栄中日文化センター講座
2023年4月23日，5月21日（第２回），**6月25日（第３回）**

名古屋・栄 中日文化センター

量子もつれとは何だろう？

量子力学の基礎から
２０２２年のノーベル物理学賞まで

谷村 省吾

名古屋大学大学院 情報学研究科

twitter @tani6s

資料を私のウェブサイトで公開しています。「谷村省吾」で検索 または QRコード→

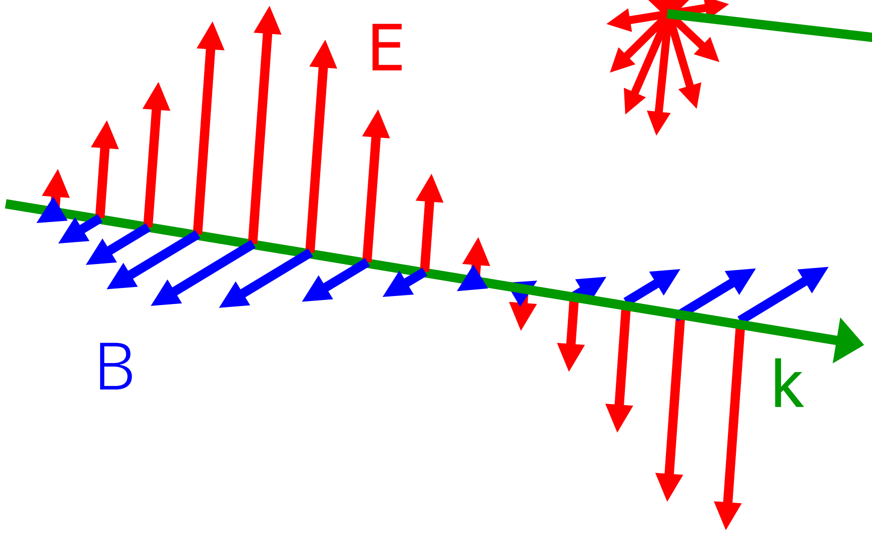
MAKE NEW STANDARDS. 東海国立大学機構

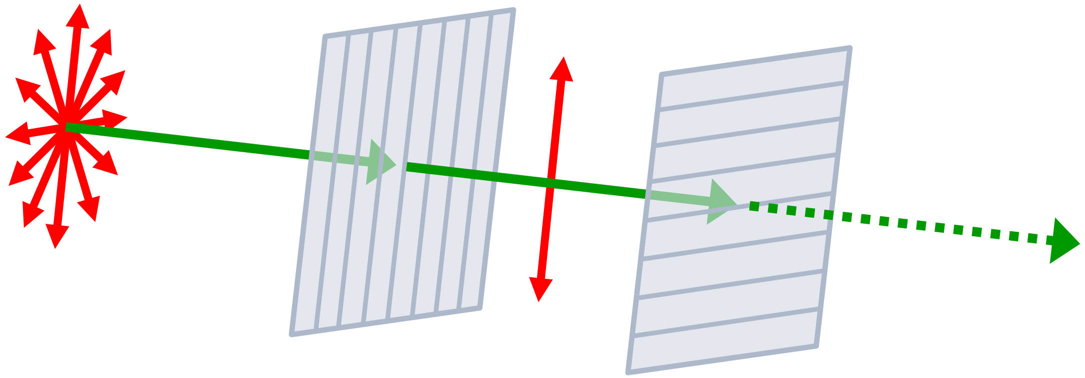
NAGOYA UNIVERSITY

名古屋大学
情報学部
大学院情報学研究科

偏光の話 1/4

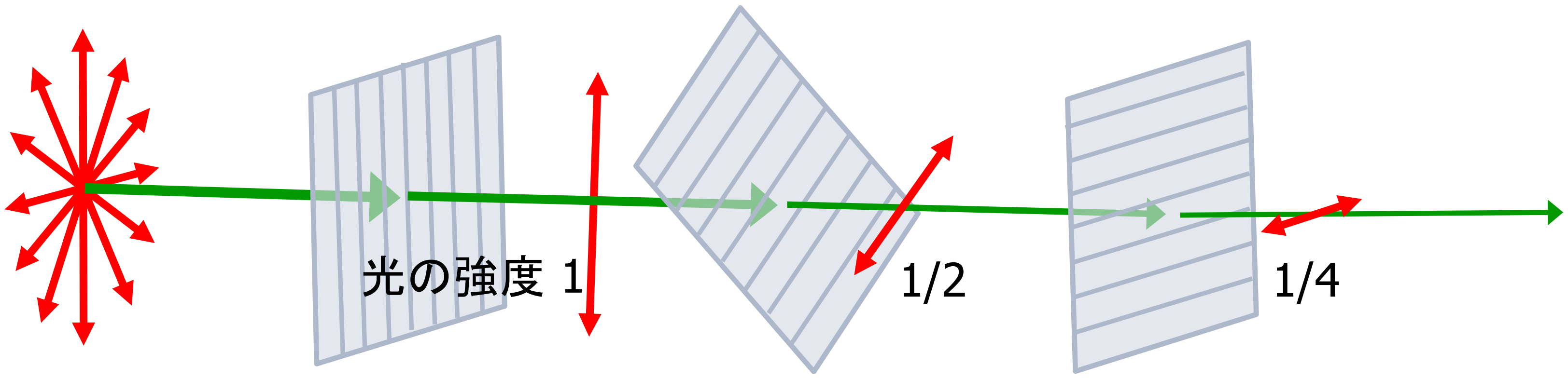
- 光は横波（進行方向の垂直方向に電磁場が振動している）
- 光には偏光（電磁場の振動方向の偏り）という性質がある。
- 偏光フィルターは特定方向の偏光だけを通す。





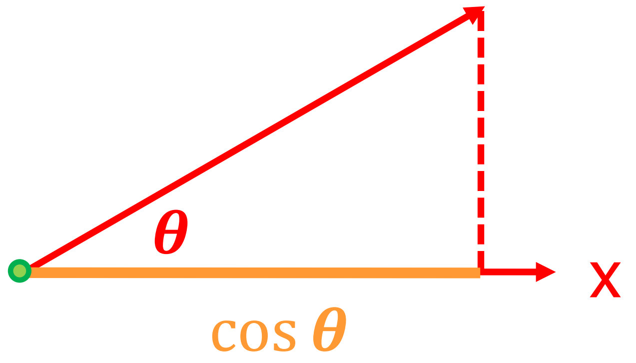
偏光の話 2/4

- 光自体の偏光の向きと、偏光フィルターの透過軸の向きとが、ずれている場合は、確率的に光が通り、しかもフィルターを通り抜けたあとの光は「そっち向きの偏光」になりきる。



偏光の話 3/4

- 角度 θ 傾いた偏光を x軸に**射影した成分**

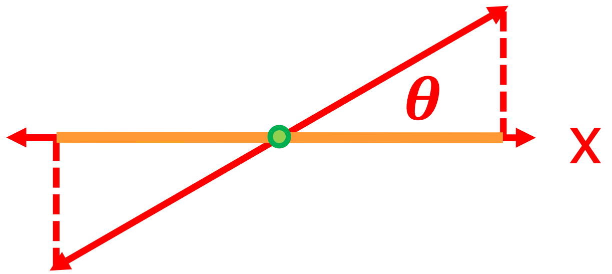


$$\alpha = \cos\theta$$

- **偏光の向きと偏光フィルターの向きが角度 θ ずれているときフィルターを通る確率**は、**振幅の絶対値２乗**

$$P(\theta) = |\alpha|^2 = \cos^2\theta = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\theta)$$

$$P\left(90^\circ\right) = 0$$

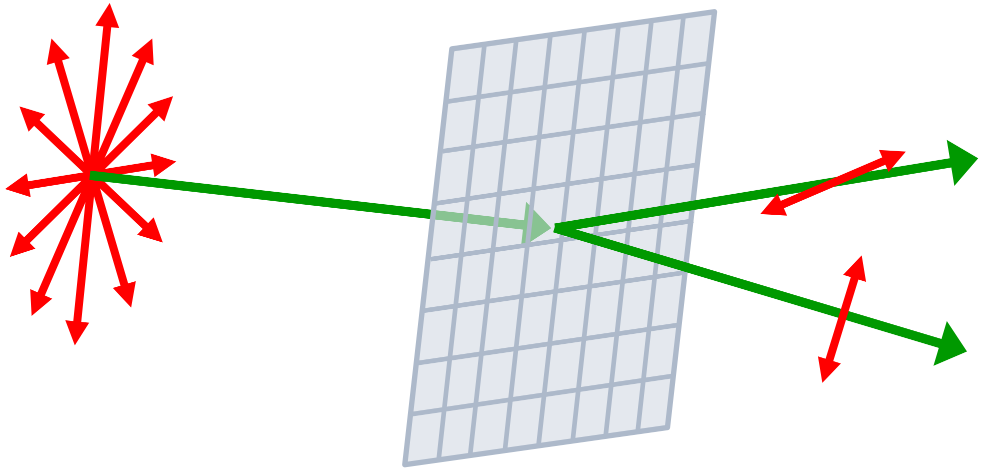


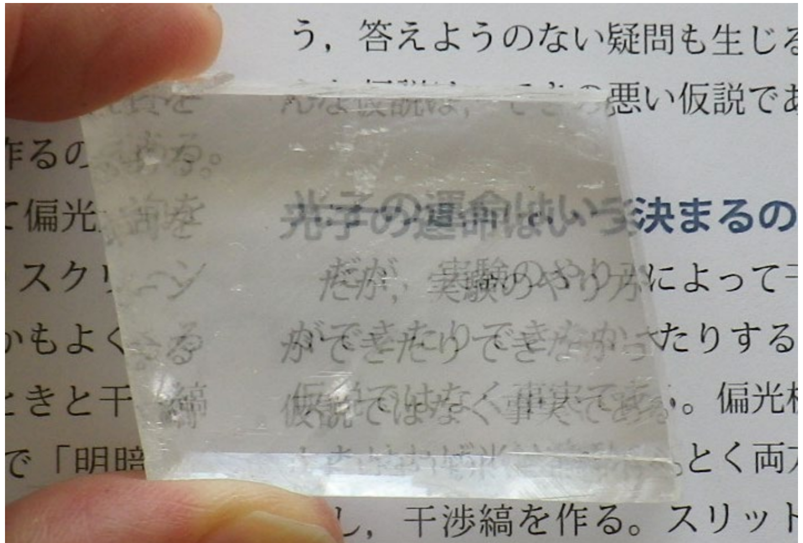
$$P\left(45^\circ\right) = \left|\frac{1}{\sqrt{2}}\right|^2 = \frac{1}{2}$$

