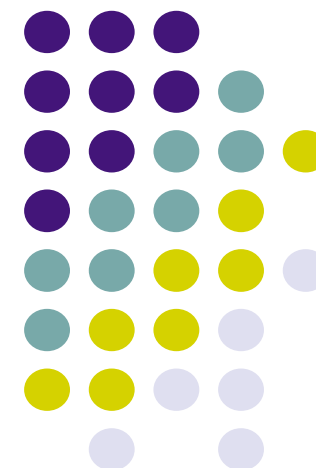


創発セミナー 中部大学アクティブホール 2022年4月21日(木)

不確定性原理について

中部大学
AI数理データサイエンスセンター
創発学術院

小澤 正直



古典力学の世界



- 力学は、何のためか？ 未来予知のため
 - 天体の力学 $\Rightarrow$ 暦の作成 $\Rightarrow$ 農業の成立
- ニュートンの運動方程式: $f = ma$
- 力学的状態＝位置と速度(運動方程式の初期条件)
- 決定論的世界観
 - 力と位置と速度(運動量)で未来が決定
 - ラプラスの悪魔

もしも、ある瞬間における全ての物質の力学的状態と力を知ることができ、それらのデータを解析できるだけの能力の知性が存在するとすれば、この知性にとっては、不確実なことは何もなくなくなり、その目には未来も過去同様に全て見えているであろう。

(ラプラス『確率の解析的理論』1812年)

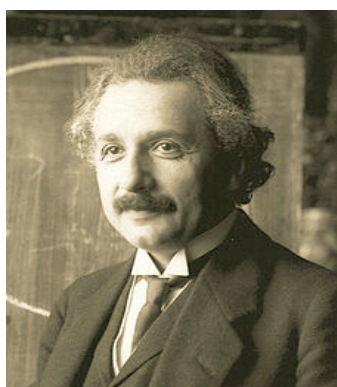


courtesy of the Académie des Sciences, Paris



量子力学の発見

- ◆ 社会的背景：プロイセンの製鉄業—溶鉱炉の温度制御—分光学
- 1900 年：プランク（1858生,1918受賞,1947没）の量子仮説
- 1905 年：アインシュタイン（1879生,1921受賞,1955没）の光電効果
- 1925 年：ハイゼンベルク（1901生,1932受賞,1976没）の行列力学
- 1926 年：シュレーディンガー（1887生,1933受賞,1961没）の波動力学
- 1927 年：ハイゼンベルクの不確定性原理





ハイゼンベルクの不確定性原理（1927年）

- ガンマ線顕微鏡の思考実験から導出。
- 位置と速度を同時に決定することはできない。
- 現代物理学（量子論＋相対論）のうち量子論の根本原理。
- 量子力学の非決定性。世界は確率論的。
 - ニュートン力学は決定論的：ロケットの軌道、日食、月食の予測
 - ボーア＝アインシュタイン論争
 - 「神はサイコロを振りたまわず」（アインシュタイン）
- ネガティブ：超精密測定の限界＝重力波検出
- ポジティブ：量子暗号の原理＝盗聴する側の限界を定める
- 問題点：量子測定理論が1980年代まで整備されなかった。
 - 位置と速度を同時に決定できる例外的場合がある（EPRのパラドックス）。
 - 定量的公式（ハイゼンベルクの不等式）の証明がなく、普遍的真理性に疑問がある。



不確定性原理とは何か？

ふかくていせいげんり【不確定性原理】

- 量子力学において、粒子の位置と運動量，エネルギーと時間などの一組の物理量について、その両者を同時に正確に測定し、決定することはできないことをいう。
- 二つの測定値の不確定さの積はプランク定数に比例する一定値より小さくなり得ないという不確定関係が成り立つ。
- 1927年ハイゼンベルクによって導かれた。

(大辞林)…iPhone 内蔵

- ◆ 「不確定さ」=ゆらぎの程度を表し、二乗平均平方根誤差偏差(標準偏差)で測られる。
- ◆ 「不正確さ」=誤差の程度を表し、二乗平均平方根誤差で測られる。



ハイゼンベルクの定式化(1927年)

- 不確定性原理を導入したHeisenbergの原論文:

Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, Zeitschrift für Physik 43, 172-198 (1927).

- 正準共役な物理量は, ある特徴的な不正確さの下でのみ同時に決定することが示される(第1節).
- [E]s wird gezeigt, daß kanonisch konjugierte Größen simultan nur mit einer charakteristischen Ungenauigkeit bestimmt werden können .
- 参考:「不正確さ」=Ungenauigkeit=inaccuracy
- 参考:「不確定さ」=Unbestimmtheit=indeterminacy
- [I]t is shown that canonically conjugate quantities can only be determined simultaneously with a characteristic inaccuracy. (Google Translation)

Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik.

Von W. Heisenberg in Kopenhagen.

Mit 2 Abbildungen. (Eingegangen am 23. März 1927.)

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst exakte Definitionen der Worte: Ort, Geschwindigkeit, Energie usw. (z. B. des Elektrons) aufgestellt, die auch in der Quantenmechanik Gültigkeit behalten, und es wird gezeigt, daß kanonisch konjugierte Größen simultan nur mit einer charakteristischen Ungenauigkeit bestimmt werden können (§ 1). Diese Ungenauigkeit ist der eigentliche Grund für das Auftreten statistischer Zusammenhänge in der Quantenmechanik. Ihre mathematische Formulierung gelingt mittels der Dirac-Jordanschen Theorie (§ 2). Von den so gewonnenen Grundsätzen ausgehend wird gezeigt, wie die makroskopischen Vorgänge aus der Quantenmechanik heraus verstanden werden können (§ 3). Zur Erläuterung der Theorie werden einige besondere Gedankenexperimente diskutiert (§ 4).

Zeitschrift für Physik, 43, 172-98 (1927)

「正準共役な物理量はある特徴的な不正確さのもとでしか同時に決定することができない。」



I.3 THE PHYSICAL CONTENT OF QUANTUM KINEMATICS AND MECHANICS

WERNER HEISENBERG

translation into English by

John Archibald Wheeler and Wojciech Hubert Zurek

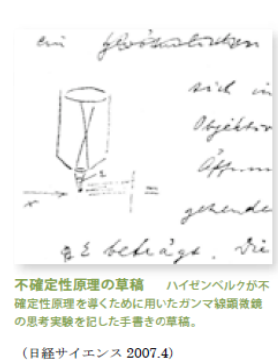
First we define the terms *velocity*, *energy*, etc. (for example, for an electron) which remain valid in quantum mechanics. It is shown that canonically conjugate quantities can be determined simultaneously only with a characteristic indeterminacy (§1). This indeterminacy is the real basis for the occurrence of statistical relations in quantum mechanics. Its mathematical formulation is given by the Dirac-Jordan theory (§2). Starting from the basic principles thus obtained, we show how microscopic processes can be understood by way of quantum mechanics (§3). To illustrate the theory, a few special *gedankenexperiments* are discussed (§4).

Inaccuracyの誤訳

「正準共役な物理量はある特徴的な不確定さのもとでしか同時に決定することができない。」

Heisenberg の不確定性原理

- 1925 年：Heisenberg の行列力学
- Heisenberg の交換関係



$$PQ - QP = \frac{h}{2\pi i}$$

- 1927 年：Heisenberg の不確定性原理：位置と運動量の同時測定は，以下の制約の下でのみ可能である．

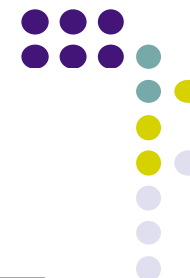
$$\epsilon(Q)\epsilon(P) \geq \frac{h}{4\pi}.$$

ここで， $\epsilon(Q)$ ＝位置測定の平均的誤差， $\epsilon(P)$ ＝運動量の平均的誤差．

- 有名な『ガンマ線顕微鏡の思考実験』に基づいて『不確定性原理』を導入し，それが交換関係の帰結であることを示す数学的証明を試みた．

W. Heisenberg, *Z. Phys.* **43**,172 (1927).

That this relation (1) is a straightforward mathematical consequence of the rule $pq - qp = -ih$ will be shown below.



