

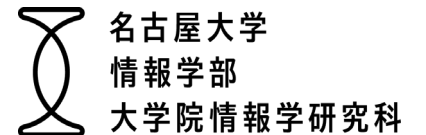
林忠四郎記念講演会「量子力学と宇宙論の100年」
九州大学 2025年11月7日

量子力学の発見と論争： ベルとクラウザーに焦点をあてて

谷村 省吾

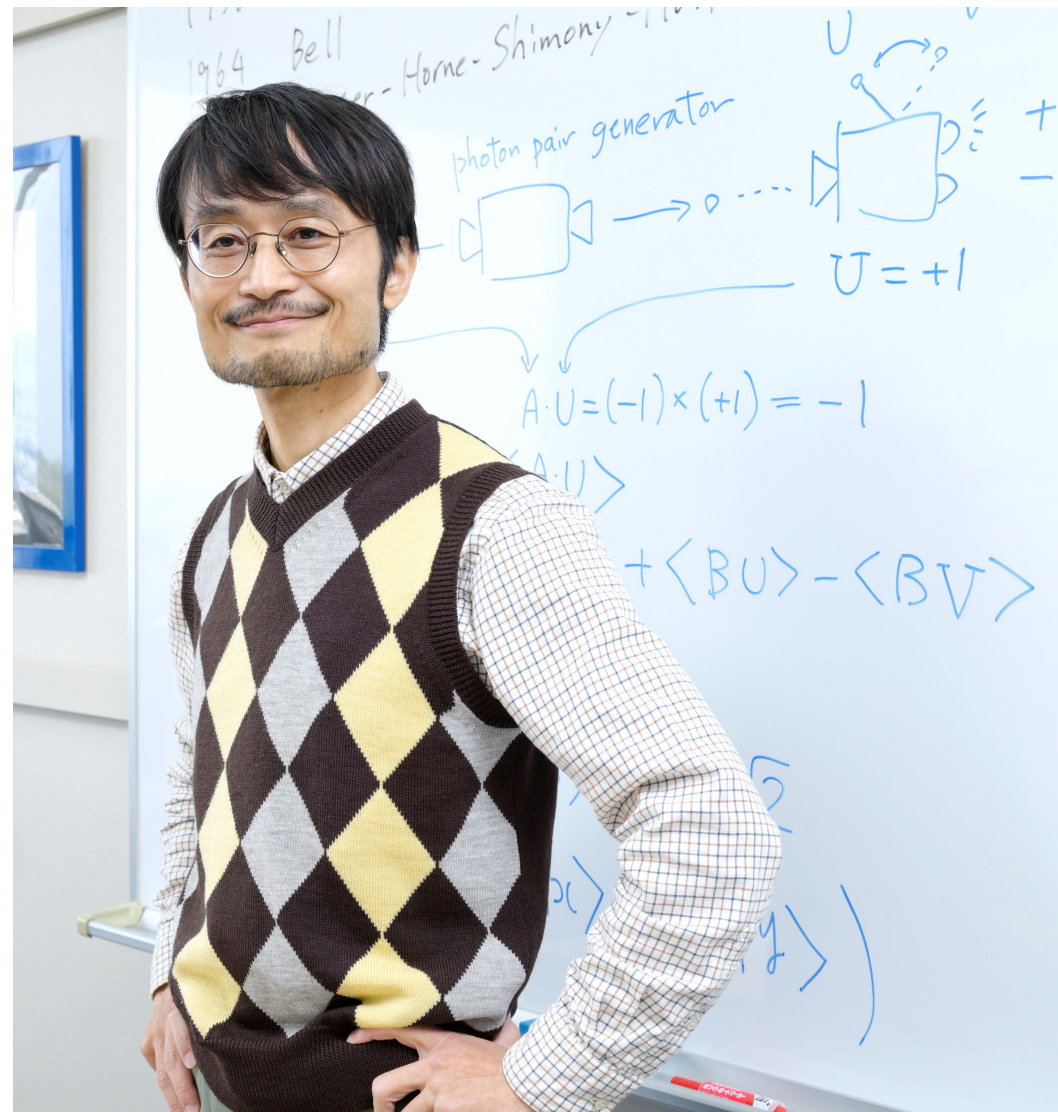
TANIMURA Shogo

名古屋大学 情報学研究科



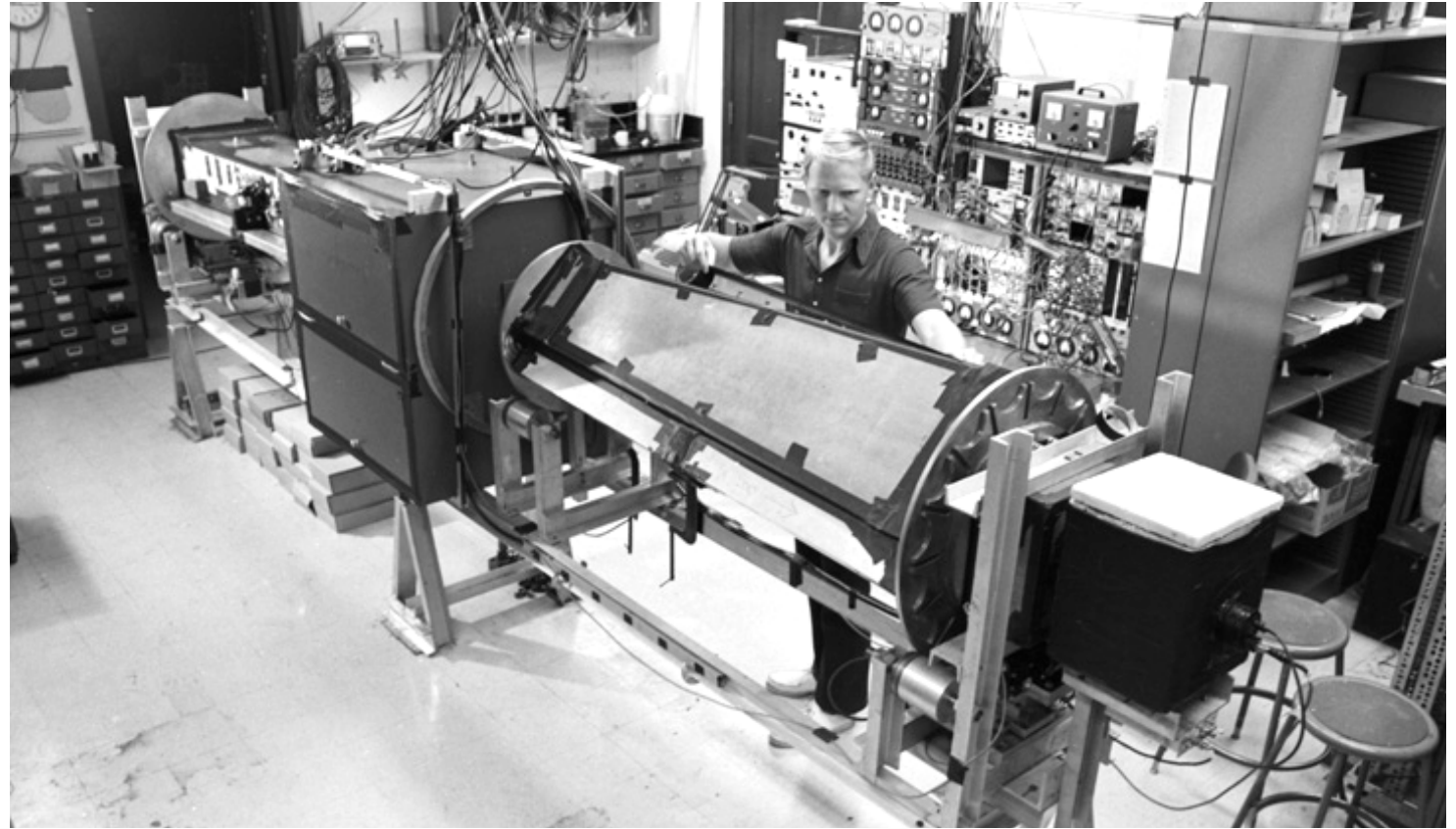
自己紹介

- 谷村省吾（たにむら・しょうご）
- 1990年 名古屋大学工学部応用物理学科卒業，1995年 大学院理学研究科物理学専攻で博士取得。その後，東京大学学振PD，京都大学，大阪市立大学などで職歴を経て，2011年に名古屋大学に着任。
- 一番の師と言える方は大貫義郎。
- 研究：量子力学の基礎，圏論・微分幾何の応用，AIなど。



