

猫の笑いと裸の中性子

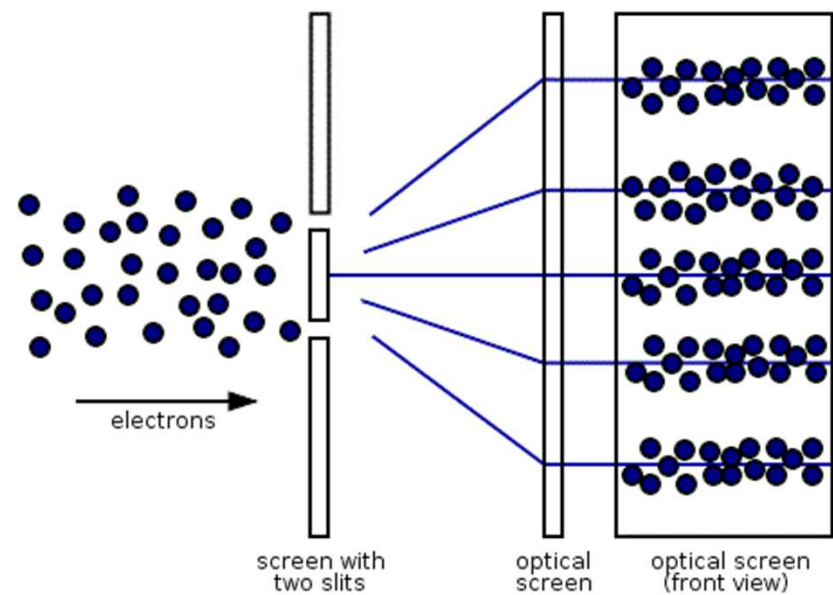
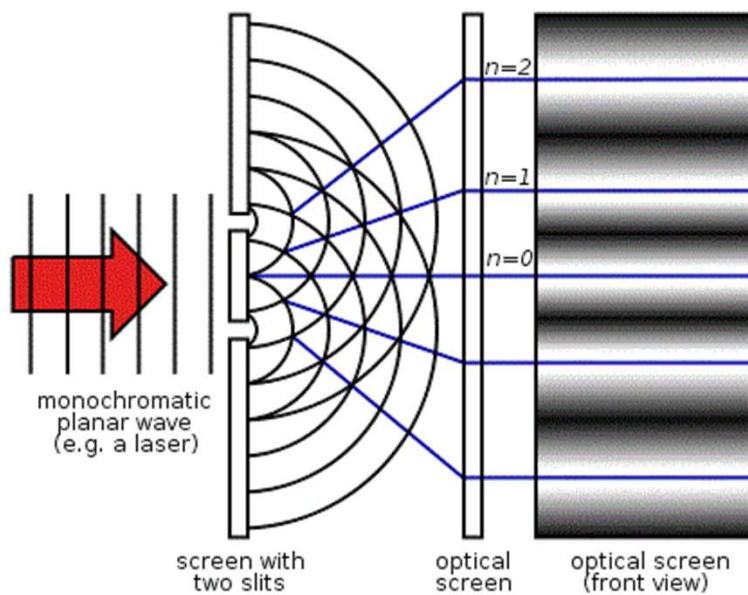
—量子干渉実験の挑戦—

長谷川 祐司

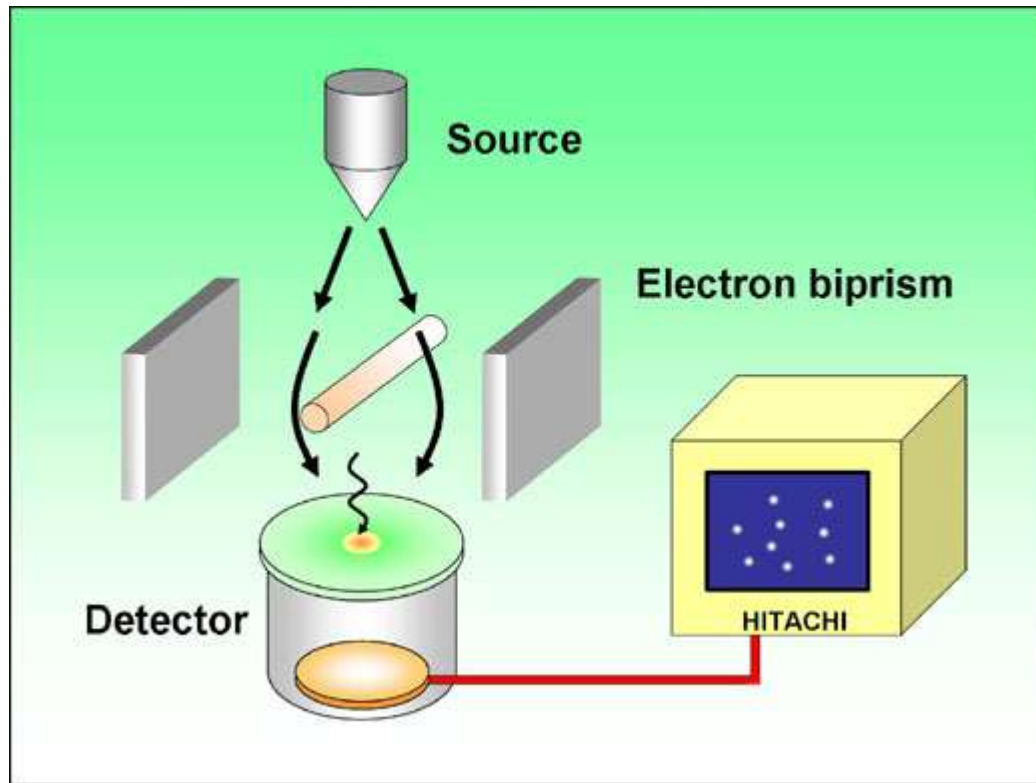
Atominsitut, TU-Wien, Austria

- I. はじめに
- II. 誤差と擾乱の不確定性関係
- III. 量子チェシャ猫
- IV. まとめ

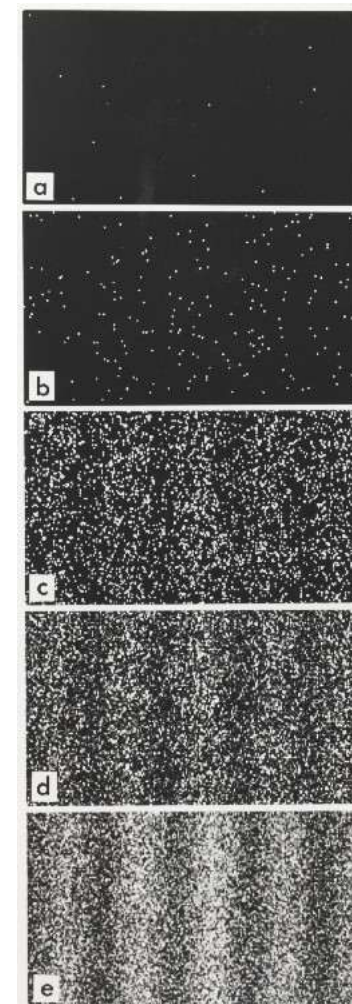
古典力学/量子力学における干渉



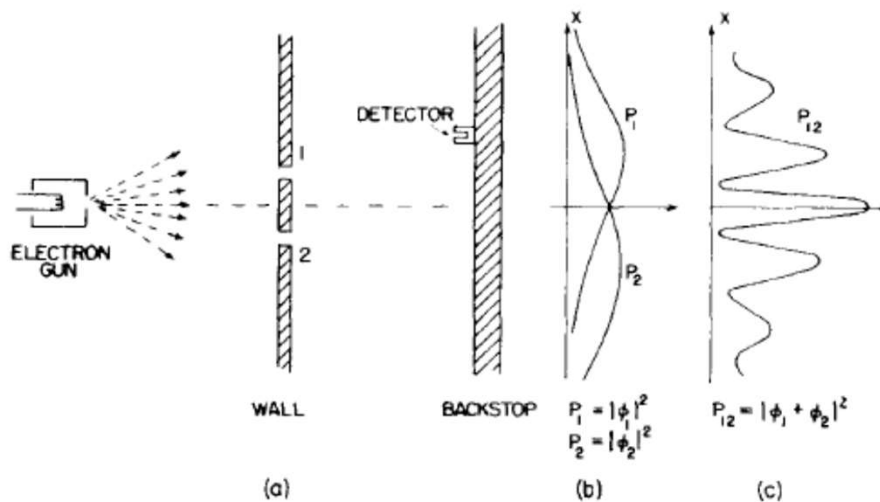
電子を使った二重スリット実験



日立：研究開発より

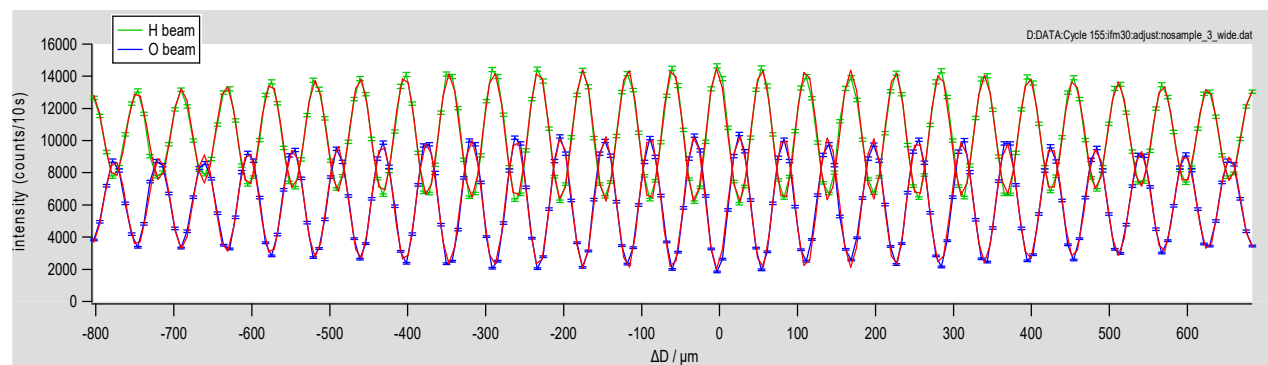
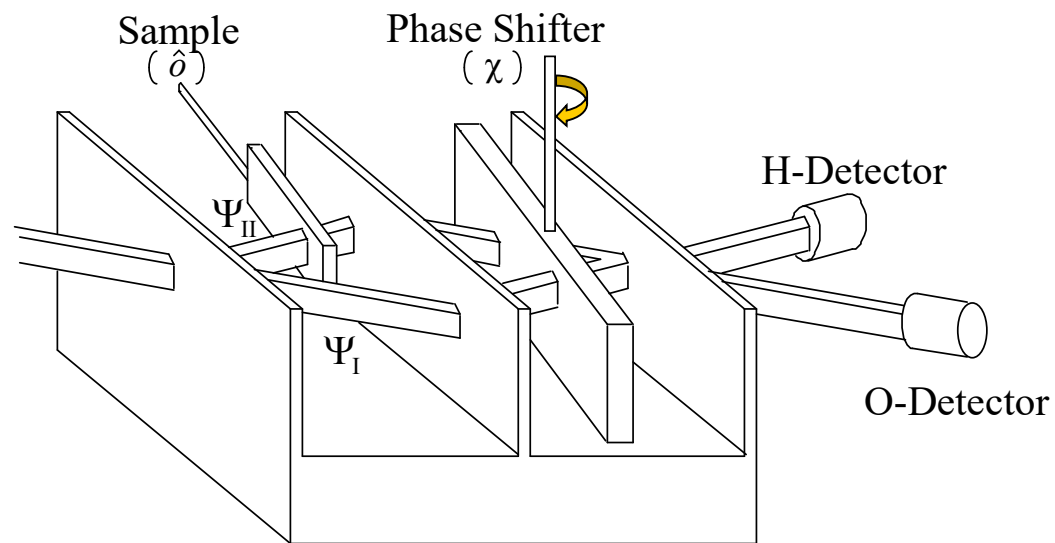


二重スリット実験: ファインマン レクチャー

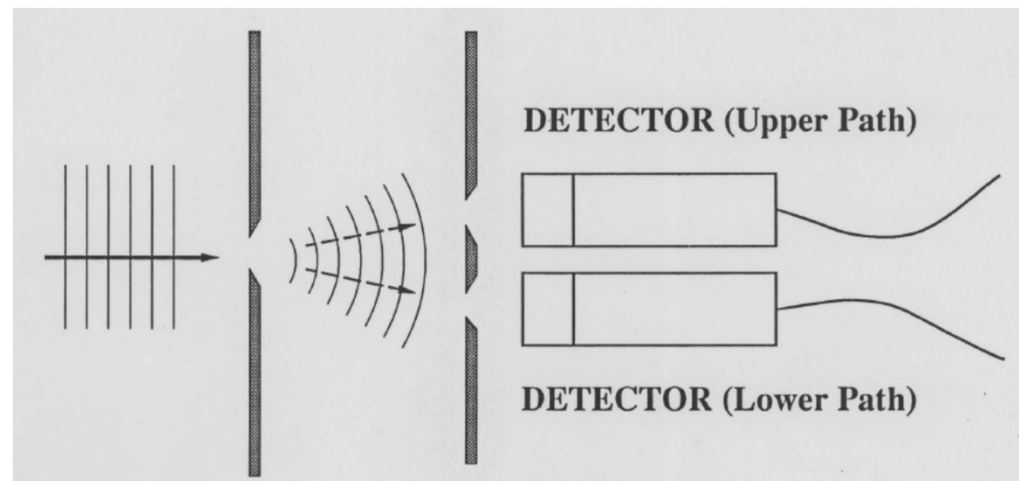
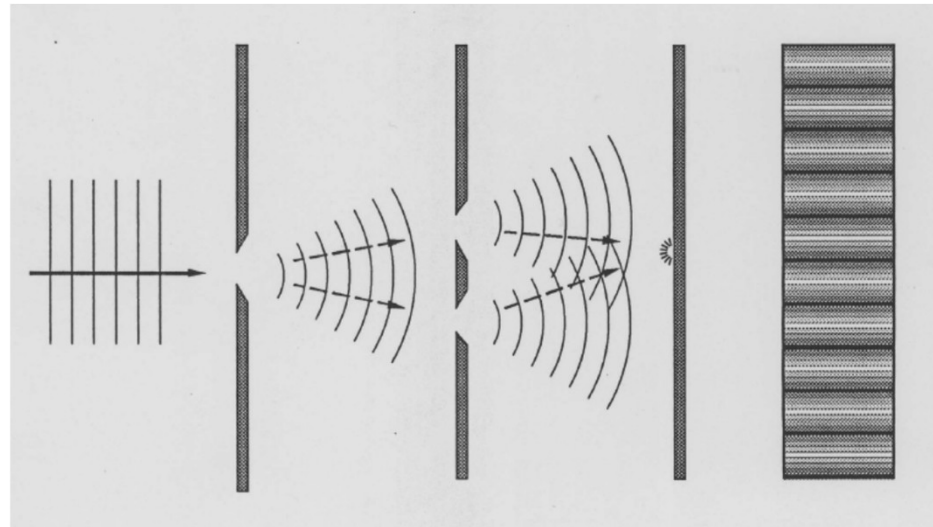


In this chapter we shall tackle immediately the basic element of the mysterious behavior in its most strange form. We choose to examine a phenomenon which is impossible, *absolutely* impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the *only* mystery. We cannot make the mystery go away by “explaining” how it works. We will just *tell* you how it works. In telling you how it works we will have told you about the basic peculiarities of all quantum mechanics.