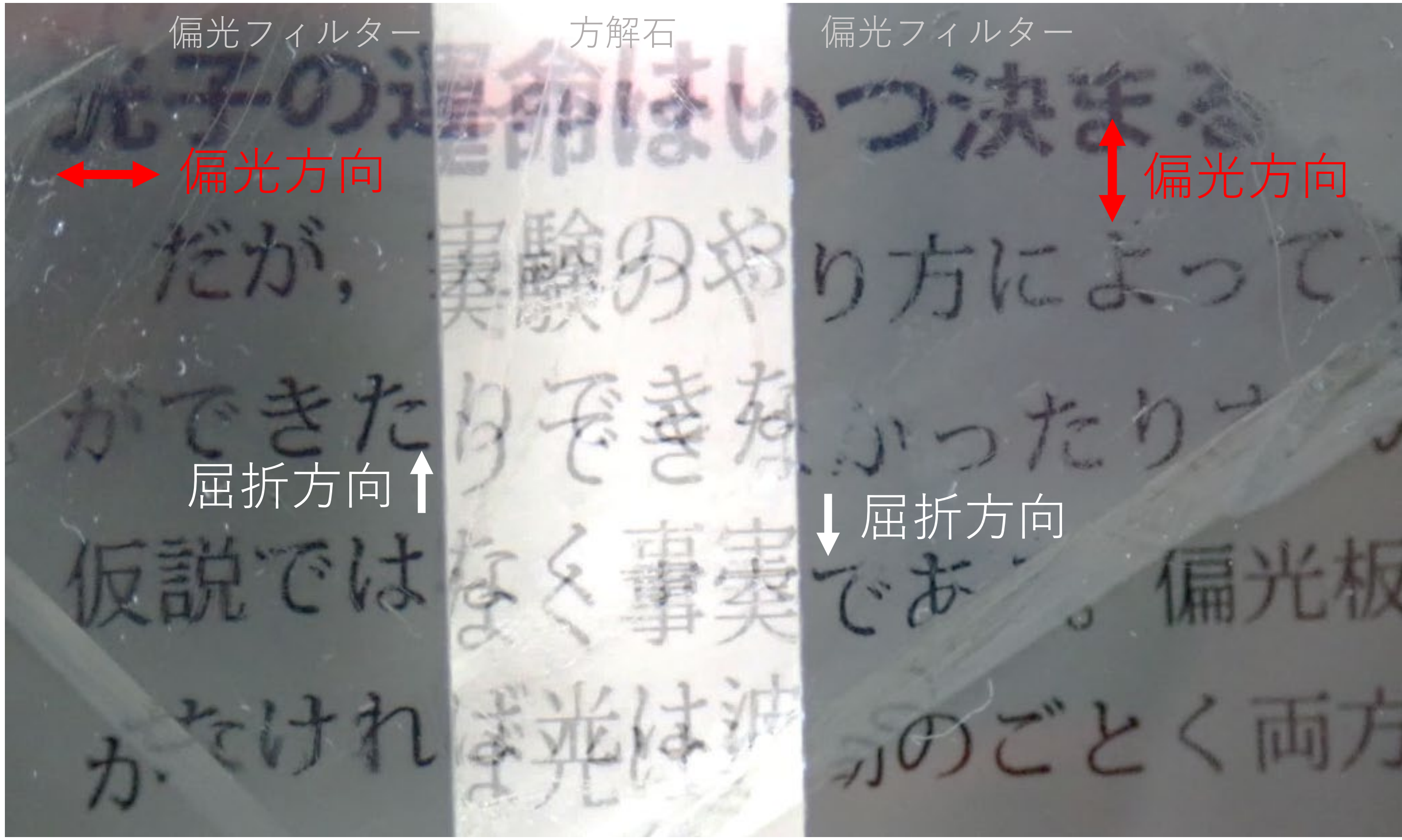
$$P\left(22.5^\circ\right) = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right) = 0.8535\cdots$$

