

L'INCERTEZZA IN MECCANICA QUANTISTICA

Giovanni Chesi

QUIT - quantum information
theory group

Università degli Studi di Parma

25 Novembre 2025



L'incertezza in fisica

Tre forme di incertezza

In seguito allo sviluppo della meccanica quantistica, possiamo distinguere (almeno) tre forme di incertezza nelle teorie fisiche:

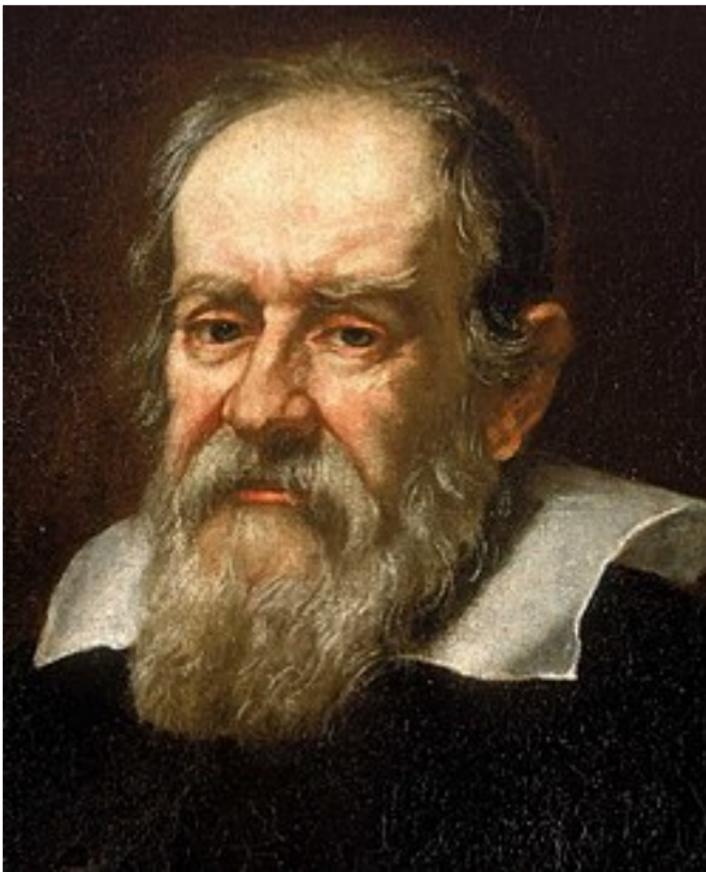
- Incertezza epistemologica
- Incertezza ontologica
- Incertezza metafisica



Incertezza Epistemologica



Ascoltiamo Galileo



Il grande libro

«La filosofia è scritta in questo *grandissimo libro* che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico *l'universo*), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua e conoscere i caratteri ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.»

Galileo Galilei, *Il Saggiatore*



Il grande libro

Galileo introduce qui tre punti essenziali e fondativi di quello che si cristallizzerà come *metodo scientifico*.

1) Rapporto soggetto-oggetto

L'universo è oggettato come un ente esterno, disponibile alla *lettura* di un soggetto osservatore.

2) Esattezza

Il conoscibile è ciò che viene estratto - *esatto*, riscosso - dall'ente esterno "universo".

3) Lingua matematica

L'esattezza è possibile perché la chiave di accesso al libro-universo è la *rappresentazione matematica*.



Il grande libro

Questo paradigma è permeato da due assunzioni che si trasferiranno immutate nel grande programma della meccanica Newtoniana.

Assunzione A. Individuazione e determinabilità

Ogni sistema fisico è dotato di proprietà *intrinseche* (sono scritte nel libro) e *ben definite* (rapporti geometrici).

Assunzione B. Measurement without disturbance

La lettura del libro non ne altera il contenuto, basta saperlo leggere: è sempre possibile, in linea di principio, compiere una misura su un sistema fisico senza influenzarne l'esito. La conoscenza *oggettiva* (indipendente dal soggetto osservatore) delle proprietà di un sistema fisico è possibile ed è l'obiettivo della pratica scientifica.



Incertezza

Definizione

In questo paradigma, l'*incertezza* è una stima della distanza fra il valore intrinseco e ben definito di una proprietà fisica di un sistema e il valore previsto da un modello formale e/o sperimentalmente misurato.

Possiamo quindi individuare due fonti di incertezza.

