

**Scusate il disturbo**  
**Considerazioni sulla didattica del cosiddetto «Principio d'indeterminazione»**

Riccardo Uigur  
Granducato di Copluxonia, C.so Caio Plinio 2 - 10127 Torino  
riccardo.urigu@coplux.edu.it



**UNCERTAINTY - BY NANSCLARK**



Heisenberg, Schrodinger and Ohm are in a car and they get pulled over. Heisenberg is driving and the cop asks him "Do you know how fast you were going?"

"No, but I know exactly where I am" Heisenberg replies.

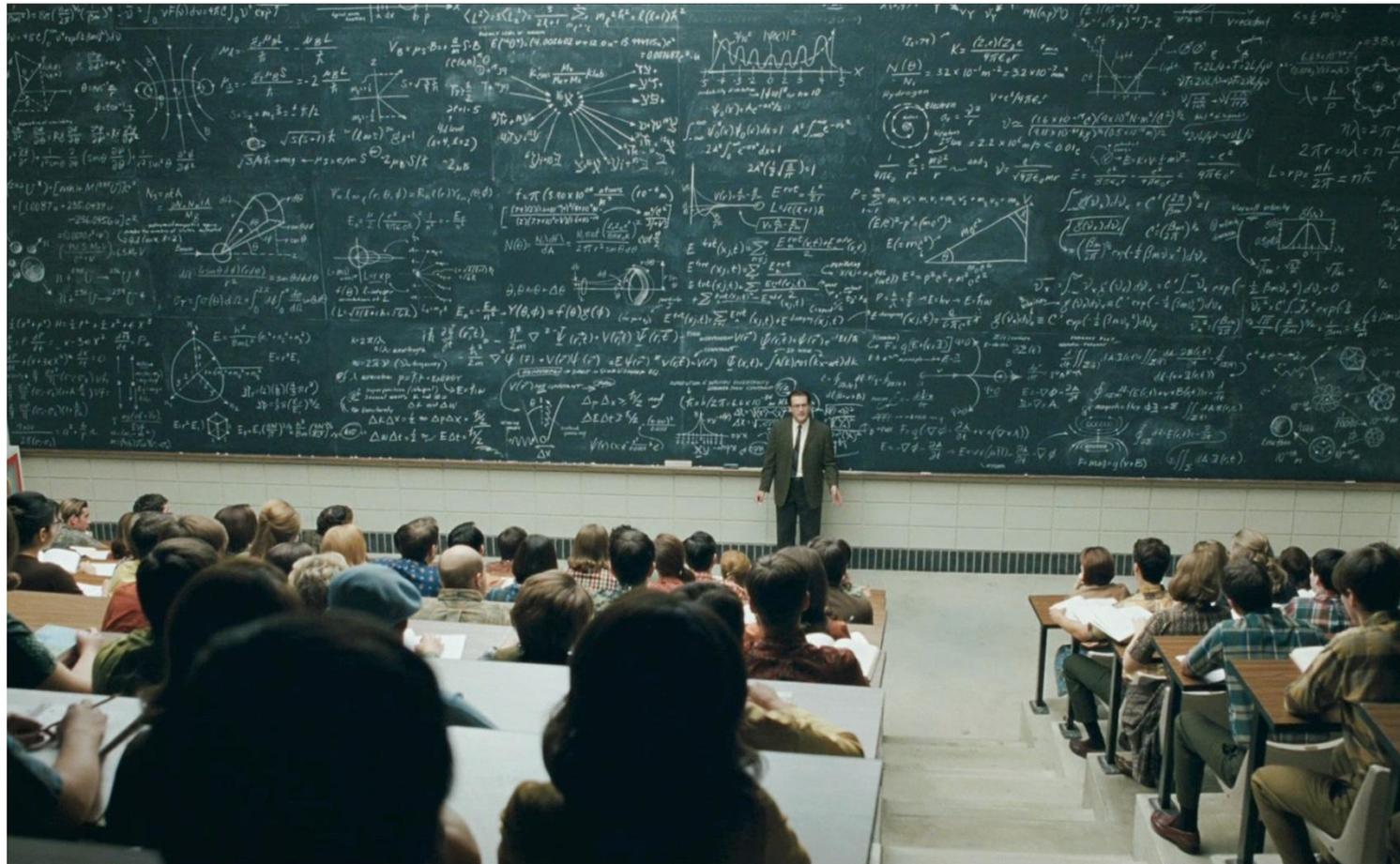
The cop says "You were doing 55 in a 35." Heisenberg throws up his hands and shouts "Great! Now I'm lost!"

The cop thinks this is suspicious and orders him to pop open the trunk. He checks it out and says "Do you know you have a dead cat back here?"

"We do now, asshole!" shouts Schrodinger.

The cop moves to arrest them. Ohm resists.

# Io e il «Principio di Indeterminazione» ... and You?



“The Heisenberg Uncertainty Principle ... proves that we can't ever know what's going on ...”

Joel, Ethan Coen, *A Serious Man* (2009)

[http://www.math.harvard.edu/~knill/mathmovies/m4v/seriousman\\_uncertainty.m4v](http://www.math.harvard.edu/~knill/mathmovies/m4v/seriousman_uncertainty.m4v)



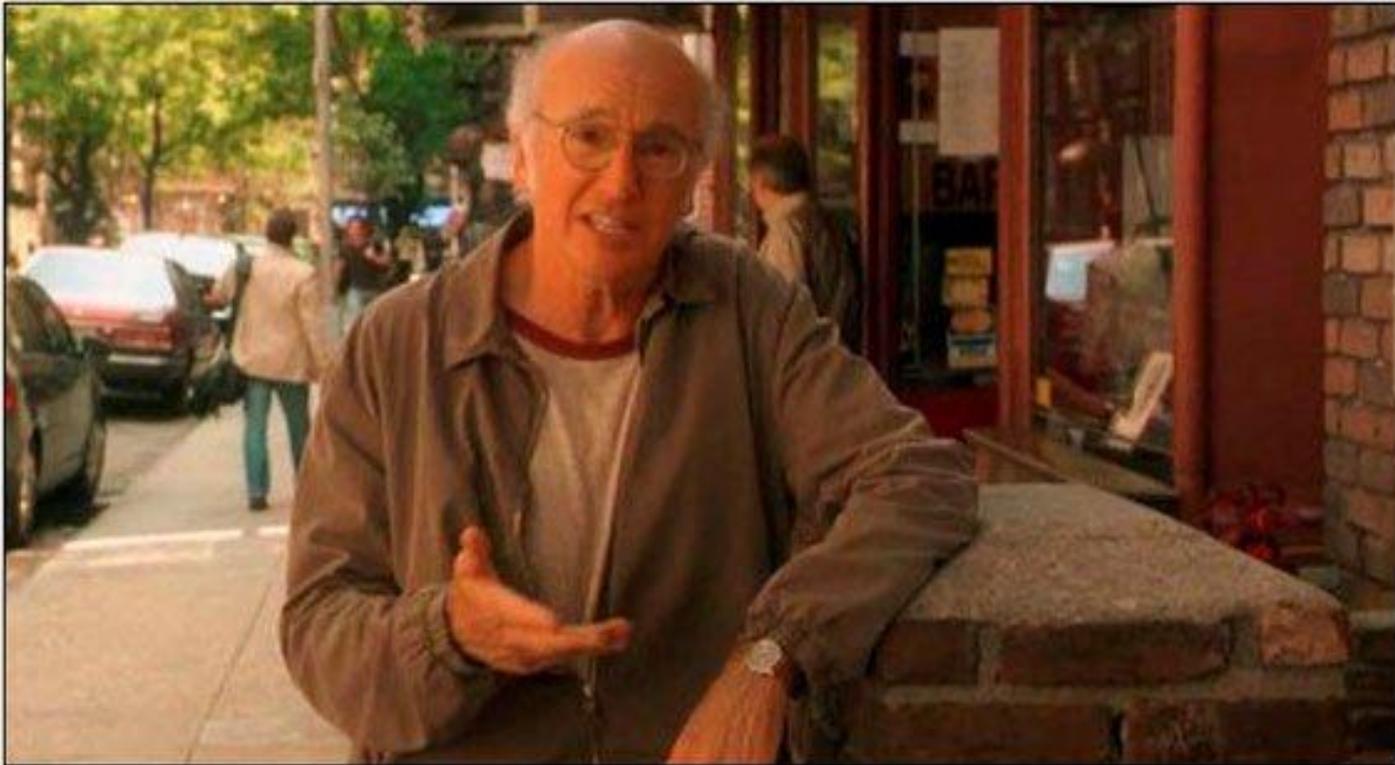
If I were forced to sum up in one sentence  
what the Copenhagen interpretation says  
to me, it would be 'Shut up and calculate!'