偏光の話 4/4

- 複屈折結晶は、互いに垂直な偏光成分を分けて屈折させる。



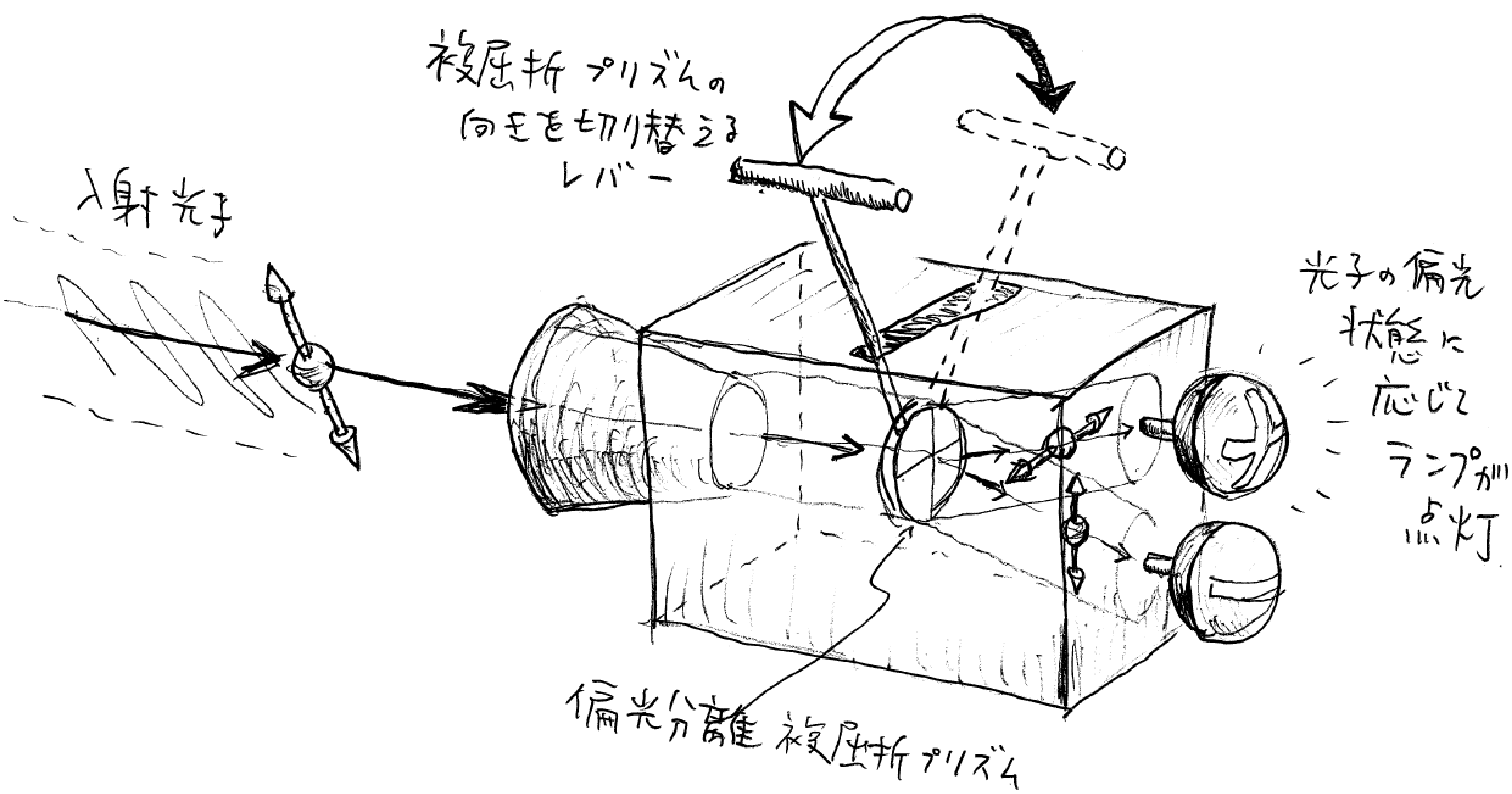




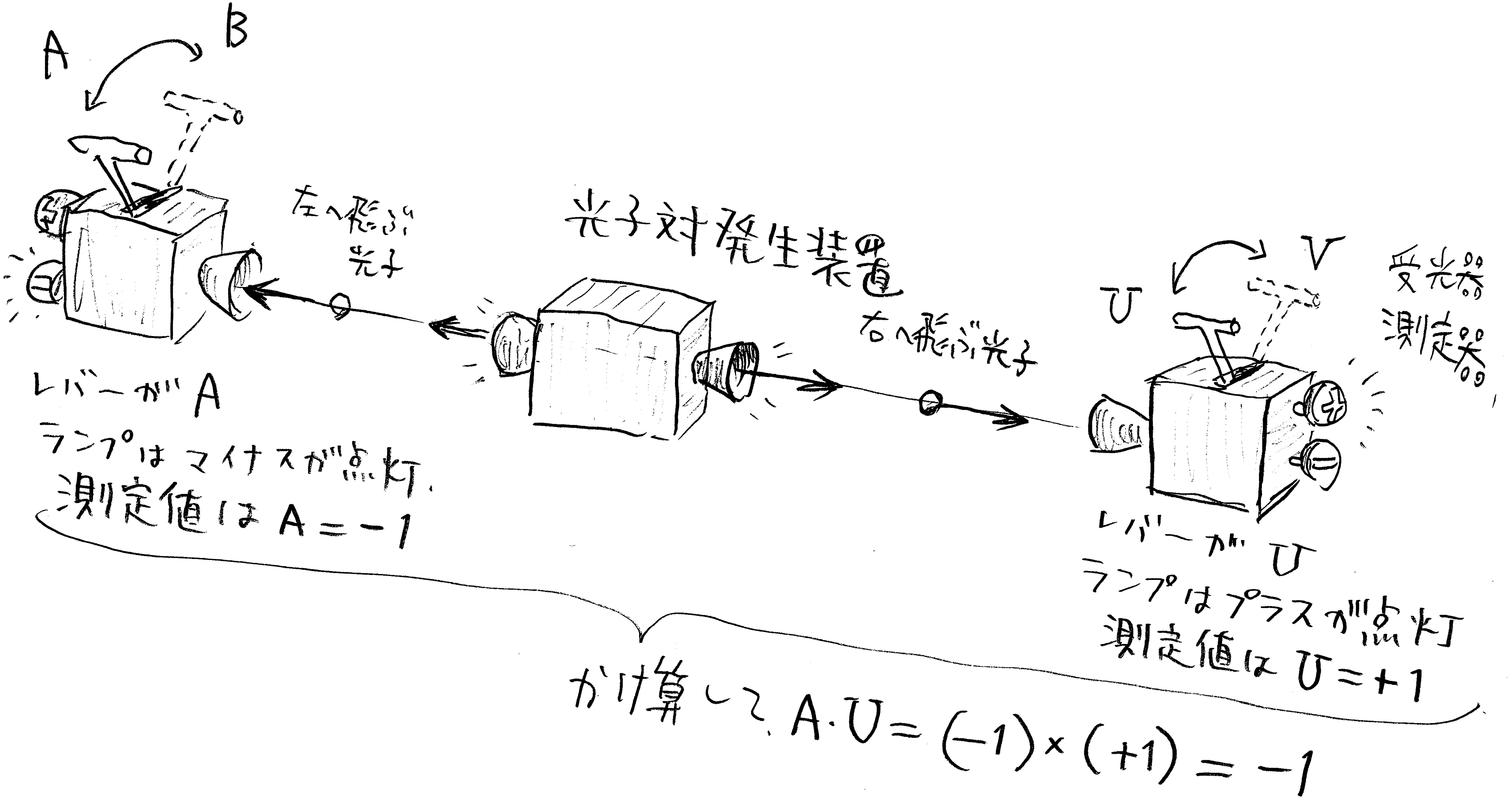
CHSHの実験設定

- 1969年にクラウザー、ホーン、シモニー、ホルト（CHSH）の４人が、ベルの不等式を実験検証しやすい形に改良した。
（シモニーはカルナップのもとで哲学の博士を取り、ワイトマンとウィグナーのもとで物理の博士を取った。ワイトマンに「EPR論文の間違いを指摘せよ」と指示されてEPR論文を読んだが、どこも間違っていないと思った、という。ホーンはシモニーの学生。参照：アダム・ベッカー『実在とは何か』）
- CHSHの設定を説明する。

光子の偏光測定器の概念図



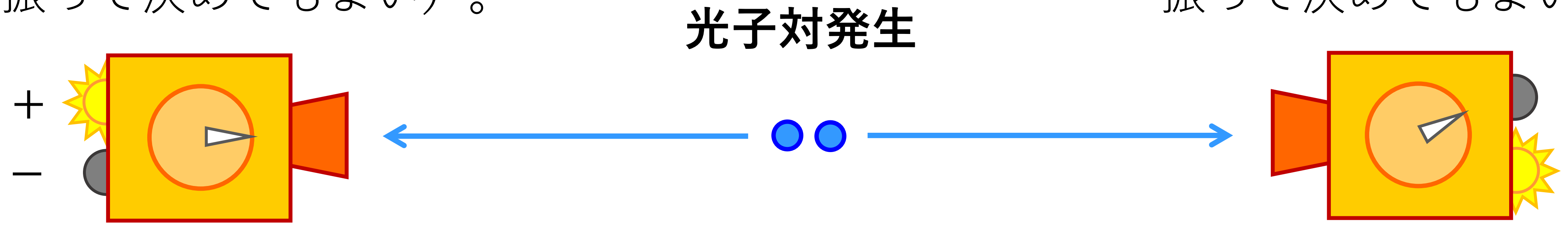
光子対発生装置と２台の偏光測定装置



実験の枠組み

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）。



測定結果は
A=±1 または B=±1

測定結果は
U=±1 または V=±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	AU=−1
2	A	−1	V	−1	AV=+1
3	B	−1	V	+1	BV=−1
4	A	+1	V	−1	AV=−1
5	B	+1	U	+1	BU=+1
6	B	−1	U	−1	BU=+1
7	A	−1	V	−1	AV=+1
8	A	+1	U	+1	AU=+1
9	B	+1	V	−1	BV=−1
10	A	−1	V	+1	AV=−1
…					…

光子対についてのAとUの掛け算 AUの平均値〈AU〉，
AとVの掛け算 AVの平均値〈AV〉，
BとUの掛け算 BUの平均値〈BU〉，
BとVの掛け算 BVの平均値〈BV〉
を求める。

ランダムネスと相関

A	U	AU
＋	＋	＋
＋	＋	＋
＋	−	−
−	−	＋
−	−	＋
−	＋	−

Aだけを見ていると半々の確率で±1がランダムに出ているように見える。

Aの平均値　$\langle A\rangle = (+1)\times\frac{1}{2} + (-1)\times\frac{1}{2} = 0$

Uだけ見ても、半々の確率で±1。

Uの平均値　$\langle U\rangle = (+1)\times\frac{1}{2} + (-1)\times\frac{1}{2} = 0$

しかし、AとUは同符号（両方とも＋1か、両方とも−1）になっていることが多い。この例では、

AUの平均値 $\langle AU\rangle = (+1)\times\frac{4}{6} + (-1)\times\frac{2}{6} = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = \frac{1}{3} \neq 0$

一般に（量子論でなくても）$\langle AU\rangle \neq \langle A\rangle\langle U\rangle$ となることを「相関（correlation）がある」という。

測定データの最終処理

$$\langle \boldsymbol{S} \rangle = \langle \boldsymbol{AU} \rangle + \langle \boldsymbol{AV} \rangle + \langle \boldsymbol{BU} \rangle - \langle \boldsymbol{BV} \rangle$$

を求める。

局所実在論によると（常識的に考えると）

$$-\mathbf{2} \leq \langle \boldsymbol{S} \rangle \leq \mathbf{2}$$ **（CHSHの不等式）**

となるはずである。

CHSHの不等式の証明 1/2

平均化する前の式を書く：

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

因数分解する：

$S = A(U + V) + B(U - V)$

U と V の値は±1なので、

U+Vの値は±2 または 0.

U−Vの値も 0 または ±2.

U+V と U−V の どちらか一方は 0で、もう一方は±2.

CHSHの不等式の証明 2/2

S = A(**U**＋**V**) ＋B(**U**－**V**)

U＋V と U－V は 必ず一方が 0 で、もう一方が ±2.

A, Bの値は±1 なので、けっきょく S の値は±2.

平均値は、必ず最大値と最小値の間にあるので、

－2 ≦ 〈**S**〉 ≦ **+2**　（CHSHの不等式）

〈S〉がこの不等式の外にはみ出るなんてありえない！

常識論 vs. 量子論

$$-2 \leqq \langle S \rangle \leqq +2$$ （CHSHの不等式）

$-2.828 = -2\sqrt{2} \leqq \langle S \rangle \leqq +2\sqrt{2} = 2.828$（量子論）

量子論では、CHSH不等式の破れ（violation）が起きうる。

今日やること

- 量子論から、いかにして $\langle S \rangle = 2\sqrt{2}$ という結果が出るのか、納得していただく。
- CHSHの不等式の破れが意味するところを吟味する。

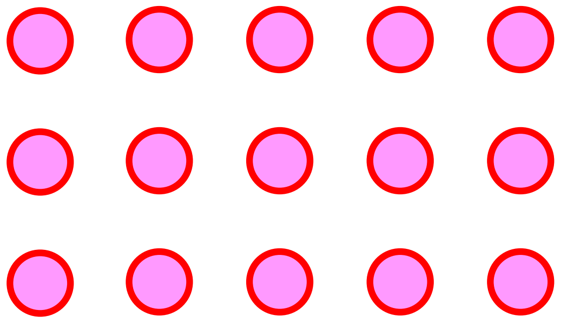
通常の数学：可換代数

ふつうの数の掛け算：

5個のアメ／人 × 3人の子供＝15個のアメ

3人の子供 × 5個のアメ／人＝15個のアメ

5 × 3 ＝ 3 × 5 ＝15



掛け算の順序を換えても答えは変わらない。

可換、交換可能、 commutative

量子力学の数学：非可換代数

量子力学で扱う物理量は、掛け算順序によって答えが変わる

$$BA \neq AB$$

非可換代数　non-commutative algebra

とくに、同時には測れない物理量が非可換になる（測定器のレバーをAにセットしているときはBは測れない）

量子力学の数学

量子力学の数学は「ほぼ高校数学」なのだが、掛け算の順序だけは気にする。

例えば、$\boldsymbol{A^2 = 1}$ という方程式は、$A^2 - 1 = 0$ に変形できて、

$$A^2 - 1 = A^2 + A - A - 1 = (A - 1)(A + 1) = 0$$

$A - 1 = 0$ または $A + 1 = 0$

$\boldsymbol{A = 1}$ または $\boldsymbol{A = -1}$.