1. Adeguatezza del modello matematico e potenza computazionale richiesta
2. Fallibilità della procedura sperimentale.

L'incertezza è epistemologica

L'incertezza si configura nelle *limitate capacità di lettura* dell'osservatore (accessibilità alle condizioni iniziali, limitazioni computazionali, disponibilità di adeguati strumenti matematici, errori casuali e sistematici nella misura...), il quale è un *accidente* alla conoscibilità dell'universo. Tuttavia, in linea di principio, errori formali e procedurali possono essere resi trascurabili, se non eliminabili.

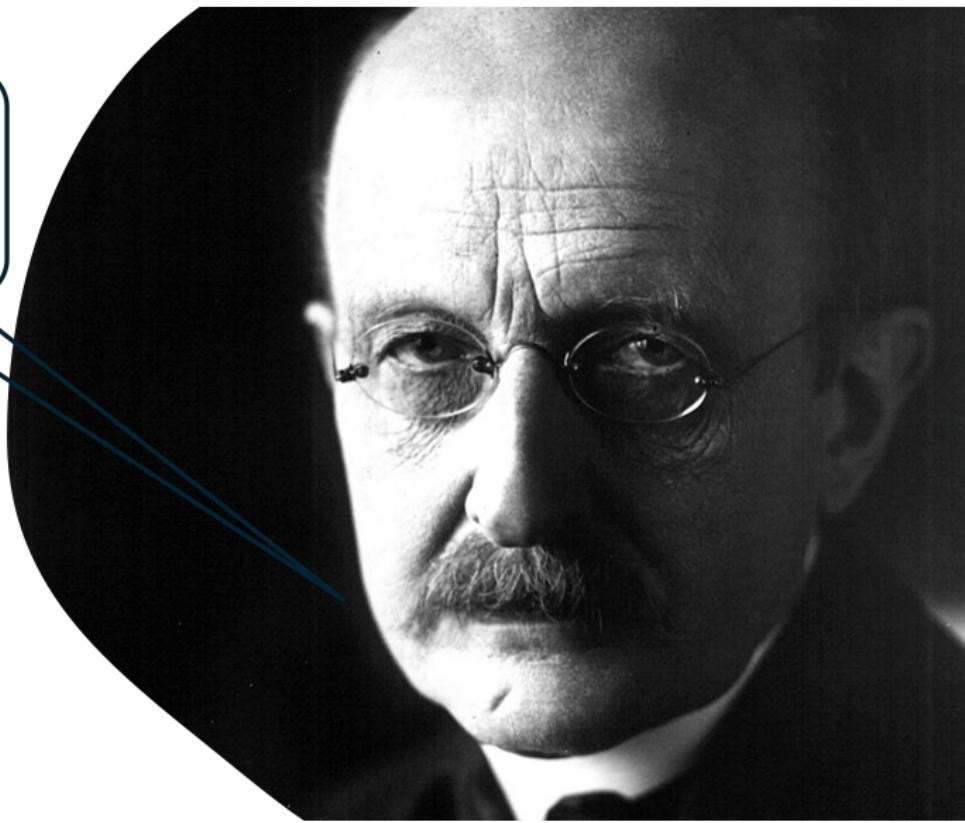


Incertezza Ontologica



L'ipotesi dei *quanta*

$$E = h\nu$$



L'ipotesi dei *quanta*

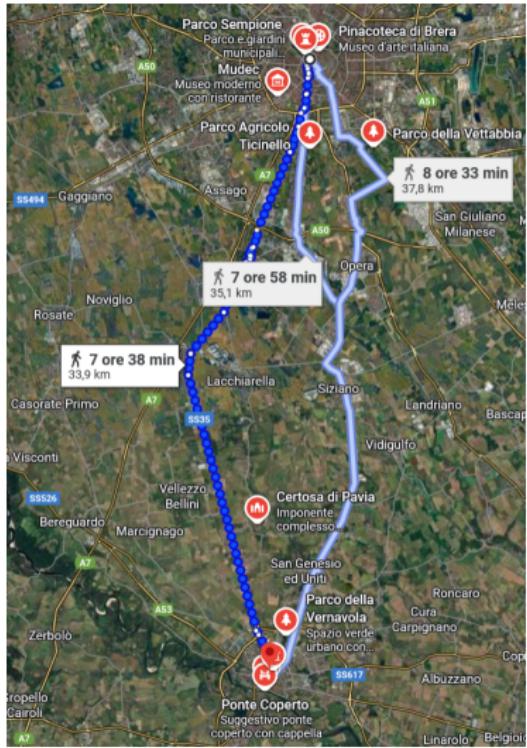
«L'idea che l'energia potesse essere emessa o assorbita soltanto in quanta separati di energia era così nuova che non poté inserirsi nella struttura tradizionale della fisica.»