(David Mermin)

# Chissenefrega! Basta che funzioni!

**ORDINARY QUANTUM MECHANICS (as far as I know) IS JUST FINE FOR ALL PRACTICAL PURPOSES: FAPP = FOR ALL PRACTICAL PURPOSES**

J. S. Bell, *Against measurement*, Physics World (August 1990)



Whatever Works 2009 Woody Allen

## NEL TUNNEL DELLE INDICAZIONI NAZIONALI

Riforma Gelmini (Avviata a.s. 2010-2011)

Indicazioni nazionali di cui al decreto del Presidente della Repubblica 15 marzo 2010, n.89

[http://www.indire.it/lucabas/lkmw\\_file/licei2010/indicazioni\\_nuovo\\_impaginato/\\_decreto\\_indicazioni\\_nazionali.pdf](http://www.indire.it/lucabas/lkmw_file/licei2010/indicazioni_nuovo_impaginato/_decreto_indicazioni_nazionali.pdf)

### FISICA - QUINTO ANNO

Lo studio dei fenomeni elettrici e magnetici permetterà allo studente di esaminare criticamente il concetto di interazione a distanza, già incontrato con la legge di gravitazione universale, la necessità del suo superamento e dell'introduzione di interazioni mediate dal campo elettrico, del quale si darà anche una descrizione in termini di energia e potenziale, e dal campo magnetico.

Lo studente completerà lo studio dell'elettromagnetismo con l'induzione elettromagnetica; un'analisi intuitiva dei rapporti fra campi elettrici e magnetici variabili lo porterà a comprendere la natura delle onde elettromagnetiche, i loro effetti e le loro applicazioni nelle varie bande di frequenza.

La dimensione sperimentale potrà essere ulteriormente approfondita con attività da svolgersi non solo nel laboratorio didattico della scuola, ma anche presso laboratori di Università ed enti di ricerca, aderendo a progetti di orientamento.

**E' auspicabile che lo studente possa affrontare percorsi di fisica del XX secolo, relativi al microcosmo e/o al macrocosmo**, accostando le problematiche che storicamente hanno portato ai nuovi concetti di spazio e tempo, massa e energia.

Alla professionalità del docente si deve intendere affidata la responsabilità di declinare in modo coerente alla tipologia del Liceo in cui opera, i percorsi di cui si sono indicate le tappe concettuali essenziali.

## QUINTO ANNO

[ ... ]

L'affermarsi del modello del quanto di luce potrà essere introdotto attraverso lo **studio della radiazione termica e dell'ipotesi di Planck** (affrontati anche solo in modo qualitativo), e sarà sviluppato da un lato con lo studio **dell'effetto fotoelettrico** e della sua interpretazione da parte di Einstein, e dall'altro lato con la discussione delle teorie e dei risultati sperimentali che evidenziano la presenza di **livelli energetici discreti nell'atomo**. **L'evidenza sperimentale della natura ondulatoria della materia, postulata da De Broglie, ed il principio di indeterminazione** potrebbero concludere il percorso in modo significativo.

La dimensione sperimentale potrà essere ulteriormente approfondita con attività da svolgersi non solo nel laboratorio didattico della scuola, ma anche presso laboratori di Università ed enti di ricerca, aderendo anche a progetti di orientamento.

In quest'ambito, lo studente potrà approfondire tematiche di suo interesse, accostandosi alle scoperte più recenti della fisica (per esempio nel campo dell'astrofisica e della cosmologia, o nel campo della fisica delle particelle) o approfondendo i rapporti tra scienza e tecnologia (per esempio la tematica dell'energia nucleare, per acquisire i termini scientifici utili ad accostare criticamente il dibattito attuale, o dei semiconduttori, per comprendere le tecnologie più attuali anche in relazione a ricadute sul problema delle risorse energetiche, o delle micro- e nano-tecnologie per lo sviluppo di nuovi materiali).

[http://www.indire.it/lucabas/lkmw\\_file/licei2010///indicazioni\\_nuovo\\_impaginato/\\_Liceo%20scientifico.pdf](http://www.indire.it/lucabas/lkmw_file/licei2010///indicazioni_nuovo_impaginato/_Liceo%20scientifico.pdf)

# Versione ufficiale del Quadro di Riferimento della II Prova di Fisica

<http://ls-osa.uniroma3.it/documents/45>

The screenshot shows a web browser window displaying the website <http://ls-osa.uniroma3.it/notices/100>. The website has a dark header with the LS-OSA lab logo and navigation links: PROGETTO, CONTATTI, ESPERIMENTI, PROBLEMI, FORUM, and PARTECIPANTI. Below the header is a search bar and a large blue banner with the text "FARE LABORATORIO" and icons of a flask, thermometer, lightbulb, microscope, and beaker. Logos for LS-OSA lab, MIUR, and ROMA TRE Dipartimento di Scienze are visible below the banner. The main content area features the title "Versione ufficiale del Quadro di Riferimento della II Prova di Fisica" and a paragraph explaining that the final version of the reference framework for the second written physics exam for scientific high schools was published by MIUR on December 15, 2015, following a technical table of experts. Below the text are "News" and "Home" buttons. On the right side, there is a sidebar with several sections: "Accesso e iscrizione" (Access and registration), "Atti Bologna 1-3.XII.2016" (Bologna Proceedings 1-3.XII.2016), "Notizie" (News), "IN EVIDENZA" (IN EVIDENCE) with a link to "Esempio Prova di Fisica (MIUR) 12.01.2017", "EVENTI" (EVENTS) with a link to "Accesso LS-OSALab per i licei scientifici - OSA e tradizionali", and "VIDEO" (VIDEO) with a video player for "Seminario residen..." (Residential Seminar...). The Windows taskbar at the bottom shows the date 14/01/2017 and time 10:51.

| MODULO/UNITA' DIDATTICA | PREREQUISITI   | CONTENUTI IRRINUNCIABILI   | ABILITA' RELATIVE AI CONTENUTI  | COMPETENZE SETTORIALI   |
|-------------------------|--|--|---|---|
| Modulo B.<br>Relatività | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatività galileiana</li> <li>• Sistemi di riferimento inerziali</li> <li>• Trasformazioni di coordinate</li> <li>• Invarianti</li> <li>• Legge non relativistica di addizione delle velocità</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dalla relatività galileiana alla relatività ristretta</li> <li>• I postulati della relatività ristretta</li> <li>• Relatività della simultaneità degli eventi</li> <li>• Dilatazione dei tempi e contrazione delle lunghezze</li> <li>• Evidenze sperimentali degli effetti relativistici</li> <li>• Trasformazioni di Lorentz</li> <li>• Legge di addizione relativistica delle velocità; limite non relativistico: addizione galileiana delle velocità</li> <li>• L' Invariante relativistico</li> <li>• La conservazione della quantità di moto relativistica</li> <li>• Massa ed energia in relatività</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Applicare</u> le relazioni sulla dilatazione dei tempi e contrazione delle lunghezze e saper individuare in quali casi si applica il limite non relativistico</li> <li>• <u>Utilizzare</u> le trasformazioni di Lorentz</li> <li>• <u>Applicare</u> la legge di addizione relativistica delle velocità</li> <li>• <u>Risolvere</u> problemi di cinematica e dinamica relativistica</li> <li>• <u>Applicare</u> l'equivalenza massa-energia in situazioni concrete tratte da esempi di decadimenti radioattivi, reazioni di fissione o di fusione nucleare</li> <li>• <u>Illustrare</u> come la relatività abbia rivoluzionato i concetti di spazio, tempo, materia e energia</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Saper mostrare, facendo riferimento a esperimenti specifici, i limiti del paradigma classico di spiegazione e interpretazione dei fenomeni e saper argomentare la necessità di una visione relativistica</li> <li>• Saper riconoscere il ruolo della relatività in situazioni sperimentali e nelle applicazioni tecnologiche</li> <li>• Essere in grado di comprendere e argomentare testi divulgativi e di critica scientifica che trattino il tema della relatività</li> </ul> |

**4 MODULI/UNITA' DIDATTICHE**  
 A. Induzione elettromagnetica; Equazioni di Maxwell e Onde Elettromagnetiche  
 B. Relatività  
 C. Fisica Quantistica  
 D. Argomenti e approfondimenti di Fisica Moderna

| MODULO/UNITA' DIDATTICA         | PREREQUISITI  | CONTENUTI IRRINUNCIABILI  | ABILITA' RELATIVE AI CONTENUTI   | COMPETENZE SETTORIALI   |
|---------------------------------|---|---|--|---|
| Modulo C.<br>Fisica Quantistica | <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'esperimento di Rutherford e modello atomico</li> <li>• Spettri atomici</li> <li>• Interferenza e diffrazione (onde, ottica)</li> <li>• Scoperta dell'elettrone</li> <li>• Urti classici</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'emissione di corpo nero e l'ipotesi di Planck</li> <li>• L'esperimento di Lenard e la spiegazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico</li> <li>• L'effetto Compton</li> <li>• Modello dell'atomo di Bohr e interpretazione degli spettri atomici</li> <li>• L'esperimento di Franck – Hertz.</li> <li>• Lunghezza d'onda di De Broglie.</li> <li>• Dualismo onda-particella. Limiti di validità della descrizione classica</li> <li>• Diffrazione/Interferenza degli elettroni</li> <li>• Il principio di indeterminazione</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Illustrare</u> il modello del corpo nero interpretandone la curva di emissione in base alla legge di distribuzione di Planck</li> <li>• <u>Applicare</u> le leggi di Stefan-Boltzmann e di Wien, saperne riconoscere la natura fenomenologica</li> <li>• <u>Applicare</u> l'equazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico per la risoluzione di esercizi</li> <li>• <u>Illustrare e applicare</u> la legge dell'effetto Compton</li> <li>• <u>Discutere</u> il dualismo onda-corpuscolo</li> <li>• <u>Calcolare</u> le frequenze emesse per transizione dai livelli dell'atomo di Bohr</li> <li>• <u>Calcolare</u> la lunghezza d'onda di una particella e confrontarla con la lunghezza d'onda di un oggetto macroscopico</li> <li>• <u>Descrivere</u> la condizione di quantizzazione dell'atomo di Bohr usando la relazione di De Broglie</li> <li>• <u>Calcolare</u> l'indeterminazione quantistica sulla posizione/quantità di moto di una particella</li> <li>• <u>Analizzare</u> esperimenti di interferenza e diffrazione di particelle, illustrando anche formalmente come essi possano essere interpretati a partire dalla relazione di De Broglie sulla base del principio di sovrapposizione</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Saper mostrare, facendo riferimento a esperimenti specifici, i limiti del paradigma classico di spiegazione e interpretazione dei fenomeni e saper argomentare la necessità di una visione quantistica</li> <li>• Saper riconoscere il ruolo della fisica quantistica in situazioni reali e in applicazioni tecnologiche</li> <li>• Essere in grado di comprendere e argomentare testi divulgativi e di critica scientifica che trattino il tema della fisica quantistica</li> </ul> |