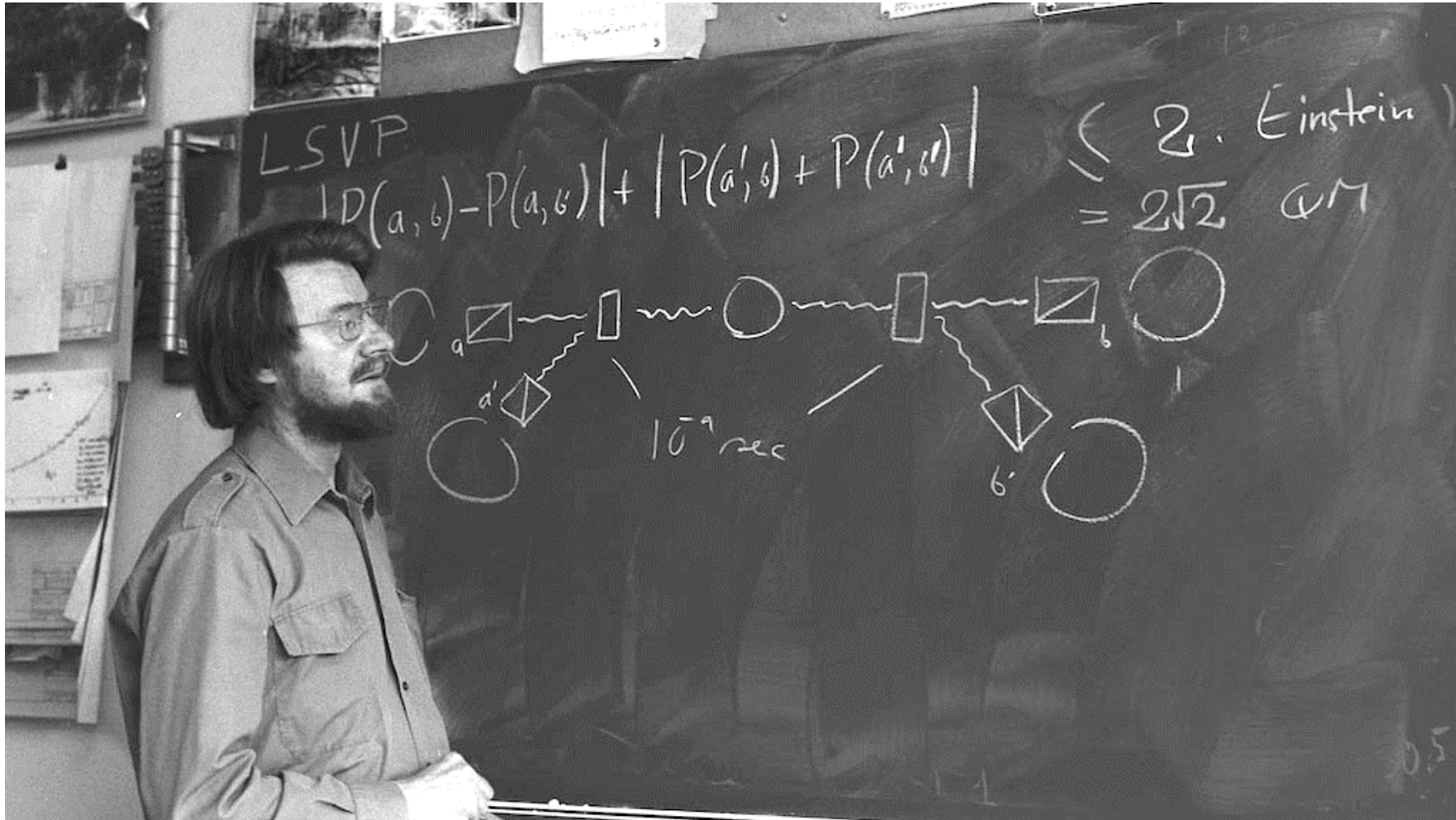
クラウザーは2022年にノーベル賞を受賞しました

1972年にベルの不等式の破れを実験検証した。同様の実験を改良して行ったアスペ, ツァイリンガーとともに2022年のノーベル物理学賞を受賞した。



2024年はベルの不等式60周年でした

John Stewart Bell, On the Einstein Podolsky Rosen paradox, 1964



2025年は量子力学100周年

Heisenberg, Born, Jordan, Dirac が量子力学の基本形を創ったのが1925年。それから100年。



INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

100 years of quantum is just the beginning...

On June 7, 2024, the United Nations proclaimed 2025 as the International Year of Quantum Science and Technology (IYQ). According to the proclamation, this year-long, worldwide initiative will "be observed through activities at all levels aimed at increasing public awareness of the importance of quantum science and applications."

<https://quantum2025.org/en/>

2025年9月14日 佐藤文隆先生ご逝去

京都大学基礎物理学研究所
で開催された量子力学100
周年研究会で「量子力学の
100年」と題する講演を9月
11日にされました。
享年87歳。
佐藤文隆先生のご冥
福をお祈りします。



<https://www.seidosha.co.jp/book/index.php?id=3906>
<https://indico.yukawa.kyoto-u.ac.jp/event/64/>
<https://youtu.be/DUKInA1X32U>

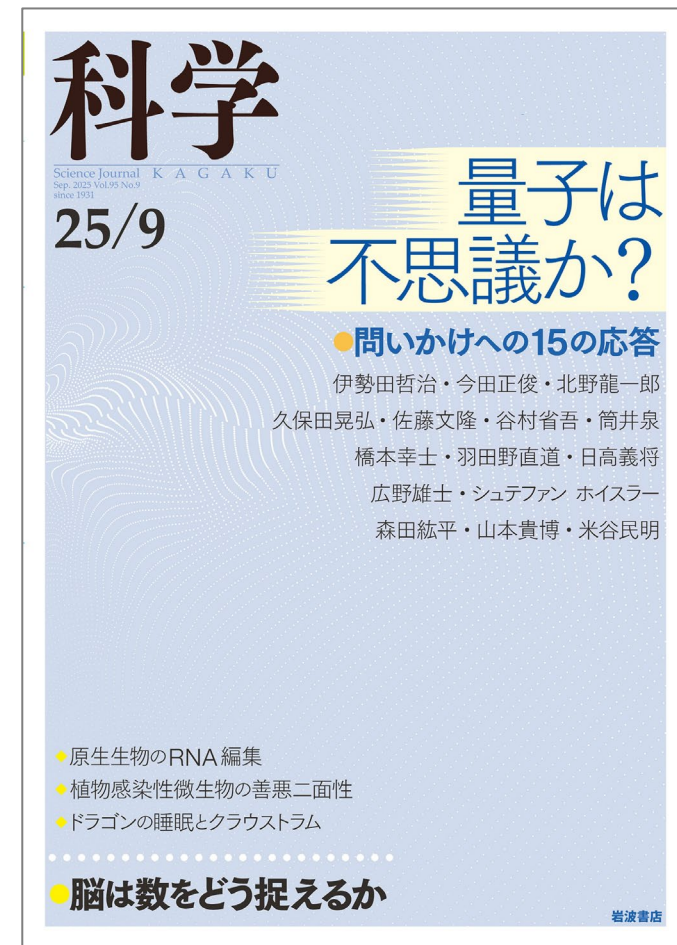
量子力学100周年を記念して



数理科学2025年1月号（7月号も）
谷村「量子力学のユニークさ：
量子力学は他の物理学理論とどう違うか」



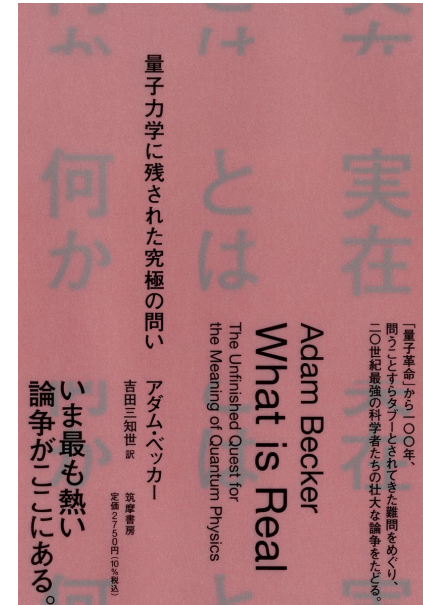
日経サイエンス2025年4月号，観測問題
谷村のインタビュー記事
木村元氏の翻訳監修記事



科学2025年9月号
量子は不思議か？

今回の講演

- 主にアダム・ベッカーの「実在とは何か」と佐藤文隆氏の「量子力学の100年」を参考にしてお話しします
- ベルとクラウザーの問題意識に至る背景と、彼らの研究の経緯と、彼らの発見が物理学にもたらしたものについて議論します。

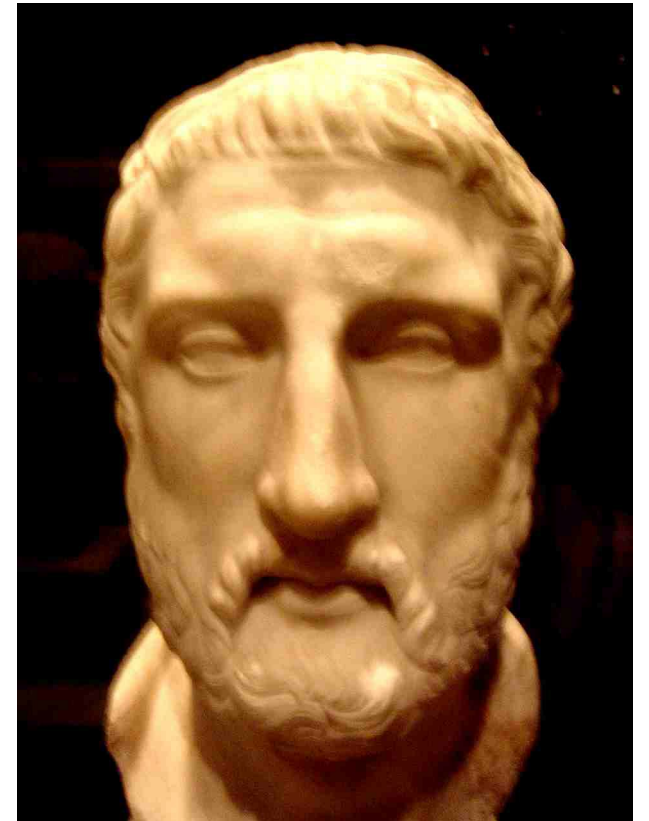


<https://www.chikumashobo.co.jp/product/9784480860927/>

<https://www.seidosha.co.jp/book/index.php?id=3906>

量子論以前

- すべての物質は微小かつ分割不可能かつ不変不滅の粒子（原子）でできているという考えは、古代ギリシャからあった。
- デモクリトス（BC460-370）



ボストン美術館所蔵，谷村撮影

近代的原子論

- ラボアジエ（1774年，質量保存則を発見。1787年，元素と化合物の区別）
- ドルトン（1805年頃，原子量）
- アボガドロ（1811年，同圧同温同体積の気体中の分子数は種類によらず一定）
- マクスウェル（1859年，気体分子の速度分布）
- ボルツマン（1875年頃，状態の数としてのエントロピー）

科学的事実論論争 (19世紀末から20世紀にかけて)

- 人間が直接検知できないもの（原子や電磁場）の実在性を認めるか？
- 「そういうものがあると仮定すると、ものごとをうまく説明できる」「思考の節約」のための道具にすぎないのか？
- 「直接観測できるもののみ実在性を認める」派：
マッハ，オストヴァルト，レーナルト，・・・

原子の実在性

- ペラン：10通り以上の異なるやりかたで分子の個数を数える（アボガドロ数を決定する）実験結果を比較して、ほぼ等しいことを確認した。
- ポアンカレ：「数えられるということは、あるのでしょうか」

合理主義 vs. 経験主義

- 合理主義：人間の感覚はあてにならない。我々は容易に錯覚にだまされる。見ているものすら真実ではないかもしれない。論理に信を置く。プラトン、デカルトなど。
- 経験主義：人間の思考はあてにならない。実験・観察・経験こそ正しい知識のよりどころである。ヒューム、ジョンロックなど。
- 「合理主義 vs. 経験主義」の対立がいろいろな場面で形を変えて蒸し返される。

論理実証主義 (logical positivism)

- カルナップ, ノイラートら, ウィーン学派と呼ばれる哲学者たちの運動. 1920~30年代にさかん.
- 非経験的な概念 (原子や電子) でも物理的意味があるものなら具体的・経験的な概念に還元できるはずだという主張. 合理主義と経験主義の和解.
- 経験的方法で実証できない形而上学的概念はナンセンスだとして排除する. 実在にコミットしない.
- ハイゼンベルクやパウリに影響を与えた.