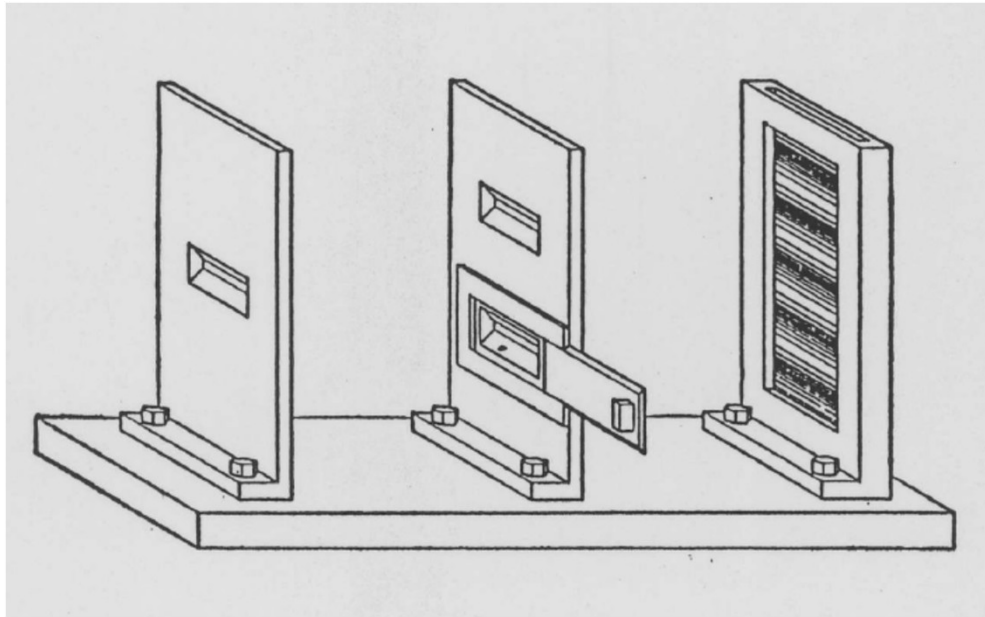
中性子干渉計



ボーア・アインシュタイン論争1: 波動と粒子の二重性

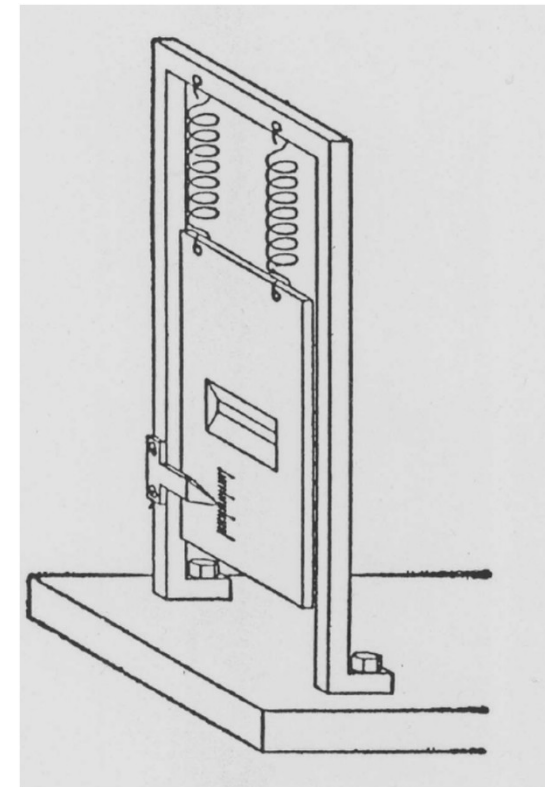


ボーア・アインシュタイン論争2: which-way 検出器

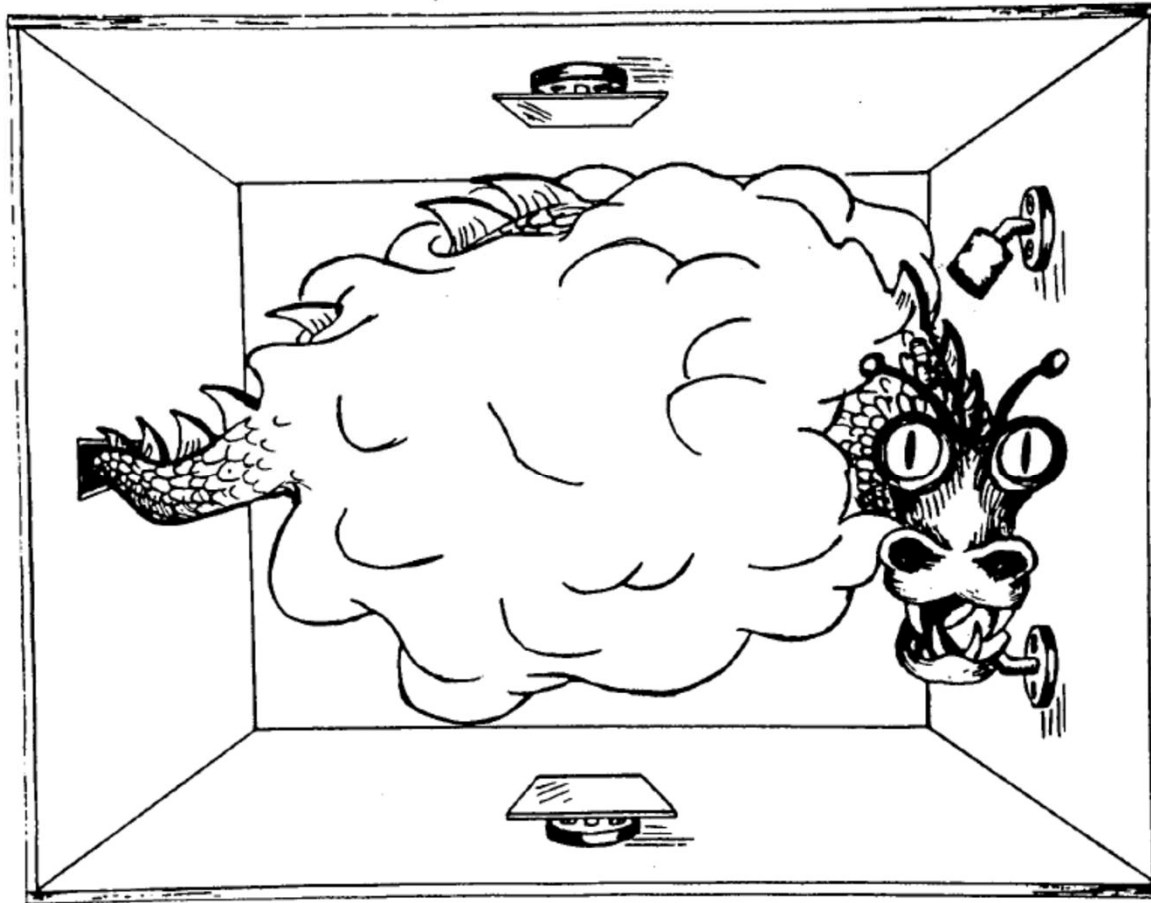
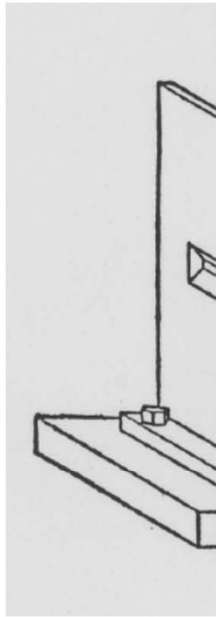


Double-slit experiment

Momentum detector



ボーア・アインシュタイン論争2: which-way 検出器



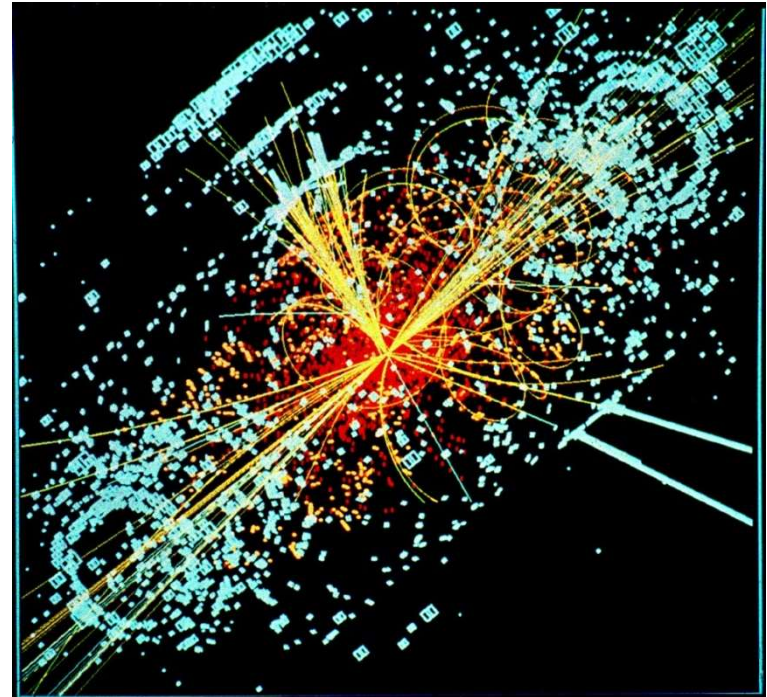
ector

Smoky dragon by J.A. Wheeler

量子測定1

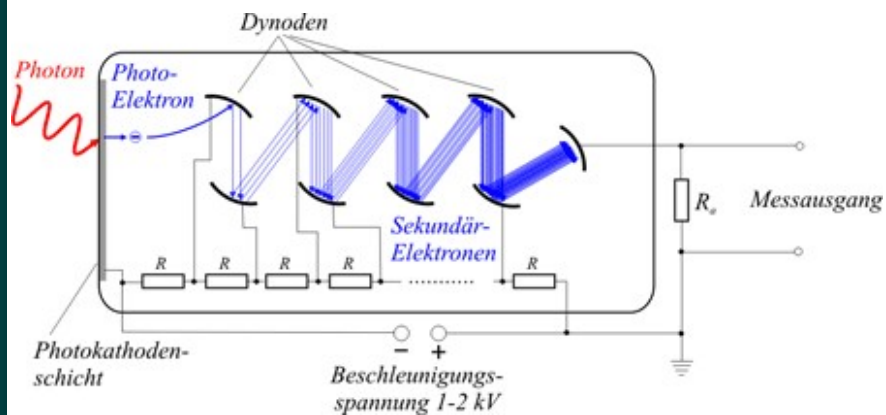


Classical apparatus
<continuous „value“>



Quantum apparatus
<discrete as particle>

量子測定2



Absorption(demolition) → Amplification → Signal (pulse)

量子の不思議な世界 1 : シュレディンガーの猫

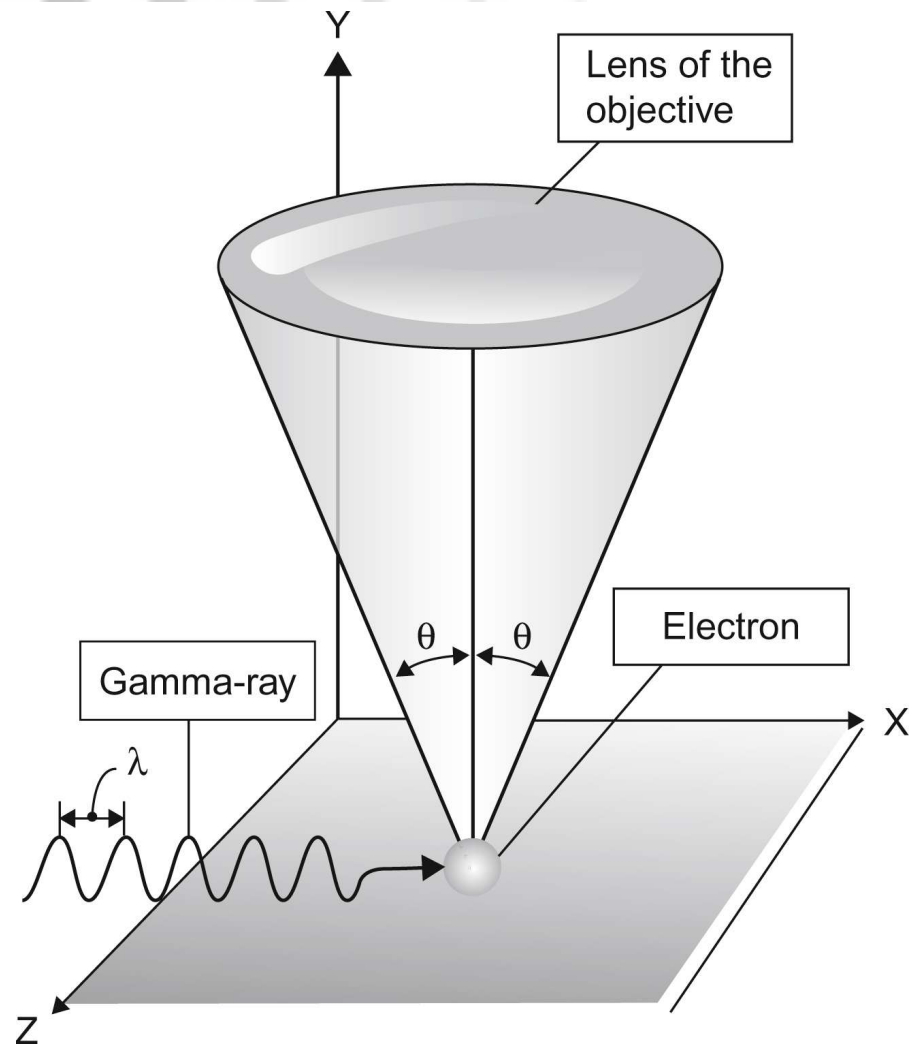


観測者の役割？

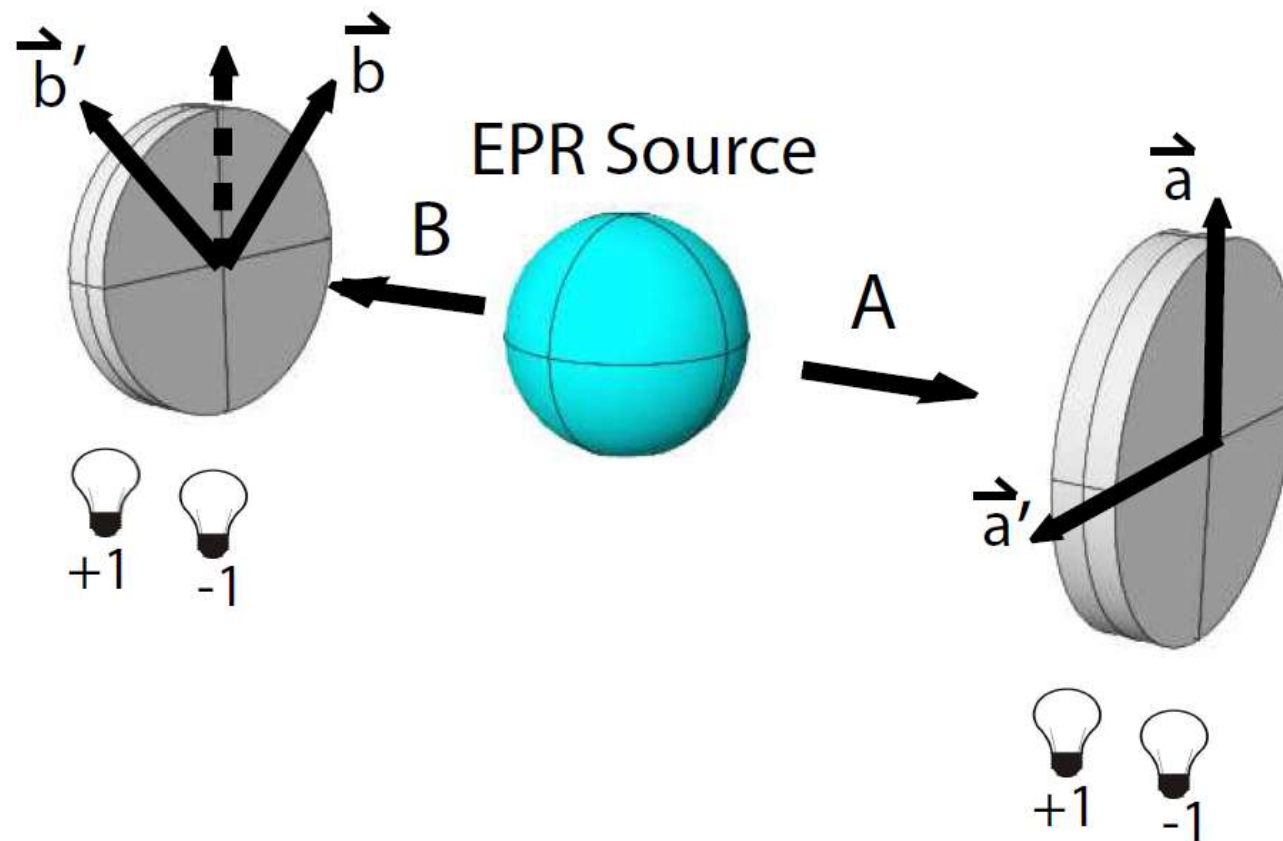
量子の不思議な世界2：ハイゼンベルクの不確定性原理

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

相補的な物理量

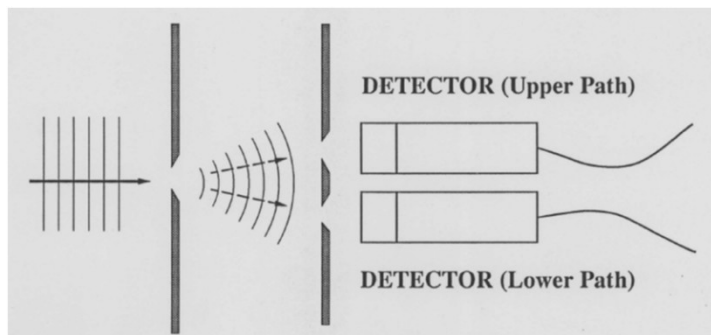
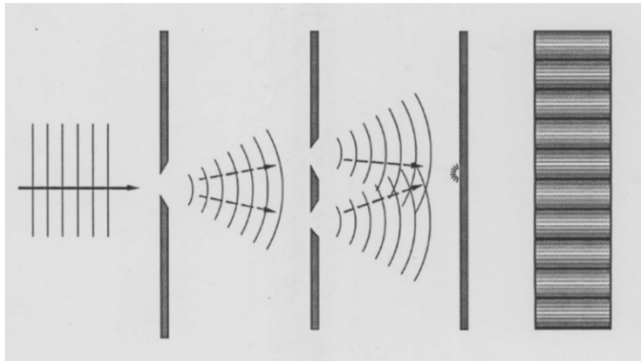


量子の不思議な世界 3 : アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼン (EPR) パラドックス

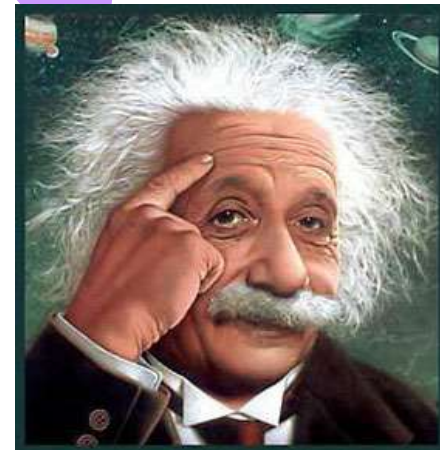


局所性を越えた相関

量子力学って正しいの? 1

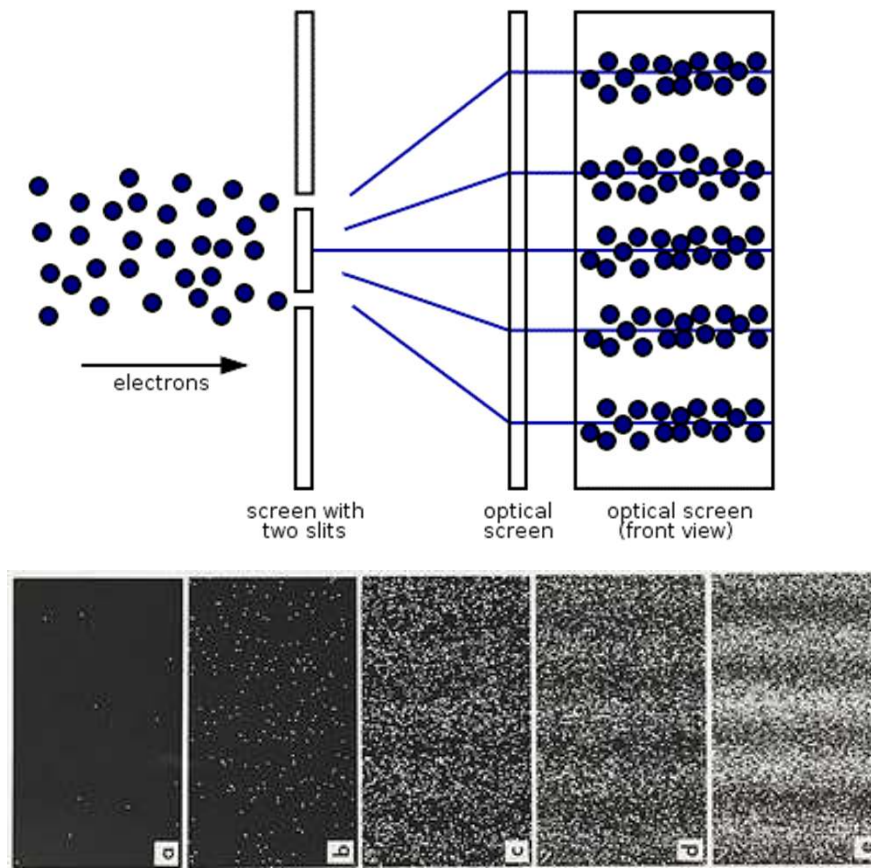


Is the moon there,
when nobody looks?

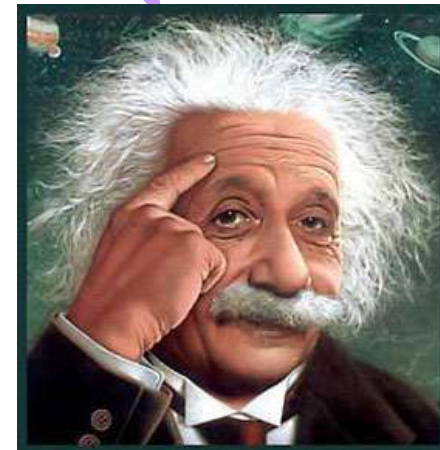


Results depends on how it is measured !!