FISICA «MODERNA»

Una didattica della fisica moderna richiede una didattica *moderna* della fisica ... ad esempio:

per *QUANTO* ... 90 anni (di progressi teorici interpretativi e di risultati sperimentali) siano passati invano ...

- «Dualismo onda - corpuscolo»

«Si sente dire spesso ... che la teoria dei quanti è insoddisfacente perché ... ci obbliga ad interpretare il reale in modo dualistico. **Ma chiunque abbia capito davvero la teoria dei quanti non si sognerà mai di definirla dualista: si tratta invece di una descrizione unificata dei fenomeni atomici ...»**

N. Bohr (cit. W. Heisenberg, *Fisica e oltre*)

- Il c.d. «Principio di Indeterminazione»

[ ... ] still now, 80 years after its inception, **there is no general consensus** over the scope and validity of this principle.

P. Busch, T. Heinonen, P. Lahti, *Heisenberg's uncertainty principle*,  
Physics Reports 452 (2007) 155-176

What uncertainty exactly means in physics is not so easy to clarify. [... ]  
This ambiguity already features in Heisenberg's original uncertainty paper from 1927.

R. F. Werner, *Uncertainty from Heisenberg to Today*,  
Foundations of Physics, June 2019, 49-6, pp. 460–491

Ogni cosa è indeterminata, pure l'indeterminazione!

Sigfrido Boffi

**IL PRINCIPIO  
di  
INDETERMINAZIONE**

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq \frac{h}{4\pi}$$

QUADERNI DI FISICA TEORICA



Università degli Studi di Pavia  
Dipartimento di Fisica Nucleare e Teorica

INDICE

|   |    |
|---|----|
| Premessa .....  | 7  |
| §1. Introduzione .....  | 9  |
| §2. Werner Heisenberg .....   | 12 |
| – Lo sviluppo della meccanica quantistica .....   | 21 |
| §3. Alcune note tecniche .....  | 39 |
| – Il contenuto intuitivo della cinematica e della meccanica nella<br>teoria quantistica ..... | 45 |
| §4. Alcune osservazioni e commenti .....  | 75 |

<http://www2.pv.infn.it/~boffi/quaderni.html>

**W. Heisenberg,**  
*Über den anschaulichen Inhalt der  
quantentheoretischen Kinematik und Mechanik,*  
**Zeitschr. Phys. 43 (1927) 172-198**

## L'esperimento ideale del microscopio a raggi gamma

Per illustrare il principio d'indeterminazione, Heisenberg ricorse a un esperimento ideale. Usando un microscopio di elevata risoluzione, che per l'illuminazione sfruttava i raggi gamma, egli tentò di dimostrare che la posizione e la quantità di moto dell'elettrone obbedivano al principio d'indeterminazione. Benché Heisenberg avesse ricavato il risultato corretto, Bohr osservò che nell'esperimento originale erano stati trascurati due punti essenziali: il potere di risoluzione del microscopio e il dualismo onda-particella. Nella versione corretta, un elettrone libero è situato direttamente sotto l'obiettivo del microscopio. L'elettrone vede la lente circolare sotto un cono di apertura  $2\Theta$ . L'elettrone viene poi illuminato da un raggio gamma proveniente da sinistra. Secondo i principi dell'ottica ondulatoria il microscopio può risolvere oggetti fino a una grandezza  $\Delta x$ , che è legata a  $\Theta$  e alla lunghezza d'onda  $\lambda$  dalla formula:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \Theta}$$

Nell'istante in cui la luce viene diffratta nell'obiettivo del microscopio, l'elettrone si sposta a destra. Dopo l'urto, il raggio gamma osservato potrebbe essere diffuso secondo qualsiasi angolo entro il cono  $2\Theta$ . Nel caso estremo di diffusione verso il bordo anteriore (destra) della lente, la componente della quantità di moto nella direzione  $x$  sarebbe

$$p'_x + \frac{h}{\lambda'} \sin \Theta,$$

dove  $p'_x$  è la componente secondo  $x$  della quantità di moto dell'elettrone,  $\lambda'$  è la lunghezza d'onda del

raggio gamma deviato,  $h$  è la costante di Planck (che lega la frequenza del fotone alla sua energia) e  $h/\lambda'$  è la quantità di moto totale del fotone del raggio gamma. Nell'altro caso limite, il raggio gamma diffonde all'indietro, colpendo il bordo sinistro della lente. In questo caso la componente secondo  $x$  della quantità di moto totale è

$$p''_x - \frac{h}{\lambda''} \sin \Theta.$$

In entrambi i casi la componente secondo  $x$  della quantità di moto finale dev'essere uguale alla stessa componente della quantità di moto iniziale.

Quindi:

$$p'_x + \frac{h}{\lambda'} \sin \Theta = p''_x - \frac{h}{\lambda''} \sin \Theta.$$

Se l'angolo  $\Theta$  è piccolo, allora  $\lambda' \sim \lambda'' \sim \lambda$ :

$$p''_x - p'_x = \Delta p_x \sim \frac{2h}{\lambda} \sin \Theta.$$

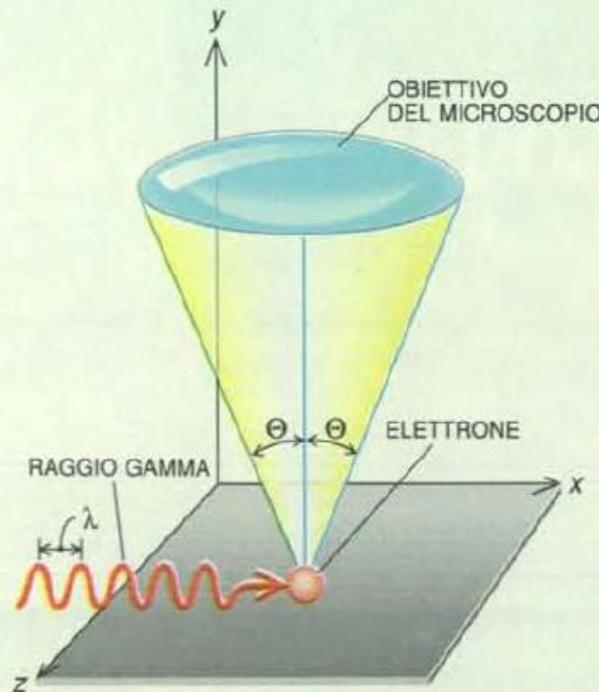
Poiché  $\Delta x = \lambda/2 \sin \Theta$ , vi è una relazione di reciprocità tra le indeterminazioni minime delle posizioni dell'elettrone lungo l'asse  $x$  e delle componenti della sua quantità di moto lungo lo stesso asse:

$$\Delta p_x \sim \frac{h}{\Delta x}.$$

Se l'incertezza è maggiore di questo minimo, si ricava la disuguaglianza

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq h$$

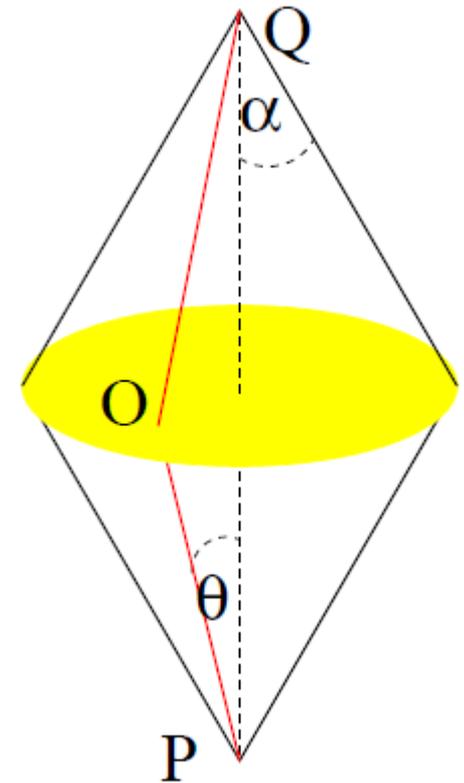
che approssima la relazione d'indeterminazione di Heisenberg.