原子の物理法則への動機

- 原子や電子があるなら，それらがどういう法則に従って挙動しているか知りたい。
- たとえて言うと，将棋の駒の名前を知っただけでは将棋は指せない，先も読めない。駒の動き方のルールを知らないといけない。
- 原子の世界のルールを知りたい。
- ニュートンふうの力学法則はあてはまらないことがわかってきた。 → 新しい力学法則が必要。

単純化して言えば

- 高温の物体が出す熱放射（電磁波）の明るさ・色
 - プランクの放射公式
 - 光自体が一つ二つと離散的に数えられるようなエネルギーのユニット（光量子）になっているというアインシュタインのアイデア
- 原子は特定の周波数の光のみ吸収・放射する。原子が出す光の周波数は連続変化しない
 - ボーアのエネルギー準位というアイデア

前期量子論

- 「解析力学 + 量子条件」で離散的エネルギー準位を計算する。
- 実体はどうなっているのかわからない（時々刻々の電子の位置のような概念はボーア・ソンマーフェルトの量子条件にはない）
- 計算結果は実験と合う。
- ドブロイが物質波という直観的描像は与えたが、そのときはまだシュレーディンガー方程式はない。

量子力学の登場（1925年）

- ハイゼンベルク，ボルン，ヨルダン：行列計算でエネルギー準位を求める。
- 電子の位置も運動量もエネルギーも行列。
- 自分の計算規則では $yx \neq xy$ となってしまうが，これは significant difficultyだ，とハイゼンベルクは論文に書いている。

アインシュタイン vs. ハイゼンベルク (1926年)

谷村による意訳・単純化

- ア 「あなたの理論では電子が原子の中のどこにあるかわからないことになってしまいます」
- ハ 「原子内の電子の軌道は観測されないのだから気にする必要はありません。物理の理論は観測可能なものだけを扱えばよいのです」
- ア 「その考えかたは間違っています」
- ハ 「あなたこそ、観測不可能なもの（絶対時間や絶対空間の概念）を排除して相対性理論を作ったじゃないですか！？」

アインシュタイン vs. ハイゼンベルク (続き)

谷村による意訳・単純化

- ア 「われわれが実際に何を観測できるか思い出すことは発見法としては役に立つこともあるかもしれませんが、原理的には、観測可能な量だけをもとにして理論を作ろうというのは完全に間違っています。実際はまさにその逆であり、**理論があってはじめて人が何を観測できるかが決まります**」

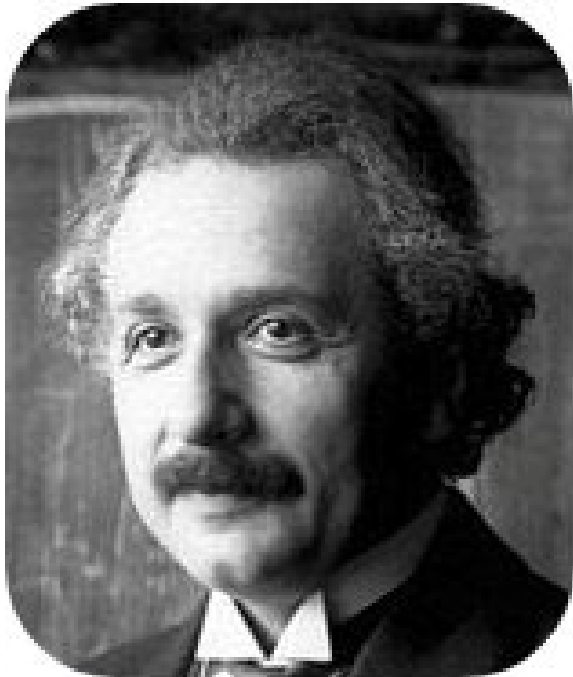
ハイゼンベルク 「部分と全体」 みすず書房 (1974)

量子力学の非決定論（確率論） 的性を批判

- ボルンが波動関数の確率解釈を提唱（1926年）
- 量子力学は非決定論（ものごとが起こる確率しか予測できない，究極的に偶然まかせ）
- アインシュタインはボルンに宛てた手紙の中で「神はサイコロを振らない（He is not playing at dice）」と書いた（1926年）。

アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼン

Einstein, Podolsky, Rosen, Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? (1935)



A. Einstein



B. Podolsky



N. Rosen

EPRの議論

- 2つの粒子の位置と運動量 $\hat{X}_1, \hat{X}_2, \hat{P}_1, \hat{P}_2$
- エンタングルメント状態：

$$|\Psi\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} e^{iqx/\hbar} |x\rangle \otimes |x+a\rangle dx,$$

$$\Psi(x_1, x_2) = \delta(x_1 - x_2 + a) \cdot e^{iq(x_1+x_2-a)/2\hbar}$$

- 相対座標 $\hat{X}_2 - \hat{X}_1 = a$ と、全運動量 $\hat{P}_1 + \hat{P}_2 = q$ の固有状態
(連続スペクトルの厳密な固有状態はないが近似的固有状態を考える)
- 1番の粒子の位置 \hat{X}_1 を測れば 2番の粒子の位置 $\hat{X}_2 = \hat{X}_1 + a$ を確実に予測できる。
- 1番の粒子の運動量 \hat{P}_1 を測れば 2番の粒子の運動量 $\hat{P}_2 = -\hat{P}_1 + q$ を確実に予測できる。

量子力学の实在論的記述の欠如を批判

- 1番の粒子を測定するだけで 2番の粒子に影響を与えることなく、2番の粒子の位置と運動量を確実に予測できるのだから、2番粒子の位置と運動量は測定する前から客観的に实在していると言ってよいだろう。
- ところが量子力学は2番粒子の位置と運動量は同時には確定しえないと言う。
- 量子力学は实在を記述する理論としては不完全だ、とEPRは主張。

ボーアの反論

Bohr, Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? (1935)



ボーア：観測のしかたに実在は依存する

ボーアのオリジナルの議論を谷村が言い換えている：

- 1番粒子の位置 \hat{X}_1 を測定する実験は全運動量 $\hat{P}_1 + \hat{P}_2$ を保存しない。だからこのとき \hat{P}_2 について確実なことは言えない。
- 1番粒子の位置 \hat{P}_1 を測定する実験は相対座標 $\hat{X}_2 - \hat{X}_1$ を保存しない。だからこのとき \hat{X}_2 について確実なことは言えない。
- だから、2番粒子の物理量 \hat{P}_2, \hat{X}_2 の値が同時に実在しているとは言えない。

観測されないものを理論は面倒見なくて よいか？

- ハイゼンベルクは、原子内の電子の軌道は観測されないのだから、時々刻々の電子の位置という概念は理論中になくてもよいと言った。
- ボーアは、 \hat{P}_2 と \hat{X}_2 の値を同時に測定する方法はないので、理論もまたそれらの値を同時に確定記述できなくてよいとした。

「隠れた変数」理論 (hidden-variable theory)

- 隠れた「変数理論」，ではない。
- 「電子は我々人類が未知の変数 λ を持っていて，その変数の値が決まれば，任意の物理量の値 $A(\lambda)$ は確実に決まっている」とする考え。
- 我々は，隠れた変数 λ の値を知らないから，観測結果を正確に予測できず，確率予測しかできない，という考え。

フォンノイマンのNo-Go theorem

von Neumann 「量子力学の数学的基礎」 (ドイツ語版 1932)

IV.2節 定理「量子力学の結果を隠れたパラメータで再現することはできない」



グレーテ・ヘルマンによる批判

Grete Hermann (1935) ゲッティンゲン大学で数学とカント哲学を研究。ネーターの学生だった。フォンノイマンの定理は経験的方法では確かめられない仮定をしていると批判。しかしほとんど誰にも気づかれなかった。



ベルによる批判

Bell, On the problem of hidden variables in quantum mechanics,
1966

非可換な物理量に対して期待値の加法性は成り立つ

$$\langle A + B \rangle = \langle A \rangle + \langle B \rangle$$

が、固有値の加法性は成り立たない：

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ の固有値は ± 1 だが、 $c_x \sigma_x + c_y \sigma_y + c_z \sigma_z$ の固有値

は $(\pm c_x \pm c_y \pm c_z)$ ではなく、 $\pm \sqrt{c_x^2 + c_y^2 + c_z^2}$

量子力学の物理量を純粋状態上の関数で表すという仮定は強すぎる、というか、それでは量子力学にならない。

$A = \pm 1, B = \pm 1$ でも $A + B = \pm 2, 0$ にならない

$A^2 = 1, B^2 = 1$ でも $BA = -AB$ だったら

$$\begin{aligned}(A + B)^2 &= (A + B)(A + B) \\ &= A^2 + AB + BA + B^2 \\ &= 1 + AB - AB + 1 \\ &= 2\end{aligned}$$