量子力学って正しいの? 2

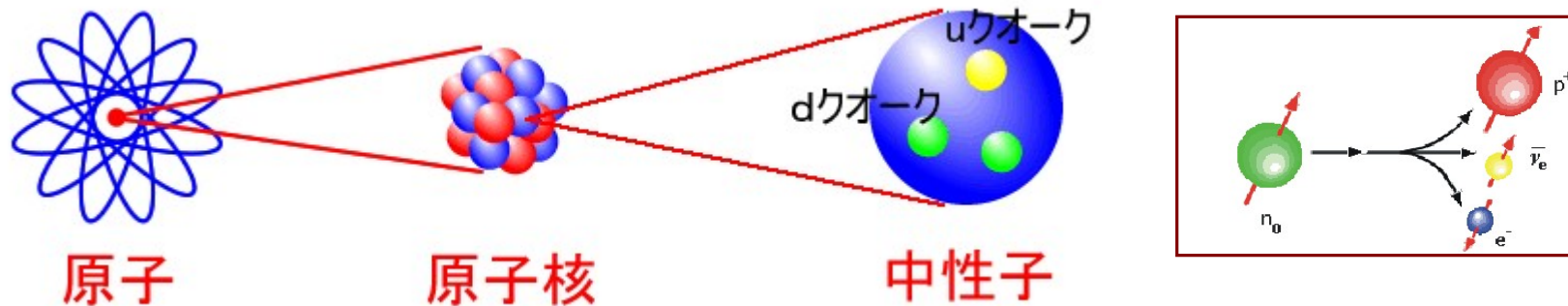


God does not
play dice !



Predictions are always statistical !!

中性子：ナノの世界の伝達者



粒子的な性質

$$m = 1.674928(1) \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$s = \frac{1}{2}\hbar$$

$$\mu = -9.6491783(18) \times 10^{-27} \text{ J/T}$$

$$\tau = 885.7(0.8) \text{ s}$$

u - d - d クォーク構造

m 質量, s スピン, μ 磁気モーメント,
 τ β -崩壊寿命

波動的な性質

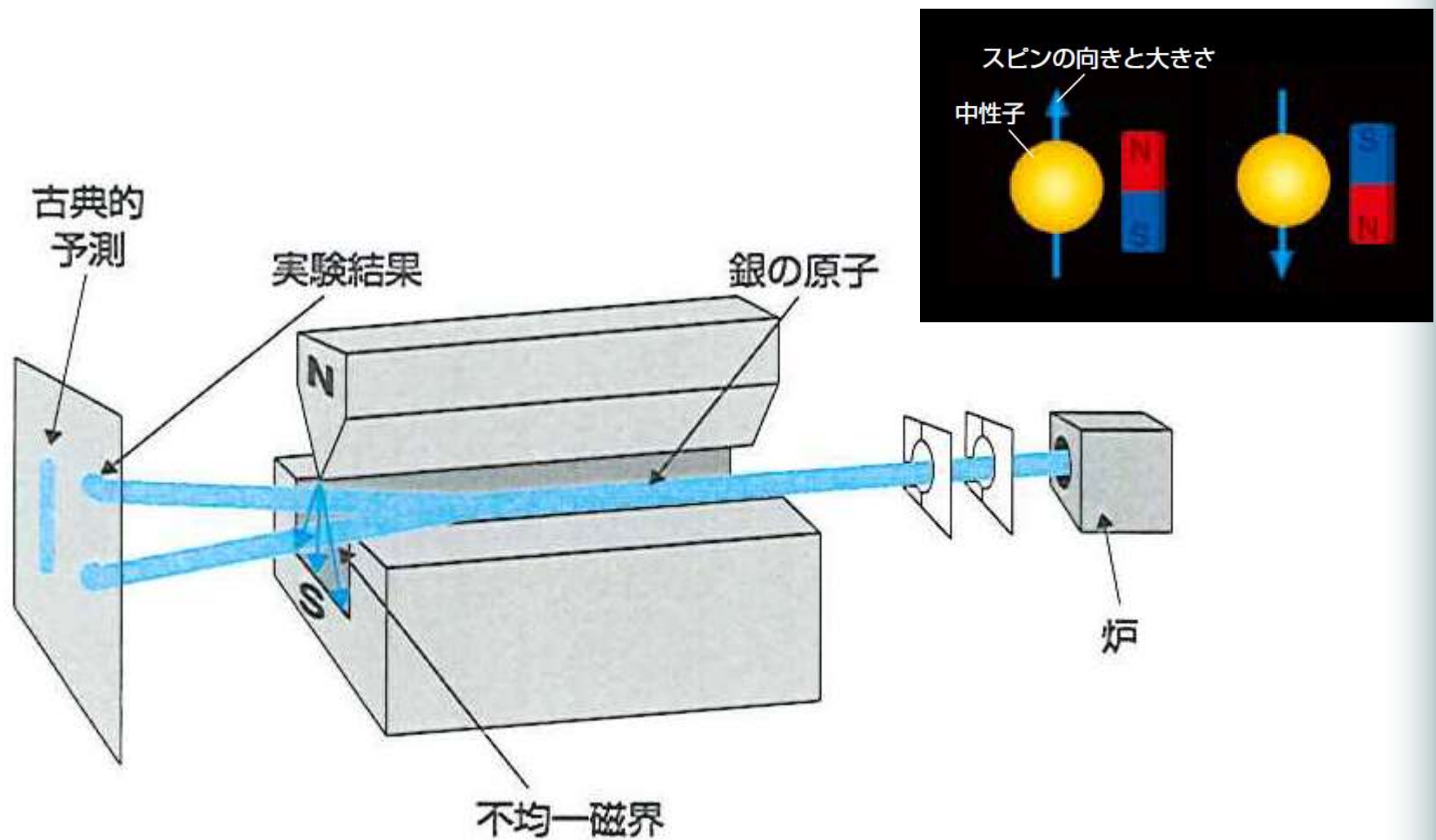
$$\lambda_c = \frac{h}{mc} = 1.319695(20) \times 10^{-15} \text{ m}$$

$$\lambda = 1.8 \text{ \AA}, v = 2200 \text{ m/s} \quad (\text{熱中性子})$$

$$\lambda_B = \frac{h}{mv} = 1.8 \times 10^{-10} \text{ m}$$

λ_c コンプトン波長, λ_B ド・ブロイ波長,
v 速度

中性子のスピン：Stern-Gerlach実験



中性子干渉計 1

Neutrons

$$m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

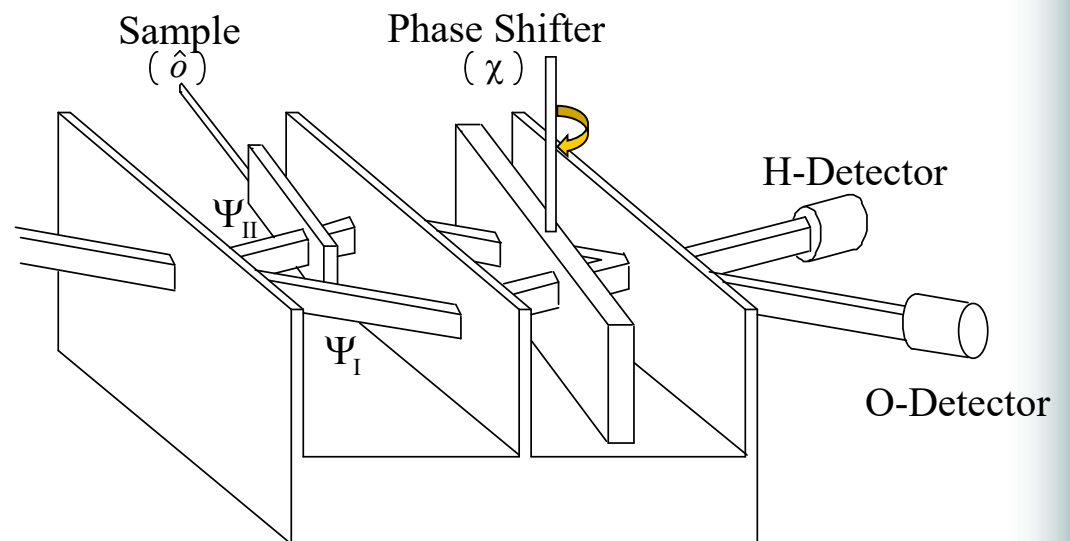
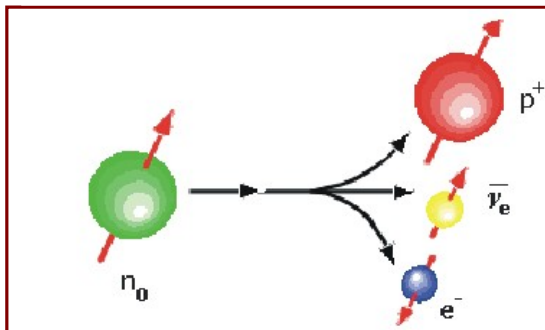
$$s = \frac{1}{2} \hbar$$

$$\mu = -9.66 \times 10^{-27} \text{ J/T}$$

$$\tau = 887 \text{ s}$$

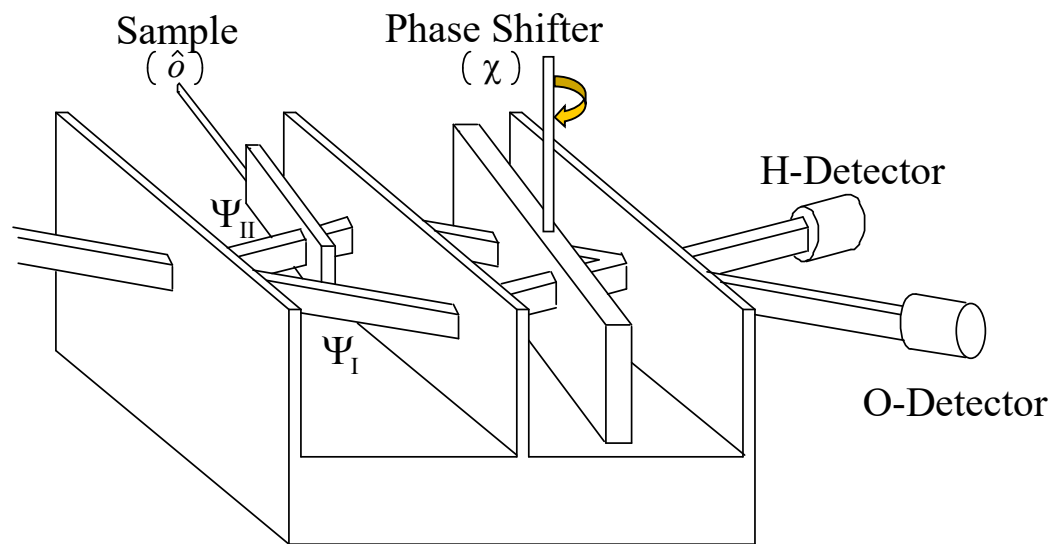
$$R = 0.7 \text{ fm}$$

u-d-d quark structure

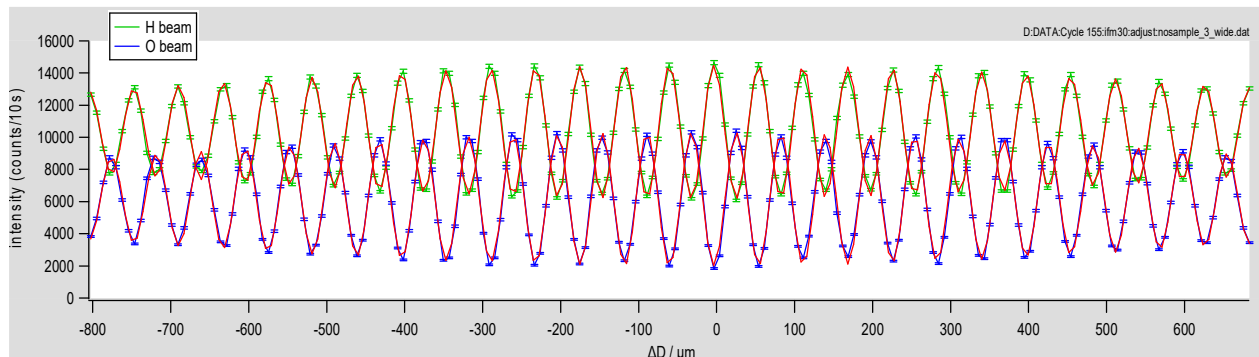


$$I = |\Psi_I + e^{i\chi} \cdot \hat{o} \cdot \Psi_{II}|^2$$

中性子干渉計 2



The New Yorker Collection, Ch.Adams 1940



量子系としての中性子

Particle and wave properties

$$p = mv = h/\lambda$$

(L. De Broglie)

Schroedinger equation

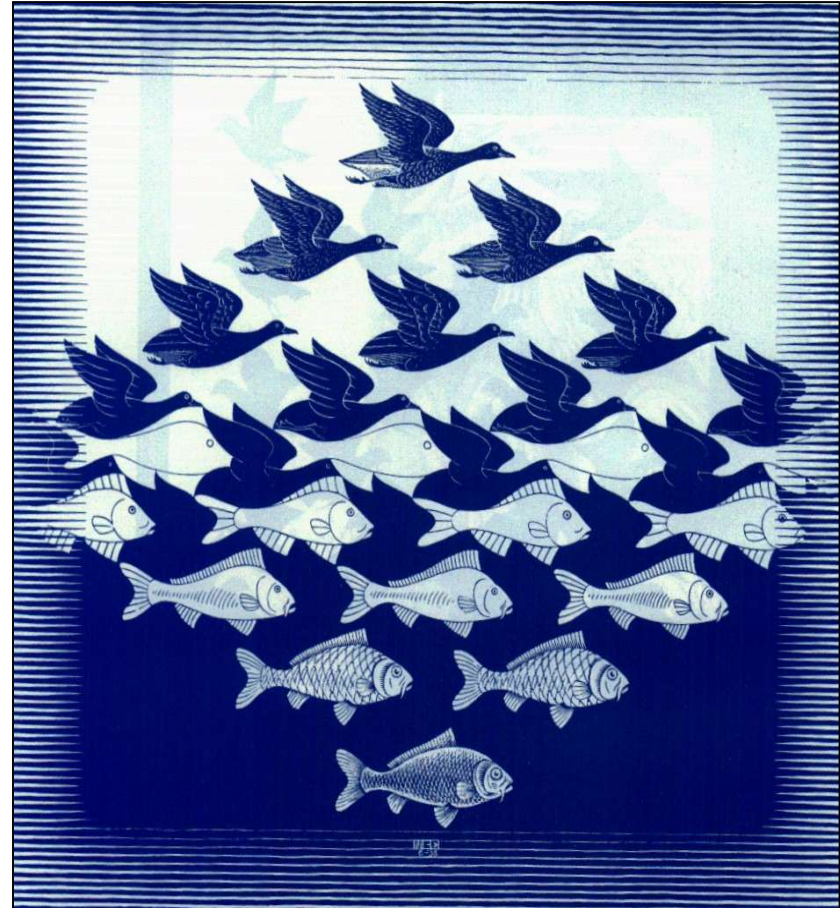
$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = H\Psi(\vec{r}, t)$$

(E. Schrödinger)

Uncertainty

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$

(W. Heisenberg)



中性子干渉実験 1: 1/2スピンの4π対称性

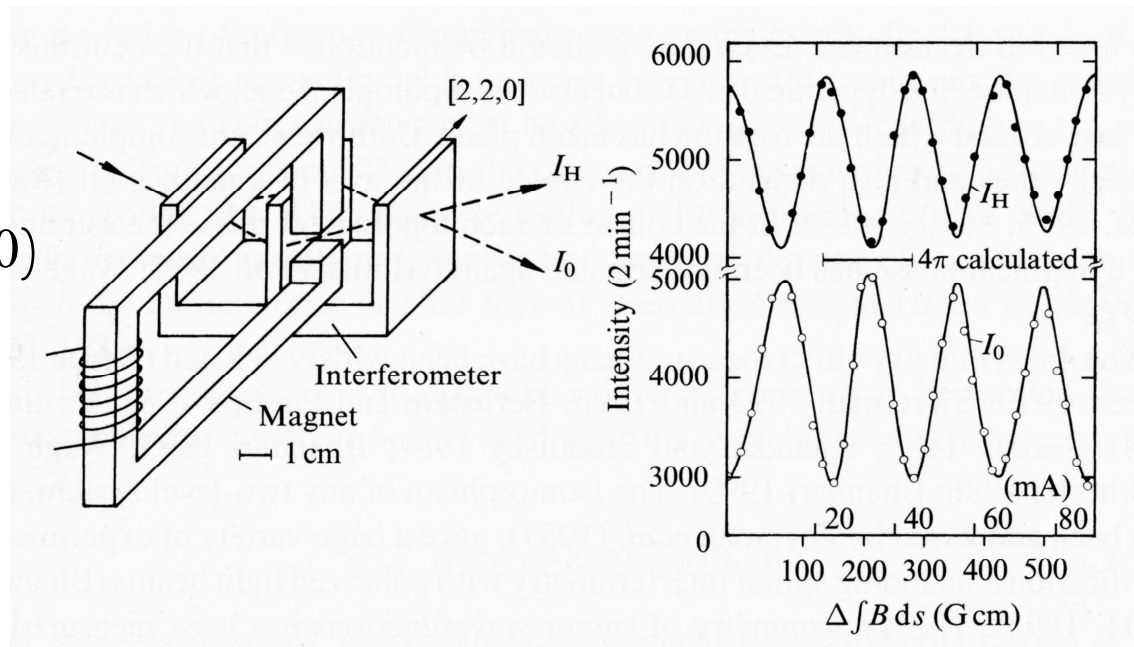
Hamiltonian

$$\hat{H} = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} = -\mu \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B}$$

Wave function

$$\begin{aligned} \Psi(t) &= \exp[-iHt/\hbar] \cdot \Psi(0) \\ &= \exp[-i\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}t/\hbar] \cdot \Psi(0) \\ &= \exp[-i\boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\alpha}/2] \cdot \Psi(0) \end{aligned}$$

$$\text{Where } \boldsymbol{\alpha} = \frac{2\boldsymbol{\mu}}{\hbar} \int \mathbf{B} dt$$



Experiment: H.Rauch, A.Zeilinger, G.Badurek, A.Wilfing, W.Bauspiess, U.Bonse, *Phys.Lett.* 54A(1975)425
 S.A.Werner, R.Colella, A.W.Overhauser, C.F.Eagen, *Phys.Rev.Lett.* 35(1975)1053
 A.G.Klein, G.I.Opat, *Phys.Rev.* D11(1976)523
 E.Klempt, *Phys.Rev.* D13(1975)3125
 M.E.Stoll, E.K.Wolff, M.Mehring, *Phys.Rev.* A17(1978)1561

中性子干渉実験 2: 重力ポテンシャルによる位相

Energy of neutron

$$E_0 = \frac{\hbar^2 k_0^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + mgH(\alpha)$$

