

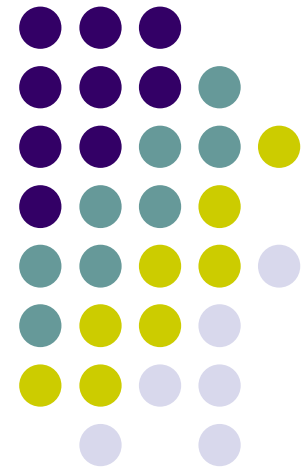
文部科学記者会 2012年1月13日 (金)

現代物理学の根幹である不確定性原理の 破れを観測

— ナノの世界の深淵を語る基本原理に穴 —

名古屋大学 大学院情報科学研究科 教授
小澤 正直

ウィーン工科大学 原子核研究所 准教授
長谷川 祐司





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。



重力波検出限界を巡る論争の解決(1988年)

- 1980, Caves 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
- 1988, Ozawa: 標準量子限界を打破する測定法を発見＝論争を解決
 - Nature 誌 News and Views で報道
- 以後, 干渉計型検出方式が主流になって現在に至る





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?

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**,

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

ventional 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

defined. Yet 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.



小澤の不等式の発見(2003年)

- 重力波検出限界論争で不確定性原理のハイゼンベルクによる定式化の不備が明らかになった
- 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。

$$\Delta Q \Delta P \geq \frac{h}{4\pi}$$

- 小澤の不等式（成立）： Q と P が同時に測れる場合もある。

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

- プランク定数

$$h = 6.626068 \times 10^{-34} m^2 kg / s$$

- 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



小澤の不等式検証実験のねらい

- 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、 Q, P 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。

小澤の不等式検証実験

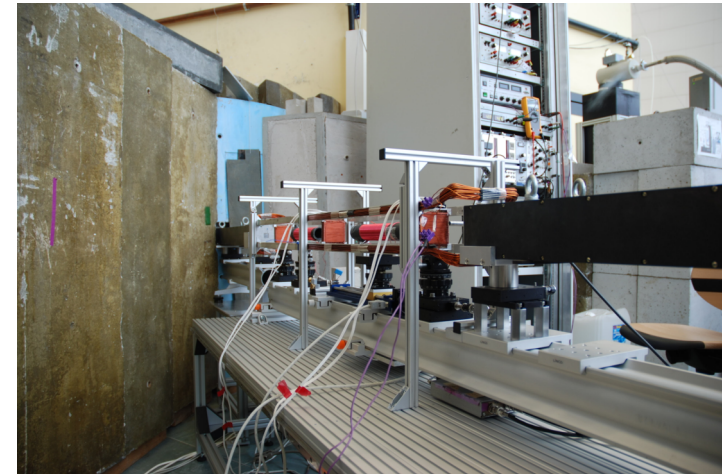
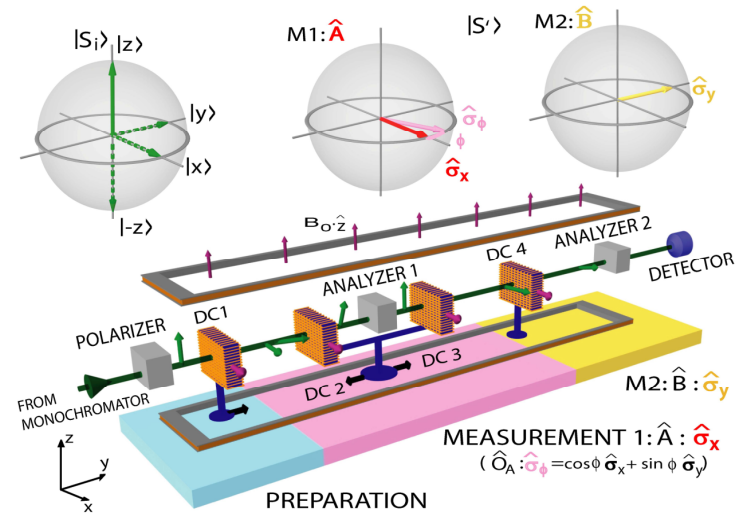


図3 小澤の不等式の検証実験の配置. 入射中性子は, (1) 状態生成[青の領域], (2) 前段の測定($A = \sigma_x$)[ピンクの領域], (3) 後段の測定($B = \sigma_y$)[黄色の領域]を通過する.