## “Principio” di indeterminazione

- Una particella in  $P$  scattera un quanto di luce  $h\nu$  che segue il percorso POQ per arrivare in un punto del piano immagine della lente
- Natura ondulatoria della luce: La posizione della particella è nota con un'indeterminazione  $\Delta x = \lambda / \sin \alpha$  pari al potere risolutivo della lente di apertura  $\alpha$ .
- Natura corpuscolare della luce: il quanto di momento  $h\nu/c$  modifica il momento della particella di  $h\nu \sin \theta / c$ .
- Indivisibilità del quanto: Il momento non può essere ridotto al di sotto di tale valore con un angolo di scattering imprevedibile  $\theta < \alpha$  (apertura della lente).
- Pertanto il momento è indeterminato della quantità  $\Delta p = h\nu \sin \alpha / c$ , ovvero si ha

$$\Delta p \Delta x \geq h\nu \frac{\sin \alpha}{c} \frac{\lambda}{\sin \alpha} = \hbar .$$

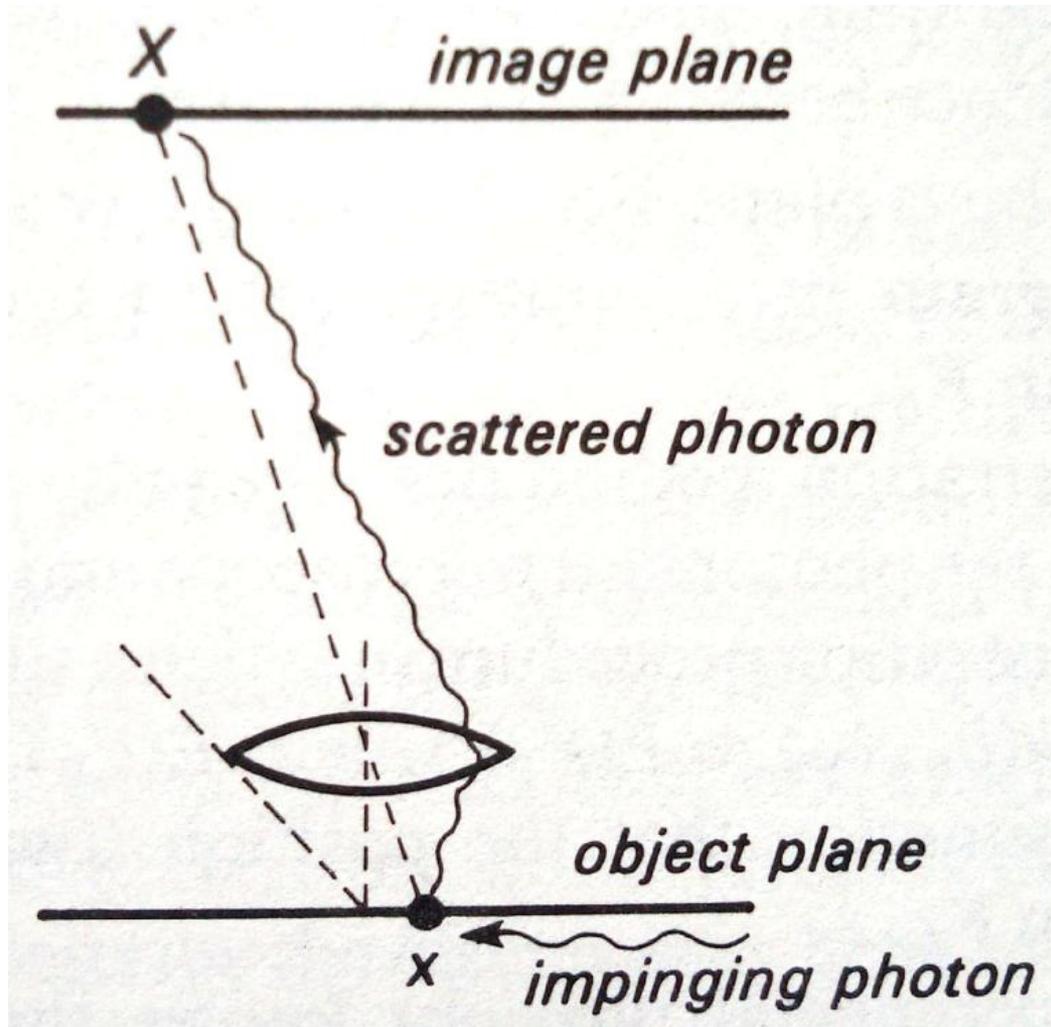


- Il fotone viene descritto  
sia come onda con una lunghezza d'onda  $\lambda$   
sia come corpuscolo con momento  $p_1 = h/\lambda$ .
- Se identifichiamo il potere risolutivo  $q_1$  del microscopio con la lunghezza d'onda  $\lambda$  e la variazione del momento dell'elettrone con il momento trasferito nello scattering Compton, otteniamo la relazione

$$q_1 p_1 \sim h$$

W. H. identifica l'accuratezza della misura di posizione con la dispersione dell'osservabile posizione nello stato quantistico dopo la misurazione. Questo è in generale falso.

# MISURA di POSIZIONE

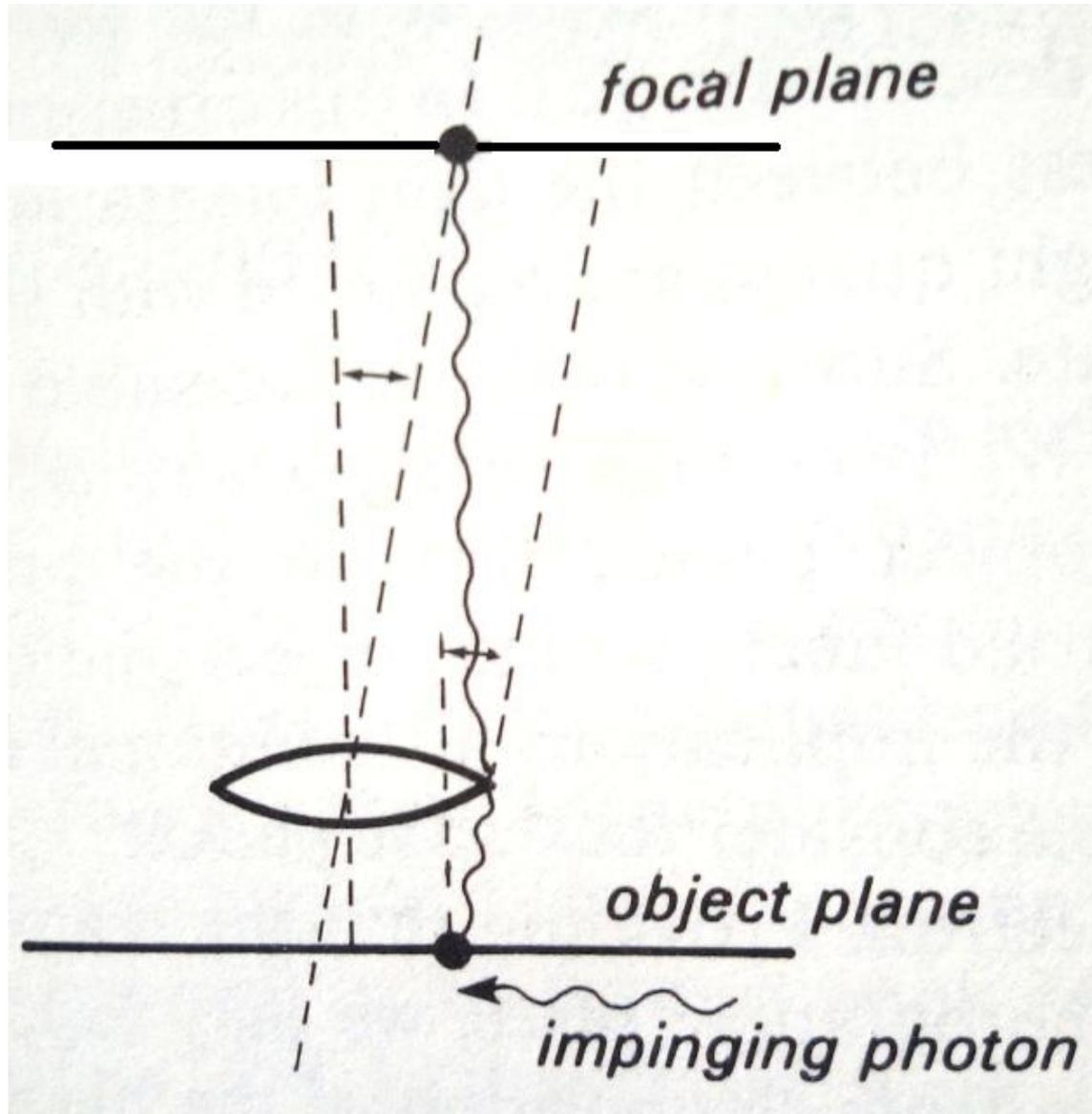


## “Principio” di indeterminazione

Nell'istante della determinazione della posizione, perciò nell'istante in cui il quanto di luce viene deviato dall'elettrone, l'elettrone ne modifica l'impulso in moto discontinuo. Questa variazione è tanto più grande quanto minore è la lunghezza d'onda della luce utilizzata, cioè quanto più precisa è la determinazione della posizione. Nel momento in cui la posizione dell'elettrone diventa nota, il suo impulso può essere contemporaneamente noto solo nella misura corrispondente a quella variazione discontinua; perciò, più precisamente viene determinata la posizione, tanto più imprecisa è la conoscenza dell'impulso e viceversa; di qui scorgiamo una spiegazione intuitiva diretta della relazione  $pq - qp = h/2\pi i$ .