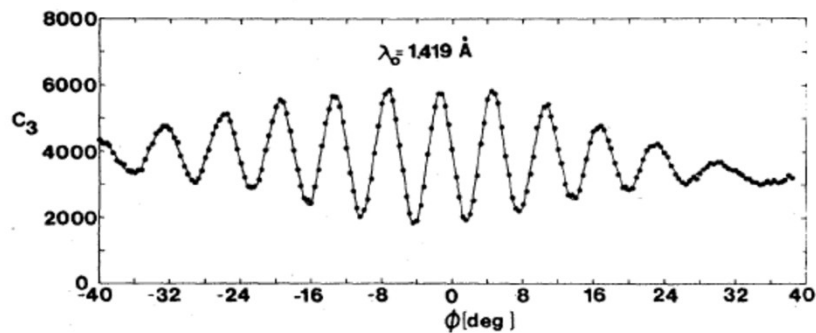
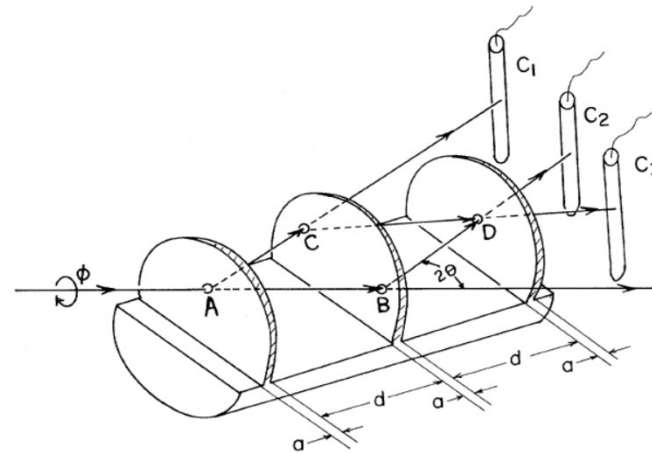
and

$$\Delta k = (k - k_0) \cong -\frac{m^2 g H}{\hbar^2 k_0} \sin \alpha$$

Phase shift

$$\Delta \Phi_{COW} = -2\pi\lambda \frac{m^2}{\hbar^2} g A_0 \sin \alpha$$

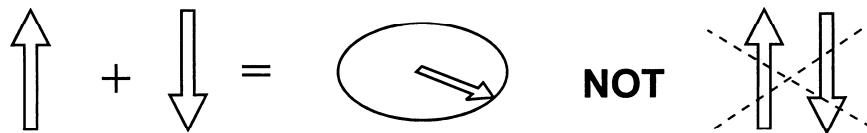
gravitational potential



R. Colella et al., PRL **34** (1975) 1472; J.L. Staudenmann et al., PR A21 (1980) 1419.

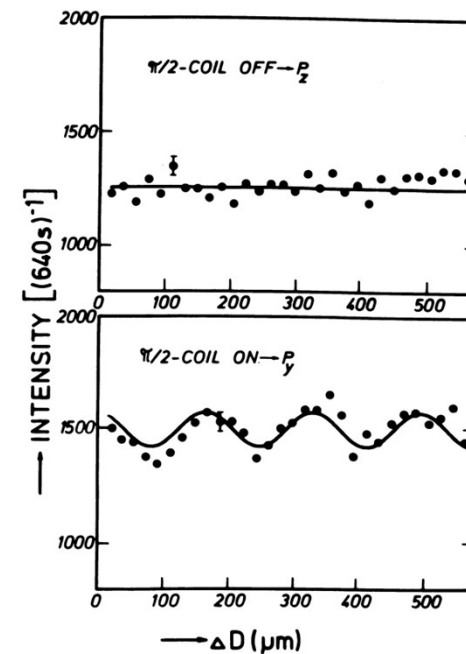
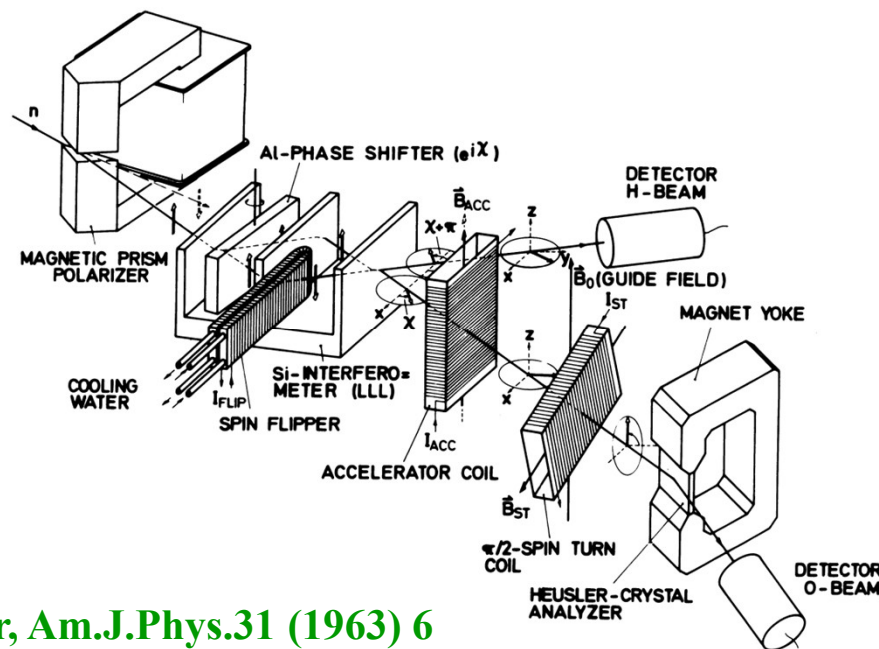
中性子干渉実験 3: スピンの重ね合わせ

"up" "down"



COHERENT SUPERPOSITION

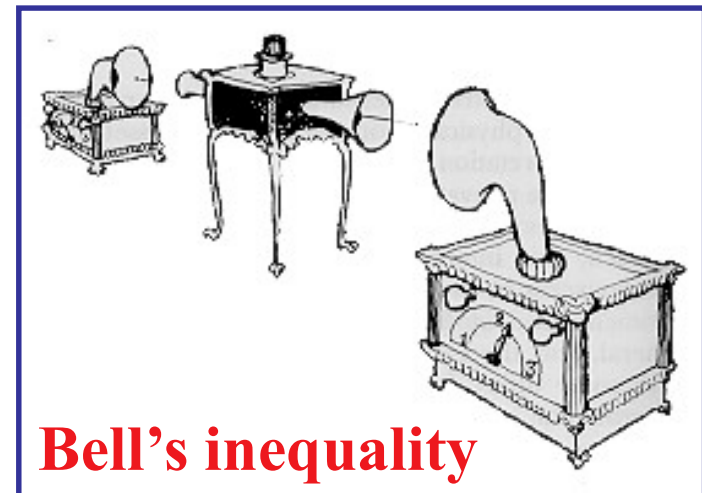
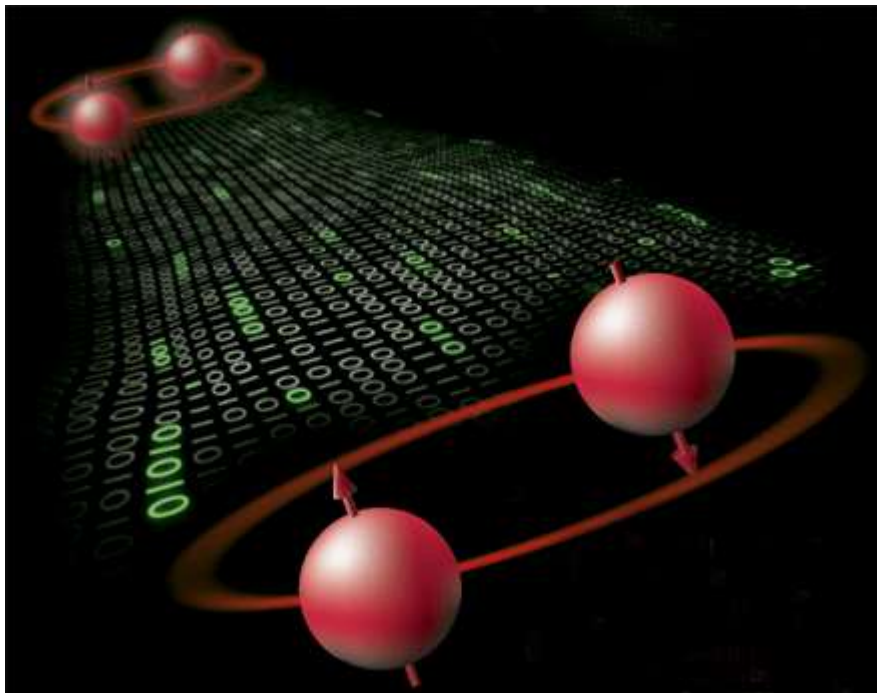
CLASSICAL MIXTURE



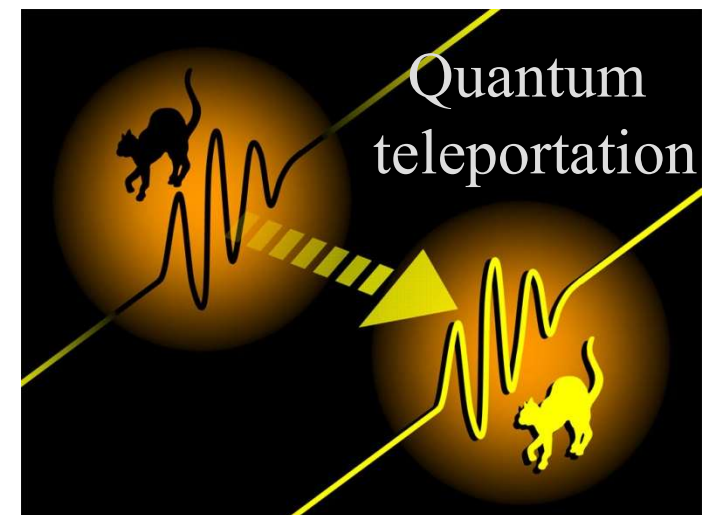
E.P. Wigner, Am.J.Phys.31 (1963) 6

J. Summhammer, G. Badurek, H. Rauch, U. Kischko, Phys.Rev. A27 (1983) 2532

量子情報技術に向けて:



Bell's inequality

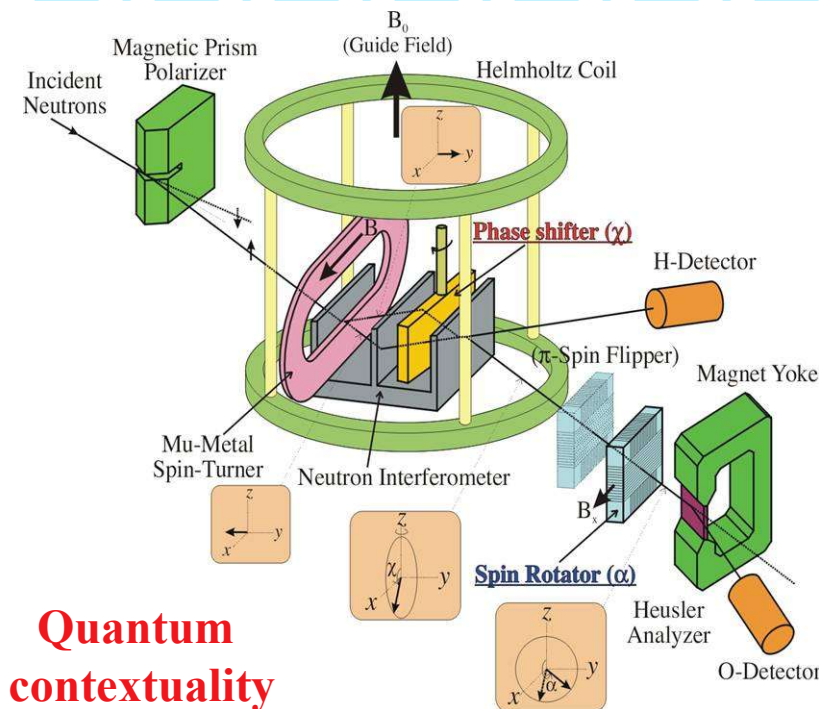


単体中性子における2体、3体のエンタングルメント

2-Particle Bell-State

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |\uparrow\rangle_I \otimes |\downarrow\rangle_{II} + |\downarrow\rangle_I \otimes |\uparrow\rangle_{II} \}$$

I, II represent 2-Particles



**Quantum
contextuality**

2-Space Bell-State

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |\uparrow\rangle_s \otimes |I\rangle_p + |\downarrow\rangle_s \otimes |II\rangle_p \}$$

s, p represent 2-Spaces, e.g., spin & path

Violation of Bell-like inequality

$$S' \equiv E'(\alpha_1, \chi_1) + E'(\alpha_1, \chi_2) - E'(\alpha_2, \chi_1) + E'(\alpha_2, \chi_2) = 2.051 \pm 0.019 > 2$$

Nature2003, NJP2011

Kochen-Specker-like contradiction

$$E_x \cdot E_y = 0.407 \xrightarrow{63\%} E' \equiv \langle \hat{X}_1 \hat{Y}_2 \cdot \hat{Y}_1 \hat{X}_2 \rangle = -0.861$$

PRL2006/2009

Tri-partite entanglement (GHZ-state)

$$|\Psi_{\text{Neutron}}\rangle = \{ |\Psi_I\rangle \otimes |\uparrow\rangle \otimes |\Psi(E_0)\rangle + (e^{i\chi} |\Psi_{II}\rangle) \otimes (e^{i\alpha} |\downarrow\rangle) \otimes (e^{i\gamma} |\Psi(E_0 + \hbar\omega_r)\rangle) \}$$

$$M_{\text{Measured}} = 2.558 \pm 0.004 > 2$$

PRA2010/NJP2013

不確定性原理の欠陥実証

名大教授ら

現代物理学の根幹である「不確定性原理」で、原理的に述べられないとされてきた「測定の精度」をめぐって、名古屋大学（名大）の物理学部教授らと、京都府立大学（京大）の物理学部教授ら、共同で「不確定性原理」の欠陥を実証した。この実証は、物理学の基礎となる「量子力学」の根本的な部分に挑戦するもので、物理学界に大きな衝撃を与えている。

不確定性原理は、電子や原子などの微小粒子の位置と運動の量を同時に正確に測定することは不可能であるという。これは、量子力学の基本原理の一つとして、物理学の基礎となる。しかし、名大教授らと京大教授らは、この原理に欠陥があることを実証した。彼らは、量子力学の基本原理である「波動関数」を用いて、位置と運動の量を同時に測定する方法を開発した。この方法を用いて、電子の位置と運動の量を同時に測定したところ、不確定性原理の予測と一致しない結果が得られた。これは、不確定性原理の欠陥を実証したという。

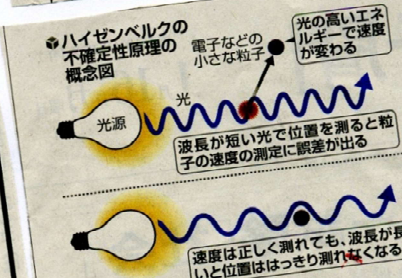
名大教授らは、この実証結果を「現代物理学の常識覆す ナンサイエンスなど応用期待」と題して発表した。この実証結果は、物理学の基礎となる「量子力学」の根本的な部分に挑戦するもので、物理学界に大きな衝撃を与えている。また、この実証結果は、量子力学の応用分野である「量子情報科学」にも大きな影響を与えることが期待されている。

現代物理学の常識覆す ナンサイエンスなど応用期待

現代物理学は、量子力学と相対性理論の2つの柱で成り立っている。量子力学は、微小粒子の振る舞いを説明する理論で、原子や分子の構造や化学反応のメカニズムなどを理解するために不可欠な理論である。相対性理論は、重力や光の速度などを説明する理論で、宇宙の構造やGPSの精度向上などに貢献している。しかし、名大教授らと京大教授らは、量子力学の基本原理である「不確定性原理」に欠陥があることを実証した。これは、現代物理学の常識を覆すもので、物理学界に大きな衝撃を与えている。

「測定精度の壁」破るより普遍的な理論に

名大教授らは、量子力学の基本原理である「不確定性原理」に欠陥があることを実証した。彼らは、量子力学の基本原理である「波動関数」を用いて、位置と運動の量を同時に測定する方法を開発した。この方法を用いて、電子の位置と運動の量を同時に測定したところ、不確定性原理の予測と一致しない結果が得られた。これは、不確定性原理の欠陥を実証したという。



「不確定性原理」の欠陥実証

名古屋大学と京都府立大学の物理学部教授ら、共同で「不確定性原理」の欠陥を実証した。この実証は、物理学の基礎となる「量子力学」の根本的な部分に挑戦するもので、物理学界に大きな衝撃を与えている。

物理の根幹 新たな数式

毎日新聞

量子力学の基本法則

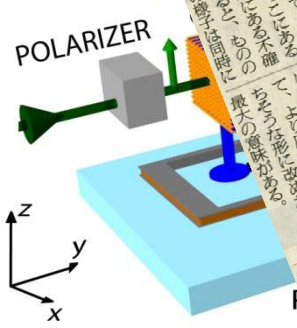
約80年前に提唱されたミクロな世界を説明する量子力学の基本法則「不確定性原理」に、欠陥があることが、名古屋大学と長谷川相司（さし）教授らの研究チームが、世界で初めて実験で発見した。高速の暗写通信技術への応用や教科書の書き換えを迫る成果といえ、15日の英科学誌ネイチャーに掲載された。

不確定性原理

名古屋大学から実証

教科書の書き換え迫る

「不確定性原理」は、量子力学の基本原理の一つとして、物理学の基礎となる。しかし、名大教授らと京大教授らは、この原理に欠陥があることを実証した。これは、現代物理学の常識を覆すもので、物理学界に大きな衝撃を与えている。また、この実証結果は、量子力学の応用分野である「量子情報科学」にも大きな影響を与えることが期待されている。