γ 線顕微鏡の思考実験

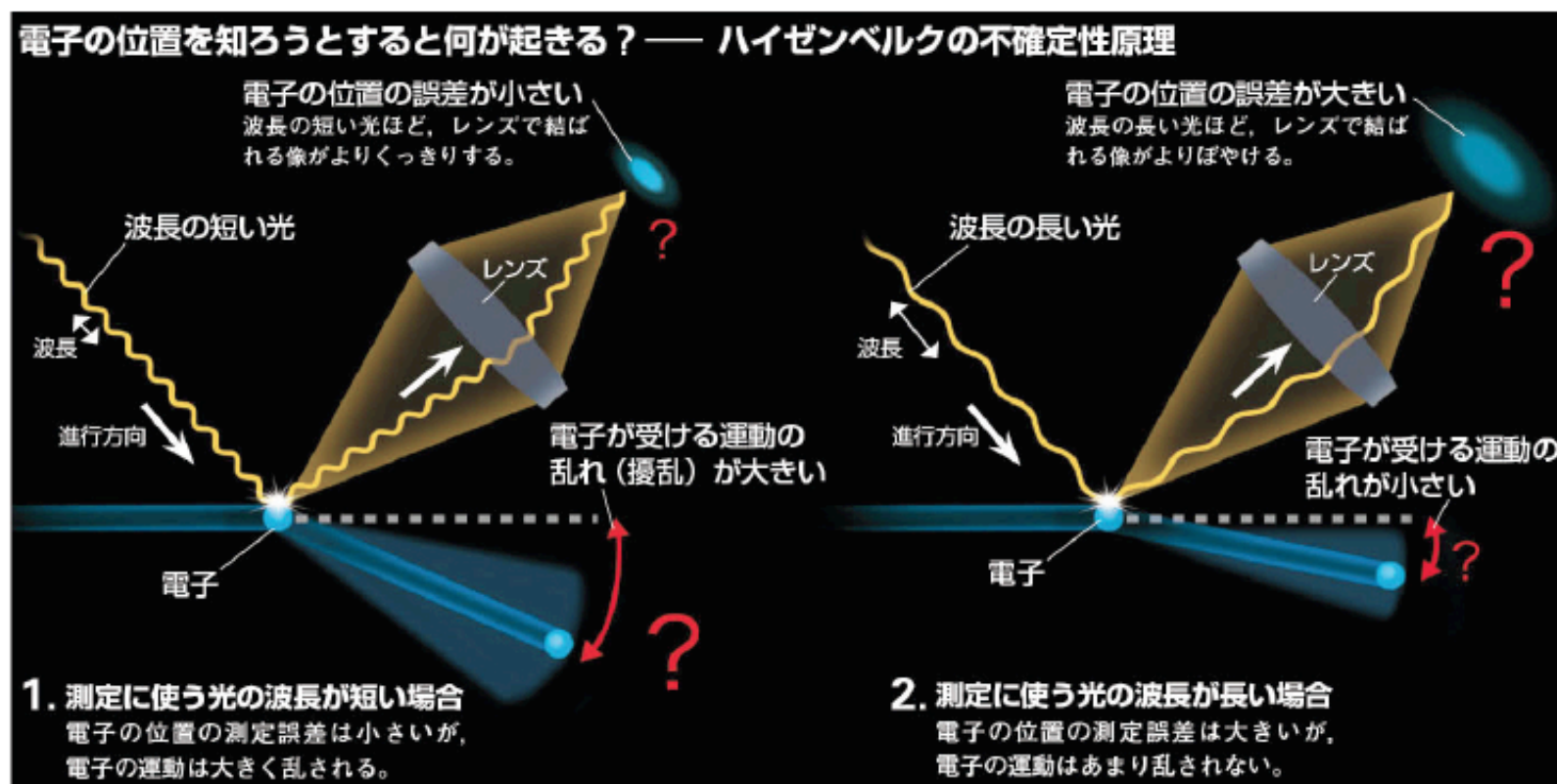


図 1: γ -ray microscopes

(Newton 2012年4月号)



- 3種の不確定性関係

- ゆらぎの不確定性関係 (JDR) : (σ =標準偏差)

$$\sigma(Q)\sigma(P) \geq \frac{h}{4\pi}$$

- 同時測定の不確定性関係 (JMR) : (ϵ =平均誤差)

$$\epsilon(Q)\epsilon(P) \geq \frac{h}{4\pi}$$

- 測定と擾乱の不確定性関係 (MDR) : (η =平均擾乱)

$$\epsilon(Q)\eta(P) \geq \frac{h}{4\pi}$$



初期の量子力学

- 1932 年：フォン・ノイマンの公理系

- (公理 1) 量子系 = ヒルベルト空間, 状態 = 単位ベクトル / 密度作用素, 物理量 = 自己共役作用素
- (公理 2) ボルンの統計公式 :

$$\Pr\{A = a | \psi\} = \|E^A(a)\psi\|^2$$

- (公理 3) シュレーディンガー方程式 :

$$i\hbar \frac{d}{dt} \psi(t) = H\psi(t)$$

- (公理 4) 反復可能性仮説 (測定公理) : 一つの系で同じ物理量を 2 回すぐ続けて測定すれば, 2 回とも同じ値が得られる.
- (公理 5) 正準交換関係 : $QP - PQ = i\hbar$.



ゆらぎに関する不確定性関係

- Kennard の不等式：任意の量子状態において，位置のゆらぎの大きさ $\sigma(Q)$ と運動量のゆらぎの大きさ $\sigma(P)$ は，次の関係を満たす.

$$\sigma(Q) \sigma(P) \geq \frac{h}{4\pi}. \quad \leftarrow \text{(公理2)ボルの統計公式から得られる.}$$

[E. H. Kennard, *Z. Phys.* 44, 326 (1927).]

- Heisenberg は，Kennard に先立って，1927 年にある種の Gauss 型波動関数（最小不確定波束）に対して次の関係を示した.

$$\sigma(Q) \sigma(P) = \frac{h}{4\pi}.$$

- 「ゆらぎ」は，測定の誤差と異なる概念で，元々どこにいたかわからないという不確定さの程度.
- 「誤差」は，得られた測定値から元々どこにいたかが，どれほど正確に分かるかの平均的な正しさの程度.



不確定性原理の Heisenberg による数学的証明

- 反復可能性仮説：同一の物理量を 2 回続けて測定すると 2 回とも同じ測定値が得られる。
⇒測定後の揺らぎは0になる.
- 近似的反復可能性仮説：物理量 A を誤差 $\varepsilon(A)$ で測定して、測定値 λ が得られると、測定後の状態 ψ は次式を満たす。 ⇒測定後の揺らぎは $\varepsilon(A)$ 以下になる.

$$\varepsilon(A) \geq \|A\psi - \lambda\psi\| \geq \sigma(A)$$

- Heisenberg の不確定性原理は、Kennard の不等式と近似的反復可能性仮説の直接の帰結である.
- 証明： Q を誤差 $\varepsilon(Q)$ で測定して測定値 q を得、同時に P を誤差 $\varepsilon(P)$ で測定して測定値 p を得たとすれば、測定直後の状態において次式が成り立つ.

$$\varepsilon(Q) \geq \sigma(Q) \quad \text{かつ} \quad \varepsilon(P) \geq \sigma(P).$$

よって、Heisenberg の不確定性原理が Kennard の不等式から得られる.