$A + B$ のスペクトル値は $\pm\sqrt{2}$

非可換物理量では、一般に

$$(A + B \text{ の値}) \neq (A \text{ の値}) + (B \text{ の値})$$

$(A \text{ の値})$ と $(B \text{ の値})$ が同時に実在すると思って計算してはいけない。

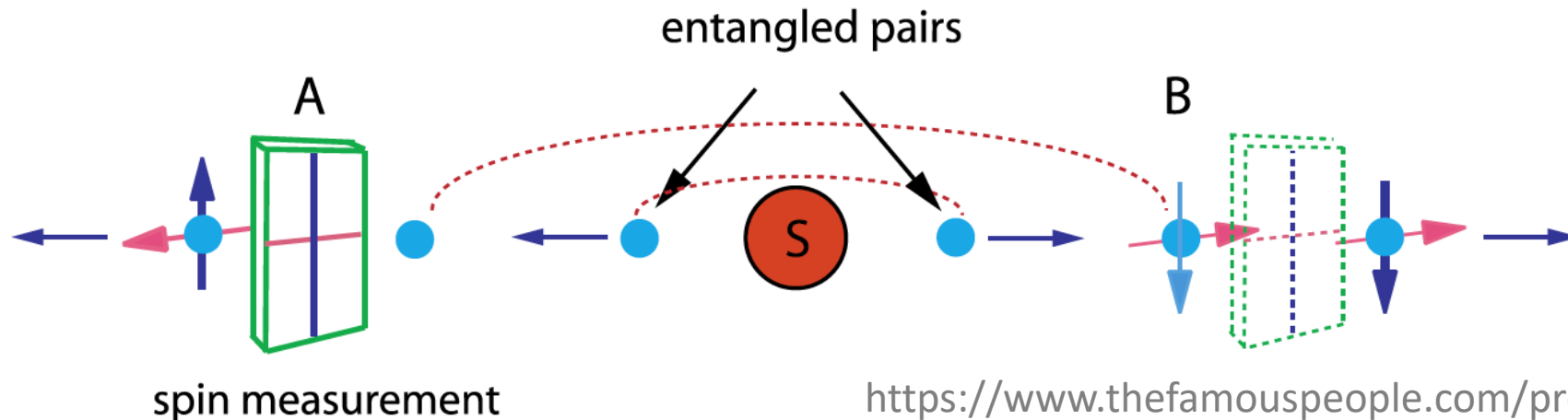
ボームのアイデア

D. Bohm, Quantum Theory, 1951

位置と運動量ではなくスピンの
EPRの問題を再考。

スピン・シングレット状態（規格化可能）

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \otimes |\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle)$$



<https://www.thefamouspeople.com/profiles/david-bohm-6313.php>

<https://www.nobelprize.org/uploads/2023/10/advanced-physicsprize2022-4.pdf>

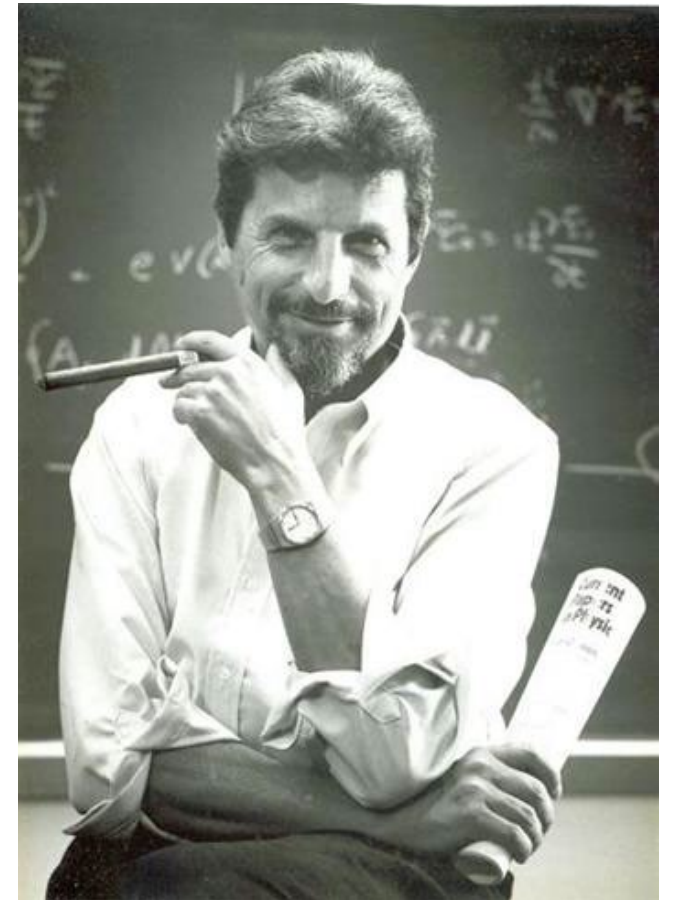
ボームとアハラノフ

D. Bohm and Y. Aharonov; Discussion of experimental proof for the paradox of **Einstein, Rosen, and Podolsky**, 1957

(なぜか EPR が ERP に)

スピンの相関量の不等式を書いている。

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \otimes |\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle)$$



ベルの不等式， 登場！

Bell, On the Einstein Podolsky Rosen paradox, 1964

$$|\langle A_1 B_2 \rangle - \langle A_1 C_2 \rangle| \leq 1 + \langle B_1 C_2 \rangle$$

1 番の粒子の物理量： A_1, B_1, C_1

2 番の粒子の物理量： A_2, B_2, C_2

いずれも測定値は ± 1

量子力学では単位ベクトル $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ 方向のスピン成分：

$$A = \vec{a} \cdot \vec{\sigma}, \quad B = \vec{b} \cdot \vec{\sigma}, \quad C = \vec{c} \cdot \vec{\sigma}$$

フォンノイマンの定理を批判した論文（1966年出版）の方を先に投稿して、その後でこの不等式の論文を投稿した（1964年出版）のだが、出版順序が逆転してしまった。

ベルの不等式の証明

スピンの測定値はどれも ± 1 .

粒子 1 と粒子 2 の同じ向きのスピン成分は完全逆相関：

$$A_2 = -A_1, \quad B_2 = -B_1, \quad C_2 = -C_1$$

そうすると,

$$\begin{aligned} A_1 B_2 - A_1 C_2 &= -A_1 B_1 + A_1 C_1 \quad (\because \text{逆相関}) \\ &= -A_1 B_1 + A_1 B_1 B_1 C_1 \quad (\because BB = 1) \\ &= -A_1 B_1 (1 - B_1 C_1) \\ &= -A_1 B_1 (1 + B_1 C_2) \quad (\because \text{逆相関}) \end{aligned}$$

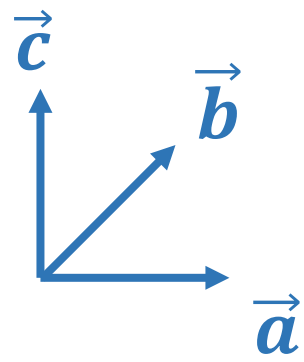
$$|\langle A_1 B_2 \rangle - \langle A_1 C_2 \rangle| = |\langle A_1 B_1 (1 + B_1 C_2) \rangle| \leq 1 + \langle B_1 C_2 \rangle$$

量子力学ではベルの不等式は破れる

スピン・シングレット状態では,

$$\langle A_1 B_2 \rangle = -\vec{a} \cdot \vec{b} = -\cos \theta_{ab}$$

測定軸をこう選ぶと,


$$\langle A_1 B_2 \rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \langle A_1 C_2 \rangle = 0, \quad \langle B_1 C_2 \rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}}$$
$$|\langle A_1 B_2 \rangle - \langle A_1 C_2 \rangle| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.7$$
$$1 + \langle B_1 C_2 \rangle = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.3$$

ベルの不等式 $|\langle A_1 B_2 \rangle - \langle A_1 C_2 \rangle| \leq 1 + \langle B_1 C_2 \rangle$ は不成立.

ベルの議論の長所と短所

長所：EPRの元の議論にかなり忠実。エンタングル状態を使って、粒子1に対する測定だけで、粒子2の状態を乱すことなく粒子2のスピン測定値を確実に予測できる（完全逆相関）という状況になっている。測定していない物理量にも ± 1 の値が実在しているという仮定から導かれる。

短所：スピン・シングレット状態が大前提。任意の状態では不等式成立の保証がない。実験で不等式の破れが観測されたとしても「シングレット状態の生成に失敗しただけだろ」と言われたらおしまい。

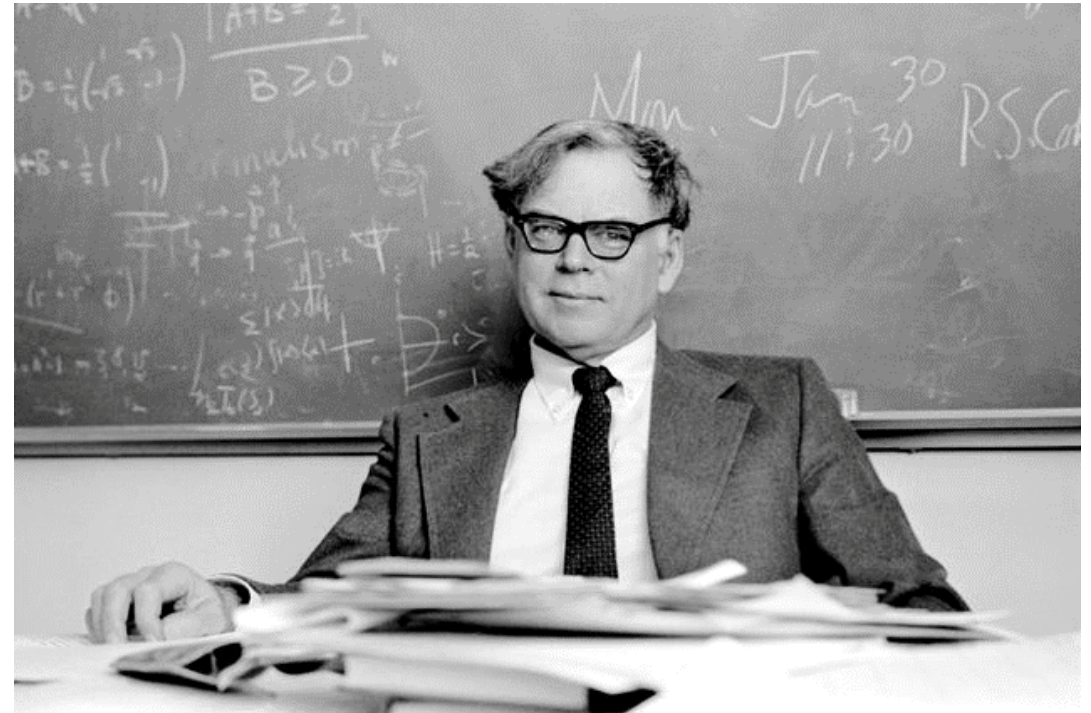
CHSH 登場

John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony, Richard Holt
Proposed experiment to test local hidden-variable theories, 1969



John Clauser

https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/clauser/photo-gallery/?gallery_style=page