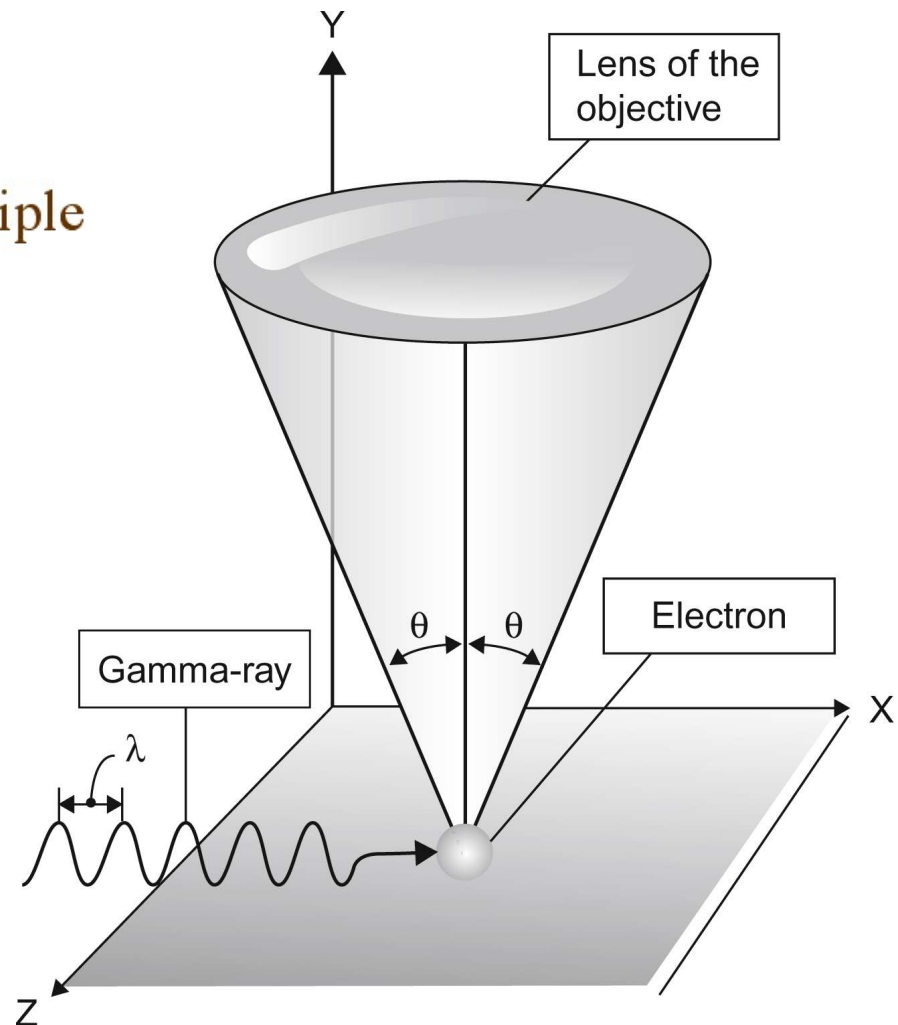
ハイゼンベルクの不確定性関係

Heisenberg's Uncertainty Principle

Change in momentum

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

Change in position



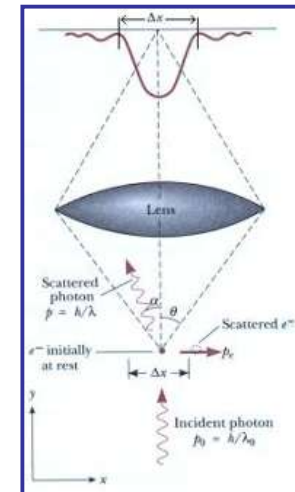
不確定性関係1: 量子測定の誤差と擾乱

- In 1927 Heisenberg postulated an uncertainty principle:

γ -ray thought experiment

$$\rightarrow p_1 q_1 \sim h$$

with q_1 (mean error) & p_1 (discontinuous change)



- $\rightarrow$ in modern treatment for commuting observables:

$$\varepsilon(Q) \eta(P) \geq \frac{\hbar}{2}$$

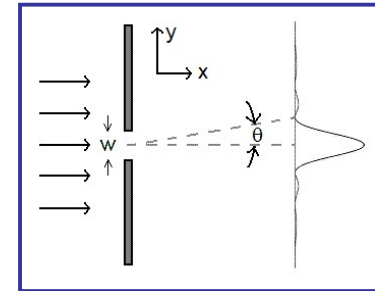
$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon: \text{error of the first measurement (Q)} \\ \eta: \text{disturbance on the second measurement (P)} \end{array} \right.$

不確定性関係2: 量子状態の広がり

- Kennard considered the spread of a wave function ψ

$$\sigma(Q)\sigma(P) \geq \frac{\hbar}{2}$$

σ : standard deviations



- Robertson generalized the relation to arbitrary pairs of observables in any states ψ

$$\sigma(A) \sigma(B) \geq \frac{1}{2} |\langle \psi | [A, B] | \psi \rangle|$$

→ dependent on the state but independent of the apparatus

Is $\varepsilon(A)\eta(B) \geq \frac{1}{2} |\langle \psi | [A, B] | \psi \rangle|$ generally valid?

誤差と擾乱の(新)不確定性原理

Definition of error & disturbancee:

- Error is defined as the root-mean-square (rms):

$$\epsilon(A) \equiv \langle \psi \otimes \xi | [U^\dagger (I \otimes M) U - A \otimes I]^2 | \psi \otimes \xi \rangle^{1/2}$$

- Disturbance is defined in the same manner:

$$\eta(B) \equiv \langle \psi \otimes \xi | [U^\dagger (B \otimes I) U - B \otimes I]^2 | \psi \otimes \xi \rangle^{1/2}$$

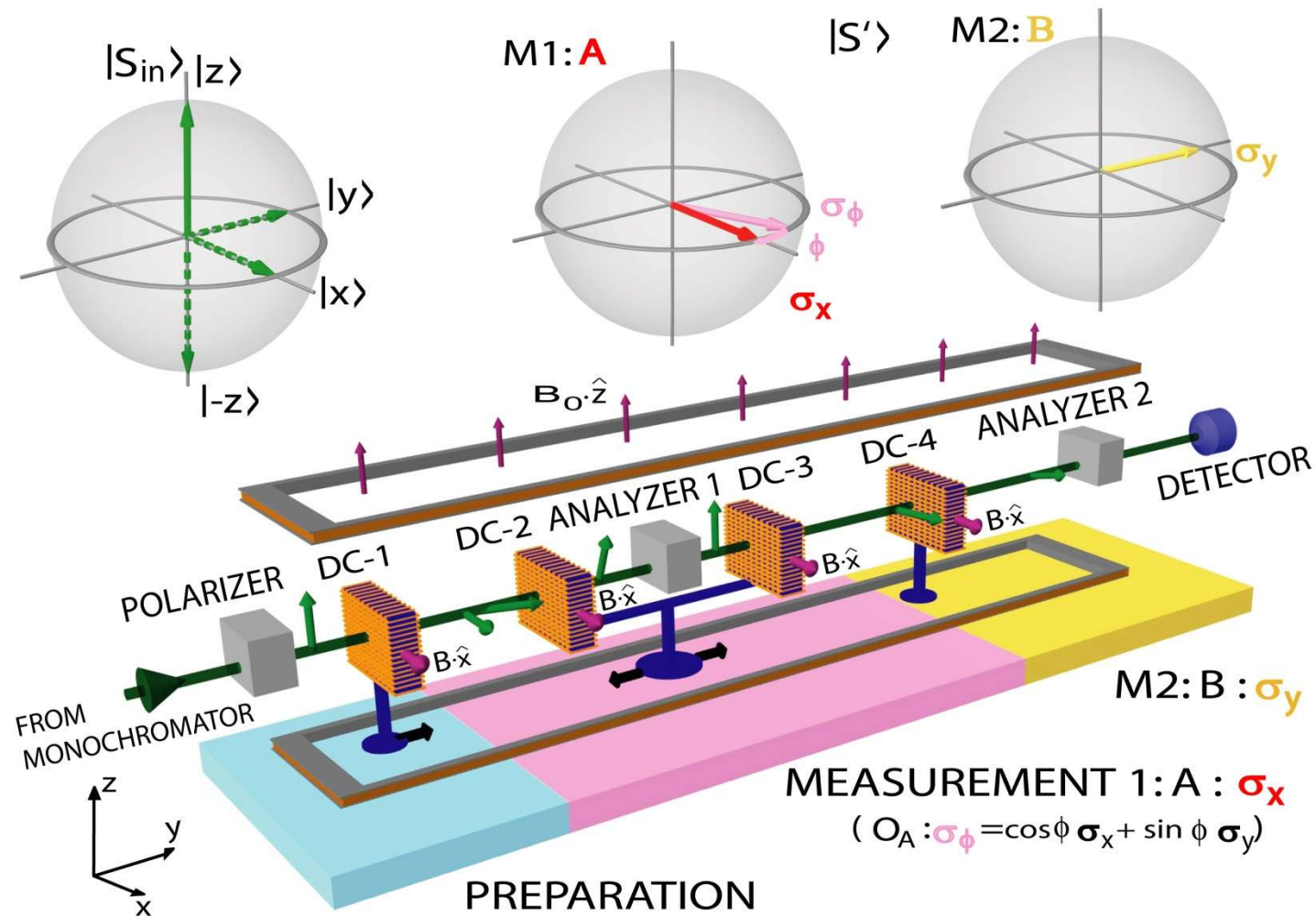
$\mathcal{K}$: a Hilbert space,
 ξ : a unit vector in $\mathcal{K}$,
 U : a unitary operator on $\mathcal{H} \otimes \mathcal{K}$
 M : a self-adjoint operator on $\mathcal{K}$

$$\epsilon(A)\eta(B) + \epsilon(A)\sigma(B) + \sigma(A)\eta(B) \geq \frac{1}{2} |\langle \psi | [A, B] | \psi \rangle|$$

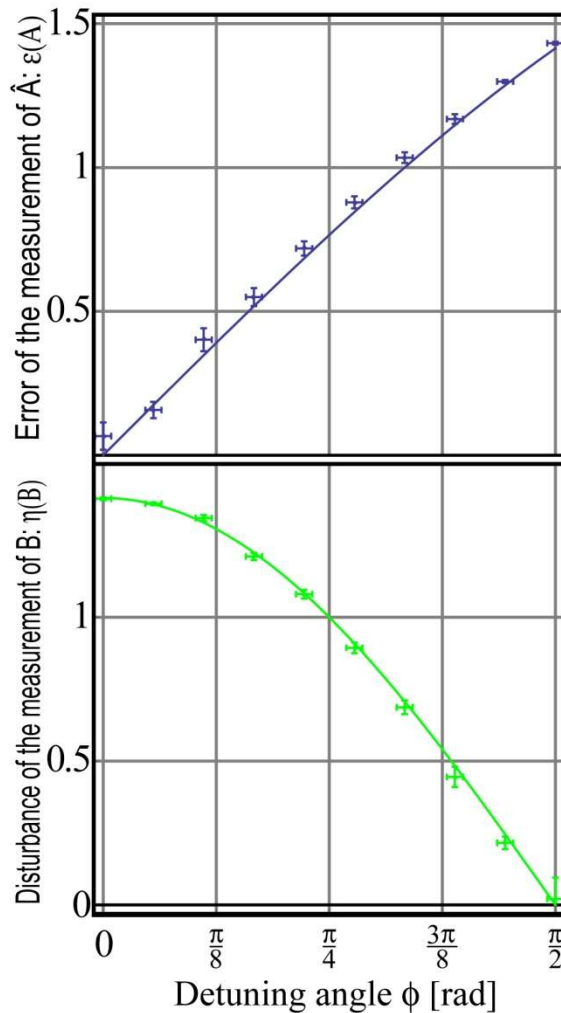
$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon : \text{error of the first measurement (A)} \\ \eta : \text{disturbance on the second measurement (B)} \\ \sigma : \text{standard deviations} \end{array} \right.$

M. Ozawa, PRA **67**, 042105 (2003).

実験による検証： 実験配置



実験結果1: 誤差と擾乱のトレードオフ



$$|\psi_i\rangle = | +z \rangle$$

$$\hat{A} = \hat{\sigma}_x \quad \hat{O}_A = \hat{\sigma}_\phi = \cos(\phi)\hat{\sigma}_x + \sin(\phi)\hat{\sigma}_y$$

$$\hat{B} = \hat{\sigma}_y$$

$$\begin{aligned} \varepsilon(A)^2 = & \langle \psi | A^2 | \psi \rangle + \langle \psi | O_A^2 | \psi \rangle + \langle \psi | O_A | \psi \rangle \\ & + \langle A\psi | O_A | A\psi \rangle - \langle (A + I)\psi | O_A | (A + I)\psi \rangle \end{aligned}$$

$$|\psi\rangle = | +z \rangle$$

$$|A\psi\rangle = | -z \rangle$$

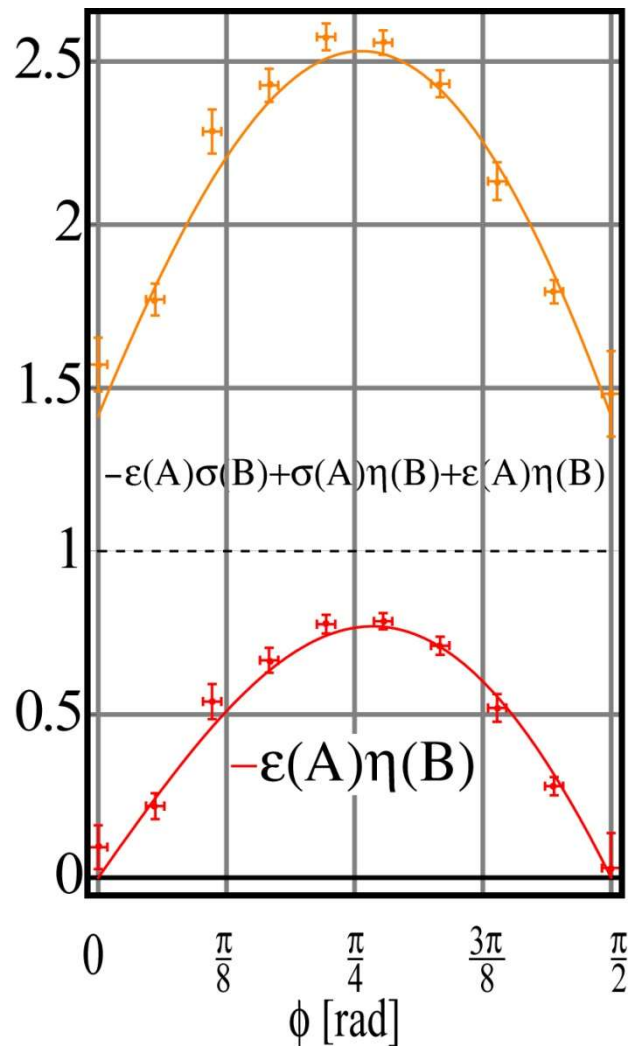
$$|(A + I)\psi\rangle = | +x \rangle$$

$$|\psi\rangle = | +z \rangle$$

$$|B\psi\rangle = | -z \rangle$$

$$|(B + I)\psi\rangle = | +y \rangle$$

実験結果2: 新旧の不確定性関係

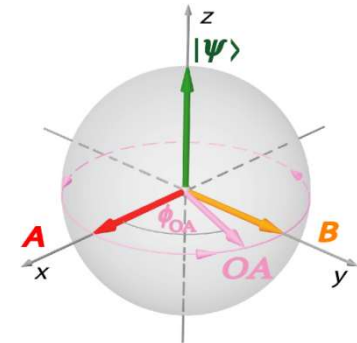


New uncertainty principle

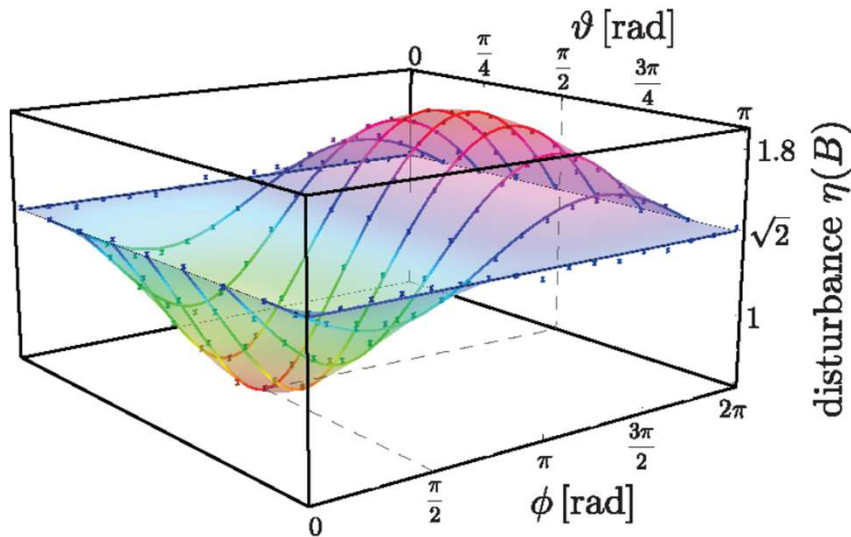
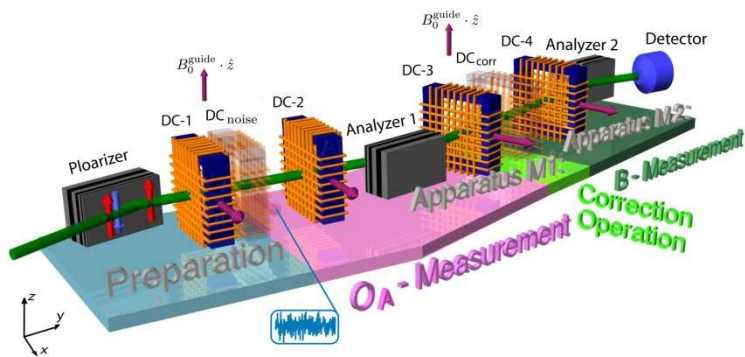
ε : error of the first measurement (A)
 η : disturbance on the second measurement (B)
 σ : standard deviations

Heisenberg product

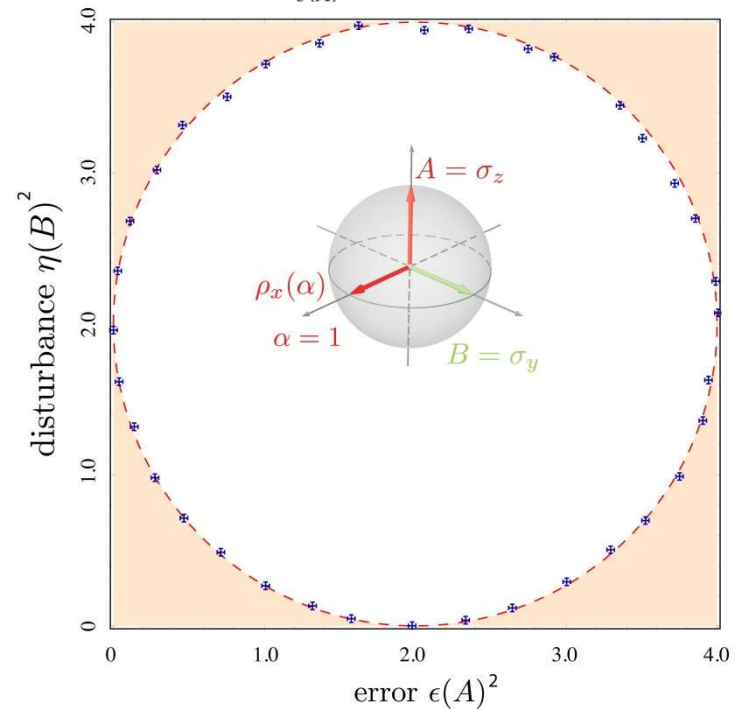
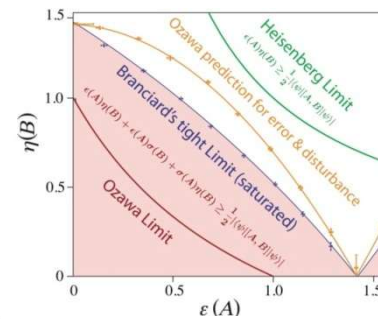
J. Erhart, Nature Phys. **8**, 185-189 (2012)