不確定性原理と重力波検出プロジェクト

- ハイゼンベルクの不確定関係 JMR/MDR が物理学の問題に使われることは 1970 年代後半までなかった。

理由：それほど精度の高い測定を実験で実現する技術がなかった。

- Braginsky-Volontsov-Thorn (1980), Caves, et al. (1980) : MDR $\Rightarrow$ SQL
 - SQL (標準量子限界) : 自由質点型 (干渉計型) 重力波検出装置の感度の限界

$$\text{SQL} = \sqrt{\frac{h\tau}{2\pi m}}$$

- 当時、重力波検出には、干渉計型と共振器型 (調和振動子型) の 2 つの方式が提案されていたが、不確定性原理に由来する感度限界のない共振器型が優位と見られた。

二つの重力波検出プロジェクト

- 1980, Braginsky, Vorontsov, Thorne, Caves, Drever: 干渉計方式には不確定性原理から導かれる標準量子限界 (SQL) が存在すると主張, そのような限界を回避できる共振器方式を推進

共振器方式

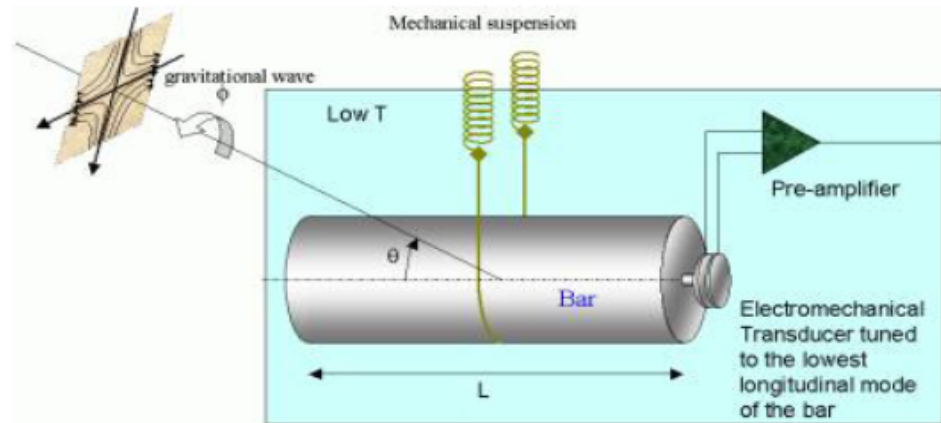
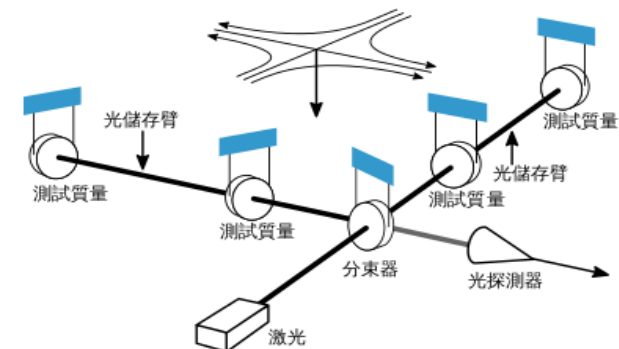


Schéma válcového detektoru gravitačních vln AURIGA.

VS 干渉計方式



「不確定性原理」

⇒ 「共振器方式 $\geq$ 干涉計方式」



1 August 1980, Volume 209, Number 4456

SCIENCE

Quantum Nondemolition Measurements

Vladimir B. Braginsky, Yuri I. Vorontsov, Kip S. Thorne

Summary. Some future gravitational-wave antennas will be cylinders of mass ~ 100 kilograms, whose end-to-end vibrations must be measured so accurately (10^{-19} centimeter) that they behave quantum mechanically. Moreover, the vibration amplitude must be measured over and over again without perturbing it (quantum nondemolition measurement). This contrasts with quantum chemistry, quantum optics, or atomic, nuclear, and elementary particle physics, where one usually makes measurements on an ensemble of identical objects and does not care whether any single object is perturbed or destroyed by the measurement. This article describes the new electronic techniques required for quantum nondemolition measurements and the theory underlying them. Quantum nondemolition measurements may find application elsewhere in science and technology.



On the measurement of a weak classical force coupled to a quantum-mechanical oscillator. I. Issues of principle*

Carlton M. Caves, Kip S. Thorne, Ronald W. P. Drever,[†] Vernon D. Sandberg,[‡] and Mark Zimmermann[§]

Gedanken experiments described in the literature suggest a possible limit

$$\text{standard quantum limit: } (\Delta F)_{\min} \simeq (m \hbar / \tau^3)^{1/2} \quad (3.1)$$

on the accuracy with which one can measure a weak classical force F acting on a free mass m , with a measurement of duration τ .

(3.1) on the force F , to within a factor 2. A laser-interferometer detector for gravitational waves is an example of a system which studies weak classical forces by position measurements, and which is therefore subject to the constraint (3.1); see, e.g., Drever *et al.* (1977) or Edelstein *et al.* (1978). For laser detectors this constraint is a serious potential problem at low gravitational-wave frequencies, $f \lesssim 1$ Hz.

干渉計
方式の
SQLの
存在



重力波検出限界を巡る論争

- 1980, Braginsky et al. : 干渉計型検出方式には、不確定性原理から導かれる標準量子限界が存在すると主張、共振型検出方式を推進
- 1983, Yuen: 標準量子限界の導出を批判、収縮状態測定による標準量子限界の打破を提案
- 1985, Caves: 標準量子限界を改訂、収縮状態測定を疑問視

PHYSICAL REVIEW LETTERS

VOLUME 51

29 AUGUST 1983

NUMBER 9

Contractive States and the Standard Quantum Limit for Monitoring Free-Mass Positions

Horace P. Yuen

Department of Electrical Engineering and Computer Science, Northwestern University, Evanston, Illinois 60201

(Received 27 June 1983)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

VOLUME 54

10 JUNE 1985

NUMBER 23

Defense of the Standard Quantum Limit for Free-Mass Position

Carlton M. Caves

Theoretical Astrophysics, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125

(Received 6 April 1984)

H. P. Yuen, Phys. Rev. Lett. **51**, 719 (1983).

K. Wodkiewicz, Phys. Rev. Lett. **52**, 787 (1984); H.P. Yuen, *ibid.* **52**, 788 (1984).

R. Lynch, Phys. Rev. Lett. **52**, 1729 (1984); H.P. Yuen, *ibid.* **52**, 1730 (1984).

R. Lynch, Phys. Rev. Lett. **54**, 1599 (1985).

C. M. Caves, Phys. Rev. Lett. **54**, 2465 (1985).



量子力学におけるパラダイムシフト

- さまざまな量子測定が実験的に実現されるようになり、反復可能性仮説を満たさない測定の存在が問題視されるようになった。
 - 光子計数測定
 - 連続物理量の測定：離散的物理量で近似することは、現実の測定にあわない。
- 1970 年：デービス・ルイス、反復可能性仮説の放棄を提唱
 - 「反復可能性」の概念は、量子力学のほとんどすべての公理的取り扱いにおいて、本質的な概念として、陰伏的に仮定されている。しかし、それを放棄することによって、測定理論に対する極めて柔軟なアプローチが可能になる。

E.B. Davies and J.T. Lewis, Commun. Math. Phys. 17, 239 (1970)



Davies-Lewis の仮説

- Davies-Lewis の仮説. 出力変数 x をもつ任意の測定装置 $A(x)$ に対して, あるインストルメント $\mathcal{I}$ が存在して, 測定装置 $A(x)$ の統計的性質は, インストルメント $\mathcal{I}$ によって, 以下のように定まる.

(i) 出力分布: $\Pr\{x \in \Delta \mid \rho\} = \text{Tr}[\mathcal{I}(\Delta)\rho]$.

(ii) 条件付き出力状態: $\rho_{\{x \in \Delta\}} = \frac{\mathcal{I}(\Delta)\rho}{\text{Tr}[\mathcal{I}(\Delta)\rho]}.$

E.B. Davies and J.T. Lewis, CMP 17, 239 (1970)

- 注意. Davies-Lewis の仮説の下で, 測定装置 $A(x)$ のインストルメント $\mathcal{I}$ は, 測定装置 $A(x)$ の統計的性質によって, 次のように定まる.

$$\mathcal{I}(\Delta)\rho = \Pr\{x \in \Delta \mid \rho\} \rho_{\{x \in \Delta\}}.$$



量子力学における新しい測定公理

- 1984 年：量子力学における新しい測定公理「一般測定公理」

- 量子測定＝正規化された完全正写像値測度（完全正值インストルメント）：
- 各測定値 x に完全正写像 $\mathcal{I}(x)$ が対応する.
- 状態 ρ で測定値 x をえる確率は $\text{Tr}[\mathcal{I}(x)\rho]$ で与えられ，測定後の状態は， $\mathcal{I}(x)\rho/\text{Tr}[\mathcal{I}(x)\rho]$ で与えられる.
- A の射影測定は，

物理的実現可能性の
必要十分条件

$$\mathcal{I}(x)\rho = E^A(x)\rho E^A(x)$$

と定義される完全正值インストルメントで表される.

MO, J. Math. Phys. **25**, 79 (1984).