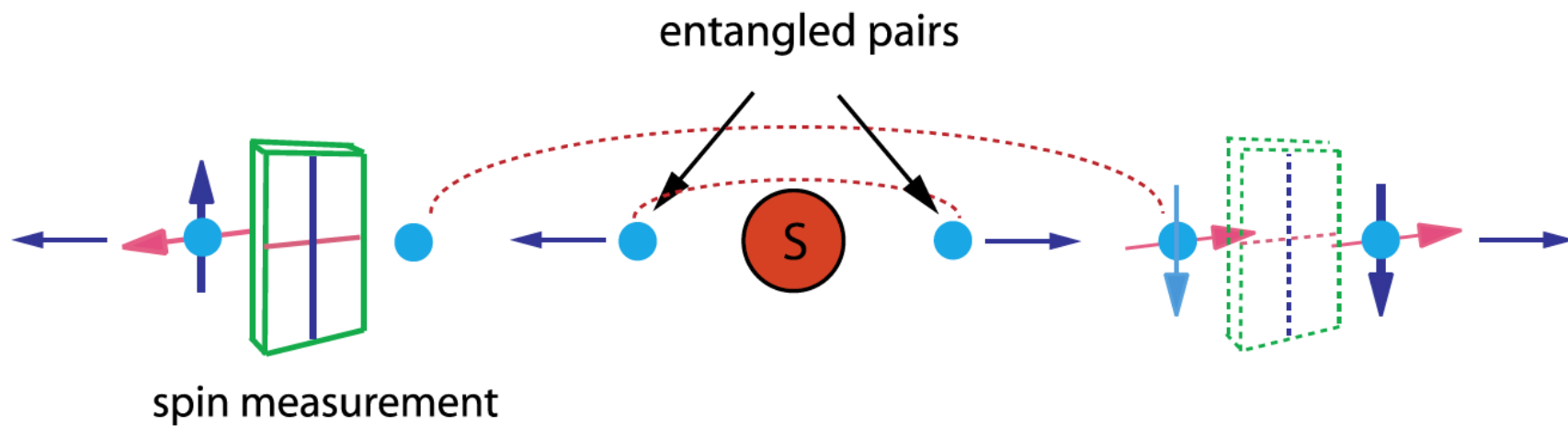


Abner Shimony

<https://www.bu.edu/cphs/about/abner-shimony/>

CHSHの不等式

$$-2 \leq \langle AU \rangle + \langle AV \rangle + \langle BU \rangle - \langle BV \rangle \leq 2$$



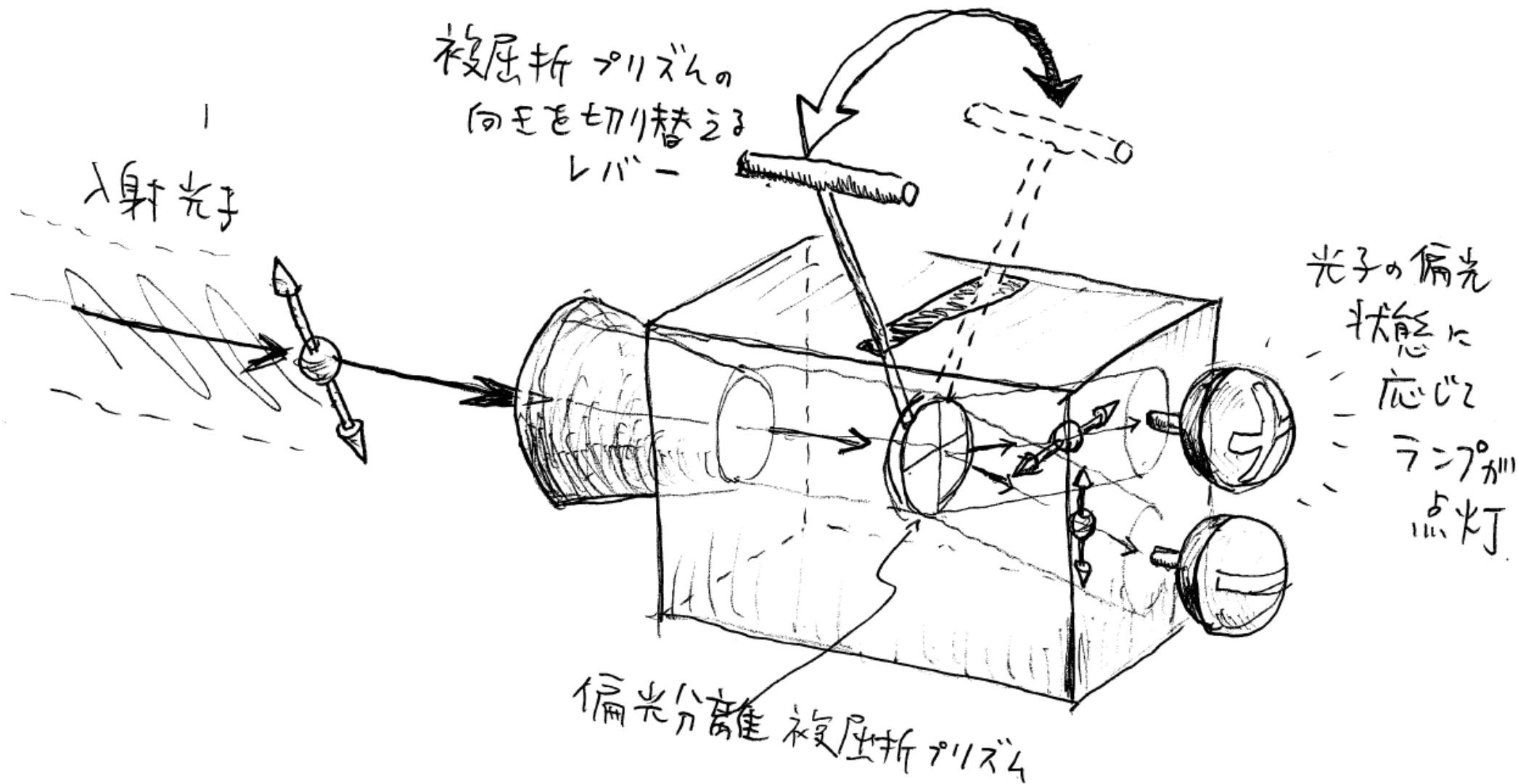
A または B を測る。測定値は ± 1 .
(A と B を一度に測ることはできない)

$$A = \vec{a} \cdot \vec{\sigma}, \quad B = \vec{b} \cdot \vec{\sigma}$$

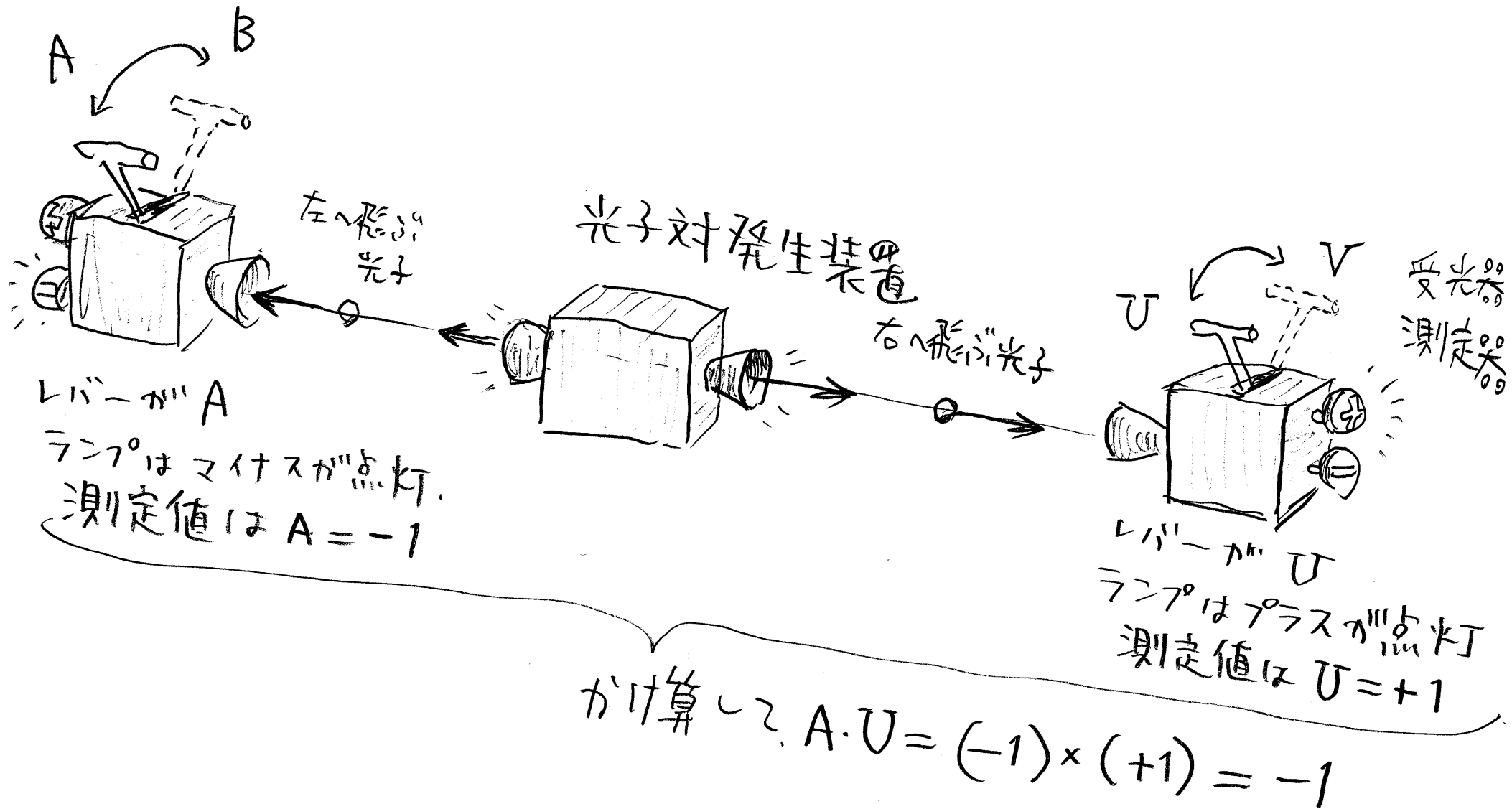
U または V を測る。測定値は ± 1 .
(U と V を一度に測ることはできない)