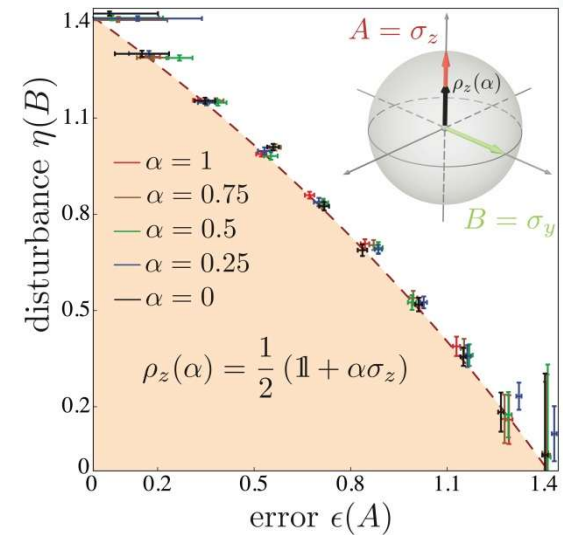
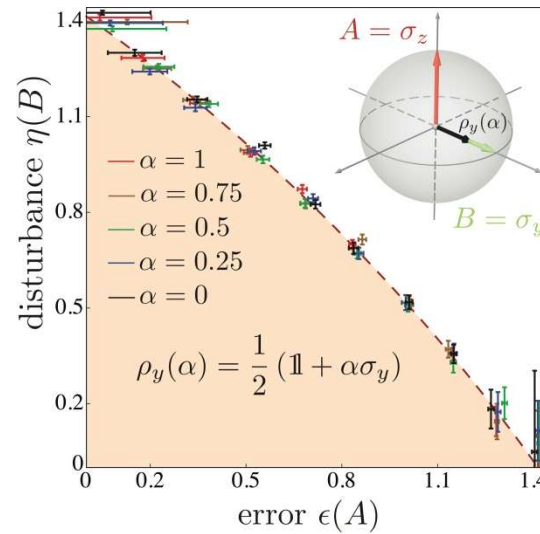
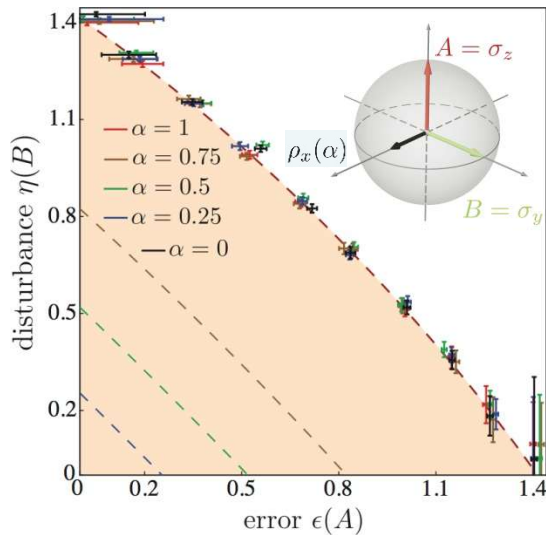
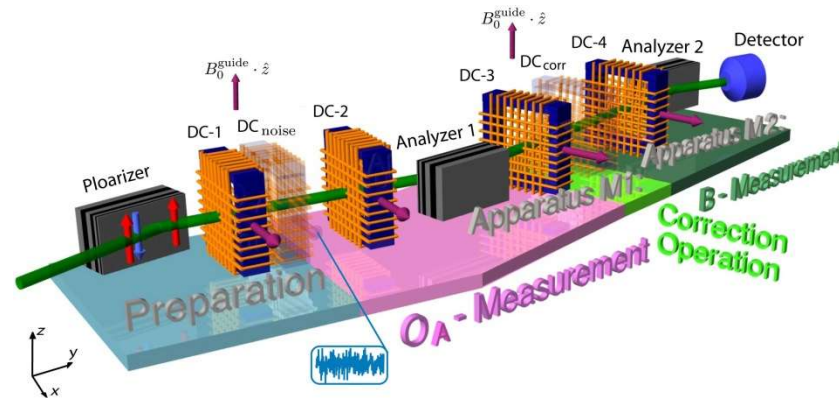
タイトな不確定性関係1: 誤差からの補正



B. Demirel, PRL 117, 140402 (2016).



タイトな不確定性関係2: 混合状態への拡張



B. Demirel, PRL 117, 140402 (2016).

隠れた誤差、量子状態/エントロピー形式の不確定性関係

npj | Quantum Information

www.nature.com/npjqi

ARTICLE OPEN

Check for updates

Neutro root-1

Stephan Sp

While in mechan major pr obtain an accurate incomple complete projectiv npj Quar

CrossMark

OPEN ACCESS

RECEIVED 2 October 2018

ACCEPTED FOR PUBLICATION 16 January 2019

PUBLISHED 31 January 2019

NPJ Publishing

New J. Phys. 21 (2019) 013038

<https://doi.org/10.1088/1367-2630/aafecb>

New Journal of Physics

Deutsche Physikalische Gesellschaft DPG

Published in partnership with: Deutsche Physikalische

PHYSICAL REVIEW A 102, 042204 (2020)

Experimental test of tight state-independent preparation uncertainty relations for qubits

Stephan Sponar^{1,*}, Armin Danner¹, Kazuma Obigane², Simon Hack¹, and Yuji Hasegawa^{1,2,†}

¹Atominstut, TU Wien, Stadionallee 2, 1020 Vienna, Austria

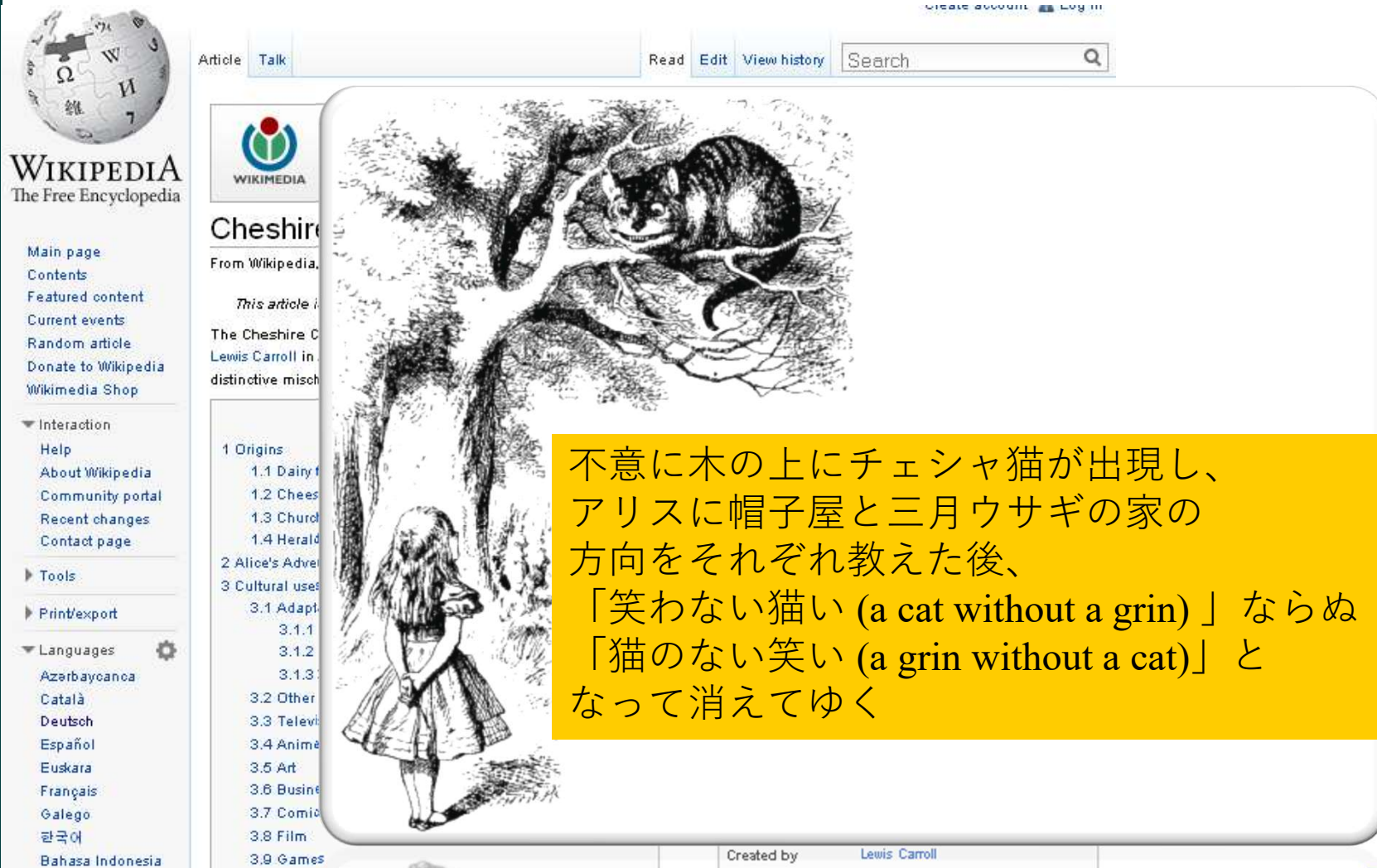
²Department of Applied Physics, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060-8628, Japan

(Received 3 February 2020; revised 4 September 2020; accepted 9 September 2020; published 6 October 2020)

The well-known Robertson-Schrödinger uncertainty relations miss an irreducible lower bound. This is widely attributed to the lower bound's state dependence. Therefore, Abbott *et al.* introduced a general approach to derive tight state-independent uncertainty relations for qubit measurements [Mathematics 4, 8 (2016)]. The relations are expressed in two measures of uncertainty, which are standard deviation and entropy, both functions of the expectation value. Here, we present a neutron polarimetric test of the tight state-independent preparation uncertainty relations for orthogonal, as well as nonorthogonal, Pauli spin observables. The final results, obtained with pure and mixed spin states, reproduce the theoretical predictions clearly for arbitrary initial states of variable degree of polarization.

DOI: [10.1103/PhysRevA.102.042204](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.042204)

チェシャ猫: 猫のいない笑い

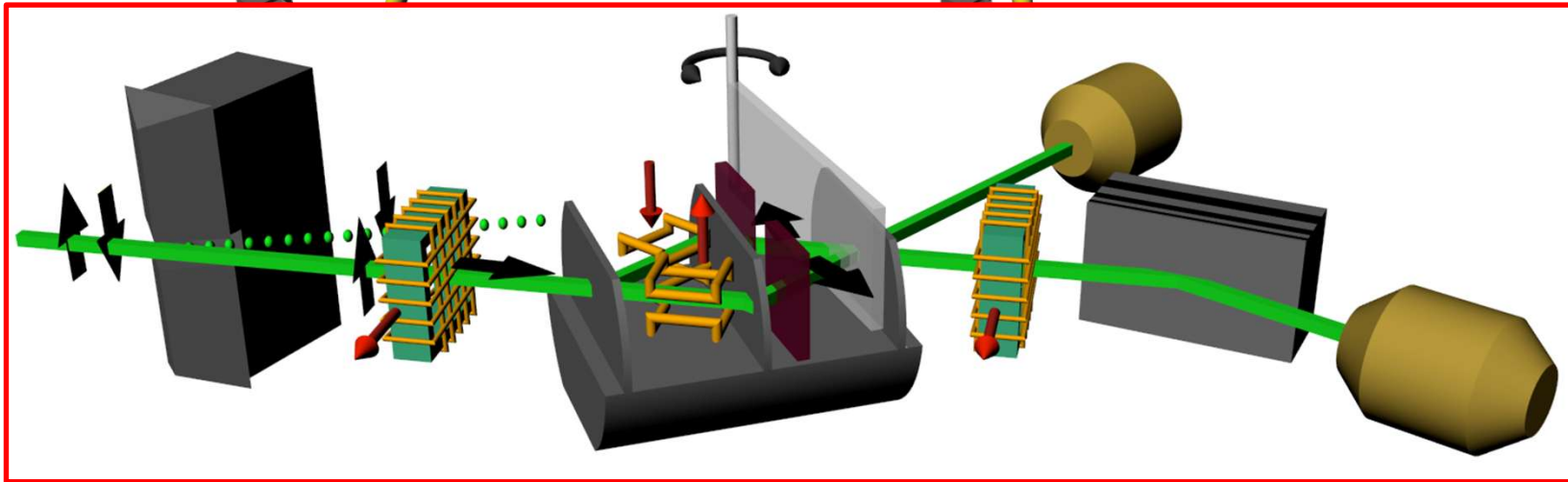
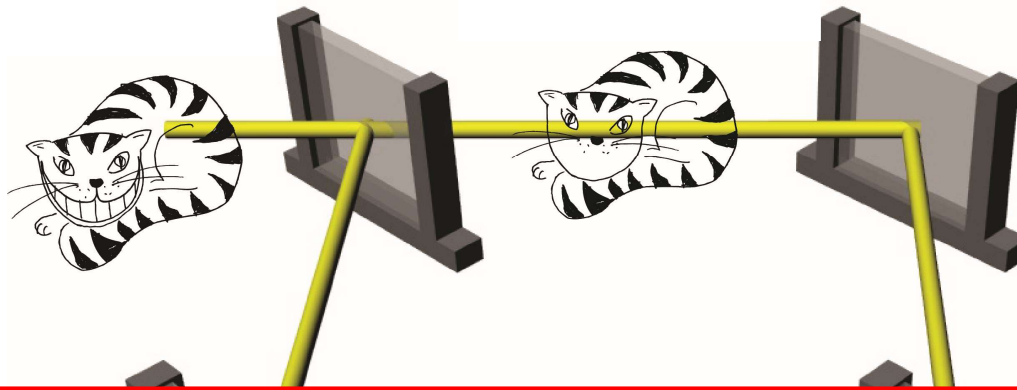


The image shows a screenshot of the Wikipedia article for 'Cheshire cat'. The page layout includes the Wikipedia logo, navigation links, and a table of contents. A yellow text box is overlaid on the right side of the article, containing Japanese text. The text box contains the following text:

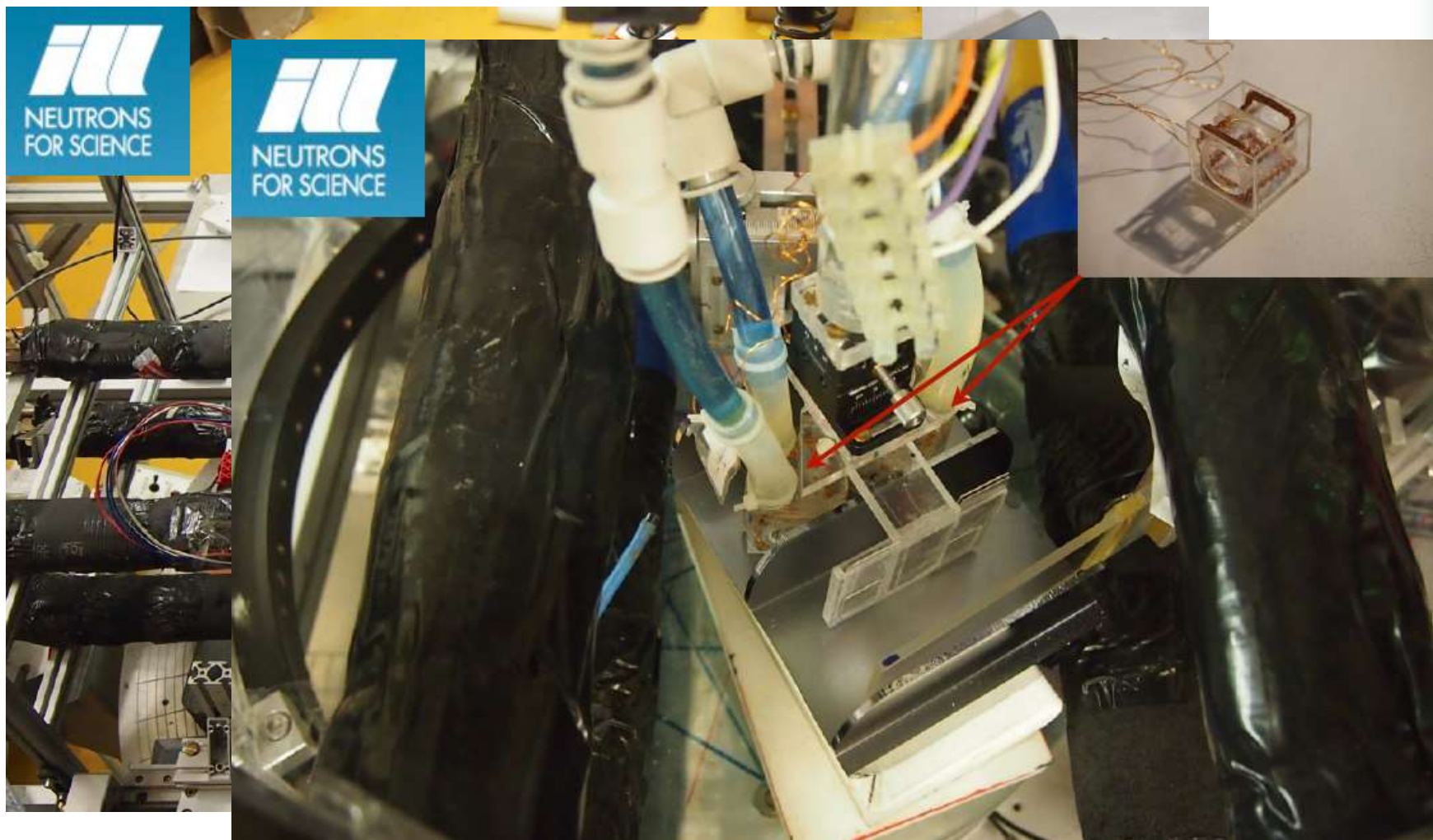
不意に木の上にチェシャ猫が出現し、アリスに帽子屋と三月ウサギの家の方向をそれぞれ教えた後、「笑わない猫い (a cat without a grin)」ならぬ「猫のない笑い (a grin without a cat)」と なって消えてゆく

The background image shows a black and white illustration of the Cheshire cat sitting on a tree branch, looking down at Alice, who is standing and looking up at the cat.