量子インストルメント理論により量子力学の公理化 (ヒルベルトの第6問題)の完成

- 量子力学の公理化＝ヒルベルトの第6問題
 - 1932年, フォン・ノイマンの『量子力学の数学的基礎』
 - 「量子測定理論」は未完のまま残された
 - 精密な実験技術がなかった—思考実験
- 1960年代初頭のレーザーの発見＝量子情報技術の可能性
 - 精密測定技術, 光通信, 重力波検出実験
 - 「量子測定理論」の構築＝科学技術上の要請
- 「量子測定理論」の公理化
 - 1984年「量子インストルメント」の数学理論
 - M. Ozawa, “Quantum measuring processes of continuous observables,” J. Math. Phys. 25, 79–87 (1984).
 - 物理的実現可能な量子測定の概念の数学的特徴づけの完成
＝完全正值インストルメント
 - 作用素環論, 表現論, 完全正写像値測度



Yuen の測定実現可能性問題

- 1986 年に Yuen は, Davies-Lewis の仮説と量子力学の整合性を問題にし, 物理的に実現可能なすべての量子測定を数学的に特徴付けるという問題を提案した.

私は, (Davies-Lewis の) オペレーショナル・アプローチはあまりに一般的すぎると信じる—この枠組みで記述される多くの測定は実現可能ではないと信じる. [...]

H. P. Yuen, *Proc. 2nd Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics (ISQM '86)*, Tokyo, 1986, pp. 360–368.

Characterization and Realization of General Quantum Measurements

Horace P. YUEN

*Department of Electrical Engineering and Computer Science,
Northwestern University, Evanston, Illinois 60201, USA*

まさにこの問題が
1984年に解決され
ていた.

The problem of mathematically characterizing and realizing all the possible quantum measurements are addressed, assuming the present framework of quantum mechanics. They go considerably beyond the standard textbook descriptions, and the complete solutions are yet to be obtained. Some application of these developments to precision measurements are briefly discussed.

重力波検出の標準量子限界

- 1980 年, Braginsky, Thorne, Caves 等は, Heisenberg の不確定性原理に基づいて干渉計型重力波検出装置に対する標準量子限界 (SQL) と呼ばれる感度限界を導いて, 共振器型重力波検出装置の開発を進めた.

V. B. Braginsky, K. S. Thorne et al., *Science* **209**, 547 (1980); C. M. Caves, K. S. Thorne et al., *Rev. Mod. Phys.* **52**, 341 (1980)

- 1983 年, Yuen は, 収縮状態測定という位置測定の方法を提案して, これによって SQL が打ち破れると主張した.

H. P. Yuen, *Phys. Rev. Lett.* **51**, 719 (1983).

- 1985 年, Caves は SQL の定式化を改良して新しい導出を示し, また, 収縮状態測定の物理的実現可能性を疑問視して, Yuen の議論を批判した.

C. M. Caves, *Phys. Rev. Lett.* **54**, 2465 (1985).

- 1988 年, 収縮状態測定のための測定相互作用が発見され, 収縮状態測定が間接測定モデルで物理的実現可能であることが示され, 実際に, SQL が打破されることが示された. また, Caves の SQL の導出には, 近似的反復可能性仮説が仮定されていることが明らかにされた.

MO, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 385 (1988).

- 1994 年, Thorne 等は NSF の研究助成で LIGO(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) の建設に取りかかった.
- 2016 年, LIGO が重力波を検出したと発表した.
- 以下では, 収縮状態測定が誤差と擾乱に関する Heisenberg の不確定性関係を満たさないことを示す.



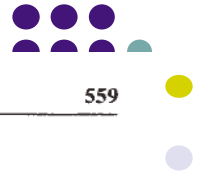
LIGO project, <http://ligonews.blogspot.com/>



位置測定モデル

- 1988 年までに知られてきた唯一の位置測定モデル：von Neumann モデル
- $U = \exp(-i\hbar H_{\text{Neuman}}), \quad H_{\text{Neuman}} = \hat{x}\hat{p}_y.$
- Heisenberg の誤差・擾乱不確定性関係が成立： $\varepsilon(\hat{x})\eta(\hat{p}_x) \geq \frac{\hbar}{2}.$
- 1988 年に，第 2 の位置測定モデルである誤差のない収縮状態測定モデルが発見された：
- $U = \exp(-i\hbar H_{\text{MO}}), \quad H_{\text{MO}} = \frac{\pi}{3\sqrt{3}}\{2(\hat{x}\hat{p}_y - \hat{p}_x\hat{y}) + (\hat{x}\hat{p}_x - \hat{y}\hat{p}_y)\}.$
- Heisenberg の誤差・擾乱不確定性関係は不成立： $\varepsilon(\hat{x})\eta(\hat{p}_x) = 0.$

MO, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 385 (1988); *Phys. Lett. A* **299**, 1 (2002).



Beating the quantum limits (cont'd)

Heisenberg's Uncertainty Principle is for many an irksome constraint on the freedom to make measurements accurately. Can the constraint be overturned?

Ozawa's calculation will undoubtedly lift the spirits of those involved with the design of gravitational wave detectors; it will be interesting to see where this leads.

[J. Maddox, Nature 331 (1988), 559]

What Ozawa has now done is to pull apart Cave's definition of "resolution",

ascendant. But now Masanao Ozawa of Nagoya University has put a cat among the pigeons by specifying a quantum system in which, he says, it is possible to do better than SQL (*Phys. Rev. Lett.* **54**, conventional position on the SQL. One of the virtues of Ozawa's case is that the quantities arising in his calculations are indeed precisely defined and are related directly to quantities that can be measured. On the

Naturally, Ozawa's conclusion is that such a state of affairs is indeed attainable. The crux of his argument is the construction of a solvable model to represent the interaction between the measuring equipment and the free particle whose position is to be measured, which has the virtue that (regarded as a quantum mechanical hamiltonian) it can be solved exactly. In

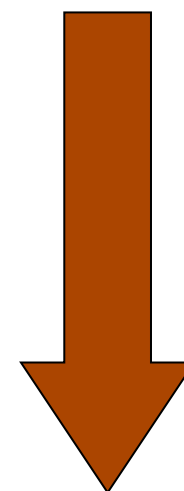


小澤の不等式の発見（2003年）

ハイゼンベルクの不等式（不成立）： Q と P は同時に測れない。

$$(H) \quad \varepsilon(Q)\varepsilon(P) \geq \frac{h}{4\pi}$$

$\varepsilon(Q), \varepsilon(P)$: 位置 Q , 運動量 P の測定誤差
 $\sigma(Q), \sigma(P)$: 位置 Q , 運動量 P の標準偏差
 h : プランク定数 $h = 6.626068 \times 10^{-34} m^2 kg / s$

