

日本科学哲学会第55回大会 名古屋大学にて
2022年12月4日
http://pssj.info/program_ver1/program_ver1.html

2022年のノーベル物理学賞業績と 量子論的实在像

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→



自己紹介

- 谷村省吾（たにむら・しょうご）と申します。
- 1967年、名古屋市生まれ
- 1990年、名古屋大学工学部応用物理学学科卒業。物性物理を中心に学ぶ。
学部3年生のとき、中村新男先生が光学の授業中に、アスペの実験についてシモニーが書いた[日経サイエンス記事](#)を紹介してくれました。
- 1995年、名古屋大学大学院理学研究科物理学専攻修了、博士（理学）
- 大学院生のときはE研（素粒子論研究室）にいました。小林誠氏と益川敏英氏（2008年ノーベル物理学賞受賞）は同研究室の大先輩。
- 大学院修了後は、東京大学、大阪市立大学、京都大学などで研究・教育に従事しました。2011年から名古屋大学教授。
- 専門は理論物理、とくに量子論、量子情報理論、最近は AI も研究。

今年のノーベル物理学賞授賞対象

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

ジョン・クラウザー（アメリカ）

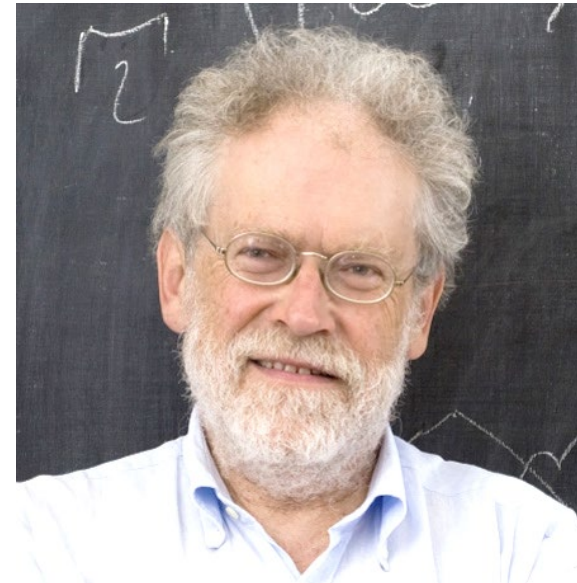
<https://www.johnclausner.com/>

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/>



- ホーム
- 話題を検索
- 通知
- メッセージ
- ブックマーク