W. Heisenberg, *Zeitschrift für Physik*, 43 (1927) 172–198  
(trad.: S. Boffi, *IL PRINCIPIO di INDETERMINAZIONE*,  
QUADERNI DI FISICA TEORICA, Università degli Studi di Pavia)

## MISURA di IMPULSO



Following Heisenberg's ground-breaking paper from 1927 uncertainty relations have become an indispensable tool of quantum mechanics. Often they are used in a qualitative heuristic way rather than in the form of proven inequalities. The paradigm of the latter kind is the Kennard-Robertson-Weyl inequality, which is proved in virtually every quantum mechanics course. This relation shows that by **turning the uncertainty relations into a theorem**, one also reaches a higher level of conceptual precision.

[ ... ]

There have been several papers in recent years formalizing and proving further instances of quantitative uncertainty.

**This is perhaps part of a trend which has become necessary as more and more experiments approach the uncertainty-limited regime.** Moreover, uncertainty relations play an important role in some proofs of quantum cryptographic security.

[ ... ]

In a fundamentally statistical theory like quantum mechanics the results of individual measurements tell us almost nothing: It is always the probability distribution of outcomes for a fixed experimental arrangement which can properly be called the result of an experiment.

The fact that even for a pure state the probabilities usually take values other than 0 or 1 is not a bug but a feature of quantum mechanics.

Therefore the variance of position in a particular state has nothing to do with an 'error' of measurement. **There is no 'true value' around which the outcomes are scattering, and which the measurement is designed to uncover.** The variance merely provides some partial information about the probability distribution and a careful experimenter will record as much information about this distribution as can be reliably inferred from his finite sample of individual measurements.

Paul Busch, Pekka Lahti, Reinhard F Werner  
*Measurement uncertainty relations*  
Journal of Mathematical Physics 55, 042111 (2014)

## Malintesi diffusi/interpretazioni errate del “principio”

1. L'indeterminazione è dovuta al *disturbo* incontrollabile della misura di una variabile sulla misurazione dell'altra [vedi Messiah].
2. L'indeterminazione riguarda la *misura simultanea* di variabili coniugate [vedi Bohm].

### Malintesi diffusi sul “principio” di indeterminazione di Heisenberg

Congresso SIF 2000, Palermo

Giacomo Mauro D'Ariano

*Dipartimento di Fisica 'Alessandro Volta'*  
via Bassi 6, I-27100 Pavia, Italy

- **Messiah** III. Uncertainty Relation and the Measurement Process. 12. *Uncontrollable Disturbance During the Operation of Measurement.* [...] “The quantum theory, however, assumes that the unpredictable and uncontrollable disturbance suffered by the physical system during a measurement is always sufficiently strong that the uncertainty relations always hold true.”
- **Bohm** If a measurement of position is made with accuracy  $\Delta Q$  and if a measurement of momentum is made *simultaneously* with accuracy  $\Delta P$ , then the product of the two errors can never be smaller than a number of the order of  $\hbar$ .

THE SCIENCES

# Common Interpretation of Heisenberg's Uncertainty Principle Is Proved False

A new experiment shows that measuring a quantum system does not necessarily introduce uncertainty

By Geoff Brumfiel on September 11, 2012  38

Erhart, J. et al. *Nature Phys.* 8, 185–189 (2012)

Earlier this year, Yuji Hasegawa, a physicist at the Vienna University of Technology in Austria, measured groups of neutron spins and derived results well below what would be predicted if measurements were inserting all the uncertainty into the system.

Rozema, L. A. et al. *Phys. Rev. Lett.* 109, 100404 (2012)

Aephraim Steinberg of the University of Toronto in Canada and his team have performed measurements on photons (particles of light) and showed that the act of measuring can introduce less uncertainty than is required by Heisenberg's principle.

## **Quantum uncertainty not all in the measurement**

A common interpretation of Heisenberg's uncertainty principle is proven false.  
**Nature News** 11 September 2012

### **Erhart, J. et al. Nature Phys. 8, 185–189 (2012)**

Earlier this year, Yuji Hasegawa, a physicist at the Vienna University of Technology in Austria, measured groups of neutron spins and derived results well below what would be predicted if measurements were inserting all the uncertainty into the system.

### **Rozema, L. A. et al. Phys. Rev. Lett. 109, 100404 (2012)**

Aephraim Steinberg of the University of Toronto in Canada and his team have performed measurements on photons (particles of light) and showed that the act of measuring can introduce less uncertainty than is required by Heisenberg's principle.

HOME

SCIENCE NEWS

# Interpretation of Heisenberg's Principle is Proven False

**TOPICS:** [Heisenberg Principle](#) [Quantum Mechanics](#) [Quantum Physics](#) [Quantum Uncertainty](#)

SEPTEMBER 12, 2012

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

- **Il c.d. «Principio di Indeterminazione» ... 90 anni passati invano ...**

«Heisenberg's uncertainty principle, as it was conceived in his classic work of 1927 [1], may be understood as comprising three distinct statements concerning pairs of canonically conjugate quantities such as the position and momentum observables of a quantum particle.

**Preparation Uncertainty:** position and momentum distributions cannot both be arbitrarily sharply concentrated in the same state.

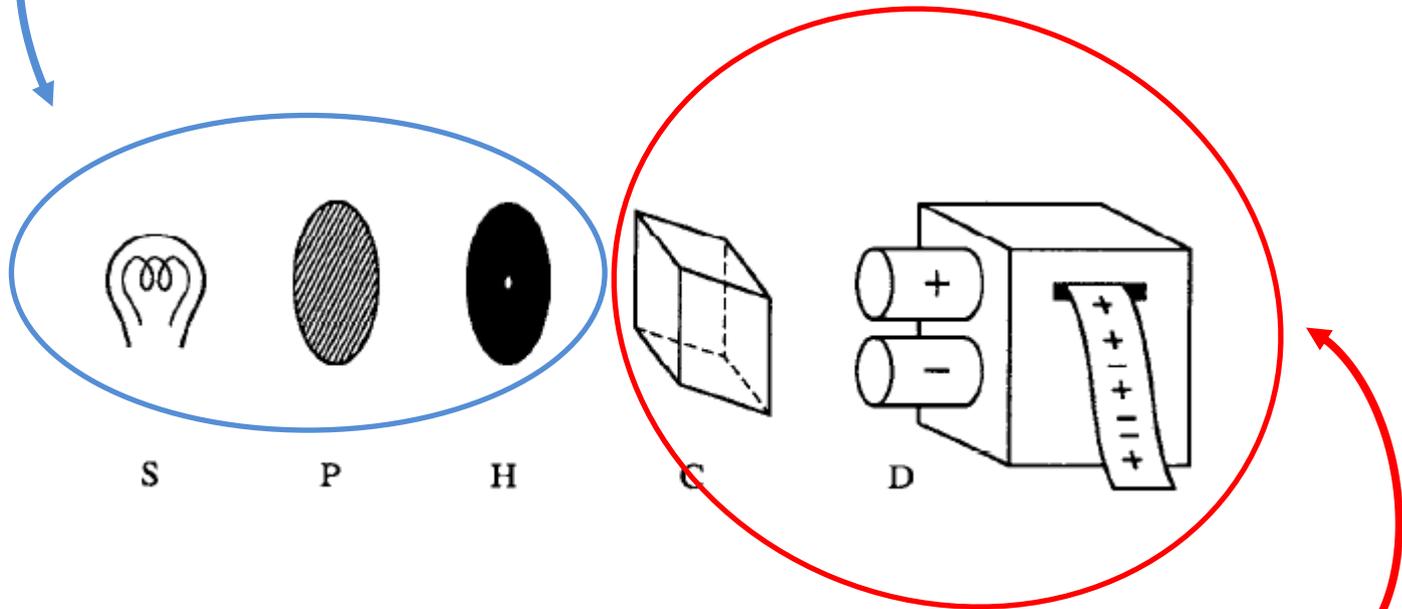
**Measurement Uncertainty:** the errors in any joint measurement of position and momentum cannot both be arbitrarily small.

**Error-Disturbance Relation:** the error in any position (momentum) measurement and the disturbance of momentum (position) caused by this measurement cannot both be arbitrarily small.»

Paul Busch, *Quantum rms error and Heisenberg's error-disturbance relation*

EPJ Web of Conferences 78, 01002 (2014)  
<https://doi.org/10.1051/epjconf/20147801002>

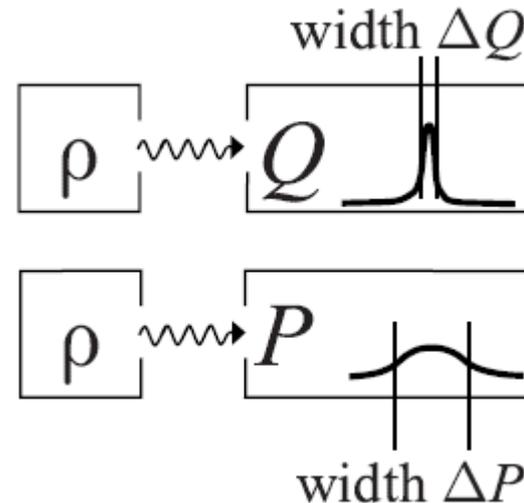
## PROCEDURA DI PREPARAZIONE



## PROCEDURA DI REGISTRAZIONE (MISURAZIONE)

- What is a quantum system?
- In a strict sense, quantum theory is a set of rules allowing the computation of **probabilities** for the outcomes of tests which follow specified preparations.
- Quantum physics, on the other hand, is incompatible with the proposition that measurements discover some unknown but preexisting reality.
- A **state** is characterized by the probabilities of the various outcomes of every conceivable test.
- To actually *measure* a probability, the best we can do is to repeat the same experiment a large (but finite) number of times.