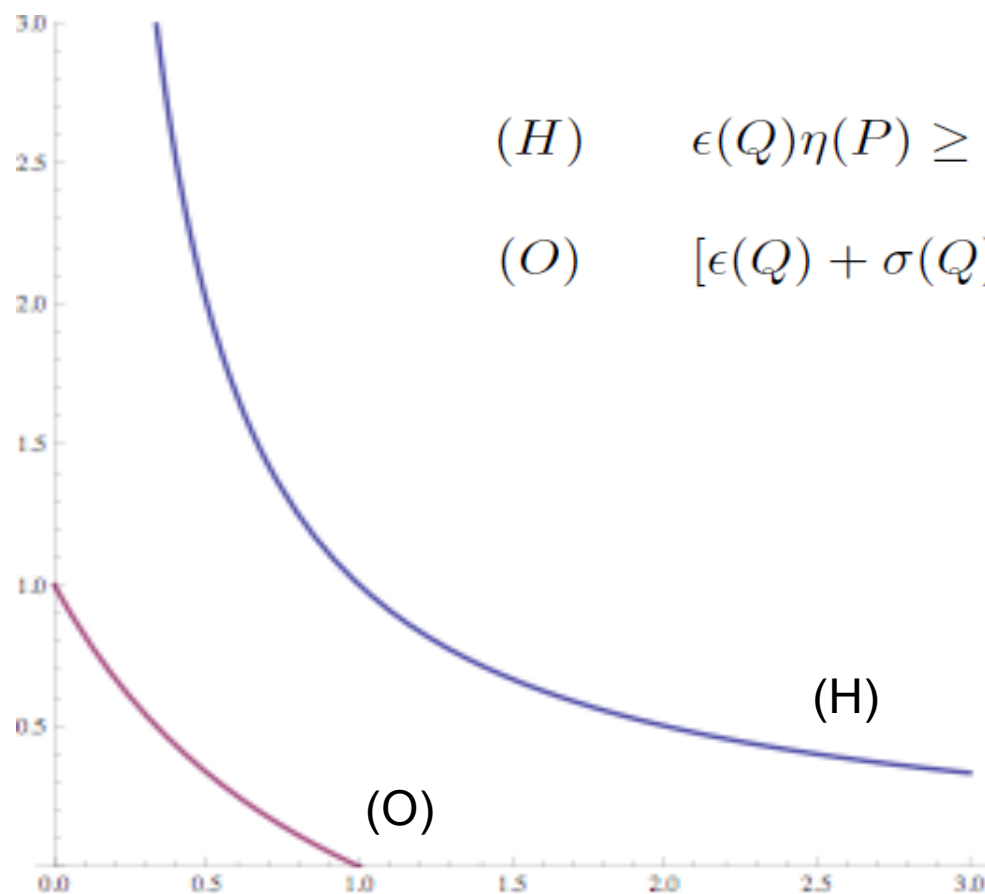


小澤の不等式（成立）： Q と P が同時に測れる場合もある。

$$(O) \quad \varepsilon(Q)\sigma(P) + \sigma(Q)\varepsilon(P) + \varepsilon(Q)\varepsilon(P) \geq \frac{h}{4\pi}$$



小澤の不等式とハイゼンベルクの不等式の比較



$$(H) \quad \epsilon(Q)\eta(P) \geq \frac{h}{4\pi}$$

$$(O) \quad [\epsilon(Q) + \sigma(Q)][\eta(P) + \sigma(P)] \geq \frac{h}{4\pi} + \sigma(Q)\sigma(P)$$

Awards

Quantum Communication Award

The International Quantum Communication Award for outstanding achievements in quantum communication research is presented at each QCMC. That award is sponsored by the Tamagawa University.

This year the award winners are:

Gerard Milburn (Australia),
for pioneering theoretical work on quantum information
and computation processing.

Masanao Ozawa (Japan),
for contributions to mathematical theories of quantum
measurements and quantum computation.

Christopher Fuchs (Canada, USA),
for contributions to theory of quantum communication
including quantum state disturbance.

Alexander Lvovsky (Canada, Russia),
for contributions to experimental method for quantum-optical processes on coherent and squeezed states including homodyne tomography.

In the past, the award winners have been as follows:

- 1996: Charles Bennett, Carl Helstrom, Alexander Holevo, Horace Yuen
- 1998: Jeffrey Kimble, Peter Shor
- 2000: Paul Benioff, Christopher Monroe, David Wineland
- 2002: David Deutsch, Serge Haroche, Benjamin Schumacher
- 2004: Richard Jozsa, Prem Kumar
- 2006: Ignacio Cirac, Philippe Grangier, William Wootters, Peter Zoller

$\hbar$: $\frac{\text{プランク定数}}{2\pi}$
 Δq : 位置の誤差
 Δp : 運動量の擾乱
 σ_q, σ_p : 標準偏差

旧 $\Delta p \cdot \Delta q \geq \frac{\hbar}{2}$

↓

新 $\Delta q \cdot \sigma_p + \Delta p \cdot \sigma_q + \Delta p \cdot \Delta q \geq \frac{\hbar}{2}$

図1 新旧の不確定性原理

(日経BYTE2004-6)



中村 桂子 評

ハイゼンベルクの顕微鏡

不確定性原理は超えられるか

石井茂著 (日経BP社・1890円)

人が解いてゐるはずなことを、
解できなかった。そして、またよ
半分しかしれない。新聞の書籍
で取のけるのに、まづいいな
うが、判断の難いところ。し
ばうかゝるんだが、やはり解ら
ない。その理由を勢に述べて、

「學問がわからない。これは科
學についての本である。科に限
らず、學問というものは、先理
解できなく、なかなかウツク
てゐるものがある。そのこゝに
解があるが私思ひついて、こゝ

が學力學世界、廣くは、
學問の根本的問題に當つて、
物理学上の常識範圍に當つて、
物理学上の常識範圍に當つて、
さういふ點である。數者は、小
澤正東先生の著書、『對空
艦隊の、ハセベールの、
確率法則』。多の方は、數字
不確正性問題と聞いただけで頭

日本人が聞

類なことをし、私等の入
でゐる。ところが、活版
日本人に、いったん、發

日本人が開く量子力学の新しい地平

体の位置の測定誤差を測定で生じる運動量の乱れの積は、常に一定の値以上になる」とまとめた。掛

になる中、たまたま一九八六年に日本で開催された国際会議で、ここに不確定性原理による限界があ

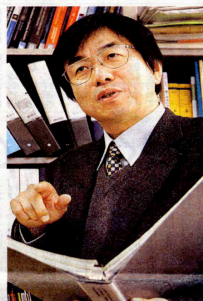
新しい地平

プロフェッショナル

海を見たい。浜に、科学者エル・ハイ
とどまると平洋の波が打ち出し方
でとどまらざる。理位置を定もう
とて互ひに。式は、知性界観の
更進迫った。
二十世紀初葉、科学
置は不確なる。調
という行為体が子

数教大、小澤正(53)

月休の全実務は、天体運行各分、



無想から20年。小澤の式は、これまでの
 「知」の限界を克服する可能性を持つ
 ハイゼンベルクの式
 $\Delta p \times \Delta q > \text{一定値}$

 小澤の式
 $\Delta q \times \Delta q \times \sigma_p + \Delta p \times \sigma_q > \text{一定値}$
 と Δq は粒子の位置と速度の誤差でハイ
 ンベルク式では両者はトレードオフの関係に
 なくてはならない。小澤式では初め状態を
 が加わり、 Δp 、 Δq がゼロになりう

「知」の限界を覆す者

[illegible]

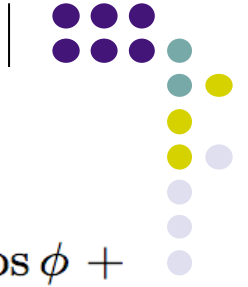
(日経産業新聞2004.1.15)

(每日新聞2006.1.29)



小澤の不等式検証実験

- 問題：ハイゼンベルクの不等式は本当に破られるのか。小澤の不等式は本当に正しいのか。これまで、実験で確かめたことはない。
- 困難な理由：プランク定数程度の大きさのエネルギーの差を識別する必要がある。
- 目標：ハイゼンベルクの不等式が不成立、小澤の不等式が成立する状況を突き止める。
- 実験の設定：実験は、 A, B がスピンという物理量の2つの成分（ x 方向と y 方向）の場合について行う。
- ウィーン工科大学原子研究所の長谷川祐司氏と中性子スピン測定における誤差と擾乱を計測する実験を構想。



Experimental demonstration in neutron spin measurements

- The apparatus make a projective measurement of $\sigma_\phi = \sigma_x \cos \phi + \sigma_y \sin \phi$ for the neutron spin.
- The apparatus is described by measurement operators $E^\phi(+1) = (1 + \sigma_\phi)/2$ and $E^\phi(-1) = (1 - \sigma_\phi)/2$ with $O_A = \sum_{x=\pm 1} x E^\phi(x)$.
- $A = \sigma_x$, $B = \sigma_y$, and $\psi = |\sigma_z = +1\rangle$
- In this case, we have

$$\sigma(A) = \sigma(B) = 1, \quad \epsilon(A) = 2 \sin \frac{\phi}{2}, \quad \eta(B) = \sqrt{2} \cos \phi.$$

- The experiment was carried out at the research reactor facility TRIGA Mark II of the Vienna University of Technology (TU Vienna) by Yuji Hasegawa's group.