- リスト
- プロフィール
- もっと見る

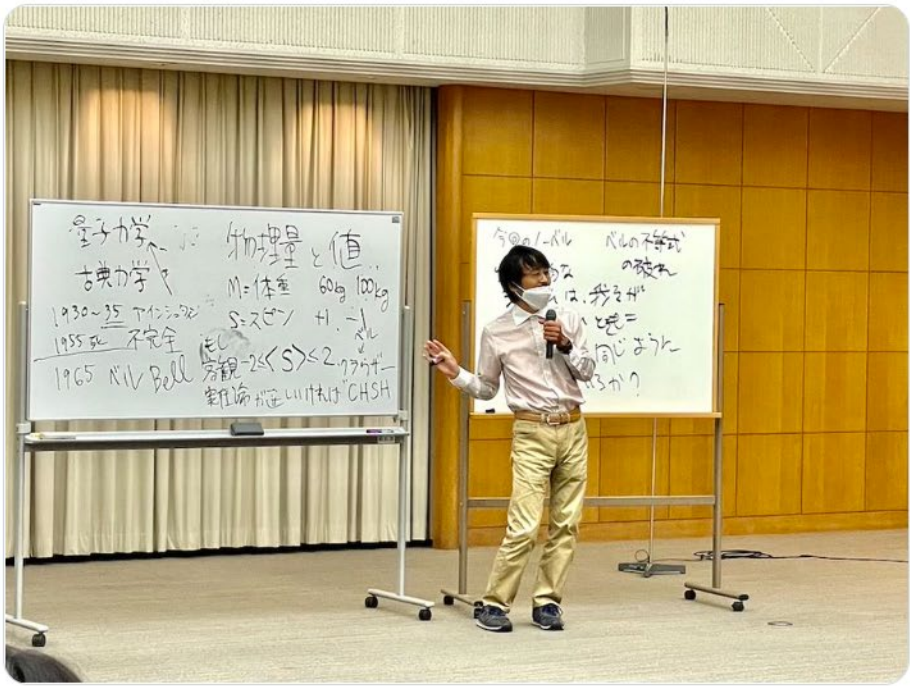
ツイートする

TANIMURA Shogo @tani6s

ツイート

名古屋大学 研究フロントライン @Frontline758

谷村先生、ただいまアツ〜く解説していただいています



午後7:33 · 2022年10月4日 · Twitter Web App

30 件のリツイート 3 件の引用ツイート 102 件のいいね



スレッド

名古屋大学 研究フロントライン @Frontline758

昨日のノーベル賞発表は、記者さんたちが集まるホールに杉山総長も駆けつけました。

受賞研究についてレクチャーしてくださった谷村省吾教授@tani6sと総長との豪華解説に、会場は釘付けとなりました。



午後2:18 · 2022年10月5日 · Twitter Web App

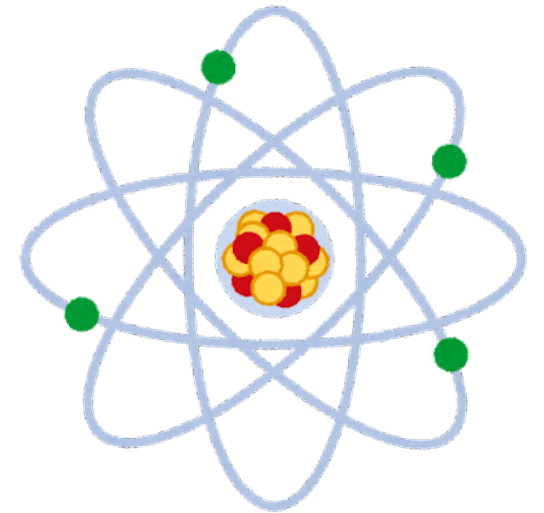
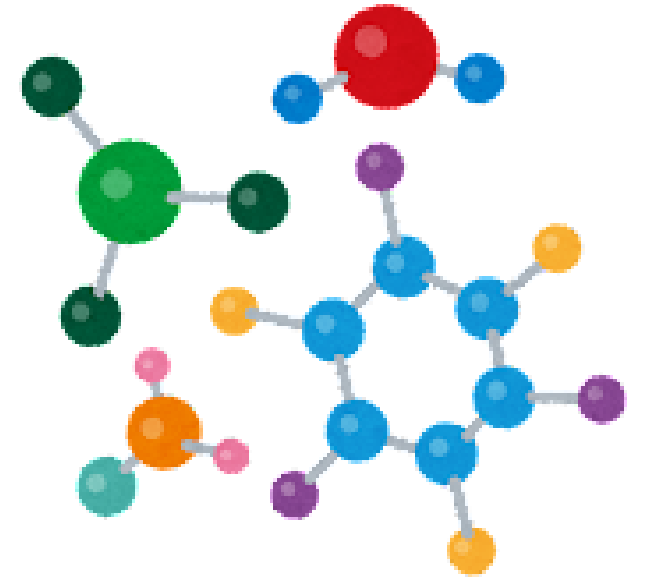
20 件のリツイート 2 件の引用ツイート 52 件のいいね

量子論

- ミクロの世界の物理法則を体系化した理論
- 英語では Quantum theory
- 量子力学 Quantum mechanics ともいう。

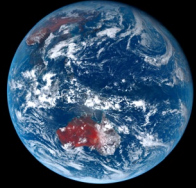
ミクロの世界

- 分子・原子・電子・原子核・光子・素粒子などの世界
- すべての物質の基本構成要素
- 原子の大きさ～1億分の1cm
- 見ているはずなのに見えていないことがわからない、指先に触れていることもわからない