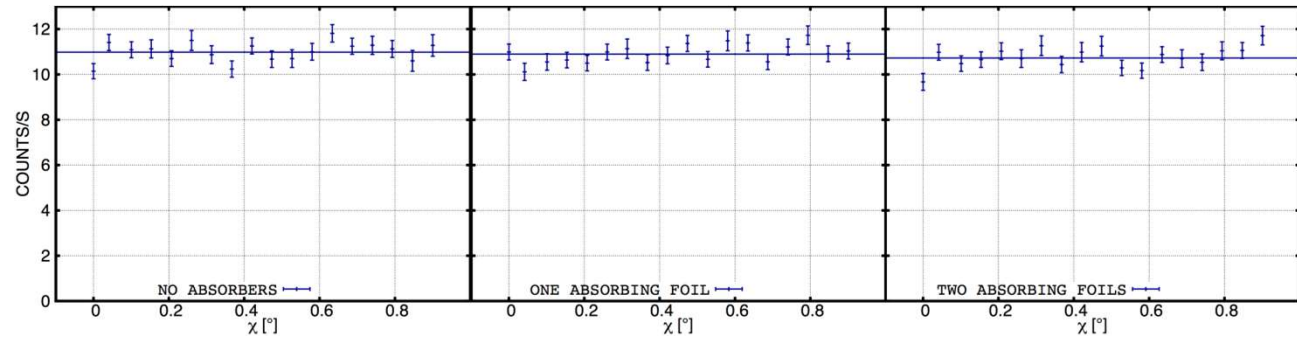
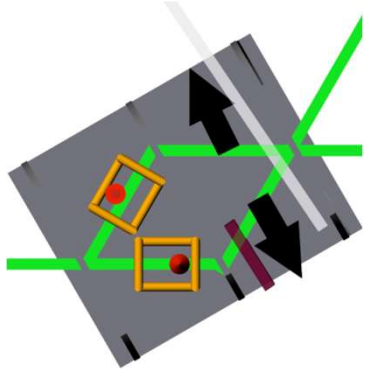
中性子干渉計における量子チェシャ猫



量子チェンヤ猫： 実験



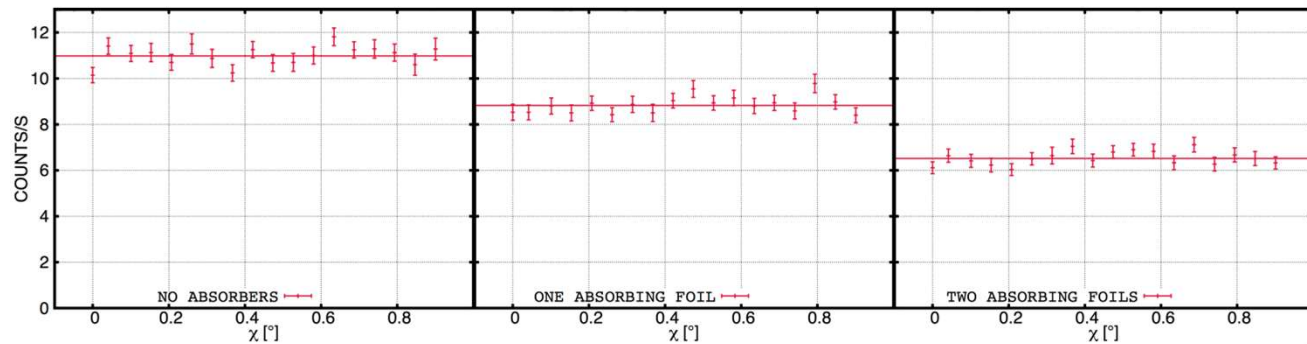
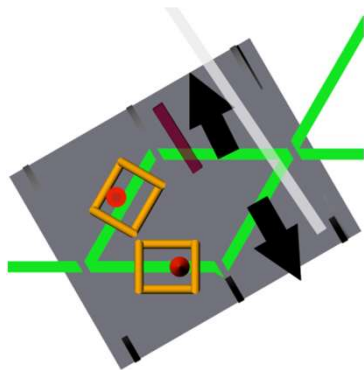
量子チェシャ猫： 中性子(猫)は上のパス



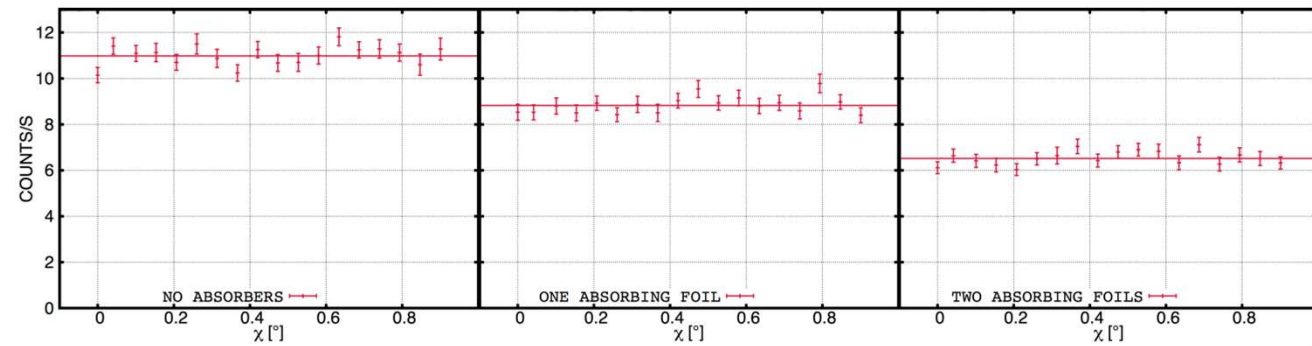
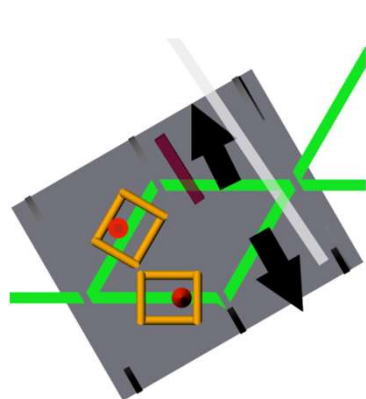
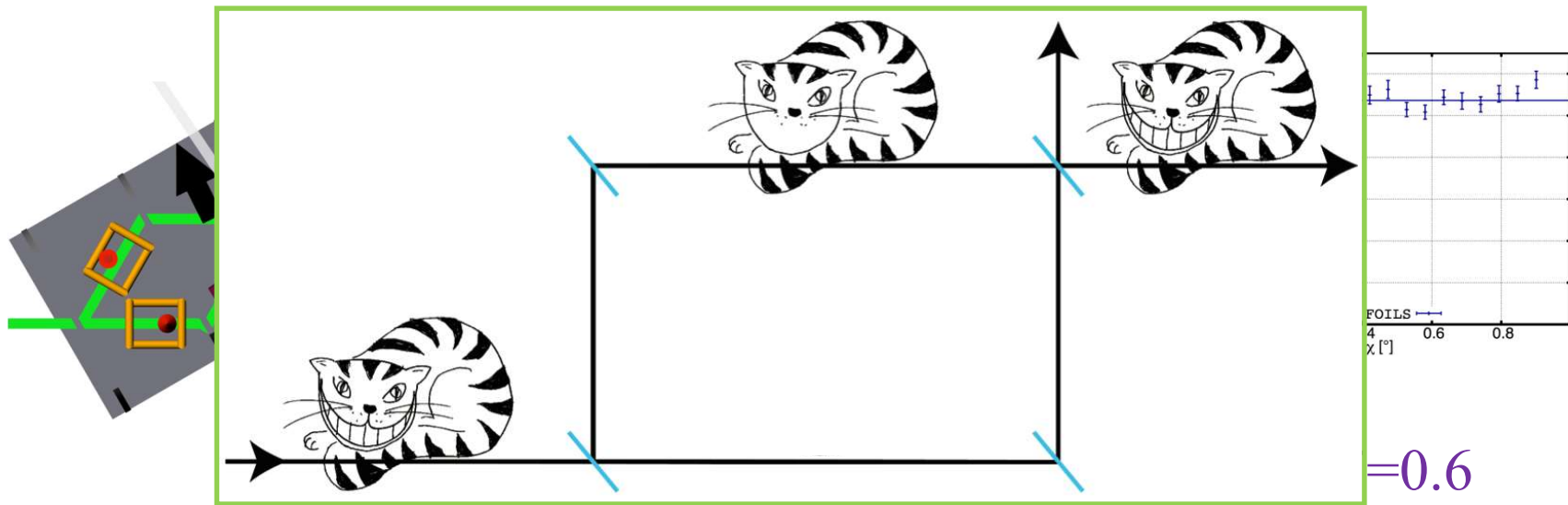
T=1