ウィーン工科大学原子研究所：研究所建屋



炉心の実験ホール



小澤の不等式検証実験

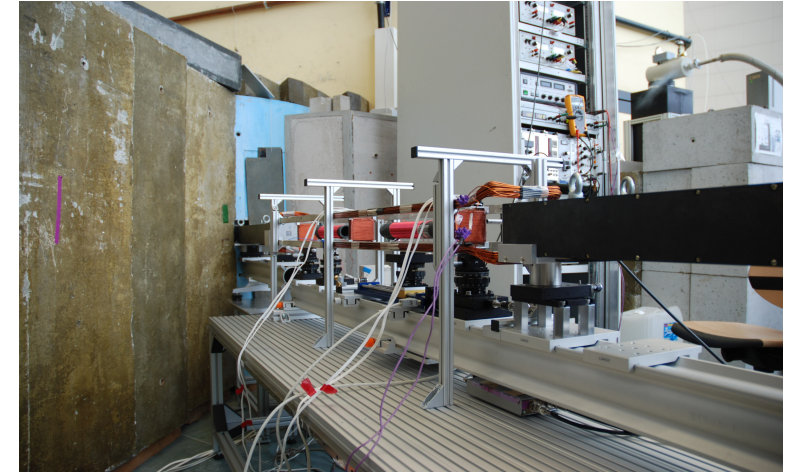
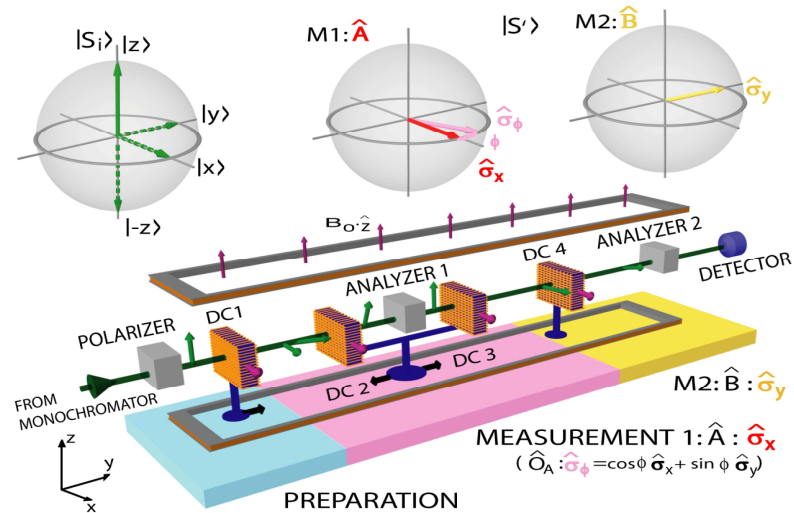


図3 小澤の不等式の検証実験の配置. 入射中性子は, (1) 状態生成[青の領域], (2) 前段の測定($A=\sigma_x$)[ピンクの領域], (3) 後段の測定($B=\sigma_y$)[黄色の領域]を通過する.

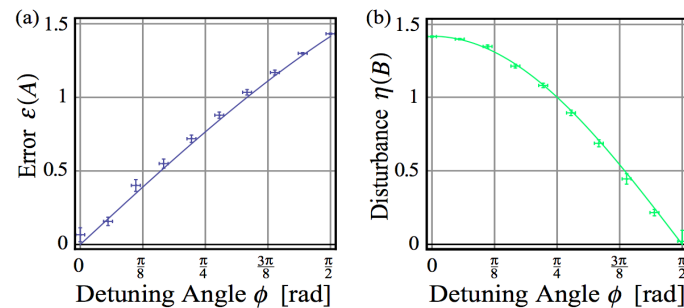
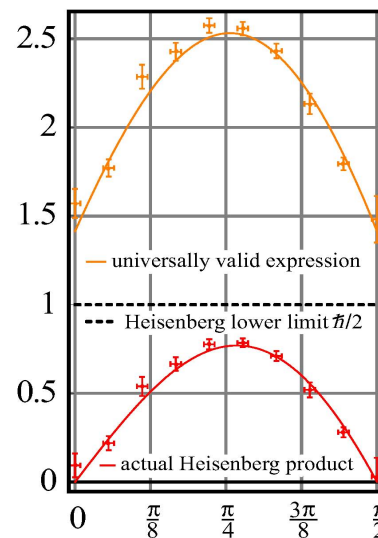


図4: The trade-off relation between the error and the disturbance.



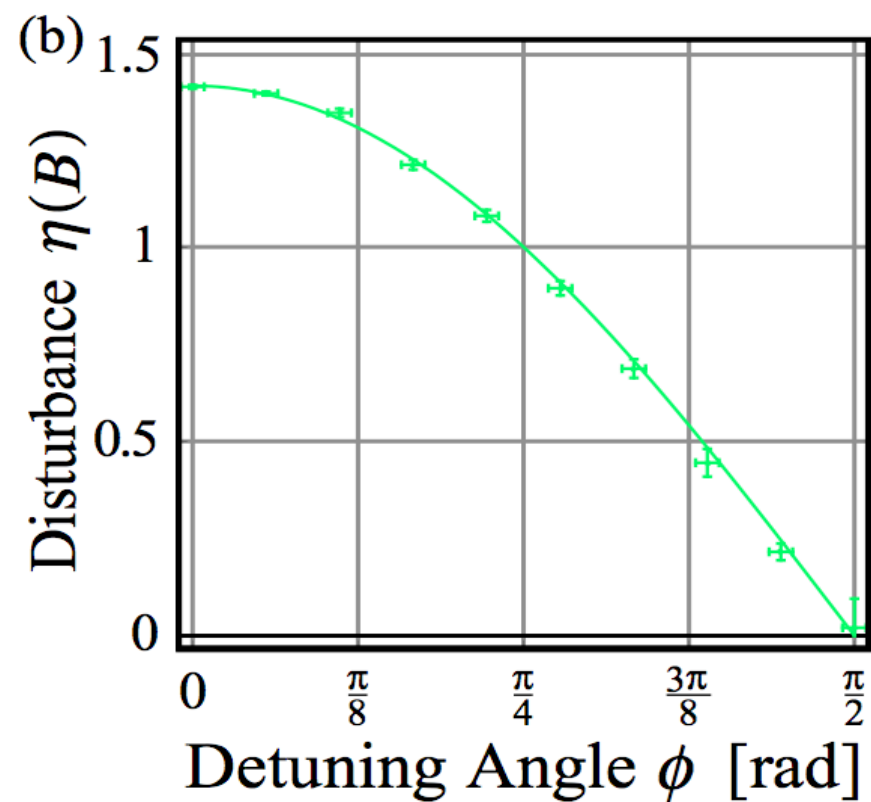
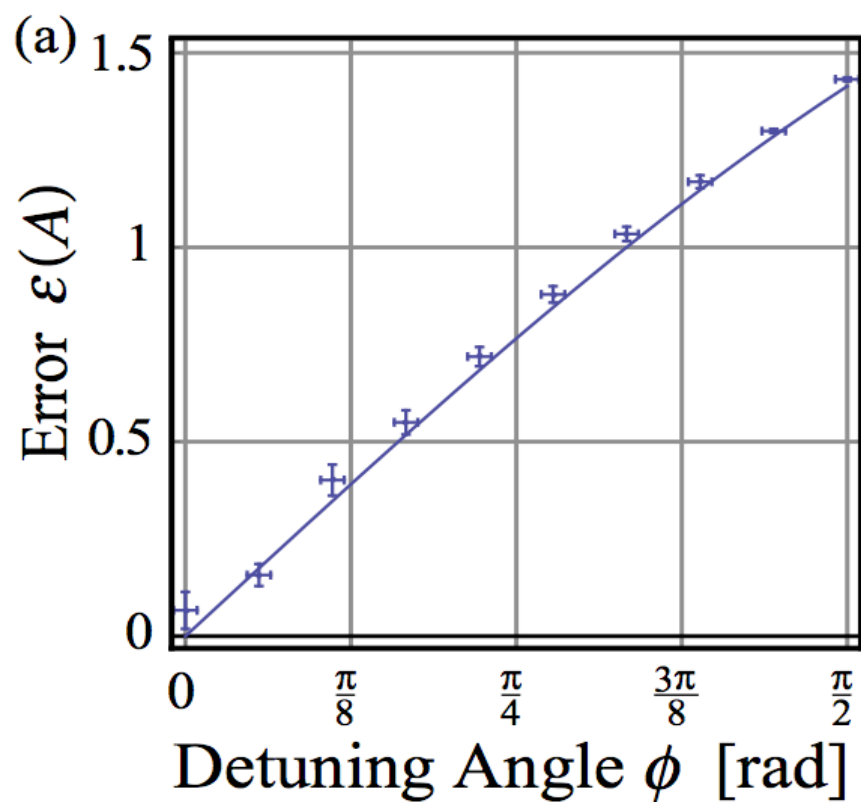
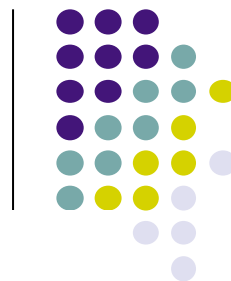
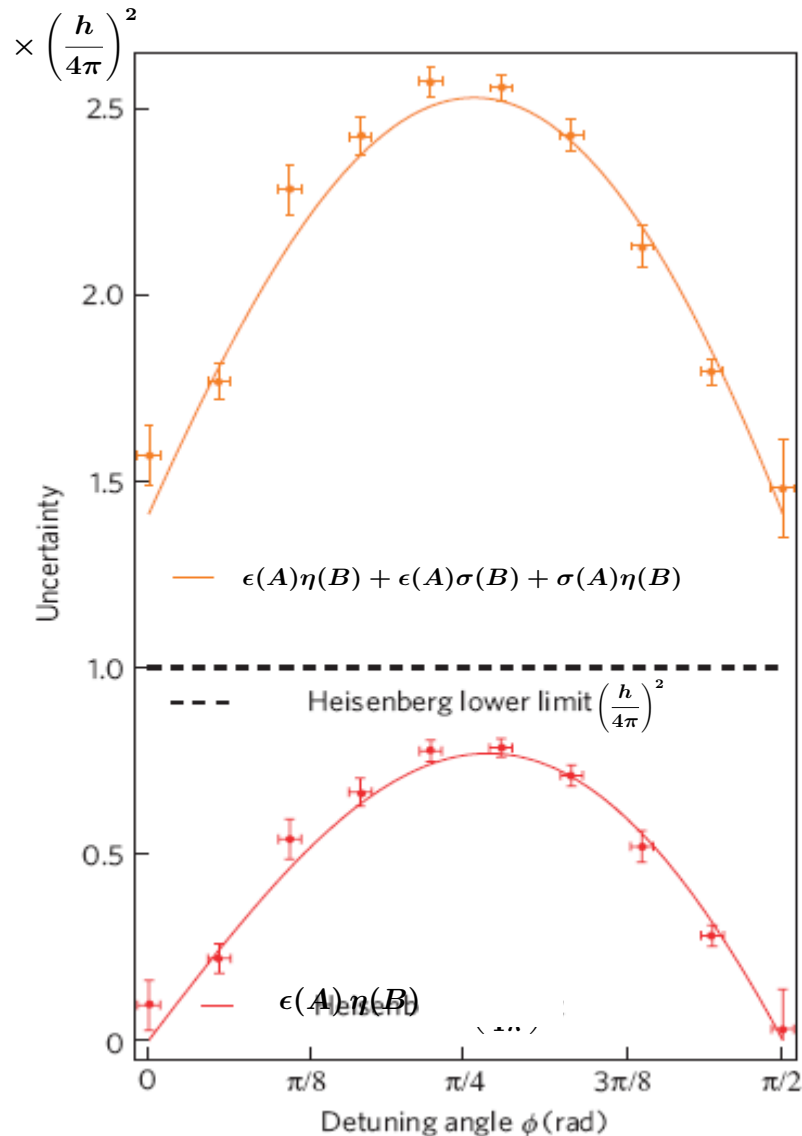