このことから「もしも物理量Aを測ったらその値は± 1のどちらかだ」と言ってよい。

量子力学の数学：非可換代数

$A^2 = 1,\ B^2 = 1$ でも $\boldsymbol{BA = -AB}$ だったら

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

$\boldsymbol{A = \pm 1,\ B = \pm 1}$ **だが、** $\boldsymbol{A + B = \pm\sqrt{2}}$

覚えておいてほしいこと：

$\boldsymbol{C = \frac{1}{\sqrt{2}}(A+B), D = \frac{1}{\sqrt{2}}(A-B)}$

とおいたものは $\boldsymbol{\pm 1}$ **の値をとる。**

非可換物理量では、一般に

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

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

同じ問題を常識的数学（可換代数）で解く

$A^2 = 1,\ B^2 = 1,\ \boldsymbol{BA = AB}$ だったら

$$\begin{aligned}(A+B)^3 &= A^3 + 3A^2B + 3AB^2 + B^3 \\ &= A + 3B + 3A + B = 4A + 4B \\ &= 4(A+B)\end{aligned}$$

$$(A+B)^3 - 4(A+B) = 0$$

$$(A+B)\{(A+B)^2 - 4\} = 0$$

$$(A+B)\{(A+B) - 2\}\{(A+B) + 2\} = 0$$

ゆえに、$\boldsymbol{A + B = 0}$ または $\boldsymbol{\pm 2}$（常識どおりの結果）

いまの話をまとめると

- **可換代数の世界**

  $A^2 = 1,\ B^2 = 1,\ BA = AB$ ならば

  $A = \pm 1$ かつ $B = \pm 1$ であり、$A + B = 0$ または ± 2

- **非可換代数の世界**

  $A^2 = 1,\ B^2 = 1,\ BA = -AB$ ならば

  $A = \pm 1, B = \pm 1$ であり、$A + B = \pm\sqrt{2}$

量子もつれ状態、登場

- 左の測定器でAまたはBを測る。

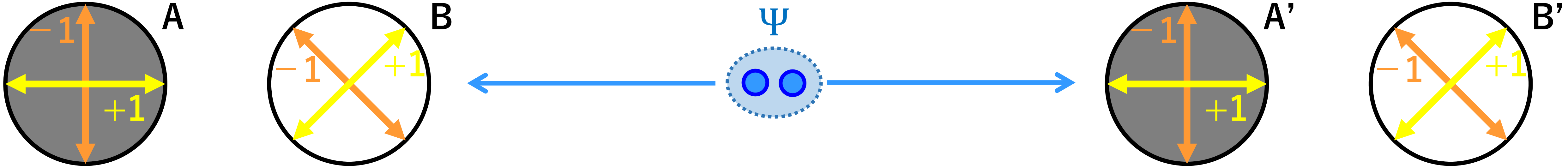
$$A^2 = 1, \qquad B^2 = 1, \qquad BA = -AB$$

- 右の測定器でA'またはB'を測る。

$$(A')^2 = 1, \qquad (B')^2 = 1, \qquad B'A' = -A'B'$$

- 量子もつれ状態 Ψ では

$$\langle\Psi|AA'|\Psi\rangle = 1, \qquad \langle\Psi|BB'|\Psi\rangle = 1$$
$$\langle\Psi|AB'|\Psi\rangle = 0, \qquad \langle\Psi|BA'|\Psi\rangle = 0$$



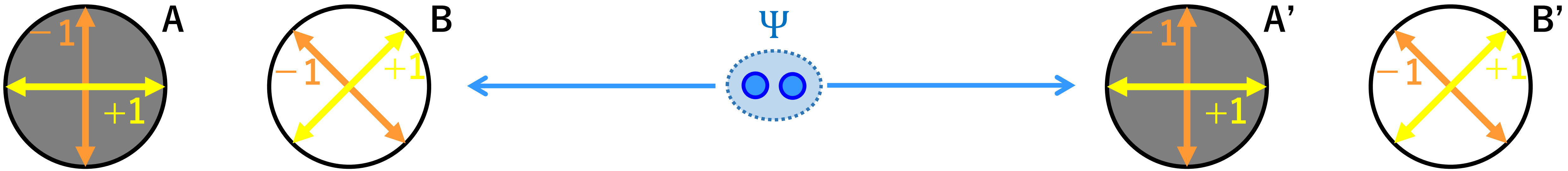
量子もつれ状態 entanglement

- A だけを測れば半々の確率で ± 1 を得て、$\langle\Psi|A|\Psi\rangle = 0$
- 他の物理量も単独で測ればランダムかつ半々の確率で± 1

$$\langle\Psi|A|\Psi\rangle = \langle\Psi|B|\Psi\rangle = \langle\Psi|A'|\Psi\rangle = \langle\Psi|B'|\Psi\rangle = 0$$

- しかし、２つの物理量を測ると完全な相関：

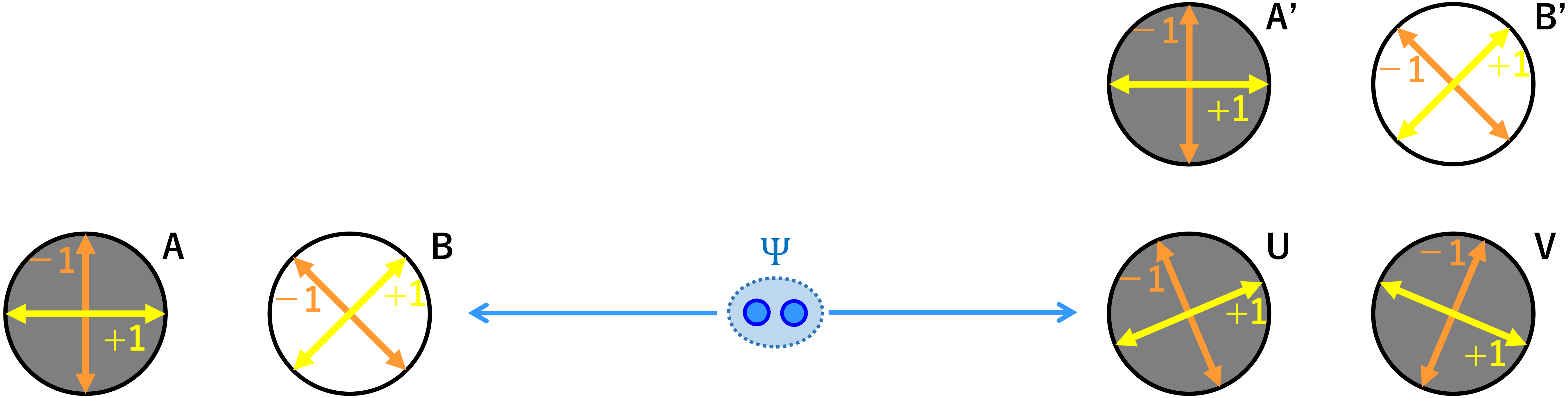
$$\langle\Psi|AA'|\Psi\rangle = 1, \qquad \langle\Psi|BB'|\Psi\rangle = 1$$
$$\langle\Psi|AB'|\Psi\rangle = 0, \qquad \langle\Psi|BA'|\Psi\rangle = 0$$



量子もつれではCHSHはどうなる？

- 量子もつれ状態で、AまたはB、 UまたはVを測ると、理論的にはどんな結果になるはずなのか？

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}}(A' + B'), \qquad V = \frac{1}{\sqrt{2}}(A' - B')$$



量子もつれで計算してみよう 1/2

$U=\frac{1}{\sqrt{2}}(A'+B'),\ V=\frac{1}{\sqrt{2}}(A'-B')$ （Ψは省略）

$\langle U\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(\langle A'\rangle+\langle B'\rangle)=0+0=0$

$\langle V\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(\langle A'\rangle-\langle B'\rangle)=0-0=0$

$\langle AU\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(\langle AA'\rangle+\langle AB'\rangle)=\frac{1}{\sqrt{2}}(1+0)=\frac{1}{\sqrt{2}}$

$\langle AV\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(\langle AA'\rangle-\langle AB'\rangle)=\frac{1}{\sqrt{2}}(1-0)=\frac{1}{\sqrt{2}}$

$\langle BU\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(\langle BA'\rangle+\langle BB'\rangle)=\frac{1}{\sqrt{2}}(0+1)=\frac{1}{\sqrt{2}}$

$\langle BV\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}(\langle BA'\rangle-\langle BB'\rangle)=\frac{1}{\sqrt{2}}(0-1)=-\frac{1}{\sqrt{2}}$

量子もつれで計算してみよう 2/2

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

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} - \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right)$$

$$= \frac{4}{\sqrt{2}}$$

$$= 2\sqrt{2}$$

出ました！

$\langle AU \rangle = \langle AV \rangle = \langle BU \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}$ の意味を考えよう

- AとUが同符号（$+$と$+$、または、$-$と$-$）になる確率

$$P_{+} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}}\right) = 0.8535 \cdots$$

- AとUが異符号（$+$と$-$、または、$-$と$+$）になる確率

$$P_{-} = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) = 0.1465 \cdots$$

- 同符号になる確率が高い。相関している。
- AとU、 AとV、 BとUも、同符号になる確率が高い。

$\langle \boldsymbol{BV} \rangle = -\frac{\boldsymbol{1}}{\sqrt{\boldsymbol{2}}}$の意味を考えよう