T=0.8

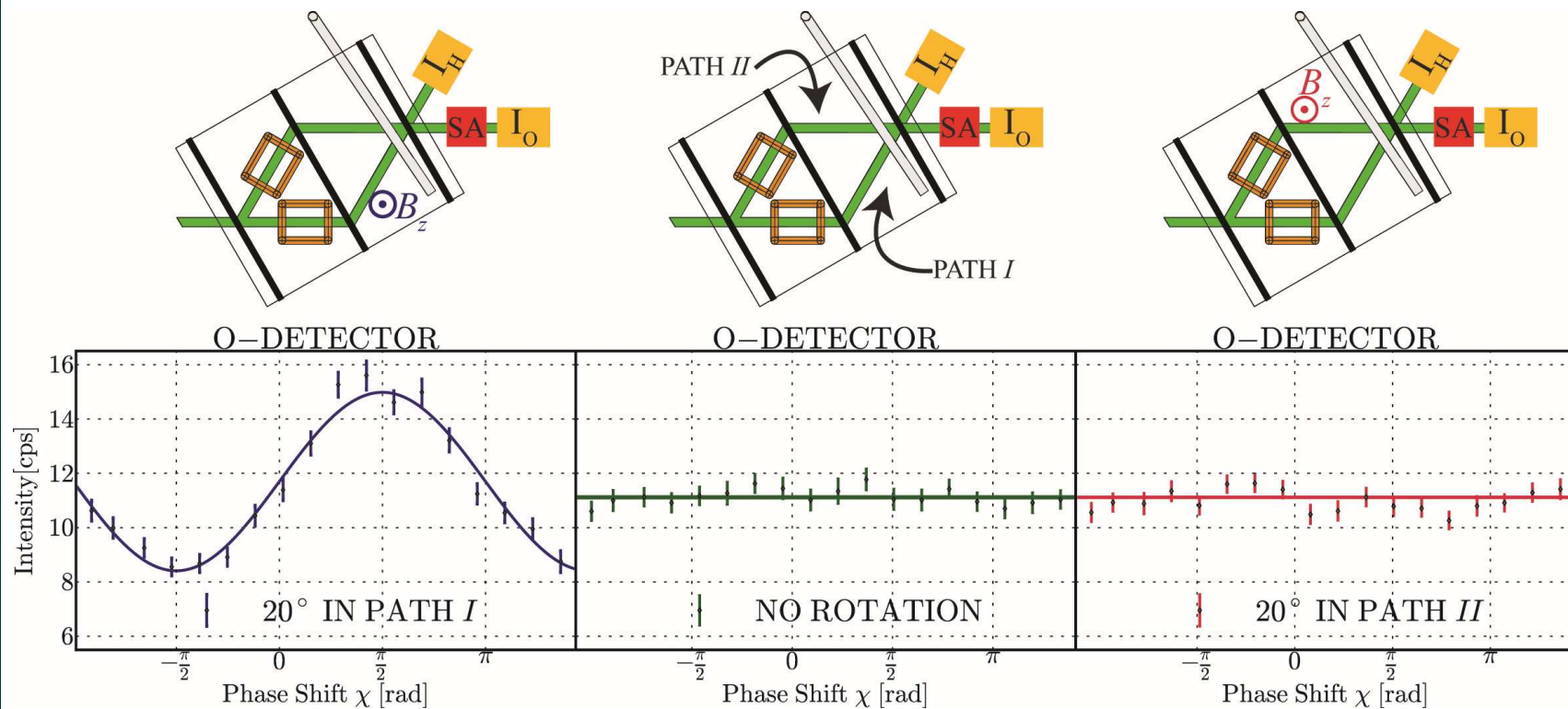
T=0.6



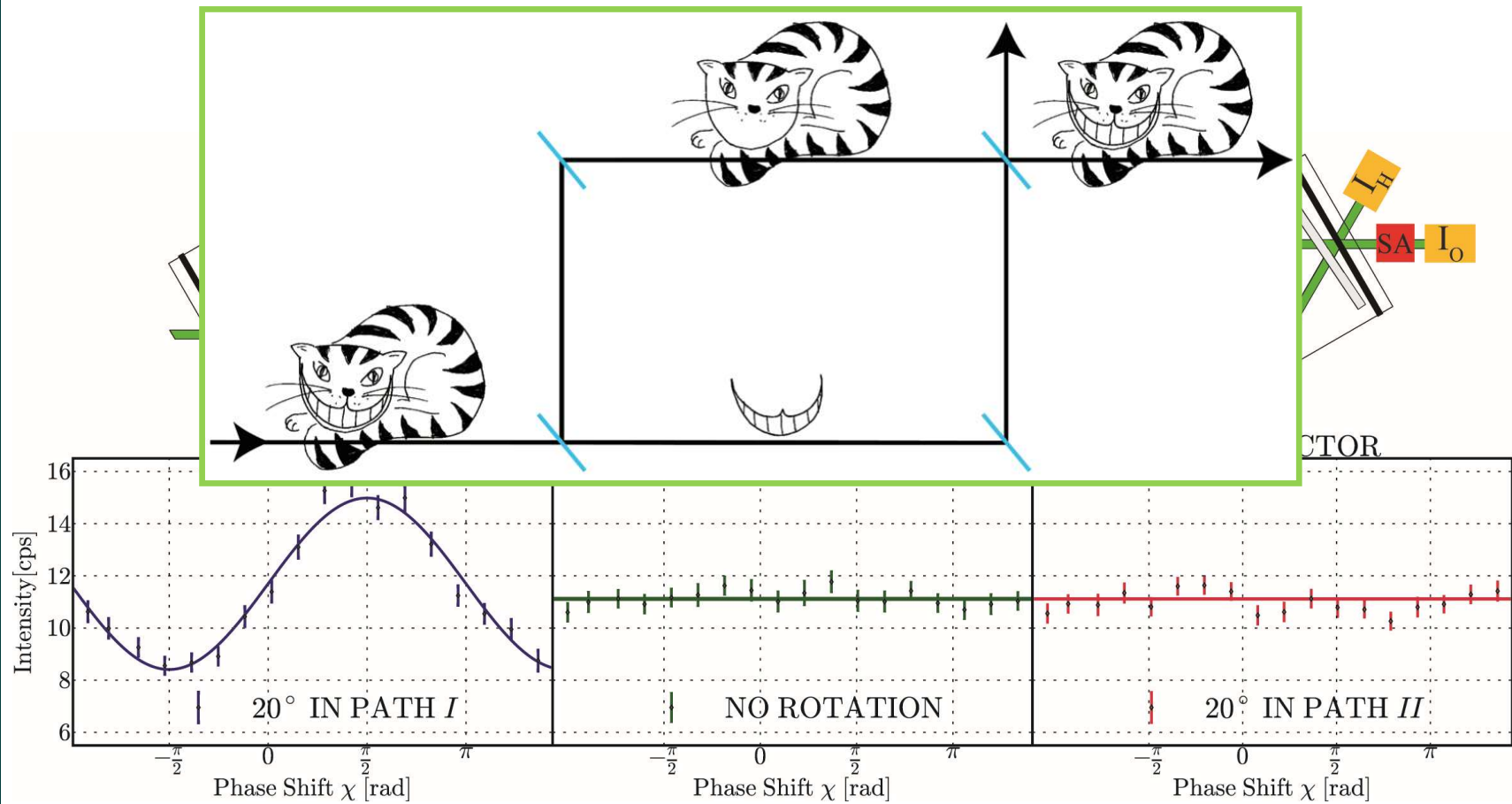
量子チェシャ猫： 中性子(猫)は上のパス



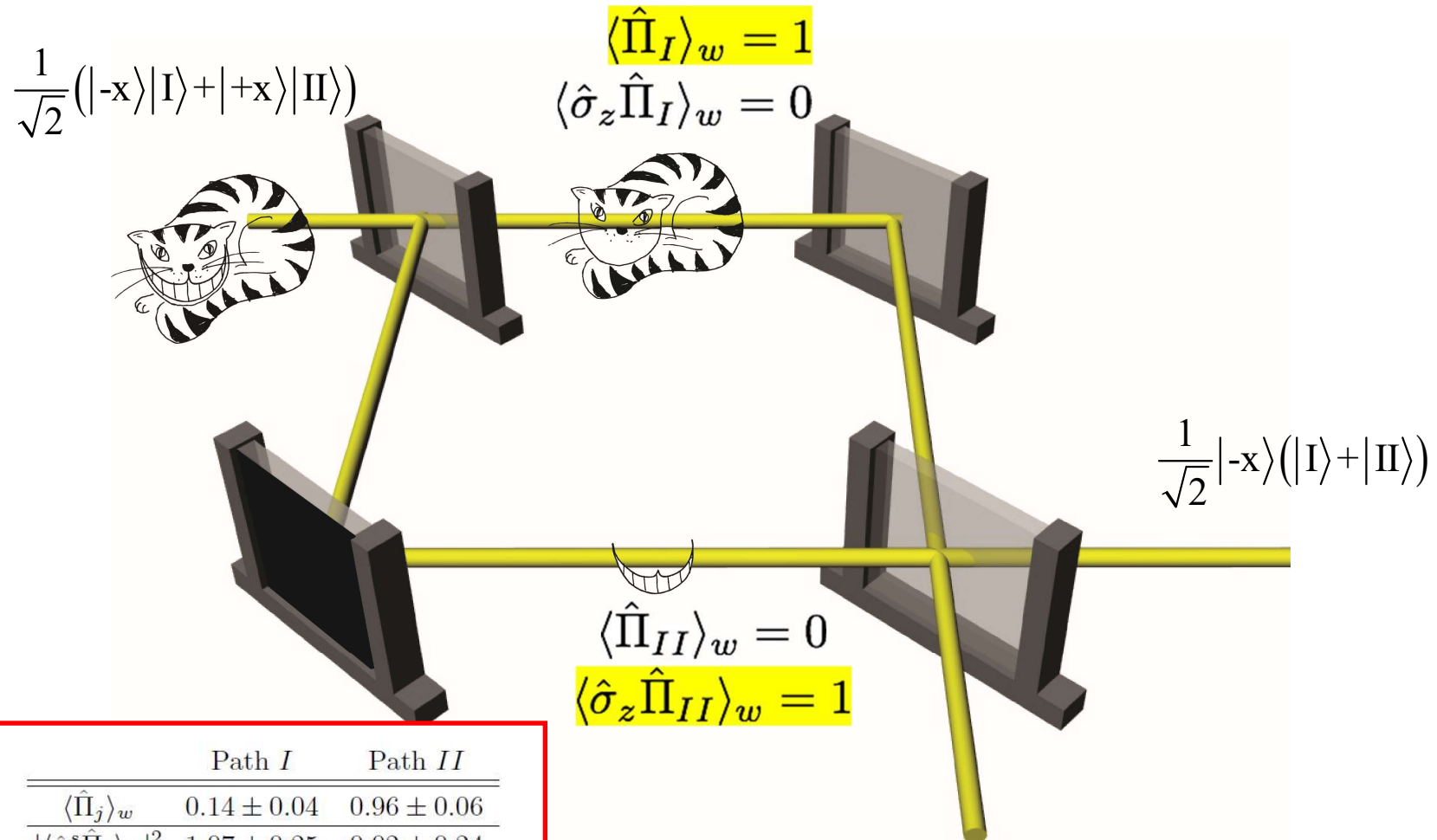
量子チェシャ猫: スピン(笑い)は下のパス



量子チェシャ猫: スピン(笑い)は下のパス

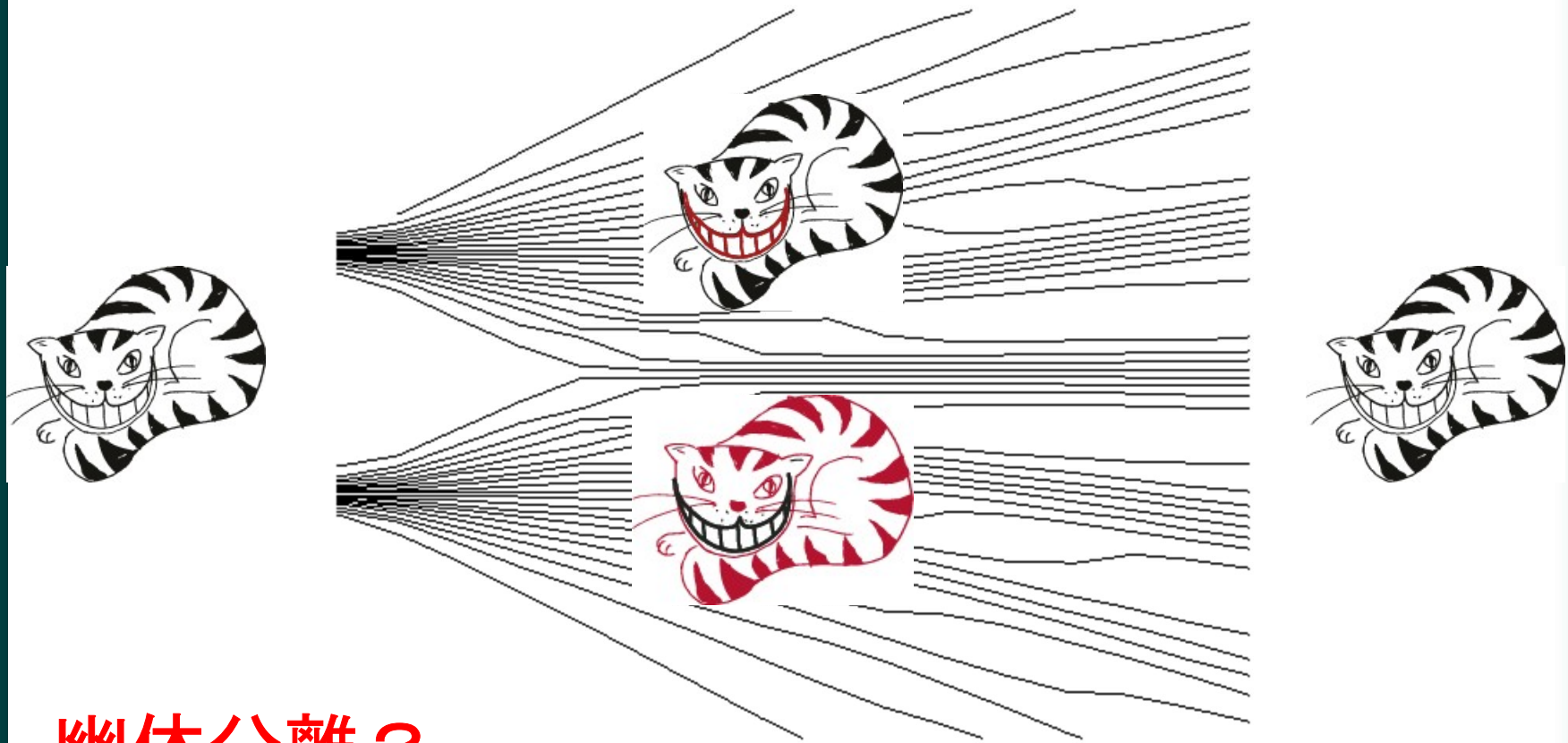


量子チェンヤ猫： 最終結果



T. Denkmayr et al. Nature Comm. 5:4492 (2014).

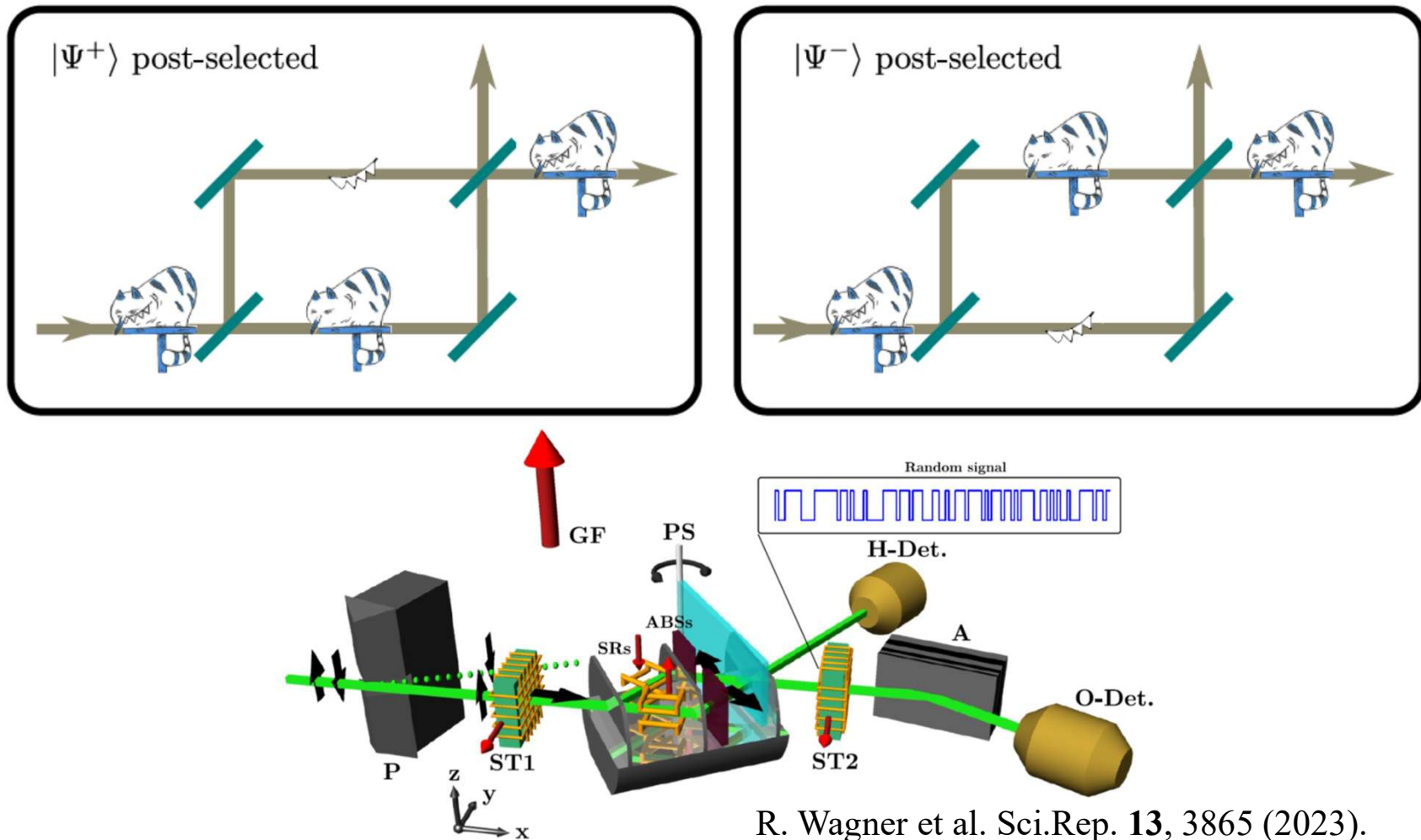
量子チェシャ猫： 見えない猫・スピン



幽体分離？

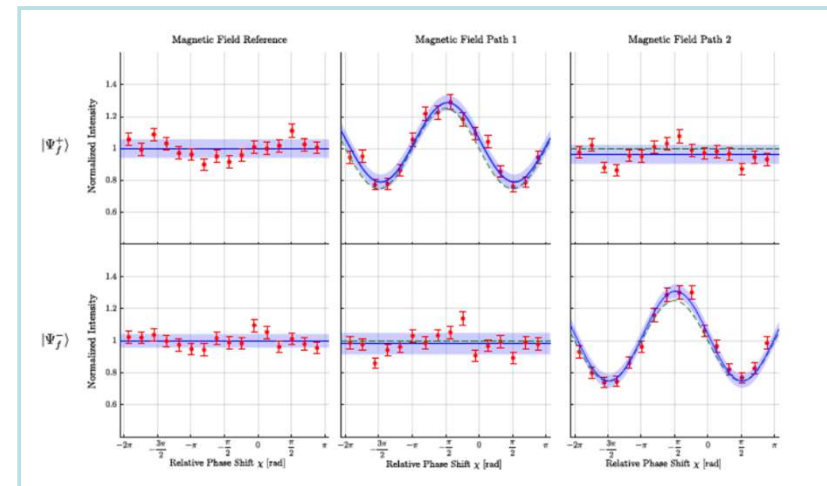
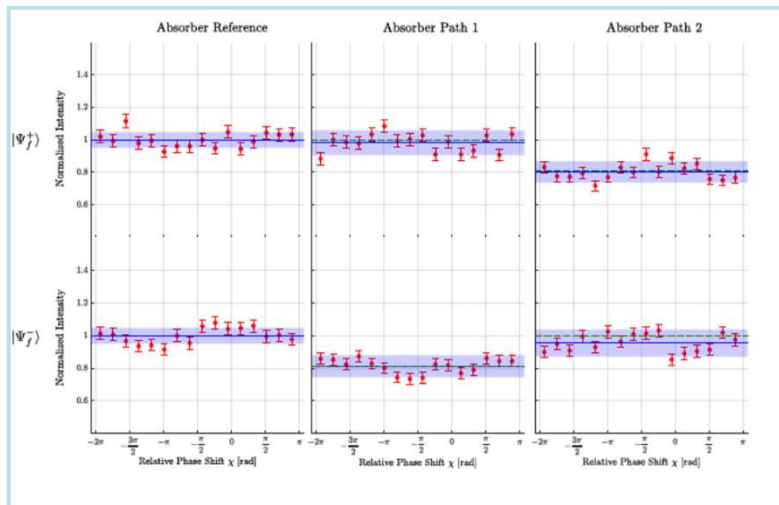
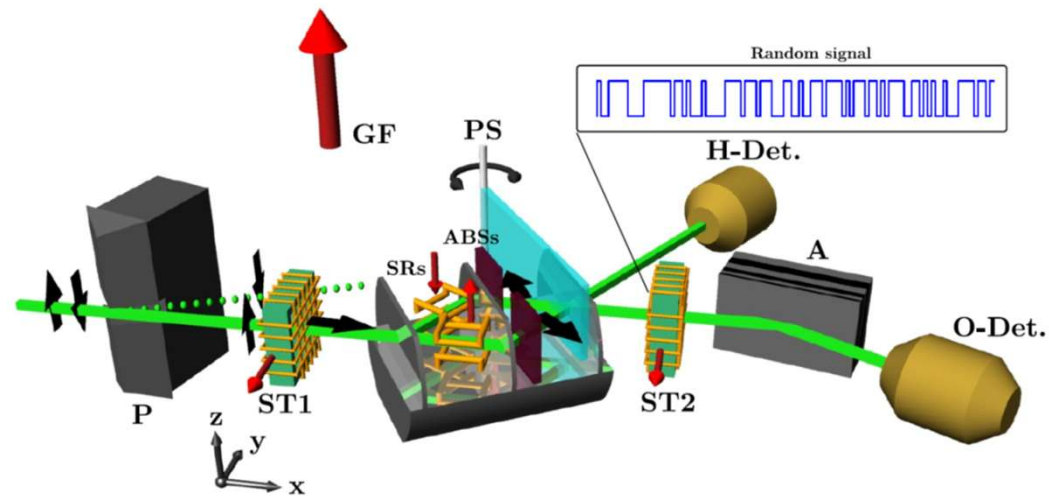
<http://Bohmian-mechanics.net/>

遅延選択を加味した量子チェシャ猫1



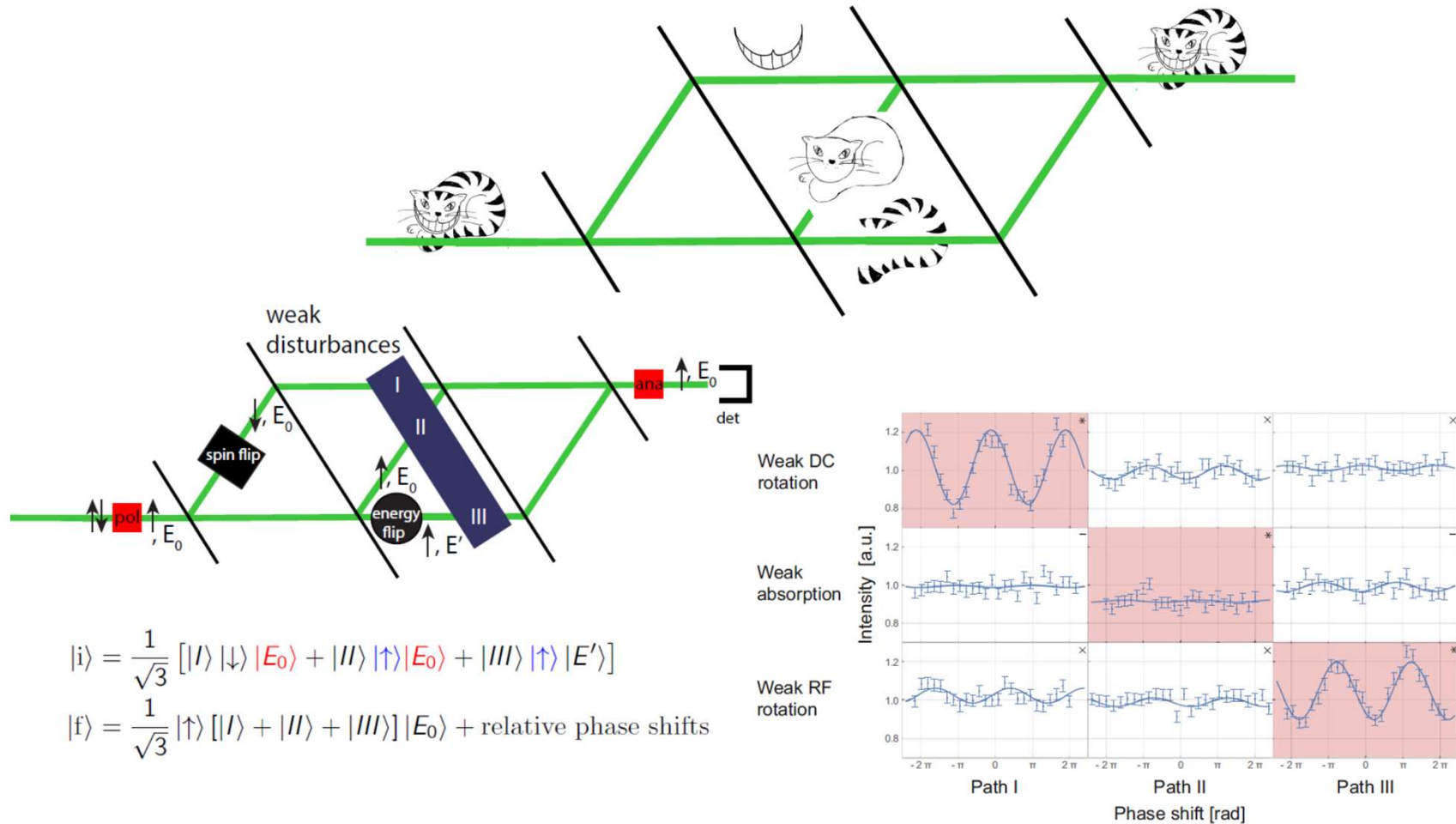
R. Wagner et al. Sci.Rep. 13, 3865 (2023).

遅延選択を加味した量子チェシャ猫2



R. Wagner et al. Sci.Rep. 13, 3865 (2023).

3体分離を示す量子チェシャ猫： 中性子/スピン/エネルギー



A. Danner et al. Comm. Phys. 7, 14 (2024).

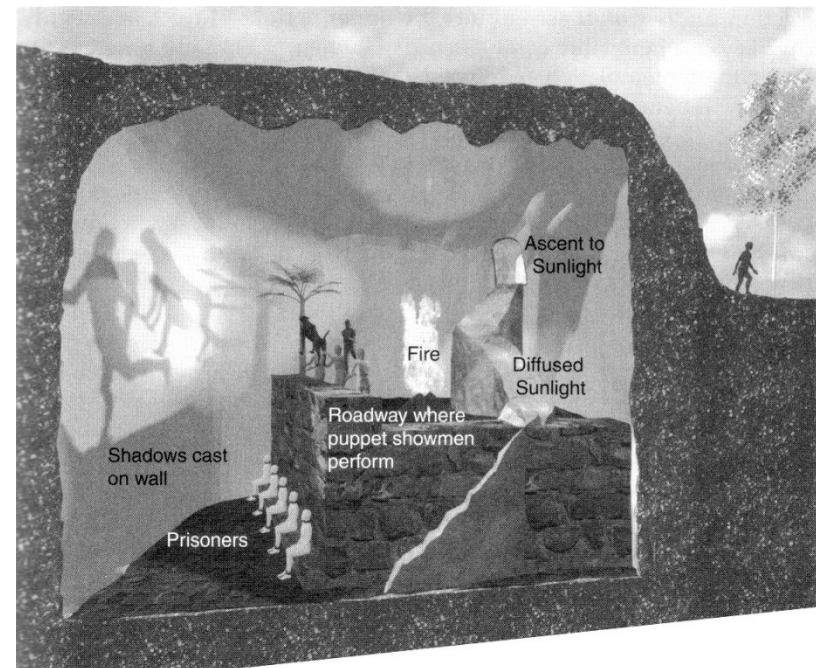
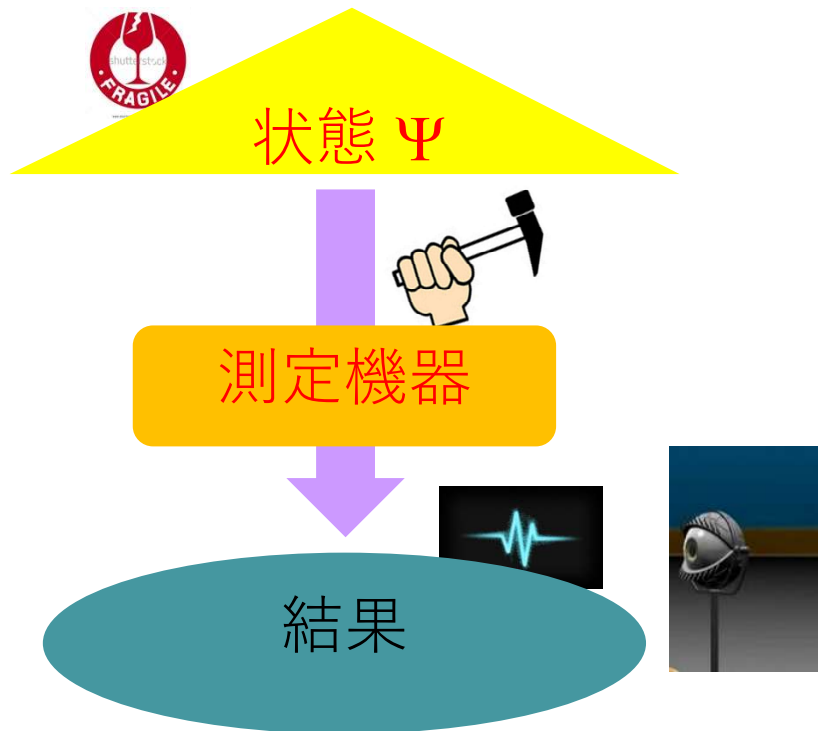
(今の)量子力学の提示する世界

状態

→ 測定 (破壊・破棄)

→ 結果/認識

- 必然性、現実性
(Notwendigkeit, Wirklichkeit)
- 客観性、実在
(Objektivität, Realität)



Fin!