Werner Heisenberg, *Fisica e Filosofia*



Continuo e Discreto

In un viaggio Milano-Pavia



Garbagnate Milanese

Bollate Centro

Milano Bovisa Politecnico M13-169

Milano Bovisa Politecnico 166-167-168-169-MXP-S2-S3

Milano Lancetti

Milano Porta Garibaldi Passante

Milano Repubblica

Milano Porta Venezia

Milano Dateo

Milano Porta Vittoria

Milano Rogoredo

Locate Triulzi

Pieve Emanuele

Villamaggiore

Certosa di Pavia

Pavia_26-141-150-154-156



Le ferrovie della fisica

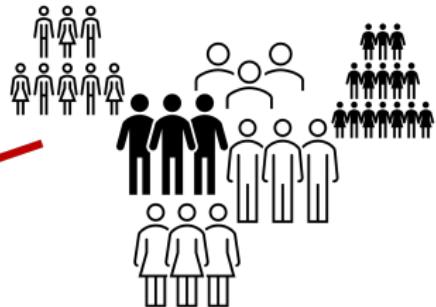


Le ferrovie della fisica



Le ferrovie della fisica

Dove si trova il treno
sulla linea S13?



Le ferrovie della fisica

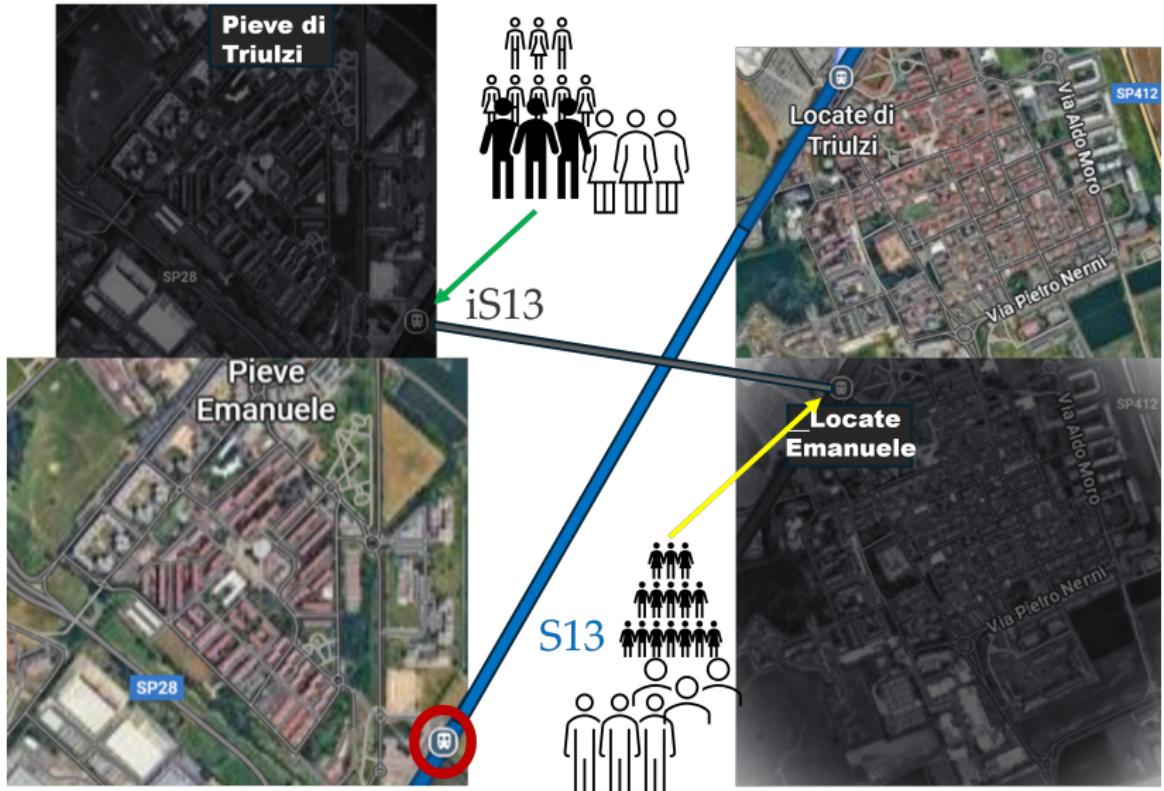


iS13

S13



Le ferrovie della fisica



Preparation Uncertainty

Incompatibilità

In meccanica quantistica, si hanno grandezze fisiche che si sviluppano su stati *in sovrapposizione* fra loro: gli stati dell'una sono combinazioni lineari normalizzate degli stati dell'altra. Tali grandezze fisiche sono dette *incompatibili* fra loro.