图 4: The trade-off relation between the error and the disturbance.

小澤の不等式とハイゼンベルクの不等式の対照結果



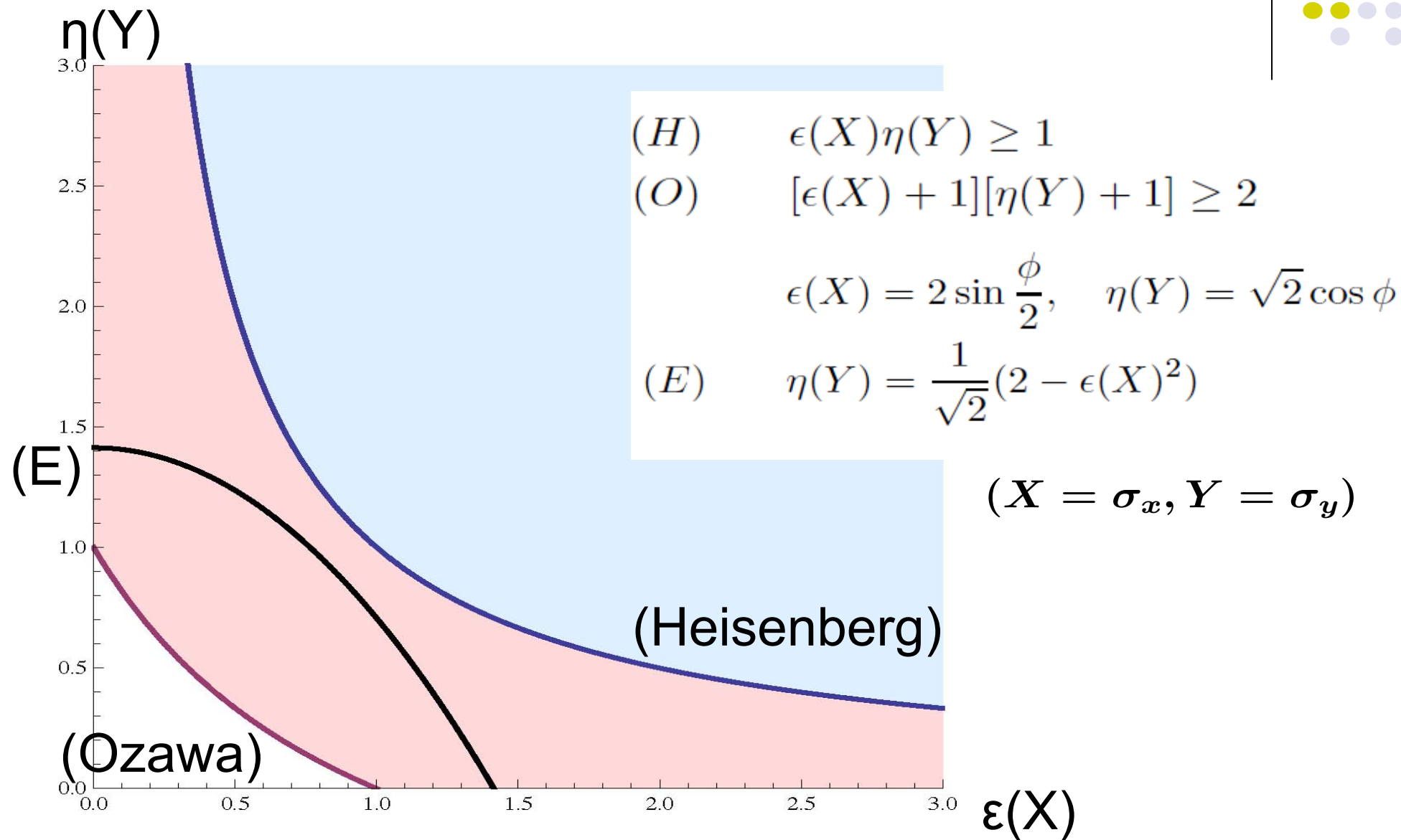
- 小澤の不等式は成立

$$\epsilon(A)\eta(B) + \epsilon(A)\sigma(B) + \sigma(A)\eta(B) \geq \left(\frac{h}{4\pi}\right)^2$$

- ハイゼンベルクの不等式は不成立

$$\epsilon(A)\eta(B) < \left(\frac{h}{4\pi}\right)^2$$

スピンの測定における 小澤の不等式とハイゼンベルクの不等式の比較



実験的検証:論文発表

nature
physics

LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 15 JANUARY 2012 | DOI: 10.1038/NPHYS2194

Experimental demonstration of a universally valid error-disturbance uncertainty relation in spin measurements

Jacqueline Erhart¹, Stephan Sponar¹, Georg Sulyok¹, Gerald Badurek¹, Masanao Ozawa² and Yuji Hasegawa^{1*}

物理の根幹 新たな数式



小澤正直
名古屋大学教授

不確定性原理 名大教授の予測、実証

科学の根幹にある量子力学の「不確定性原理」を示す数式を書き換える。名古屋大の小澤正直教授らの研究チームが、この原理の根幹にある数式を、これまで量子力学の根本的な原理として受け取られていた「不確定性原理」の式と置き換えることができた。小澤教授は「今後、新しい量子力学が生まれる」と予測している。量子力学の根幹にある数式を置き換えることができた。小澤教授は「今後、新しい量子力学が生まれる」と予測している。量子力学の根幹にある数式を置き換えることができた。小澤教授は「今後、新しい量子力学が生まれる」と予測している。