## Preparation Uncertainty

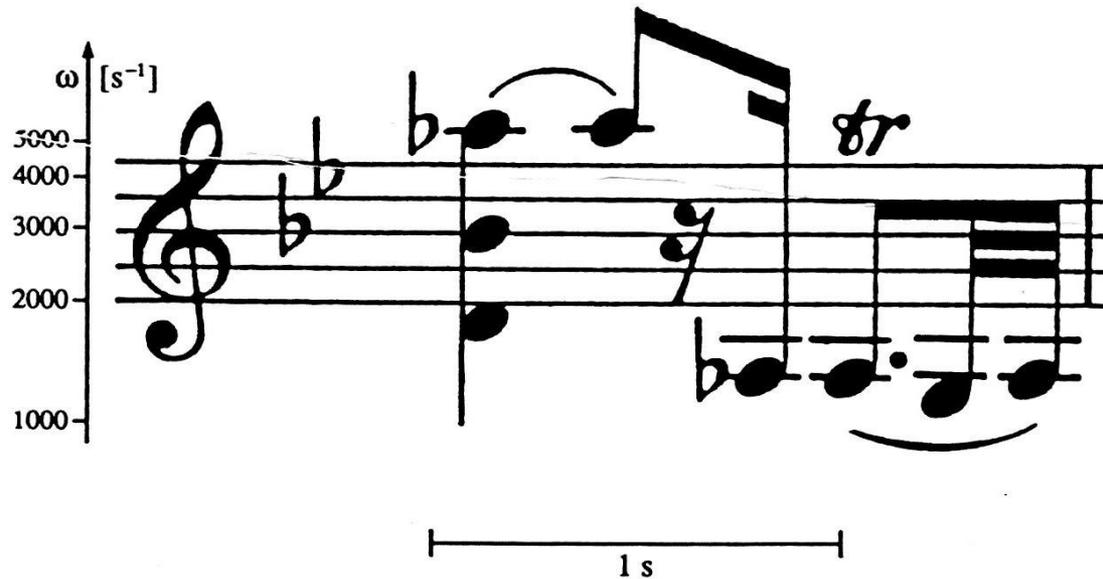


$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$$

La sola interpretazione sensata di queste disuguaglianze è la seguente.

Se la stessa procedura di preparazione è ripetuta molte volte e poi seguita o da una misurazione di  $x$  o da una misurazione di  $p$ , i vari risultati ottenuti per  $x$  o per  $p$  hanno deviazioni standard,  $\Delta x$  e  $\Delta p$ , il cui prodotto non può essere minore di  $h/4\pi$ . Tutto ciò non ha niente a che vedere con un “disturbo” che la misura di  $x$  provocherebbe per il valore di  $p$  e viceversa, come spesso si afferma. Queste procedure di misurazione sono incompatibili (ossia non esiste nessuna procedura di registrazione che possa effettuare entrambe le due misure simultaneamente) ma sono eseguite su differenti particelle (tutte identicamente preparate) della stessa collezione e perciò non possono disturbarsi reciprocamente in nessun modo. Le relazioni di incertezza esprimono soltanto l'intrinseca casualità dei risultati di misurazioni quantistiche.

Peres, A. *Quantum Theory: Concepts and Methods*, Kluwer Academic Pub. (1995, p. 93.



Musical notation as shown above contains information on time and on frequency. These are complementary parameters, which satisfy the «uncertainty relation»  $\Delta t \Delta \omega \geq \frac{1}{2}$  (this inequality is a general property of Fourier transforms). Show that this limitation does not cause any serious difficulty in playing music, because the uncertainty area is quite small on the scale of the above figure. Yet, if you try to play very low notes, for example with a double bass, it is difficult to make these notes very brief. Because of the way music is written, the time scale in this figure is not linear, and the frequency scale is only approximately logarithmic. One quaver (eighth note) is about 0,22 s. The figure is from a work of Mozart\*.

\* W. A. Mozart, *Duet for violin and viola in B flat major* (K. 429).

A. Peres, *Quantum Theory: Concepts and Methods*, Kluwer Academic Pub. (1995), p. 214

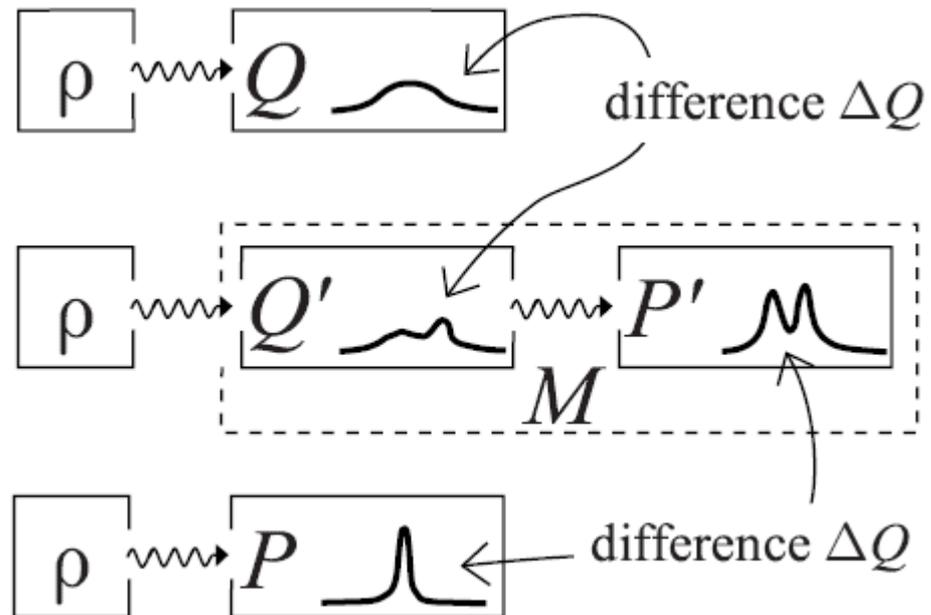
It was already known to Kennard that his new relations did not cover the categories of precision and disturbance. He remarks explicitly that a definition of ‘measurement error’ as a deviation of the measurement value from the true value does not work in quantum mechanics because the true value does not exist ‘in a physical sense’. He recommends a comparison of the probability distributions.

R. F. Werner, *Uncertainty from Heisenberg to Today*,  
Foundations of Physics, June 2019, **49**-6, pp. 460–491

In a fundamentally statistical theory like quantum mechanics the results of individual measurements tell us almost nothing: It is always the probability distribution of outcomes for a fixed experimental arrangement which can properly be called the result of an experiment. The fact that even for a pure state the probabilities usually take values other than 0 or 1 is not a bug but a feature of quantum mechanics. Therefore the variance of position in a particular state has nothing to do with an ‘error’ of measurement. **There is no ‘true value’ around which the outcomes are scattering, and which the measurement is designed to uncover.** The variance merely provides some partial information about the probability distribution and a careful experimenter will record as much information about this distribution as can be reliably inferred from his finite sample of individual measurements.

P. Busch, P. Lahti, R. F. Werner, *Measurement uncertainty relations*  
Journal of Mathematical Physics **55**, 042111 (2014)

## Error-Disturbance Relation



The quantum system is first subject to an **approximate position measurement  $Q'$** . This is not an **ideal measurement  $Q$** , since the  $\gamma$ -rays have non-zero wavelength. So  $\Delta Q$  is some measure of the difference between  $Q$  and  $Q'$ . The next step is a measurement of momentum. Due to the previous perturbation of the system, we cannot hope to recover precisely the momentum of the initial particle. So if  $P'$  is the momentum measurement (including the prior perturbation) we will see a difference  $\Delta P$  to an ideal momentum measurement  $P$ .

The claim of the Measurement Uncertainty Relations is that  $\Delta Q \cdot \Delta P \geq C \cdot h/2\pi$  for some constant  $C$ .