- BとVが同符号（$+$と$+$、または、$-$と$-$）になる確率

$$P_{+} = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) = 0.1465\cdots$$

- BとVが異符号（$+$と$-$、または、$-$と$+$）になる確率

$$P_{-} = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) = 0.8535\cdots$$

- 異符号になる確率が高い。これも相関。
- この相関のどこが不思議なのか？

CHSHの不等式の破れを吟味する

マーミンの野球原理「見ていなかった野球の試合は、見ていたときとまったく同じように進行し、同じスコアになる」が正しいとすると、

B	+	+	−	−	+	−	−	+	+	+	−	+	−	+	+	−	−	−	+	−
U	+	−	−	−	+	−	−	+	+	−	−	+	−	+	+	−	+	−	+	−

15%が異符号

U	+	−	−	−	+	−	−	+	+	−	−	+	−	+	+	−	+	−	+	−
A	+	−	−	−	+	−	+	+	+	−	−	−	−	+	+	+	+	−	+	−

15%が異符号

A	+	−	−	−	+	−	+	+	+	−	−	−	−	+	+	+	+	−	+	−
V	+	−	−	+	+	−	+	+	+	−	−	−	−	−	+	+	+	−	−	−

15%が異符号

どう頑張っても一番上のBと一番下のVの異符号箇所は45%以下。
〈S〉=2.8を達成するためには BとVの異符号箇所が85%必要！

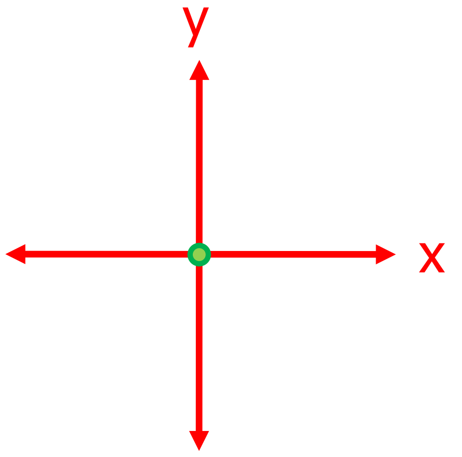
$\langle AU \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}$の別の導き方

も紹介しておこう。

一光子の重ね合わせ状態

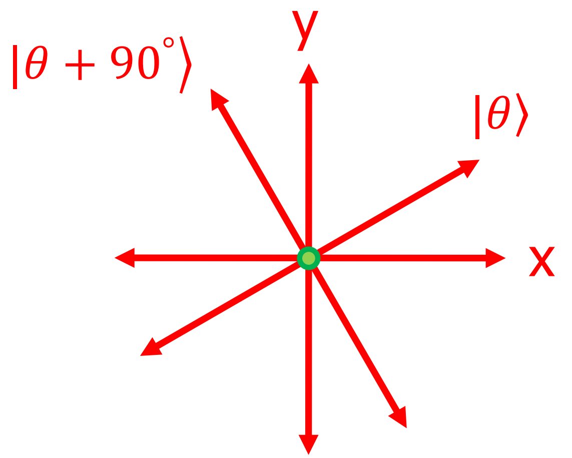
一光子の直線偏光状態（基底ベクトル）

$$|x\rangle, \quad |y\rangle$$



重ね合わせ状態

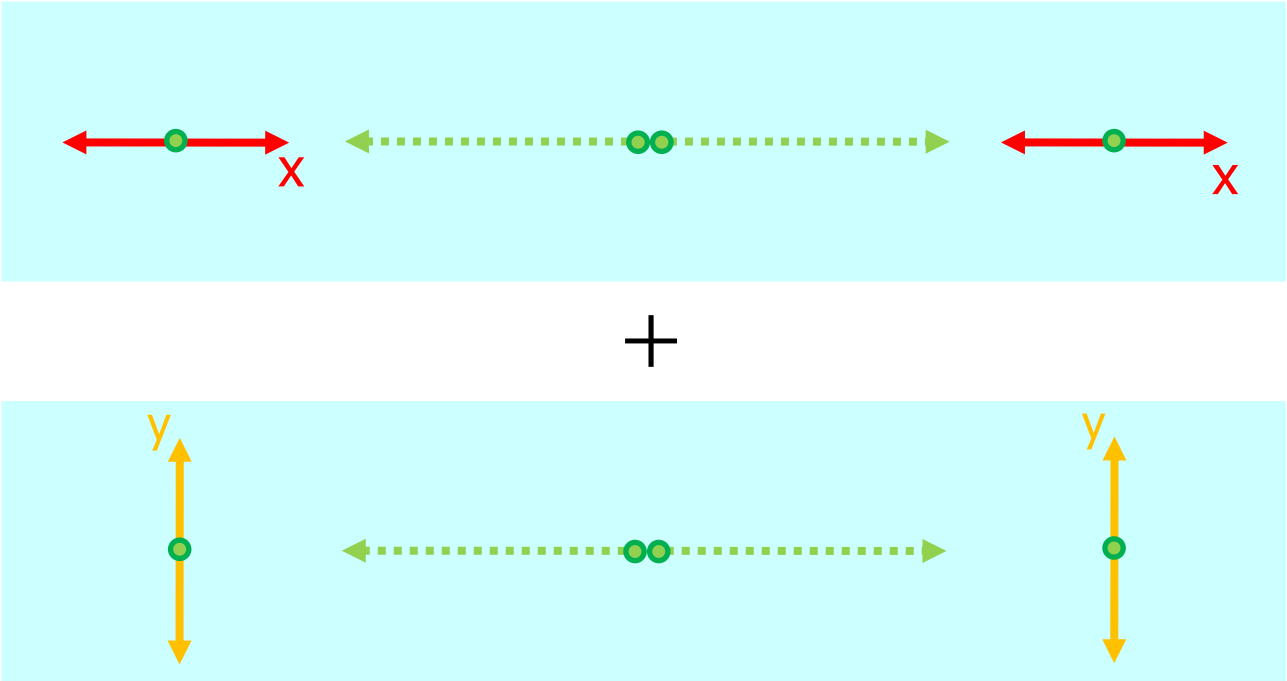
$$\begin{cases} |\theta\rangle = \cos\theta\,|x\rangle + \sin\theta\,|y\rangle \\ |\theta + 90^\circ\rangle = -\sin\theta\,|x\rangle + \cos\theta\,|y\rangle \end{cases}$$



二光子の量子もつれ状態

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|x\rangle \otimes |x\rangle + |y\rangle \otimes |y\rangle\right)$$

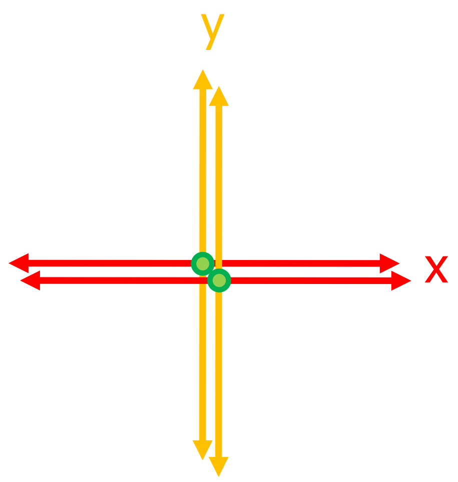
「左に**x**偏光 and 右に**x**偏光のペア状態」と
「左に**y**偏光 and 右に**y**偏光のペア状態」の**重ね合わせ状態**。



量子もつれ状態は完全な相関状態

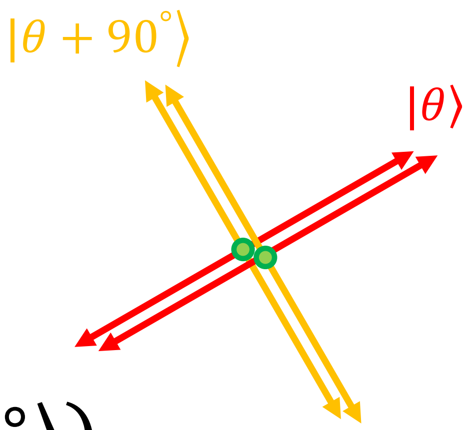
二光子の量子もつれ状態（ $\otimes$ はテンソル積）

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle\otimes|x\rangle + |y\rangle\otimes|y\rangle)$$



別の観測基底

$$|\theta\rangle = \cos\theta\,|x\rangle + \sin\theta\,|y\rangle,$$
$$|\theta + 90°\rangle = -\sin\theta\,|x\rangle + \cos\theta\,|y\rangle$$



で見ても、

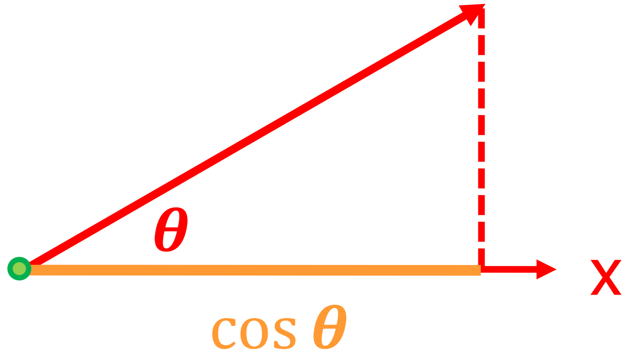
$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\theta\rangle\otimes|\theta\rangle + |\theta + 90°\rangle\otimes|\theta + 90°\rangle)$$

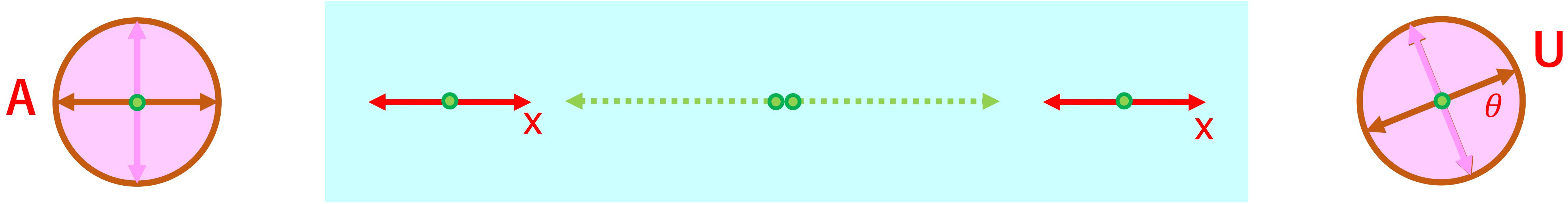
AとUが同符号になる確率

- **左の光子がx偏光であることが確定したとき、右の光子もx偏光なのだから右の光子が角度θの偏光フィルターを通る確率は**

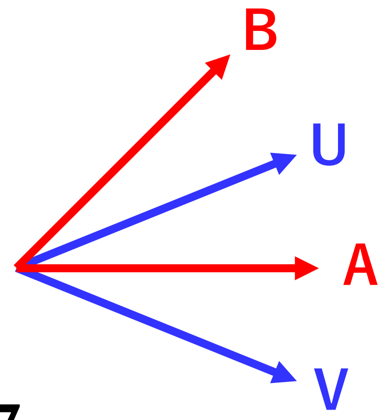
$$P(\theta) = \cos^2\theta = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\theta)$$

