Il bisogno cognitivo di ancorare il "parlare" e il "pensare" a qualcosa

Visualizzabilità come "intelligibilità"

Un altro problema di accettabilità

Il bisogno cognitivo di un criterio plausibile per rendere il linguaggio quantistico "comparabile" al linguaggio classico (necessità di un criterio di confrontabilità):

"con la relatività era diverso[…] con la relatività tu hai quella linea di separazione, perché sai che ad un certo punto, se tu nella formulina…[…] se tu applichi le velocità nostre nella formule ritrovi le nostre formule" **(Silvia).**

Senza tale criterio, il formalismo quantistico rischia di diventare nient'altro che un "*meccanismo*", una "*mentalità*" (Silvia).

Conoscenza e realtà (classe VH)

La maggior parte della classe concorda che:

- il formalismo quantistico sia un importante sostegno emotivo, intelligibile, ma chiaro solo internamente

"La parte del formalismo mi ha aiutato umanamente, perché è sempre confortante contare su equazioni, calcoli e leggi matematiche; tuttavia, nonostante questa sua coerenza interna, la parte matematica non ha contribuito a formare la mia idea di oggetto quantistico più di quanto non l'avesse fatto la parte della fisica: evidentemente perché il piano della teoria matematica è troppo astratto, dal mio punto di vista, per poter essere calato nelle realtà fisiche, per quanto possano essere intangibili. Beninteso: non si è trattato di una complicazione, perché il formalismo è stato facile da memorizzare e capire, ma, come dico, chiaro solo al suo interno." . **(Simone R.)**

Il problema dell'accettabilità:

"Il punto che mi è risultato più duro da comprendere è stato <u>l'abbandono del determinismo classico:</u> in effetti, più che di una vera e propria difficoltà, dovrei parlare di una inettitudine. La fisica del determinismo era una scienza esatta, almeno a livello teorico; la Meccanica Quantistica, invece, è sconvolgente, perché ci mette di fronte al <u>problema della conoscenza,</u> ci fa chiedere se quello che osserviamo è realmente quello che è." **(Simone R.)**

Perché “reale” dovrebbe essere sinonimo di “conosciuto in tutti i dettagli”, “conosciuto con certezza”?

“Fino a che questi interrogativi non affiorano tutto procede per il meglio, ma quando vengono a galla e dobbiamo rispondere che non sappiamo dire o prevedere ciò che vogliamo osservare, l'impatto emotivo è molto forte.” **(Simone R.)**

Il realismo non si perde. Occorre soltanto ri-definirlo in termini di probabilità (e non di certezza)

La matematica è un’astrazione. La si associa alla certezza soltanto per abitudine.

Il mondo microscopico è più reale…

“*Noi siamo una composizione di oggetti microscopici…*”

Una descrizione del mondo basata sul determinismo è meno reale di una descrizione basata su una probabilità non-epistemica.

“*Secondo me, un determinismo a la Laplace crea mondi fantascientifici… Ho capito questo guardando Minority Report*.” **(Michele)**

Tre posizioni dominanti circa l'accettabilità della MQ e tre diversi ruoli attribuiti al formalismo:

- **il formalismo è necessario e sufficiente per accettare i risultati di una teoria che funziona (sia logicamente sia sperimentalmente).**

- **un "formalismo che funziona" è una condizione necessaria ma non sufficiente per "avere la sensazione" di aver capito. La comprensione richiede di interpretare il "meccanismo formale" anche costruendo relazioni significative con il linguaggio ordinario e la descrizione classica.**

- **il formalismo è necessario ma non sufficiente per l'accettazione di una teoria. L'accettabilità richiede anche una analisi delle implicazioni filosofiche della teoria sulla conoscenza in generale.**

Per (non) concludere

- La comprensione è un processo complesso e "multidimensionale" che passa attraverso l'utilizzo di una pluralità di linguaggi e di tipologie di argomentazione (formale, sperimentale, epistemologica..); Quale bilancio è opportuno tra le diverse dimensioni di un percorso?
- La motivazione degli studenti: e quando il loro coinvolgimento e la loro curiosità diventano troppo impegnativi?