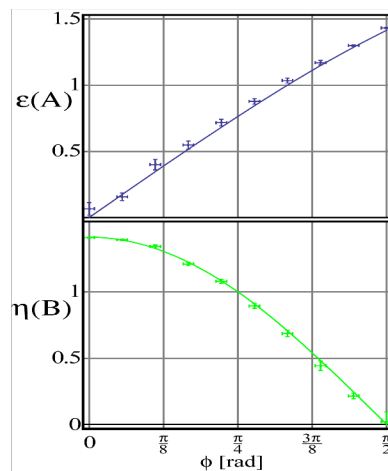


図4 パラメータ ϕ に対する前段の測定誤差 [$\epsilon(A)$](上段)と後段の測定の擾乱 [$\eta(B)$](下段)。

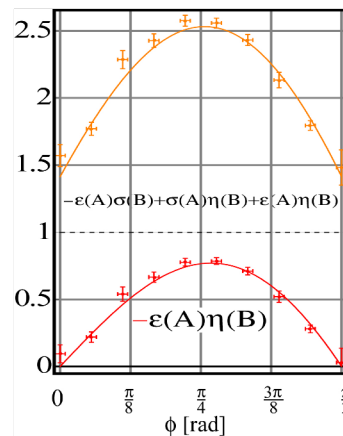
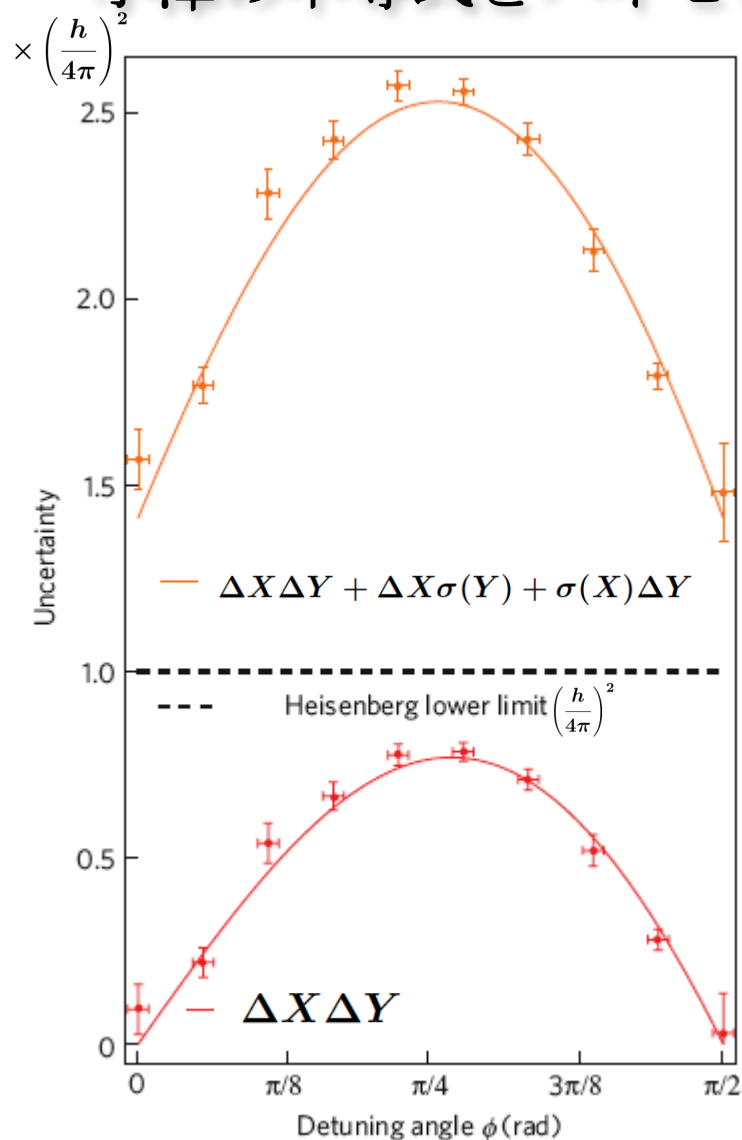


図5 小澤の不等式の和(オレンジ)とハイゼンベルク不等式の積(赤)。





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:

$$\Delta X \Delta Y + \Delta X \sigma(Y) + \sigma(X) \Delta Y \geq \left(\frac{h}{4\pi}\right)^2$$

- ハイゼンベルクの不等式は不成立:

$$\Delta X \Delta Y < \left(\frac{h}{4\pi}\right)^2$$



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。量子度量衡学。
 - 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