- とくに、$P(22.5^\circ) = 0.85\cdots$





平均値〈AU〉の計算



- AとUのなす角度が22.5°の場合、

$$\langle AU\rangle = (+1)\times 0.85 + (-1)\times 0.15 = 0.7$$

- 同様に、$\langle AV\rangle = \langle BU\rangle = 0.7$
- BとVだけ $45^\circ + 22.5^\circ = 67.5^\circ$, $\boldsymbol{P(67.5^\circ) = 0.15}\cdots$

$$\langle BV\rangle = (+1)\times 0.15 + (-1)\times 0.85 = -0.7$$

- 集計すると、

$$\langle S\rangle = \langle AU\rangle + \langle AV\rangle + \langle BU\rangle - \langle BV\rangle = 2.8$$

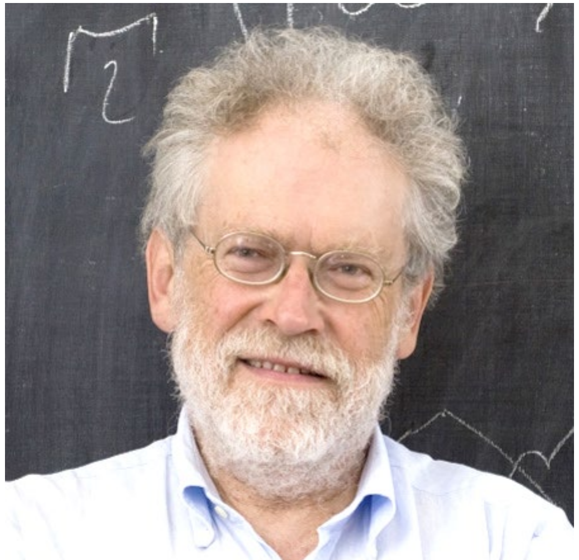
実験して、ノーベル賞を授賞

量子もつれ光子を用いた、ベルの不等式の破れの検証実験と量子情報科学の先駆的実験 **for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science**（https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/summary/）

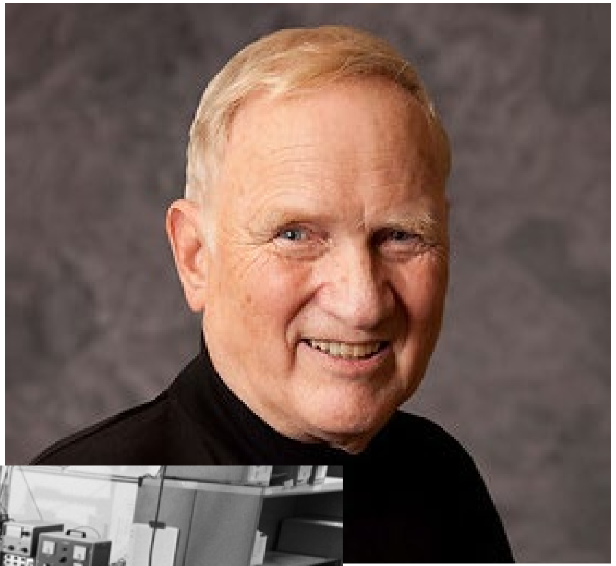
ジョン・クラウザー（アメリカ） https://www.johnclauser.com/

アラン・アスペ（フランス） https://en.wikipedia.org/wiki/Alain_Aspect

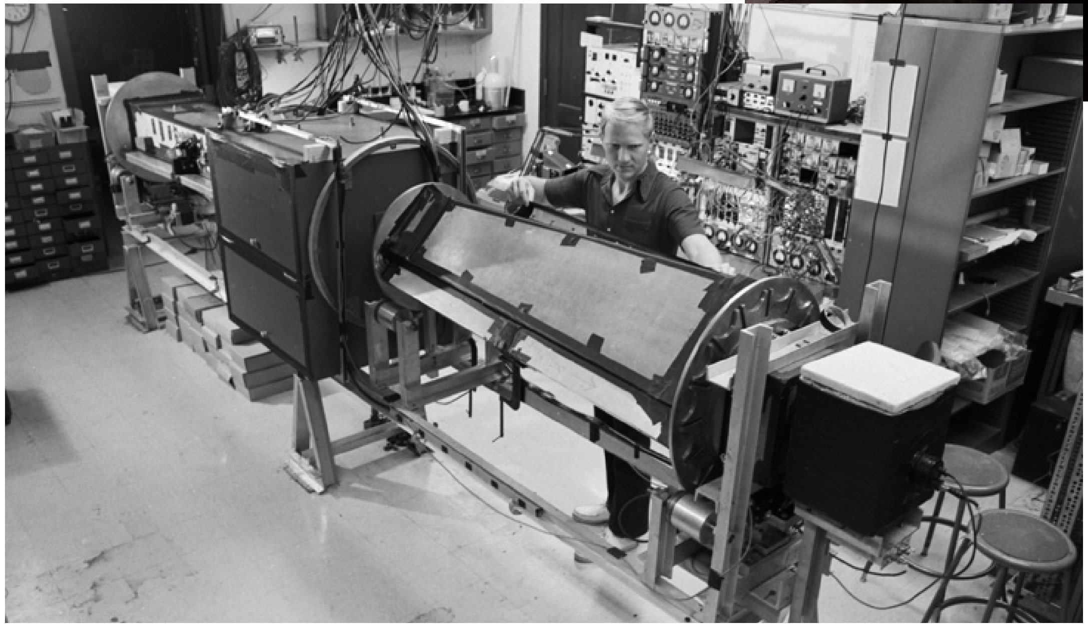
アントン・ツァイリンガー（オーストリア） https://wolffund.org.il/2018/12/11/anton-zeilinger/



ジョン・クラウザーの実験（1972年）



大学院では宇宙背景放射の研究をしていたが、ベルの論文を知ってシモニーらと共同研究して、CHSHの不等式を作った。博士号を取って、量子もつれ光子ペアを作る実験を行っていたタウンズの研究室の研究員となり、大学院生のフリードマンと共同で最初の検証実験を行った。



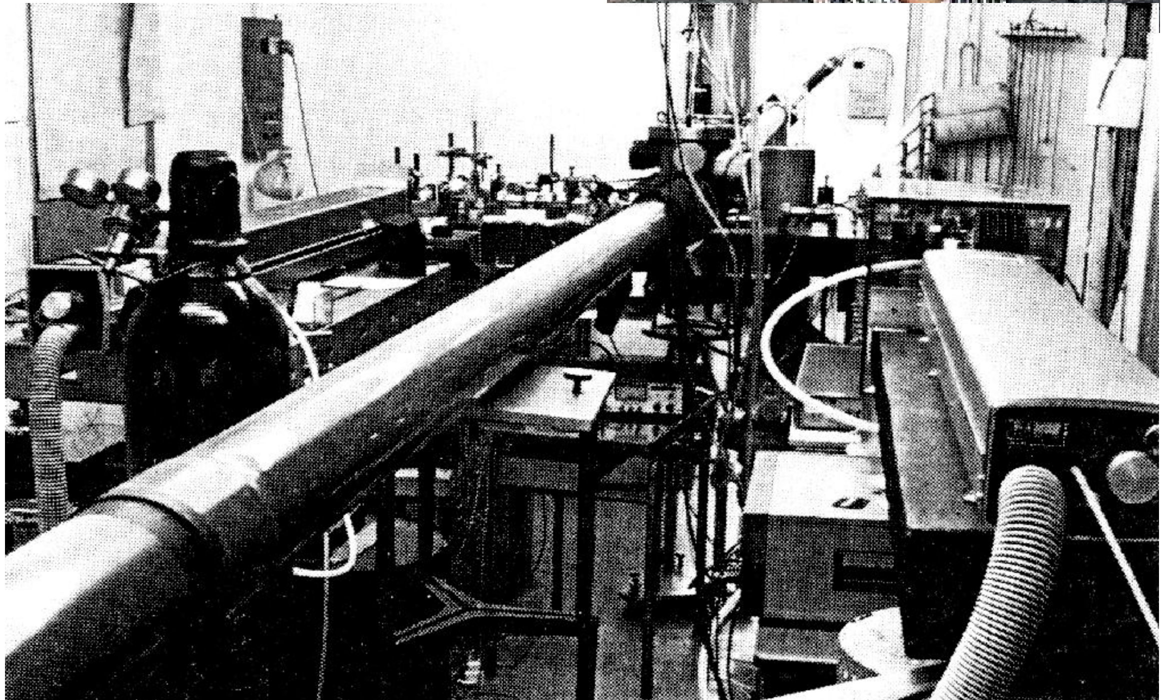
https://www.johnclauser.com/
https://www.universityofcalifornia.edu/news/physics-nobel-recognizes-uc-berkeley-experiment-spooky-action-distance