$$U = \vec{u} \cdot \vec{\sigma}, \quad V = \vec{v} \cdot \vec{\sigma}$$

CHSHの不等式の検証実験で使われる 偏光測定器の概念図



1 台の光子対発生装置と 2 台の偏光測定器

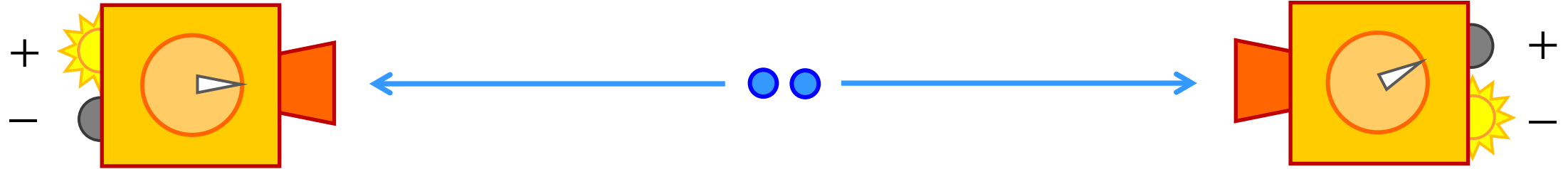


実験の手順

AまたはBを測る。
A, Bどちらを測るかは測定者が決める（サイコロを振って決めてもよい）。

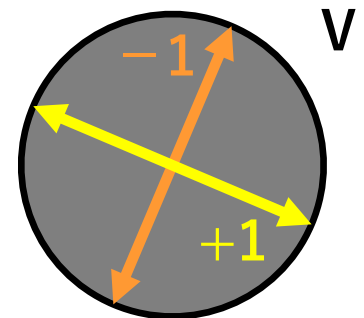
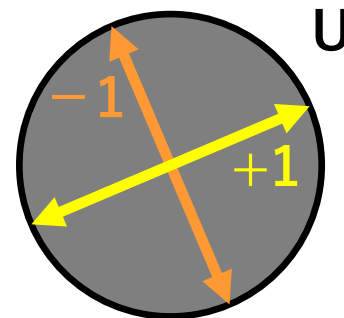
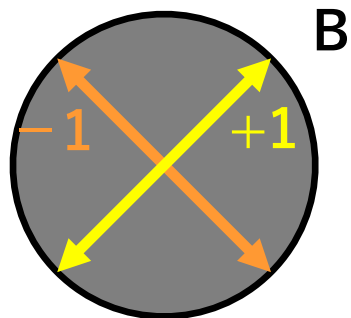
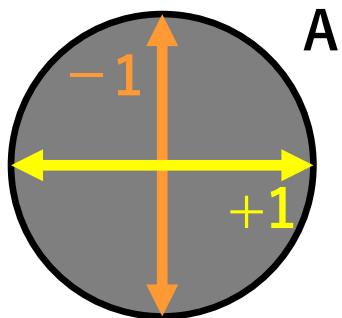
UまたはVを測る。
U, Vどちらを測るかは測定者が決める（サイコロを振って決めてもよい）。

光子対発生



測定結果は
 $A = \pm 1$ または $B = \pm 1$

測定結果は
 $U = \pm 1$ または $V = \pm 1$



測定データの集計

ペア番号	左で測る物理量	値	右で測る物理量	値	かけ算
1	A	+1	U	-1	$A U = -1$
2	A	-1	V	-1	$A V = +1$
3	B	-1	V	+1	$B V = -1$
4	A	+1	V	-1	$A V = -1$
5	B	+1	U	+1	$B U = +1$
6	B	-1	U	-1	$B U = +1$
7	A	-1	V	-1	$A V = +1$
8	A	+1	U	+1	$A U = +1$
9	B	+1	V	-1	$B V = -1$
10	A	-1	V	+1	$A V = -1$
...					...

左でAを測るかBを測るかはそのつど選ぶ。測定値は ± 1 。

右でUを測るかVを測るかはそのつど選ぶ。測定値は ± 1 。

光子対についてのAとUの値を掛けた

AUの平均値 $\langle AU \rangle$,

AVの平均値 $\langle AV \rangle$,

BUの平均値 $\langle BU \rangle$,

BVの平均値 $\langle BV \rangle$

$$\langle S \rangle := \langle AU \rangle + \langle AV \rangle + \langle BU \rangle - \langle BV \rangle$$

CHSH不等式の証明

$$S := AU + AV + BU - BV = A(U + V) + B(U - V)$$

A, B, U, V の値はどれも ± 1 .

$$U + V = +2, \quad 0, \quad 0, \quad -2$$

$$U - V = 0, \quad +2, \quad -2, \quad 0$$

ゆえに S の値は ± 2

したがって S の期待値は $-2 \leq \langle S \rangle \leq +2$ (証明終了)

証明の仮定：

A, B, U, V の ± 1 の値の出現に関する非負結合確率が存在することを仮定した。

量子力学の予測

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \otimes |\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle)$$

$$A = \sigma_x \otimes \mathbf{1}, \quad B = \sigma_y \otimes \mathbf{1},$$

$$U = \mathbf{1} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (\sigma_x + \sigma_y), \quad V = \mathbf{1} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}} (\sigma_x - \sigma_y)$$

のとき, maximal violation:

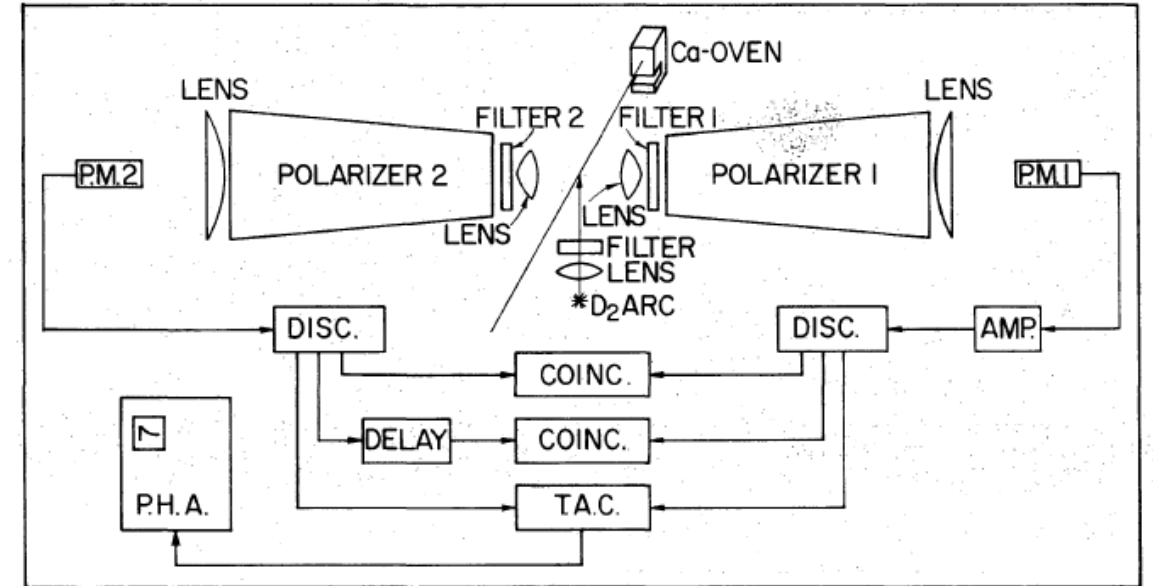
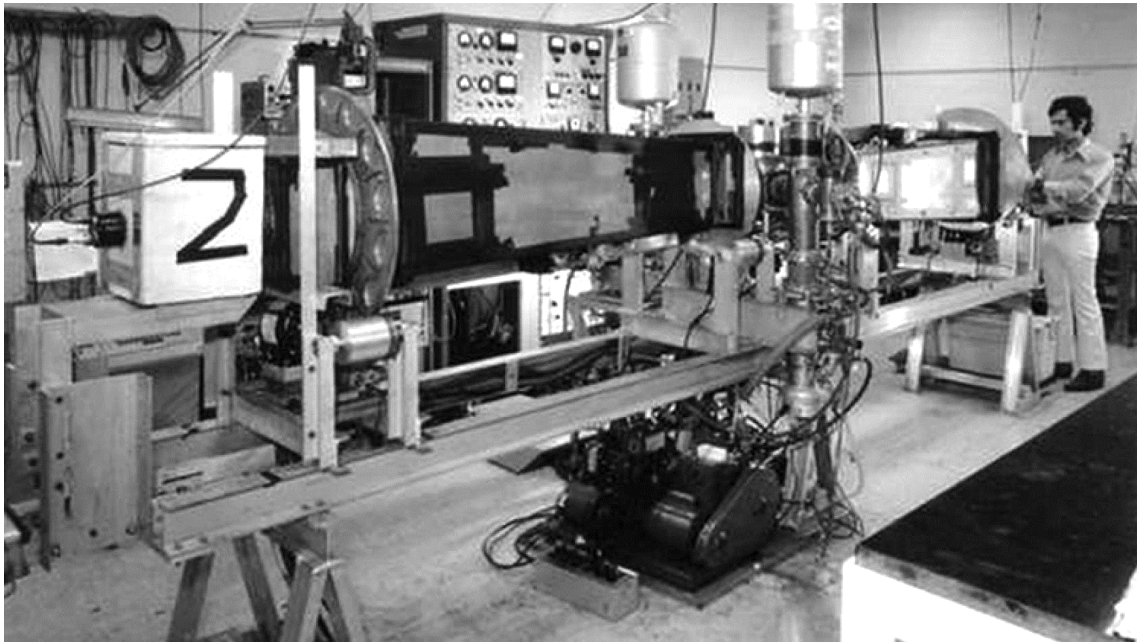
$$\langle S \rangle = -2\sqrt{2}$$



フリードマンとクラウザーの実験

Freedman (大学院生) and Clauser (ポスドク) ; Experimental test of local hidden-variable theories, 1972