# Trade off



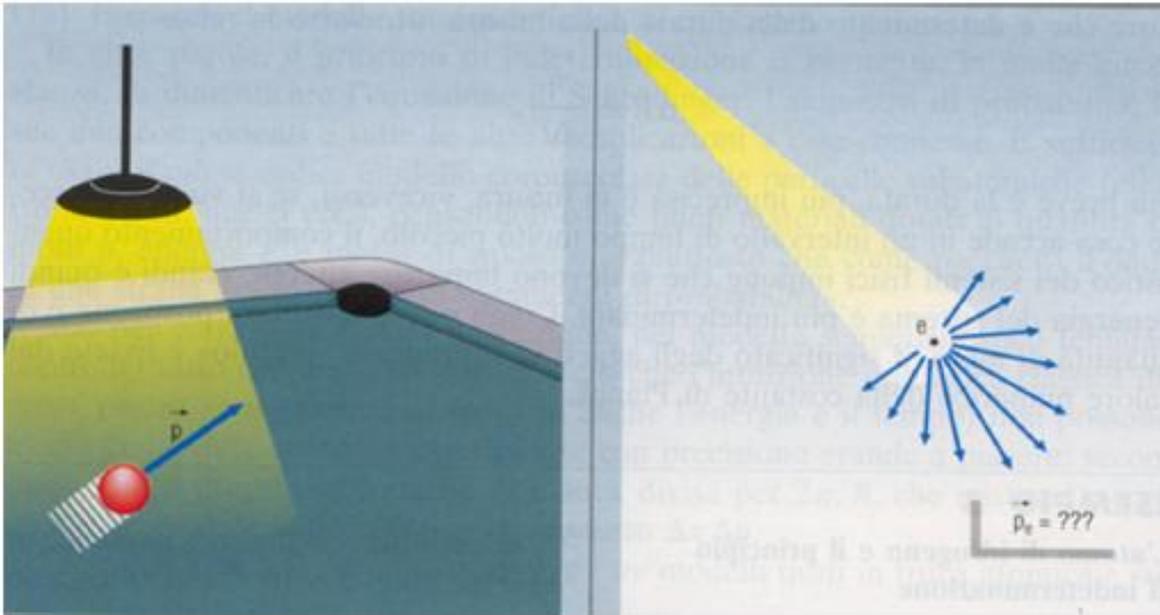
[ ... ] Teachers succumb to the persistent bad habit of proving the relations as an inequality on variances for arbitrary state preparations, **but then to go on to explain their ‘physical meaning’ in terms of a perturbation** of the momentum of a particle caused by an approximate position measurement. Since the usual proof contains nothing of that sort, attentive students quickly get the impression that quantum uncertainty rubs off on [contagiare ...] their teachers as some kind of conceptual fuzziness.

R. F. Werner, *The Uncertainty Relation for Joint Measurement of Position and Momentum*,  
Quantum Information & Computation (2018)

A common approach to this distinction is to ignore it, namely first to prove the Kennard relation and then to pretend that this says something about measurement precision and disturbance. One finds this in many textbooks and, in a way, this follows Heisenberg, who did not make this distinction either.

It is, however, pedagogically unfortunate to prove something and then lie about the conclusion. A more honest approach is to at least discuss an example of disturbance.

R. F. Werner, *Uncertainty from Heisenberg to Today*,

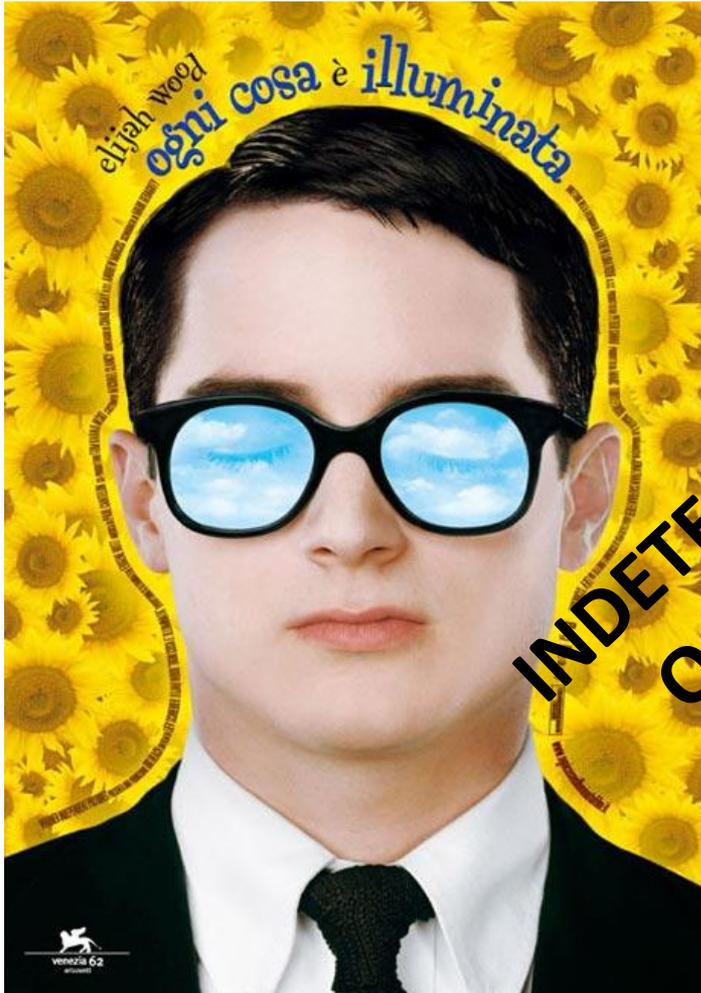


U. Amaldi, Corso di Fisica, 5a ed. (Zanichelli, Bologna, (2003), Vol. 3.

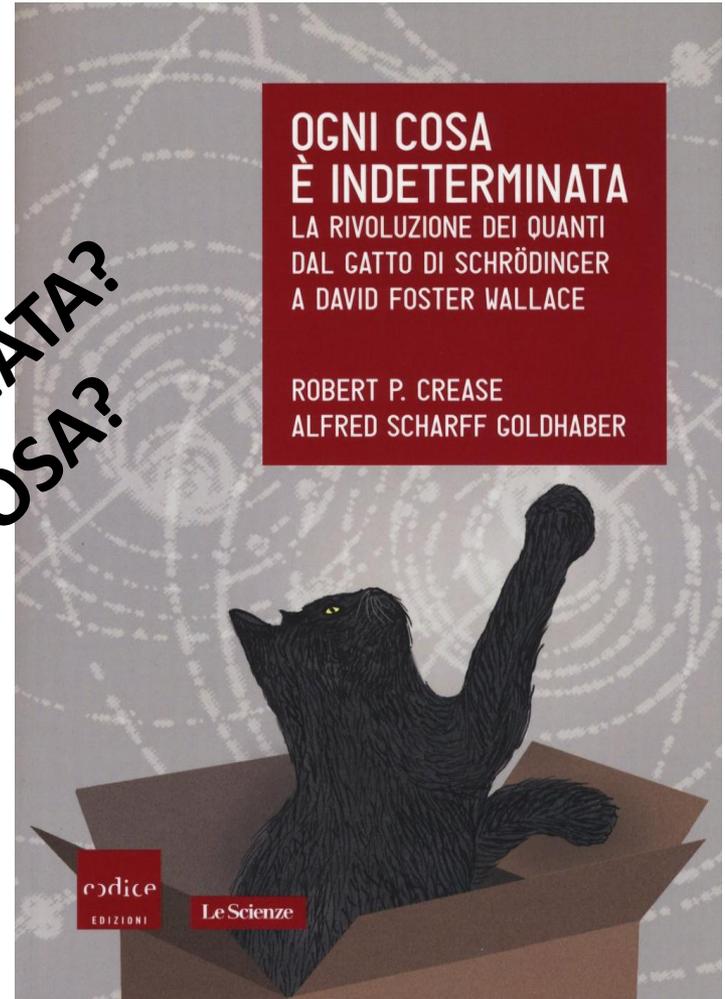
## Libri di testo

Compito a casa

Trovare un libro di testo che esponga il principio senza ricorrere alla “teoria del disturbo”.



INDETERMINATA?  
OGNI COSA?



# THE BORDER TERRITORY

QUANTUM DOMAIN

CLASSICAL DOMAIN

PHOTONS  
ELECTRONS  
ATOMS

SUN  
PLANETS  
○  
○  
US  
○  
○  
○

GRAVITY WAVE DETECTOR

QUANTUM FLUIDS

QUANTUM BILL OF RIGHTS  
INTERFERE IF YOU CAN!!!  
SCHRÖDINGER'S EQUATION

CLASSICAL LAW AND ORDER  
DO NOT INTERFERE!!!  
NEWTON'S EQUATIONS  
SECOND LAW OF THERMODYNAMICS

1

SIZE (# OF ATOMS)

$10^{23}$

«[ ... ] Questo è un esempio del ‘principio d’indeterminazione’: c’è una specie di complementarità fra la conoscenza del punto preciso in cui la luce attraversa il foro e quella della direzione in cui esce: è impossibile conoscerle esattamente entrambe. Inquadriamo il principio di indeterminazione nel suo contesto storico: nel periodo in cui si stavano affermando le idee rivoluzionarie della meccanica quantistica, si cercava ancora di interpretarle sulla base dei vecchi concetti, quale quello della propagazione rettilinea della luce. Ma, arrivati a un certo punto, i vecchi concetti cessavano di funzionare, per cui fu sviluppato un avvertimento che in sostanza diceva: ‘I vecchi concetti non servono più quando ...’. Ma se si buttano via tutti i concetti vecchi e si usano le idee esposte in queste lezioni, sommando le *freccie* per tutti i modi in cui un evento può accadere, **non c’è necessità alcuna di un principio di indeterminazione!**».