アラン・アスペの実験（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、〈S〉=2.4 を得た。

この研究でアスペは博士学位を取った。

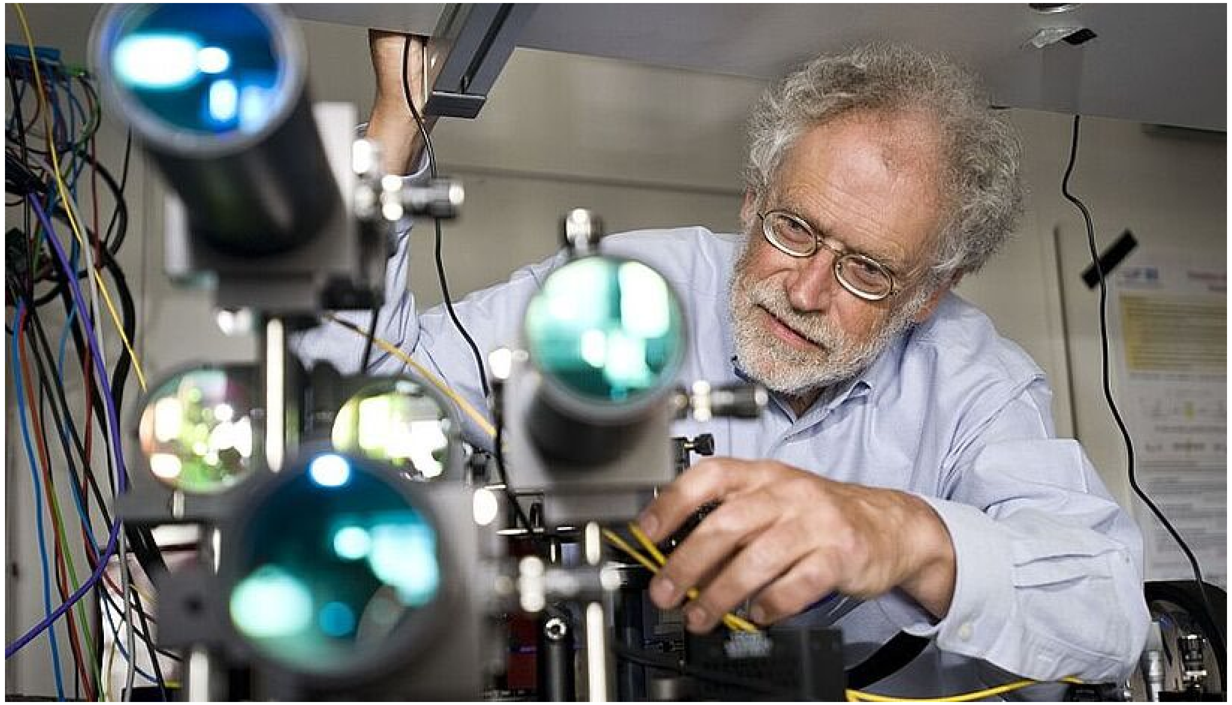


https://en.wikipedia.org/wiki/Alain_Aspect
http://eric.chopin.pagesperso-orange.fr/epr/aspect.htm

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。

〈S〉=2.73 を得た。



https://medienportal.univie.ac.at/en/media/recent-press-releases/detailansicht-en/artikel/physiknobelpreis-fuer-anton-zeilinger-1/

CHSHの不等式の破れを解釈する

何がいけなかったのか（犯人さがし）

1. 局所性が間違っている？
2. 実在論が間違っている？
3. 実在の確率が間違っている？
4. 自由意志が間違っている？
5. サンプリングが偏っている？
6. 言葉づかい・考え方・ロジックが間違っている？

1. 局所性が誤り？

- 〈AU〉＋〈BU〉＝〈AU+BU〉といった式変形をする際に「A,U,B,Vの結合確率がある」ことを仮定していた。
- 数学的には、平均値〈AU〉を求めるときの確率と、平均値〈BU〉を求めるときの確率が異なっていれば、CHSHの不等式の導出は正当化されない。
- **左の測定器でAを測るかBを測るか切り替えたことが、飛んでいる最中の光子に影響したり、右のUの測定結果に影響したりすれば（超光速テレパシー？）、古典物理的世界であっても、CHSHの不等式を破るような現象を演出できる。**
- **しかし、これはヤケクソな答えに思える。**

2. 実在論が誤り？

- 客観的・実在論的な物理量の値はないという考え方。
- マーミンの野球原理（反事実的仮定法）が間違っている。
- **「Bを測ってAを測らなかったときのUの値と、Aを測ってBを測らなかったときUの値は同じであろう」とう論法が誤り。文脈依存性（contextuality）**

B	+	+	−	−	+	−	−	+	+	+	−	+	−	+	+	−	−	−	+	−
U	+	−	−	−	+	−	−	+	+	−	−	+	−	+	+	−	+	−	+	−
U	+	−	+	−	+	−	−	+	+	−	−	+	−	+	+	−	+	−	+	−
A	+	−	+	−	+	−	+	+	+	−	−	−	−	+	+	+	+	−	+	−

Uの出方が同じと仮定したことが誤り。

Bとともに測られたUの値と、Aとともに測られたUの値は必ず異なっていなくてはならない。

3. 実在の確率が誤り？

- 結合確率(joint probability) $P(a,b,u,v) \quad (a,b,u,v=\pm 1)$
- 周辺確率(marginal probability)
  $P(a,u)=\sum_{b,v}^{\pm 1} P(a,b,u,v)$,$P(b,v)=\sum_{a,u}^{\pm 1} P(a,b,u,v)$ など
- 確率の規格化 $\sum_{a,b,u,v}^{\pm 1} P(a,b,u,v)=1.$
- **結合確率が負になることを許容すれば（例えば**
  $$\boldsymbol{P(+1,+1,-1,-1)=-0.0884}$$
  など）、周辺確率は正かつ実験値と一致し、確率の規格化を守りながら、$\langle S\rangle = 2.8$ を出すことはできる。
- **「負の確率で出現すること」を実在と呼んでよいか？**

（谷村『アインシュタインの夢ついえる』日経サイエンス2019年2月号＋ウェブ補足ノート）

4. 自由意志仮説が誤り？

- **我々は実験装置の設定をAにでもBにでも自由に選べると思っている、ことが誤りだとする説。**
- 左の測定器をどういうタイミングでA, Bどちらにセットするか、また、右の測定器をU, Vどちらにセットするか、ということは宇宙開闢以来あらかじめ決まっており、それに合わせて光子ペアは準備されており、CHSHの不等式の破れを演出している、という説。
- **全宇宙規模の陰謀説**
- **これは否定しようがない。陰謀と物理法則とが一致しているなら、それでいいじゃん、という話になる。**

5. サンプリングが偏っている？

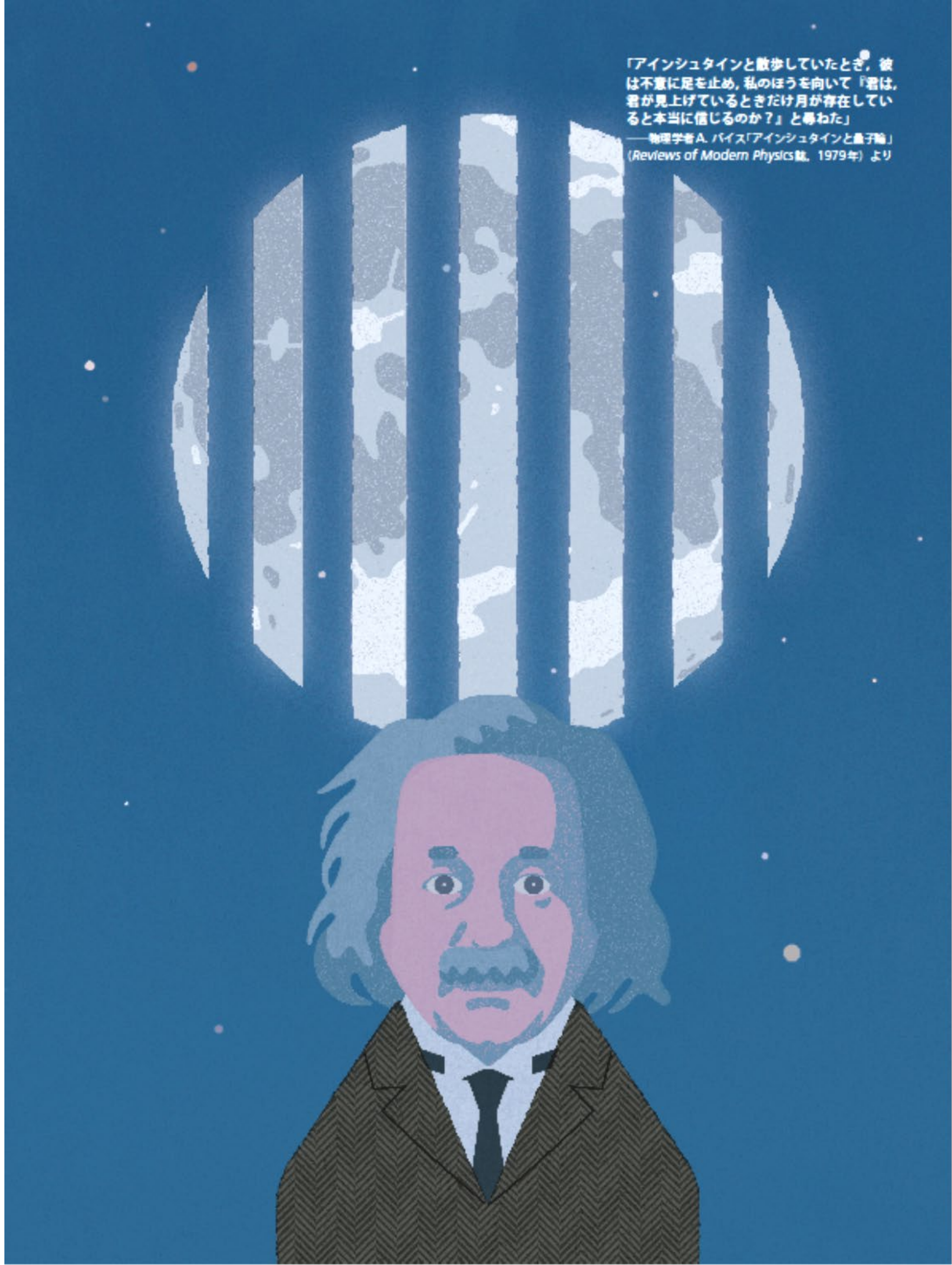
- リアルな実験装置はすべての光子を検出することはできず、必ず「見落とし」がある。
- **本当は局所実在論が正しく、無限個の光子ペアを見逃さなかったらCHSHの不等式は成立しているはずなのだが、我々は有限回の測定しかしていないし、多くの光子を見逃しているので、都合よく量子論に合うような結果を出す光子だけを見ている、かもしれない。**（サンプリング陰謀説）
- 統計を増やすか、検証方法を変えるかすれば、この種の過誤は防げる。