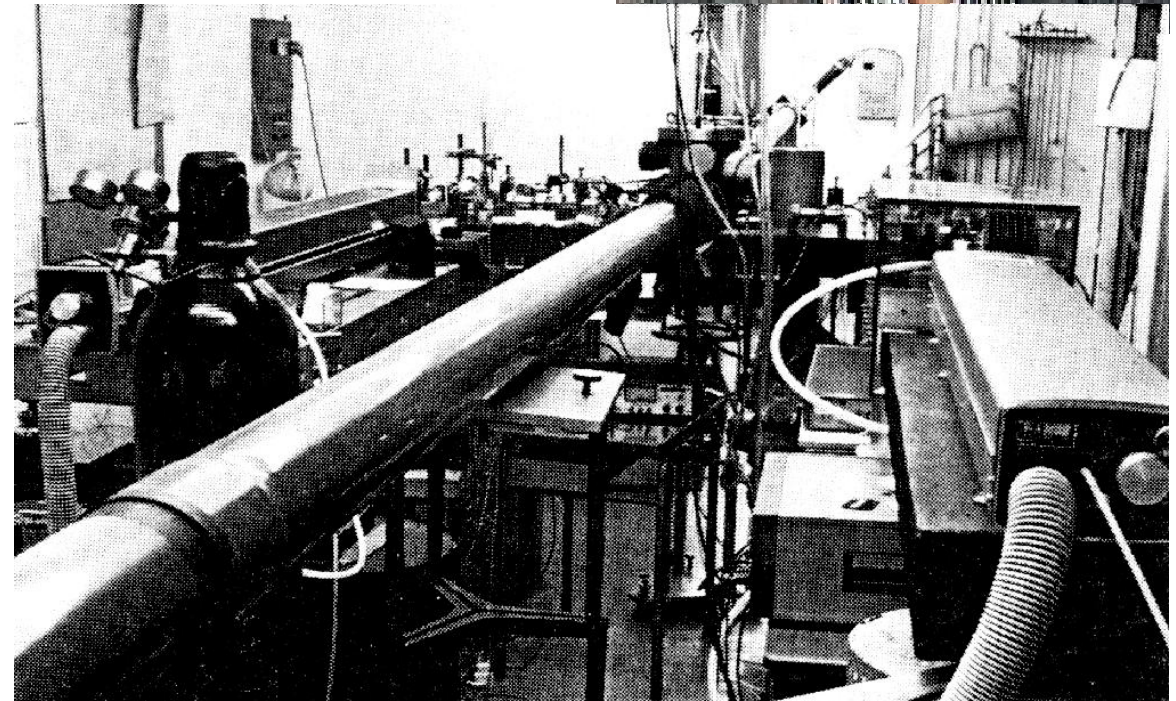
Stuart Freedman



CHSH不等式を少しmodifyした不等式の破れを確認。
しかし、測定軸を固定したため「局所性の抜け穴」があった。

アラン・アスぺの実験 (1982年)

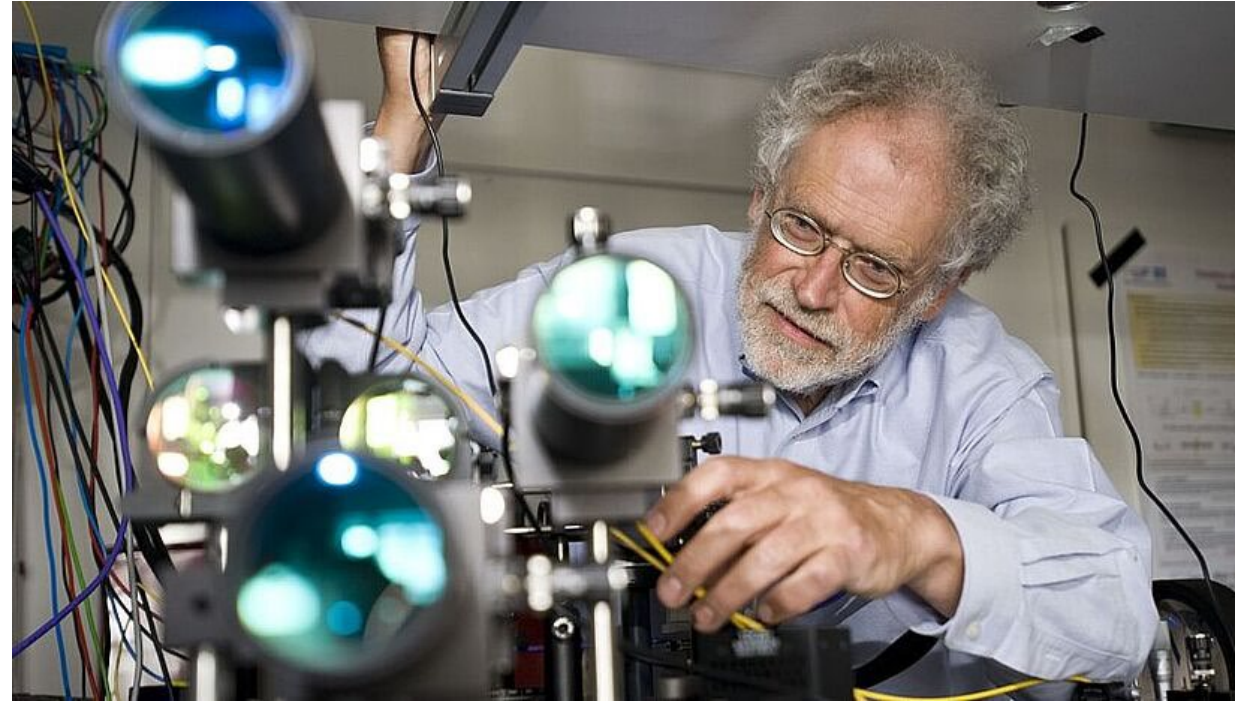
「左右の測定器が互いに連絡しあう時間があると、量子もつれがなくても相関を生じうる」というクレームに応えるため、左右の測定器を光速で40ナノ秒かかる距離に離して、測定器を10ナノ秒周期で切り替える実験を行い、 $\langle S \rangle = 2.4$ を得た。



アントン・ツァイリンガーの実験（1998年）

左右の測定器が互いに相手の状態を知らないようにするため、また、あらかじめ光子が測定器の状態を知るチャンスがないようにするため、左右の測定器のそばに乱数発生器を置いて、光子が発生して測定器に飛び込むまでの間に乱数を振って、それに応じて測定器を切り替える実験を行った。

$\langle S \rangle = 2.73$ を得た。



CHSHの不等式はなぜ破れるのか

量子力学から言えること：

A と B , U と V は非可換。同時固有状態が存在しない。

$$S = AU + AV + BU - BV$$

A と U を測っているときは B, V の値が実在していると思っ
てはいけない。また、 A と U を測って得られた A の値と、もし仮
に A と V を測ったとしたら得られたであろう A の値とが等しい
ことを量子力学は保証しない。にもかかわらず、 A, B, U, V
全部が ± 1 の値を持っていると仮定して $S = \pm 2$ と推論したこ
とが誤り。ただし、 A と U, A と V, B と U, B と V はspace-likeに離
れた物理量であり、可換であり、同時実在性を持つ。

アインシュタイン，敗れる

「空を見上げたときにだけ月
はあると君は信ずるのか？」

Do you really believe that the moon
exists only when you look at it ?

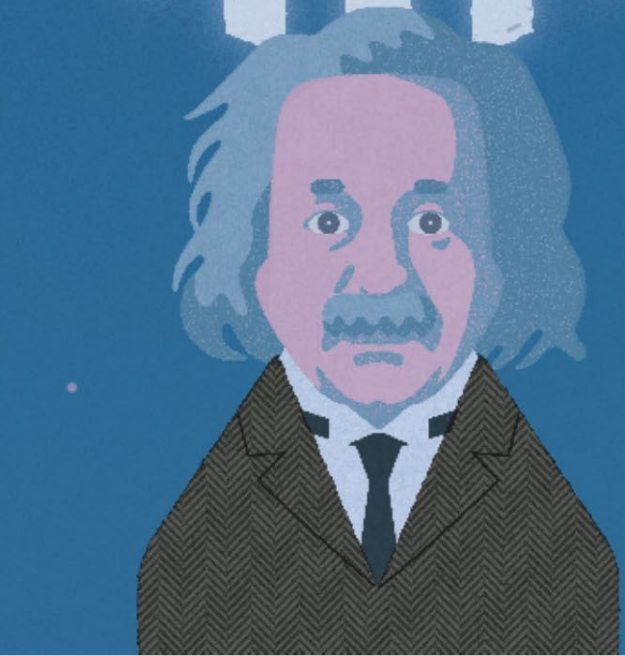
アインシュタインが Pais と散歩しているときに言った言葉

[A. Pais: Einstein and the quantum theory, Rev. Mod. Phys. \(1979\), p. 907](#)

「観測すればそうなる値」は観測されていないときも
同様に実在しているはずだ，というのがアインシュタ
インの信念だったが，それは誤りであった。

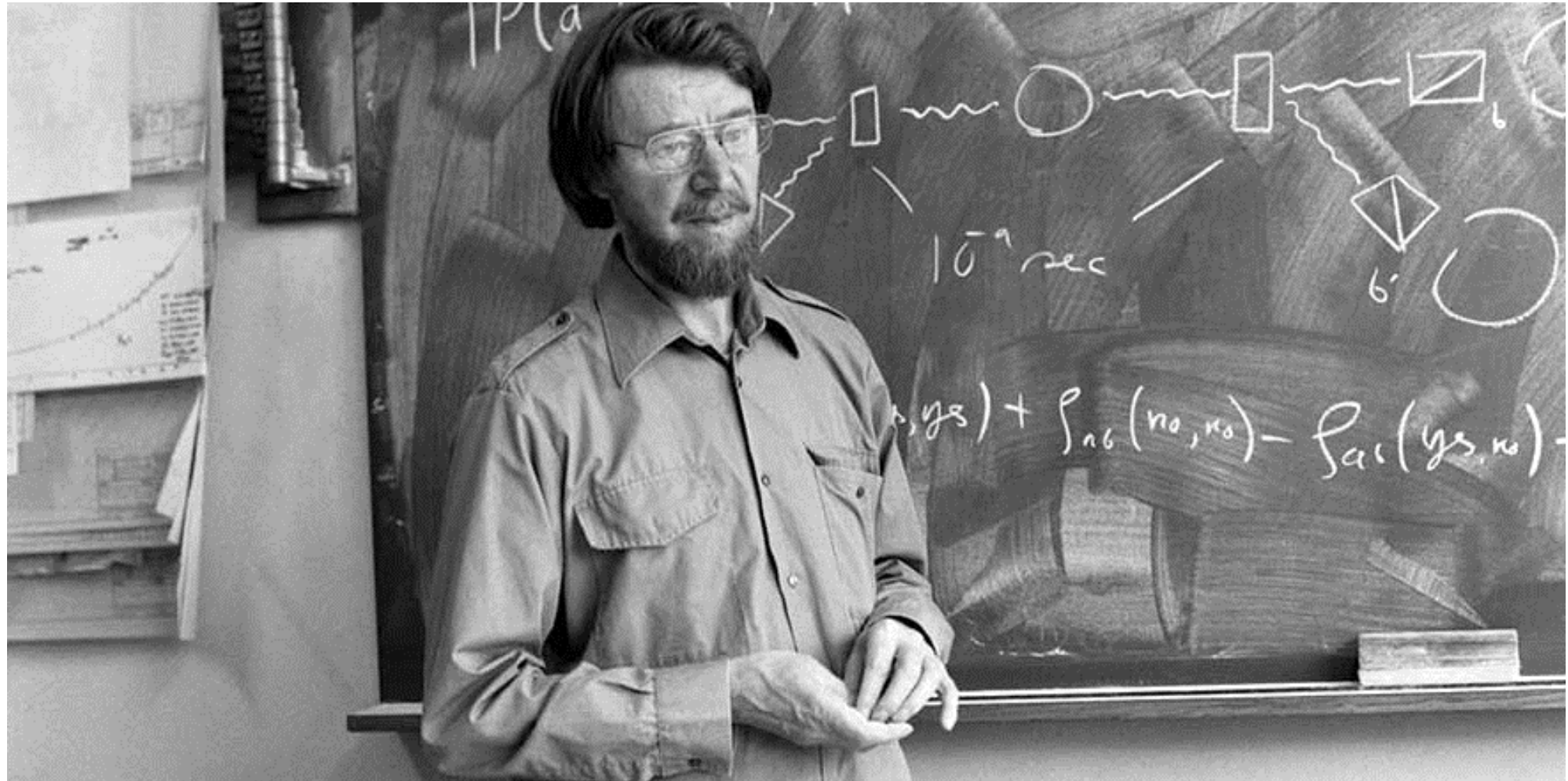
谷村省吾「量子もつれ実証アインシュタインの夢 といえる一
測っていない値は実在しない」日経サイエンス2019年2月号
(詳細な補足解説ノートを無料公開しています)