Incertezza di preparazione (preparation uncertainty)

Se un sistema fisico si trova (*viene preparato*) in uno stato di una grandezza X, lo stato relativo alla grandezza Y incompatibile rispetto ad X è intrinsecamente *indeterminato*. Ovvero, *prima ancora di aver misurato*, il solo fatto di aver preparato il sistema in uno stato di X implica che, secondo una certa distribuzione di *probabilità*, esso possa trovarsi in *qualsiasi* stato di Y.



Preparation Uncertainty

Cade l'assunzione A della fisica galileiana.

Assunzione A. Individuazione e determinabilità

Ogni sistema fisico è dotato di proprietà *intrinseche* (sono scritte nel libro) e *ben definite* (rapporti geometrici).

Indeterminazione intrinseca

I sistemi fisici possono presentare proprietà *intrinsecamente indeterminate*, e dunque non determinabili a priori (prevedibili) con precisione arbitraria.



Measurement Uncertainty

Misura

Giacché il sistema è indeterminato a priori rispetto a Y, effettuare una misura specifica per quella grandezza fisica (*misura proiettiva*) non può produrre un risultato univoco: ogni volta che preparo e poi misuro lo stato posso ottenere come outcome un qualsiasi valore di B, secondo una certa distribuzione di probabilità.

Ma c'è di più.

Incertezza di misura (measurement uncertainty)

La misura proiettiva fissa (*proietta*) lo stato del sistema su quello corrispondente al risultato ottenuto, distruggendo la eventuale sovrapposizione iniziale (*collasso della funzione d'onda*).



Measurement Uncertainty

Cade l'assunzione B della fisica galileiana.

Assunzione B. Measurement without disturbance

La lettura del libro non ne altera il contenuto, basta saperlo leggere: è sempre possibile, in linea di principio, compiere una misura su un sistema fisico senza influenzarne l'esito. La conoscenza *oggettiva* (indipendente dal soggetto osservatore) delle proprietà di un sistema fisico è possibile ed è l'obiettivo della pratica scientifica.

No measurement without disturbance

La misura *altera irreversibilmente* lo stato di un sistema fisico. L'osservatore deve essere considerato parte integrante del fenomeno fisico osservato e non è riducibile ad un accidente esterno.



Incertezza

Indeterminazione intrinseca

I sistemi fisici possono presentare proprietà *intrinsecamente indeterminate*, e dunque non determinabili a priori (prevedibili) con precisione arbitraria.

No measurement without disturbance

La misura *altera irreversibilmente* lo stato di un sistema fisico. L'osservatore deve essere considerato parte integrante del fenomeno fisico osservato e non è riducibile ad un accidente esterno.

L'incertezza è ontologica

L'incertezza è *intrinseca del sistema fisico osservato*, sia per come sono date le sue proprietà (preparazione) sia per l'impatto dell'osservatore (misura).



Relazioni di incertezza

«In principle, there is no shortage of experiments that permit a determination of the "position of the electron" to any desired precision, even. For instance: illuminate the electron and look at it under the microscope. [...] let us build in principle, a Γ -ray microscope and by means of it determine the position as precisely as desired. But in this determination a secondary circumstance becomes essential: the Compton effect. [...] At the instant of the determination of its position - i.e., the instant at which the light quantum is diffracted by the electron - the electron discontinuously changes its impulse. That change will be more pronounced, the smaller the wavelength of the light used, i.e. the more precise the position determination is to be.



Relazioni di incertezza

In the instant at which the electron's position is known, therefore, its impulse can become known only to the order of magnitude corresponding to that discontinuous change. That is, the more precisely the position is determined, the more imprecisely will the impulse be known, and vice-versa. Let q_1 be the precision to which the value of q is known (q_1 is approximately the average error of q) [...] p_1 is the precision to which the value of p can be determined [...] According to the basic equations of the Compton effect, the relation between p_1 and q_1 is then

$$p_1 q_1 \sim h.$$

Werner Heisenberg, *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, Zeitschrift fur Physik **43** (1927)



Relazioni di incertezza

- Heisenberg identifica qui una prima coppia di grandezze incompatibili: la posizione e la quantità di moto.
- Formula la prima *relazione di incertezza*, che permette di mettere in relazione le incertezze sulle due grandezze incompatibili. Questa verrà riformulata poco dopo da Kennard e Weyl usando come quantificatore di incertezza la *varianza*:

$$\text{var}(q)\text{var}(p) \geq \hbar^2/4.$$

- Heisenberg nella sua trattazione non distingue fra incertezza di preparazione e incertezza di misura. Studi successivi hanno mostrato che relazioni di incertezza di questo tipo esprimono l'incertezza di preparazione.