6. 言葉の欠陥？

- 「ベルの不等式の破れは、我々の常識に反している」と思うのは、常識の方が間違っていることを示しているだけ。
- **「Aを測ればプラスで、Bを測ればマイナスになる粒子」という言葉が有意味であるかのように言えてしまう**（本当はAとBは同時に測れず、同時には実在性を持たないのに、反事実仮想的な性質を意味ありげに述べてしまうことができる）**のは我々の言葉の欠陥。**
- （「黄色くて酸っぱい果物」や「赤くて甘い果物」は言えても、「白くて黒い」や「四角い丸」は言えないように、「Aはプラスで、Bはマイナスな光子」も本当は言ってはいけない。こういうのを言わないようにするのが量子論理。）

アインシュタインのクレーム

- 電子は見られているときと見られていないときで別物なのか？
- **「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パイスと散歩中に言った）



日経サイエンス2019年2月号

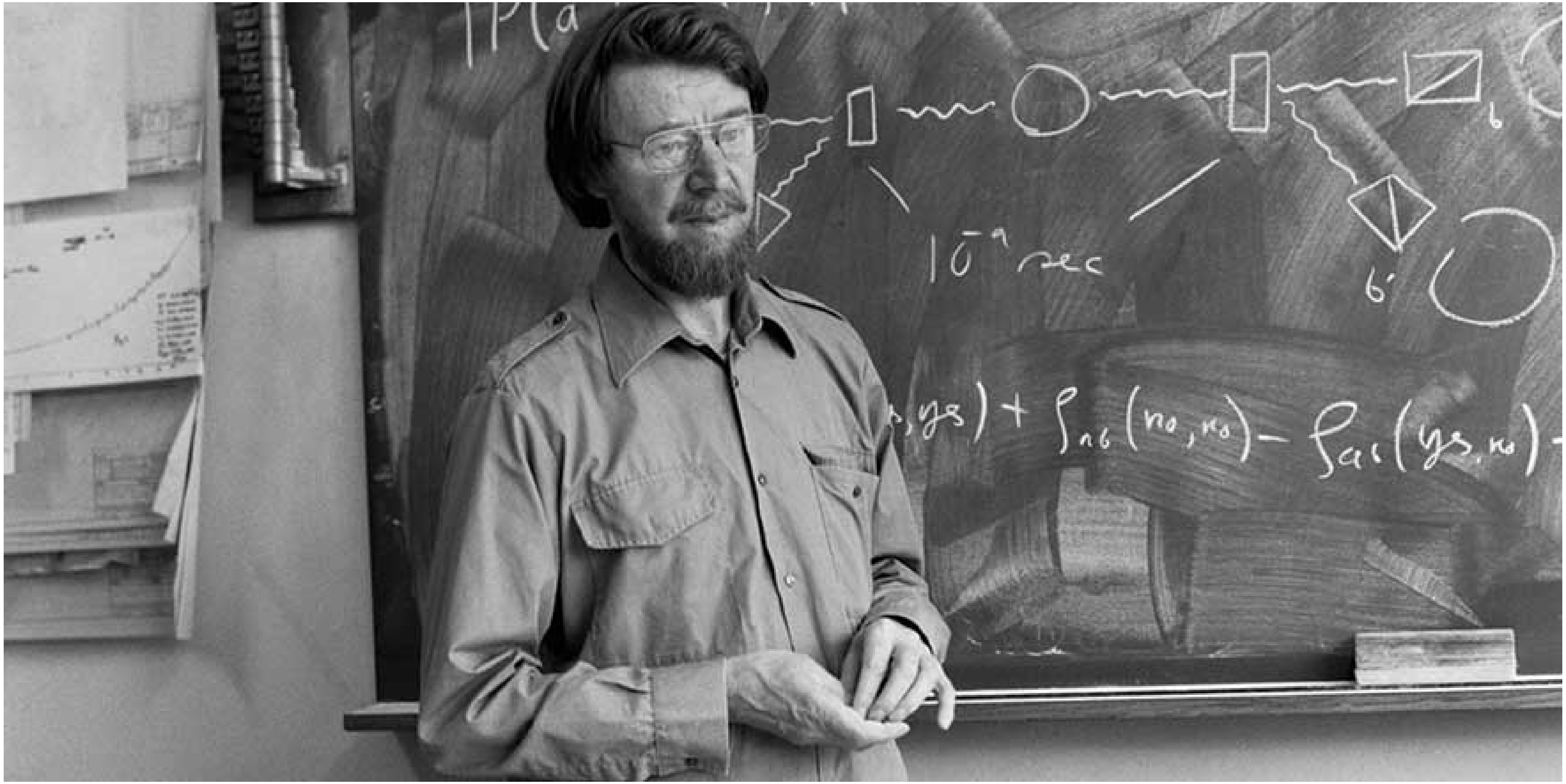
よかったじゃないか

- 「この世界は見てないときも見たときのままにあるはずだ」というアインシュタインの期待は間違っていた。
- 見ていないときは見たときのままの姿・振る舞いをしていないような電子や原子で我々の体はできているし、そういう光を我々は見ている。
- 太陽も量子論的確率に支配された核融合反応で燃えているし、体の中で起きている化学反応も、神経伝達のイオンの移動も、みんな量子力学で動いているんだよ。
- そういう宇宙の摂理をまた一歩進んで理解できた、というだけで素晴らしいじゃないですか！

https://www.ria.ie/about-john-bell

ジョン・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

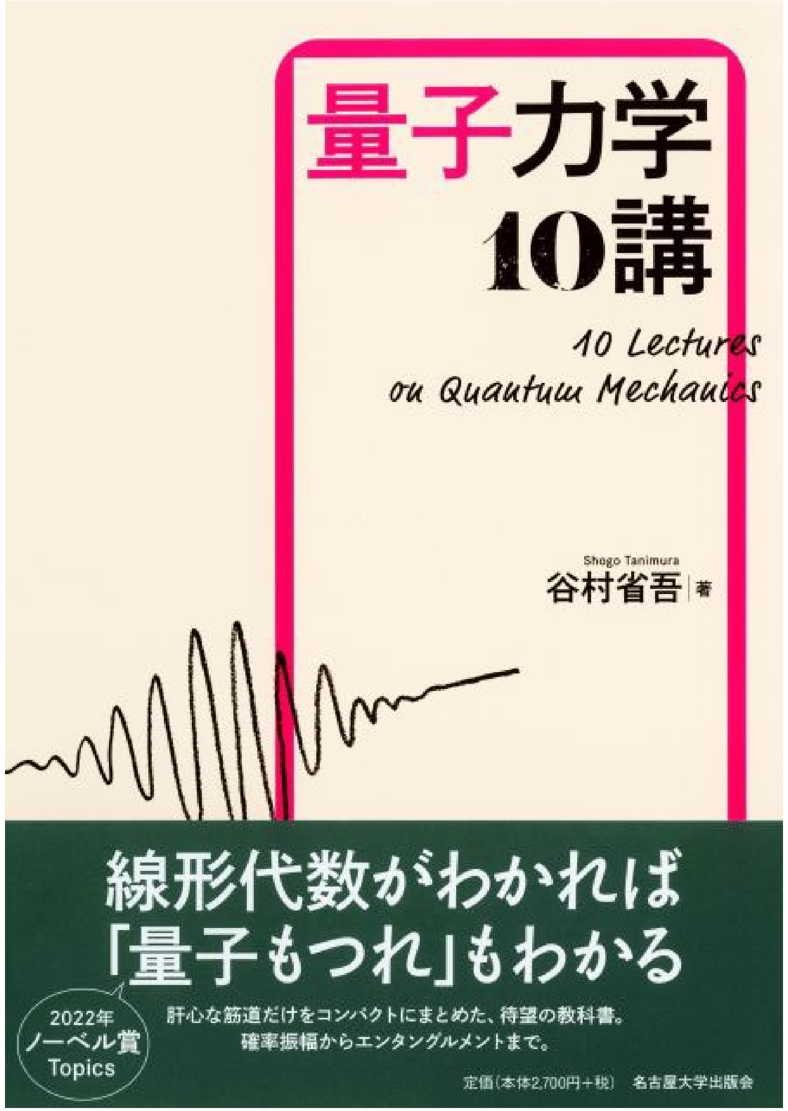


ジョン・ベルのキャリア

- 北アイルランドのベルファストで労働者階級の家に生まれた。4人兄弟の中で高校に行ったのはジョンだけ。高校を卒業してクィ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。
- 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。サバティカル休暇中に、いわゆるベルの不等式を発見。
- ジャッキーフと場の量子論のカイラル・アノマリーを発見。
- 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）。
- J.J.サクライのModern Quantum Mechanicsの遺稿のベルの不等式についての解説の部分をベルが増補。
- CERN在職中に亡くなった。
- 恵まれた環境に生まれた、とは言えないが、才気にあふれ、多彩な活躍

参考文献

1. 筒井泉『量子力学の反常識と素粒子の自由意志』岩波書店、2022.
2. アダム・ベッカー（吉田三知世 訳）『実在とは何か』筑摩書房、2021.
3. 谷村省吾『量子力学10講』名古屋大学出版会、2021.
4. 谷村省吾「アインシュタインの夢 ついえる―測っていない値は実在しない」日経サイエンス2019年2月　（電子記事を購入可能）（ウェブ補足あり）



ご清聴ありがとうございました。

Thank you for your attention.

This session is open for discussion.

質疑応答の時間