「アインシュタインと散歩していたとき、彼は不意に足も止め、私のほうを向いて『君は、君が見上げているときだけ月が存在していると本当に信じるのか？』と尋ねた」
——物理学者 A. Pais「アインシュタインと量子論」
(Reviews of Modern Physics 誌, 1979年) より



ジョン・スチュアート・ベル (1928-1990)

CERNにて、加速器設計の仕事のかたわら、量子力学・場の量子論も研究



ベルの経歴 (1/2)

- 北アイルランドのベルファストで労働者階級の家で生まれた。4人兄弟の中で高校に行ったのはジョンだけ。高校を卒業してクイーンズ大学ベルファスト校の物理学科の実験助手になり、才能が認められ、大学に入学・卒業した。
- クイーンズ大学で量子力学を学ぶと、波動関数は実在する何かなのか、それともたんなる数学的道具なのかという疑問を持ち、講師を質問攻めにした。
- イギリスの原子力研究所に就職。在職中パイエルスのもとで博士号取得。CPT定理を証明したが、パウリとリューダースが一足先に証明していた。
- CERNの加速器設計部門に転職。妻は数学科を卒業して加速器開発研究に従事。
- サバティカル休暇中に、いわゆるベルの不等式を発見。
- ジャッキーフとの共同研究で場の量子論のカイラル・アノマリーを発見。
- 特殊相対性理論において「ベルのパラドクス」と呼ぶべきパズルを考案。
- ランダウ・リフシッツの本を英訳（力学，量子力学，物質中の電磁場，量子電磁力学の巻）。

ベルの経歴 (2/2)

- 1982年にCERNに滞在していたJ.J.サクライと議論する予定だったが、約束の時間になってもサクライが現れないので、サクライのアパートを訪ねたところ、倒れているサクライを発見したらしい（未確認情報）。
- J.J.サクライのModern Quantum Mechanicsの遺稿収集に協力。ベルの不等式についての解説の節をベル自身が補足執筆。ベルのオリジナルの不等式を書き換えた数式がJ.J.サクライの本に書かれている。
- ベルも1990年、CERN在職中に亡くなった。
- 佐藤文隆氏はベルのことを「生きておればノーベル賞間違いなし」と評していた。

ベルの2つの論文

- ベルはCERNの所員としてサバティカル休暇でSLACに滞在しているときに2つの論文を書いた。
- 1つ目はフォンノイマンの「隠れた変数理論はダメ」定理を批判的に分析した論文。Reviews of Modern Physics に投稿。
- 2つ目がオリジナルのベルの不等式の論文。Physics-Physique-Fizika誌に投稿。物理学の総合誌とすることを目指してアンダーソンとマティアスが1964年に創刊した学術誌。
- 結果的には、投稿順とは逆順に掲載された。
- SLACに客員として訪問滞在中だったベルは無料で投稿できるから Physics-Physique-Fizikaに投稿したらしい（じつは著者に掲載料が支払われる）。
- Physics-Physique-Fizika誌は 1968年に予告なしに廃刊になった。
- 今ではAmerican Physical Societyが Physics誌の全論文を電子化して公開しているが、Physics誌は長年、図書館蔵の紙冊子でしか読めなかった。

クラウザーの経歴

- ジョン・クラウザーの父は、カリフォルニア工科大学で流体力学と航空工学の研究で博士学位を取った。ジョンに科学的懐疑心を持つように教えてた。
- ジョン・クラウザーもカリフォルニア工科大学に入学してファインマンに量子力学を教わったが、量子力学に納得いかない気持ちをずっと持ち続け、EPRやボアの論文を読んでいた。
- クラウザーはコロンビア大学の大学院に進学し、宇宙背景マイクロ波の測定実験を行うタデウスの下で研究していた。
- 大学院在学中にベルの論文を読んで衝撃を受けた（量子力学の正否を実験で判定できるかもしれない！という衝撃）。
- パリティ破れの実験を行ったウーに、ベルの不等式の検証に使えそうなデータはないかと問い合わせたり、アハラノフに相談したり、ベルにも手紙を書いた。
- MITのポスドクだったコーチャーを訪ね、バークレー校で偏光光子の相関実験を行っていたことを聞いた。
- タデウスに叱られ、宇宙マイクロ波の観測研究で博士号を取得した。

シモニー

- 一方で、シモニーはシカゴ大学でカルナップの指導のもとで哲学の博士学位を取得した。ただ、論理実証主義に対しては批判的であり、实在論の信奉者であった。
- シモニーはボルンの本「原因と偶然の自然哲学」を読んで、物理学の博士号を取りたいと思い、プリンストン大学大学院に入学。
- シモニーはワイトマンの指導の下につき、「EPRの論文を読んで間違いを見つけよ」という問題を与えられた。が、どこにも間違いはないと思った。
- ワイトマンの数学力についていけないと思ったシモニーはウィグナーに指導を頼み、量子力学の観測問題について主流のコペンハーゲン解釈とは別の立場を考えるようになった。
- シモニーは物理学の博士号を取る前にMITの哲学科にポストを得て、学部生に量子力学を教えるようになった。また、ボストン周辺の物理学科と哲学科に知り合いを得た。
- その頃、ベルの論文（CERNから送られてきたタイプ打ちのプレプリ）を読んだ。

クラウザーとシモニーの出会い

- シモニーは、アハラノフに「ウーの実験はベルの不等式の検証実験に使えるか」と尋ね、アハラノフは「すでにそうになっている」と（間違った）返答をした。
- ボストン大学に移籍したシモニーは、物理学科の大学院生であるホーンを指導することになり、ベルの不等式の検証する方法を検討する課題を与えた。
- バークレーのコーチャーとカミンズの光子対偏光相関実験が使いそうであることにシモニーとホーンは気づいた。
- 1969年のアメリカ物理学会のプログラムとアブストラクトを読んだシモニーは、クラウザーがそのような実験を提案していることを知って驚いた。
- シモニーはクラウザーに電話を掛けて共同研究を持ち掛けた。
- シモニーが連れてきたハーバード大学大学院生のホルトも加わって、CHSH（クラウザー・ホーン・シモニー・ホルト）の論文ができた。

クラウザーの実験とその後

- コロンビア大学で博士号を取ったクラウザーは、CHSHの不等式を検証できる実験設備がある場所を求めて、カリフォルニア大学バークレー校のタウンズのポスドク研究員になった。
- クラウザーはタウンズとカミンズを説得して（タウンズは好意的だったが、カミンズはムダだと思ったらしい）、実験計画を承認してもらい、大学院生フリードマンと一緒に実験装置を改良改造して（のちにクラウザーは、使えそうな部品を求めてゴミ箱をあさっていた、と述べている）、200時間分のデータを集め、1972年に「（局所实在論にもとづいている）CHSHの不等式は間違いであり、量子力学が正しい」という最初の論文を発表した。
- その後、クラウザーは任期付きの研究員職を転々とするが、大学の定職には何度応募しても採用されず、自営の研究所で医療機器の修理などを請け負って生計を立てていた。

教訓 (1/3)

- 科学の新説・アイデアは、提唱者・発見者ですら、にわかには信じられないし、その真価を理解できないことがある（アインシュタインは量子論の立て役者でありながら、出来上がった量子力学に不満であったし、ハイゼンベルクは物理量の積の非可換性に気づいていながら自分の理論の欠陥だと思っていた）。
- 後続の研究者にとっても「心の底から納得はしてない」気持ちは研究の原動力になる。

教訓 (2/3)

- 主義主張や世界観は、凝り固まり排他的になると有害だが、オープンに議論し修正可能とする態度を保つなら、建設的でありえる。
- 自分がやりたいことをやれる場所を求めて動くことは大切。
- 世界のどこかに理解者・仲間になれる人はいる。
- 相談は大切だが、相談した人の意見が正しいとは限らない。
- 機が熟すのに時間がかかることがある。

教訓 (3/3)

- 「よい問題」を見つけることは大切だが、何がよい問題でどういうアプローチが適切かということは後になってみないとわからないことが多い。
- 科学の研究は壮大なリレーであり、伝言ゲームに似ている。ゴールも決まっていない。
- 国籍も世代も違う人たちが、面白い問題を聞きつけ、アイデアを付け足していく。バトンタッチして行っていつの間にか遠いところまでたどり着く。
- 成果を急がないでほしい（誰に言えばいい？）

ノイラートの船：科学の研究は、乗っている船の不具合を見つけて修理・補強しながら航海するよ
うなものだ。一から作り直すことはできないが、実践を通して見直され、改良を重ねて進んでいく。



100年経っても量子力学
は最終完成形ではありませんが、
使うのをやめれるものでもありません。
あなたも量子力学を補強
する側に参加できます！



ご清聴ありがとうございました