Incompatibility and Disturbance



APS Physical Review Journals All Journals Physics Magazine Search

Physical Review A

Highlights Letters Recent Accepted Collections Authors Referees Press About Editorial Team RSS

Measurement incompatibility is strictly stronger than disturbance

[PDF](#)[Share](#)[Marco Erba](#)[Paolo Perinotti](#), [Davide Rolino](#), and [Alessandro Tosini](#)[Show more](#)

Phys. Rev. A 109, 022239 – Published 26 February, 2024

[Export Citation](#)DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.109.022239>

Relazioni di incertezza entropiche

- La varianza non è l'unico modo per quantificare l'incertezza di una grandezza fisica.
- Un quantificatore più utile a descrivere l'incertezza di preparazione, giacché dipende dalla sola distribuzione di probabilità, è l'*entropia*.

$$\mathcal{H}(q) + \mathcal{H}(p) \geq d(1 + \log_2 \pi)$$

- Per una variabile casuale discreta descritta dalla distribuzione di probabilità $\mathbf{p} = \{p_j\}_{j=1}^n$, l'entropia di Shannon è definita da

$$H(\mathbf{p}) := - \sum_{j=1}^n p_j \log p_j.$$



Relazioni di incertezza entropiche

L'entropia è utile perché permette di studiare facilmente relazioni di incertezza per più di due grandezze incompatibili, e.g. per tre grandezze A, B e C

$$H(A) + H(B) + H(C) \geq \beta.$$

PHYSICAL REVIEW A **95**, 032109 (2017)

Tight entropic uncertainty relations for systems with dimension three to five

Alberto Riccardi, Chiara Macchiavello, and Lorenzo Maccone

Dipartimento Fisica and INFN Sez. Pavia, University of Pavia, via Bassi 6, I-27100 Pavia, Italy

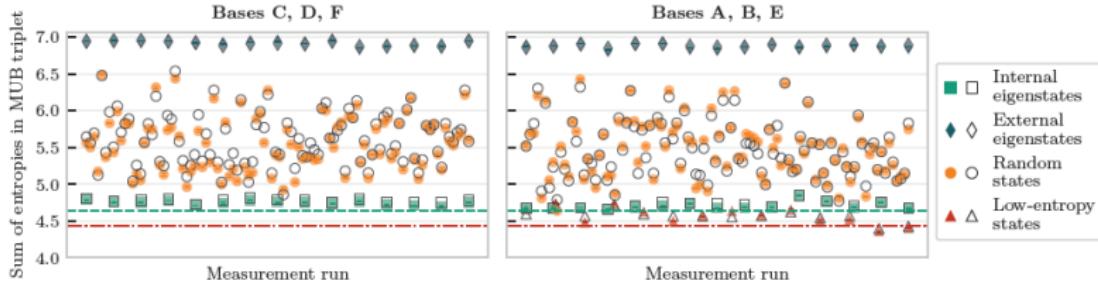
(Received 23 January 2017; published 9 March 2017)

We consider two (natural) families of observables O_k for systems with dimension $d = 3, 4, 5$: the spin observables S_x , S_y , and S_z , and the observables that have mutually unbiased bases as eigenstates. We derive tight entropic uncertainty relations for these families, in the form $\sum_k H(O_k) \geq \alpha_d$, where $H(O_k)$ is the Shannon entropy of the measurement outcomes of O_k and α_d is a constant. We show that most of our bounds are stronger than previously known ones. We also give the form of the states that attain these inequalities.