(朝日1月16日朝刊一面)

(朝日1月23日朝刊科学面)

2012年(平成24年)1月23日 月曜日 13版 科学 32



「原理を鍛える」数式を書き直し
小澤流「不確定」仕分け
「原理を鍛える」数式を書き直し
小澤流「不確定」仕分け

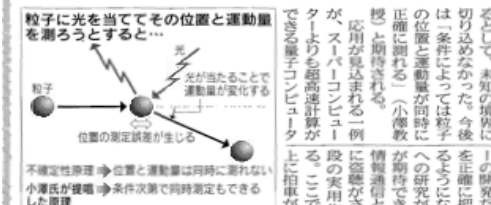
小澤流「不確定」仕分け

「不確定性原理」の矛盾実証
「不確定性原理」の矛盾実証
「不確定性原理」の矛盾実証

「不確定性原理」の矛盾実証

電子や光子のミクロの性質を記述する量子力学は、現在の情報・シグナルトランスポートを生み出す基礎になった。その根幹である不確定性原理の修正を導く小澤正直名古屋大学教授らの成果は、ミクロの世界を制御する新技術につながる期待が大きい。(一画)

次世代技術を後押し



不確定性を表現する新旧の式
位置の誤差(Δq)と運動量の誤差(Δp)について
「位置」と「運動量」は同時に測れない
小澤の式
Δq × Δp + Δq × Δp + Δq × Δp ≥ 一定値
この2つの項が付け加えられた
→「位置」と「運動量」が同時に測れない場合もある
(ΔqとΔpは位置や運動量の値のばらつきをあらわす)

「原理を鍛える」数式を書き直し
小澤流「不確定」仕分け
「原理を鍛える」数式を書き直し
小澤流「不確定」仕分け

(日経1月16日朝刊)

盗聴されない暗号通信 スパコン上回る計算機

識者のコメント

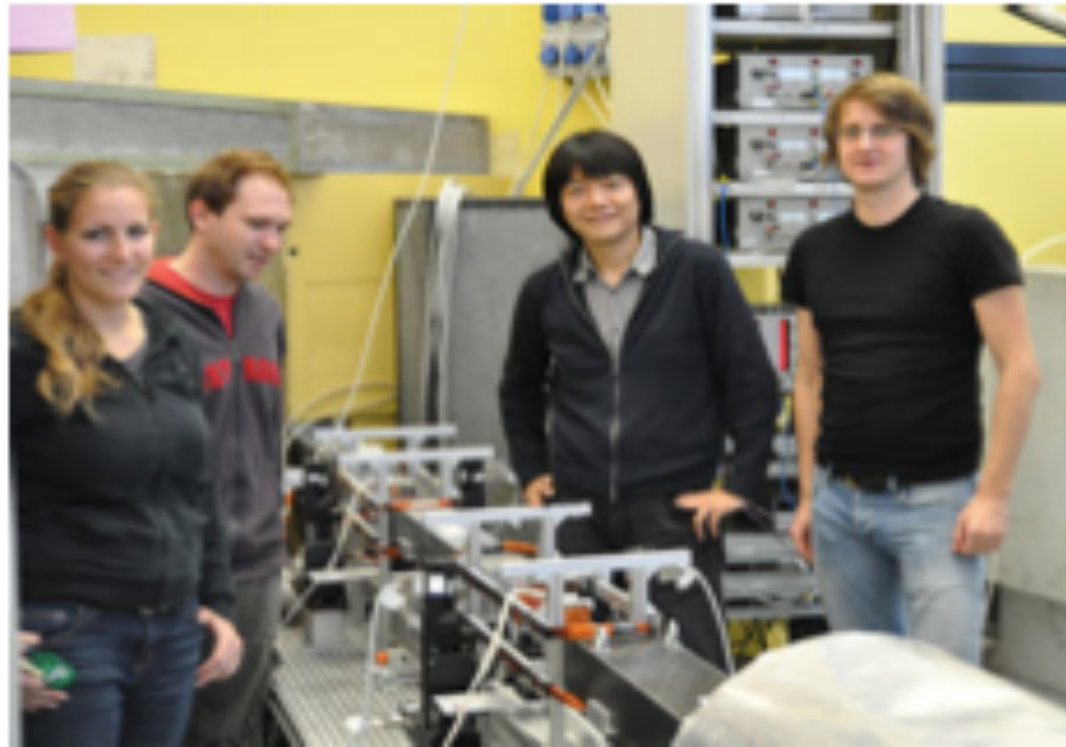
細谷隆夫 東京工業大学教授
「不確定性原理」の矛盾実証
「不確定性原理」の矛盾実証

測定・実験方法 見直しの契機

「不確定性原理」の矛盾実証
「不確定性原理」の矛盾実証

Neutrons revive Heisenberg's first take on uncertainty

Jan 20, 2012 [5 comments](#)



Yuji Hasegawa and colleagues disturbing a few neutrons

"This is certainly the first experiment to test Ozawa's formulation, so I think this should draw more attention to Ozawa's formulation, and how it is universally valid unlike a naive Heisenberg measurement-disturbance relation," said Howard Wiseman of Griffith University in Australia.

<http://physicsworld.com/cws/article/news/48378>



Media



**SCIENTIFIC
AMERICAN™**

Permanent Address: <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=common-interpretation-of-heisenbergs-uncertainty-principle-is-proven-false>

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 | Tuesday, September 11, 2012 | 18 comments

BBC NEWS

SCIENCE & ENVIRONMENT

7 September 2012 Last updated at 16:24 GMT

Heisenberg uncertainty principle stressed in new test

By Jason Palmer

Science and technology reporter, BBC News

Pioneering experiments have cast doubt on a founding idea of the branch of physics called quantum mechanics.



Quantenphysik

Der große Heisenberg irrte 偉大なハイゼンベルクは間違っていた

17.11.2012 · Werner Heisenberg wollte seine berühmte Unbestimmtheitsbeziehung auch in den Störungen wiedererkennen, die eine Messung verursacht. Diesen Schluss haben kanadische Forscher widerlegt.

Von RAINER SCHARF

Die von **Werner Heisenberg** 1927 formulierte **Unschärfebeziehung** ist trotz ihrer Tiefgründigkeit und Abstraktheit das wohl bekannteste Gesetz der Quantenphysik. Sie besagt vereinfacht, dass man nicht gleichzeitig die Geschwindigkeit und den Ort etwa eines Elektrons mit beliebiger Präzision bestimmen kann. Für die Popularität dieses Gesetzes hat vor allem eine ebenfalls von Heisenberg stammende bildhafte Erläuterung



Werner Heisenberg und seine Unschärferelation sind sogar auf einer Briefmarke verewigt

2003年、名古屋大学の小澤正直は、ハイゼンベルクが信じていたほど状況は単純ではないと疑った。

小澤が疑ったことは、トロント大学のAephraim Steinberg周辺の物理学者によって実験的に確認されました。

平均擾乱と測定誤差は、小澤正直が設定した不等式を満たしていました。

Unschärfebeziehung in Einklang steht. Dass die Sachlage nicht so ganz einfach ist, wie Heisenberg glaubte, vermutete im Jahr 2003 bereits **Masanao Ozawa** von der Universität Nagoya.

Was Ozawa vermutete, haben die Physiker um **Aephraim Steinberg** von der University of Toronto jetzt experimentell bestätigt.

Unschärferelation hier anwenden. Doch das ist offensichtlich nicht der Fall. Vielmehr erfüllten die gemittelte Störung und die Unschärfe der Messergebnisse jene Ungleichung, die Masanao Ozawa aufgestellt hatte.



将来展望

- 新しい量子物理学：
 - 量子測定理論の発展。量子情報科学の発展。
 - 新しい量子不確定性制御の展開。
 - 測定誤差の計測方法の確立。
- 新しい技術：
 - ナノサイエンスにおける精密測定技術
 - 超精密測定技術＝重力波検出，GPS等
 - 量子情報技術
 - 量子暗号（盗聴検知が可能な秘匿性通信）
 - 量子計算（誤り訂正の限界の確定）
- 未来の日常生活の革新：
 - インターネットセキュリティ
 - 次世代超高速計算