Richard P. Feynman, *QED*, Ed. Adelphi (1985), p. 77, nota



«In conclusione, **tutto quello che si può ottenere dalla relazione d’indeterminazione si può ottenere più chiaramente per altre vie**. Quanto al suo valore epistemologico, sembra meglio non esagerarlo: il punto centrale della meccanica quantistica non sta tanto lì, quanto nel ‘calcolo delle ampiezze’».

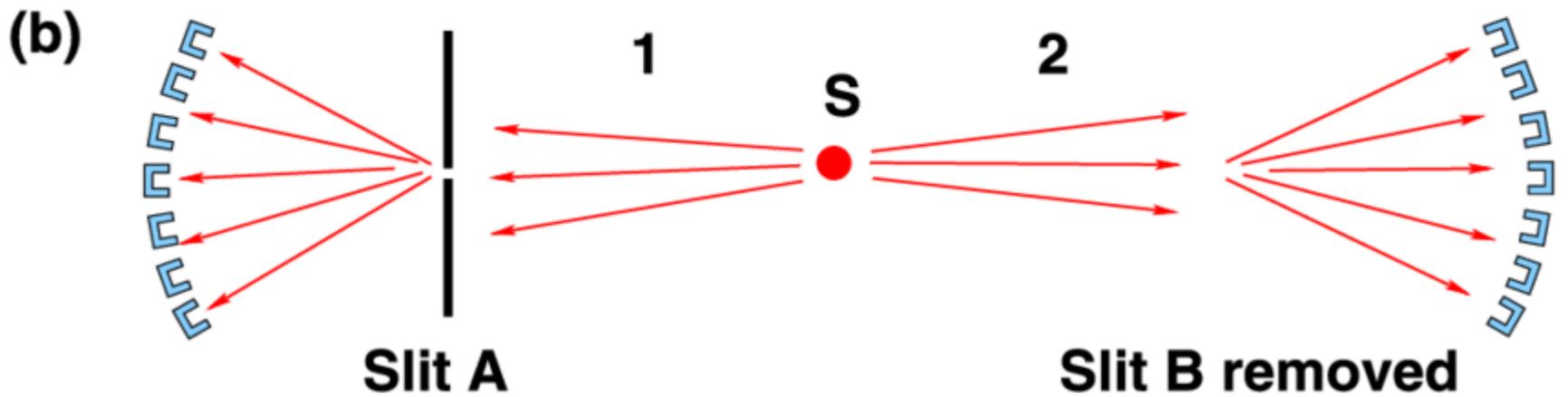
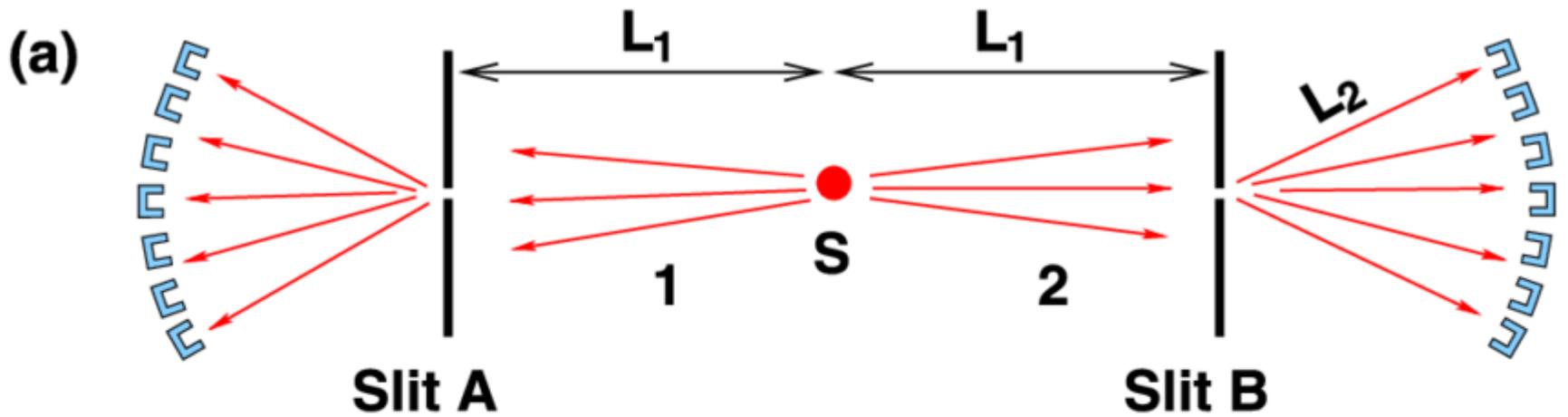
E. Fabri, *Come introdurre la fisica quantistica nella scuola s. s.*, aprile 1994

NO DISTURBANCE? NO INFORMATION GAIN!



[ ... ] it is a fundamental theorem of quantum theory that there is no measurement without perturbation. More precisely, if the output quantum states of a measuring device coincide with the input states for all inputs, then the measured values are statistically independent of the input, i.e., no information is gained from the 'measurement'. But this statement captures none of the quantitative content of Heisenberg's discussion.

R. F. Werner, *The Uncertainty Relation for Joint Measurement of Position and Momentum*,  
Quantum Information & Computation (2018)

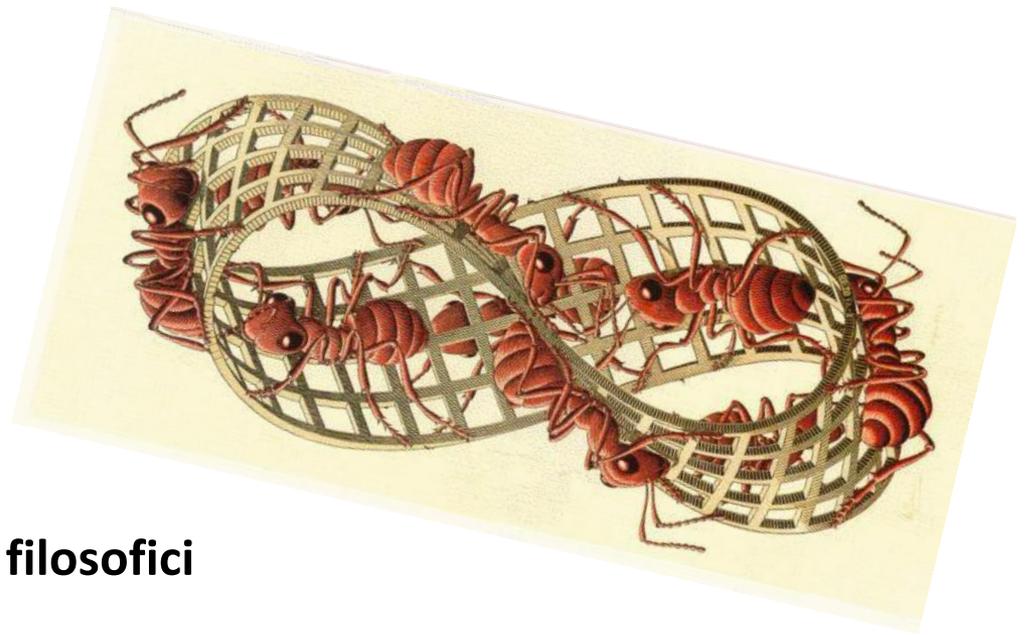


«L'effetto immediato [ del principio d'indeterminazione ] sarà di aprire le cateratte di una vera e propria inondazione di arbitrio e dissolutezza intellettuale [ ...].

[ Vi troveremo ] la sostanza dell'anima, il principio dei processi vitali, l'agente delle comunicazioni telepatiche. Alcuni troveranno nello scacco alla legge fisica delle cause e degli effetti la soluzione al vecchio problema del libero arbitrio, mentre, all'inverso, gli atei vi vedranno la giustificazione di una loro concezione del mondo retto dal caso.»

P. W. Bridgman, *The New Visions of Science*, Harper's Magazine 158 (1929)

**Popinga**  
**Scienza e letteratura:**  
*terribilis est*  
*locus iste*



**Trasgredire le frontiere:**  
**note matematiche per tromboni filosofici**

La matematica e la fisica moderne venivano ora viste come uno strumento ulteriore a disposizioni delle discipline dell'uomo. Fu, soprattutto in Francia, un'epoca di grande fervore intellettuale e di scoperte, di entusiasmi improvvisi, in cui si coniugavano liberamente la topologia con la psicanalisi, il Tao con la fisica quantistica, le geometrie non euclidee e quelle pluridimensionali, spesso confuse tra loro, con il femminismo, il trotskismo o il teatro d'avanguardia.

Tra i concetti matematici preferiti di questa ubriacatura intellettuale c'erano quelli che, allo sguardo poco esperto degli umanisti, mettevano in discussione la linearità della conoscenza. Nacque una vera e propria infatuazione per oggetti come il nastro di Möbius, la bottiglia di Klein, il *cross-cap* (berretto incrociato), per teoremi come quello d'incompletezza di Gödel, e, in campo fisico, per la meccanica quantistica, in particolare per l'indeterminazione di Heisenberg. Si trattava di figure e concetti bizzarri, di cui si coglieva non il valore reale, espresso in linguaggio formale e non equivoco, ma quello estetico e metaforico, in cui la matematica e la fisica diventavano oggetto di gioco narrativo.



**FINE  
GRAZIE  
DELL'ATTENZIONE**



**Bohr used to say that if you aren't confused by quantum physics, then you haven't really understood it.**

**J. A. Wheeler**