DOI: [10.1103/PhysRevA.95.032109](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.95.032109)

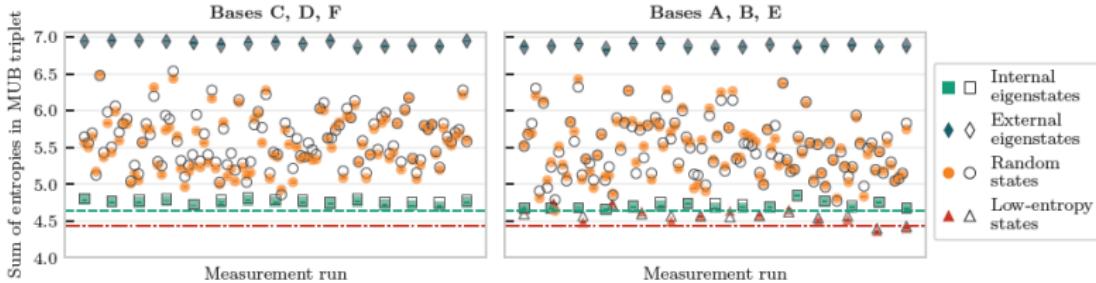


Relazioni di incertezza entropiche



Laura Serino et al., *Complementarity-based complementarity: The choice of mutually unbiased observables shapes quantum uncertainty relations*, Phys. Rev. Res. 7 (2025)

Relazioni di incertezza entropiche



Laura Serino et al., *Complementarity-based complementarity: The choice of mutually unbiased observables shapes quantum uncertainty relations*, Phys. Rev. Res. 7 (2025)

«Qualche volta è tutto finito, quel che può dare il giorno, tutto fatto, tutto detto, tutto è pronto per la notte, e il giorno non è finito, tutt’altro che finito, la notte non è pronta, tutt’altro, tutt’altro che pronta.»



Applicazioni

- **Metrologia**

Trovare il limite ultimo alla precisione raggiungibile quando si misurano grandezze fisiche su stati quantistici.

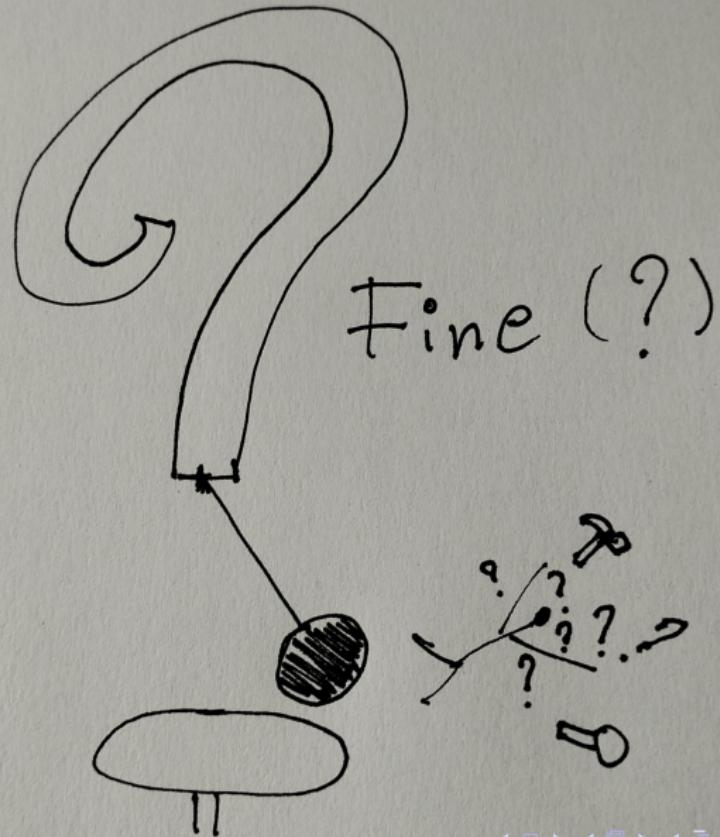
- **Crittografia**

Rifondare il concetto di sicurezza per sistemi di comunicazione codificando l'informazione su stati quantistici e misurando grandezze incompatibili.

- **Termodinamica**

Nuove relazioni di incertezza, che non si fondano però sul concetto di incompatibilità, limitano il rapporto segnale-rumore delle variabili termodinamiche in funzione della produzione di entropia.





Fine?

nature

Explore content ▾

About the journal ▾

Publish with us ▾

Subscribe

[nature](#) > [news feature](#) > article

NEWS FEATURE | 30 July 2025 | Correction [12 August 2025](#)

Physicists disagree wildly on what quantum mechanics says about reality, *Nature* survey shows

First major attempt to chart researchers' views finds interpretations in conflict.



Fine?

FAVoured EXPLANATIONS OF QUANTUM THEORY

The Copenhagen interpretation of quantum mechanics was chosen by more than one-third of the 1,101 respondents to *Nature's* survey*. But many respondents were not confident in their chosen answer.