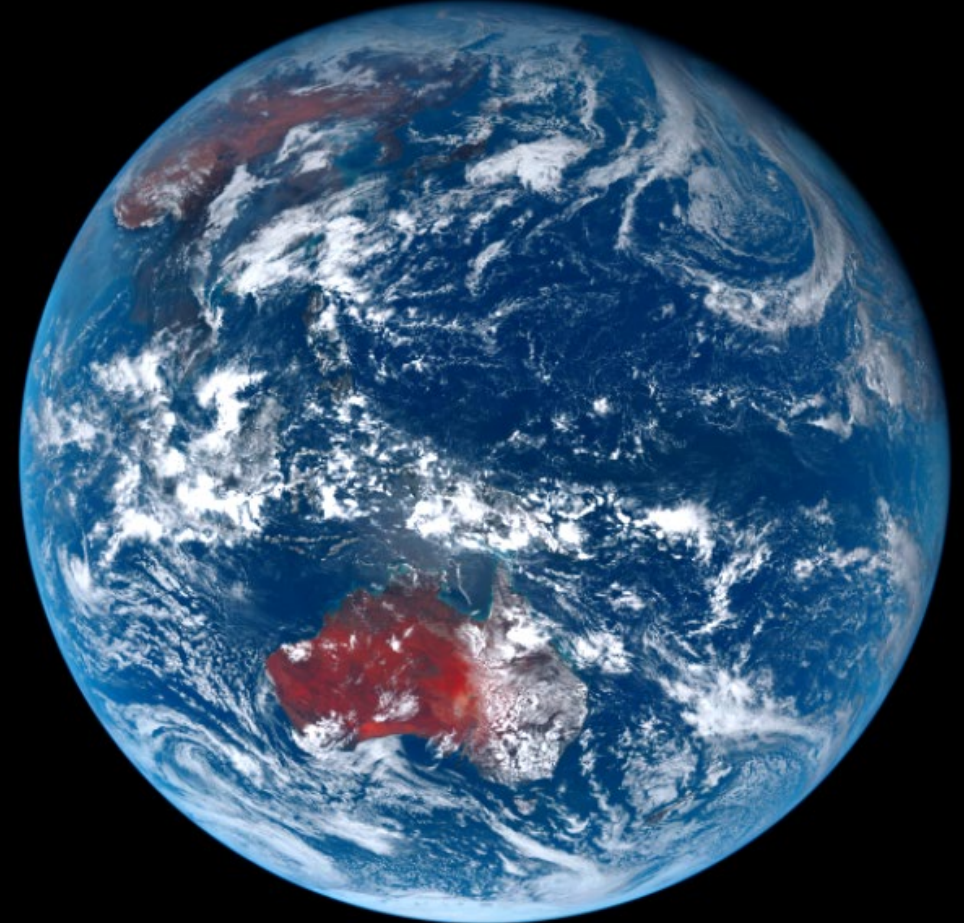
直径13cmの地球儀



1 億倍



直径1万3千kmの地球



原子



1 億倍



直径1cmの玉

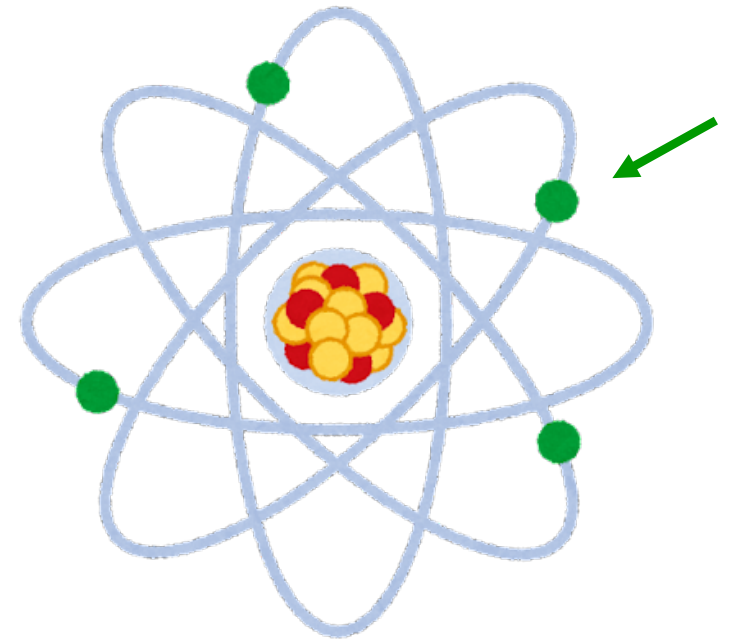


どうして量子論が必要なのか？

- ボールや車などマクロ物体の運動をつかさどる物理法則は知られていた：ニュートン力学
- 原子や電子のふるまいを調べると、**原子は「たんに小さいボール」のようなものではない**ことがわかってきた。
- 根本的に新しい物理理論が必要だということになり、1900～1926年頃に作られた。
- アインシュタインも量子論の初期の立役者

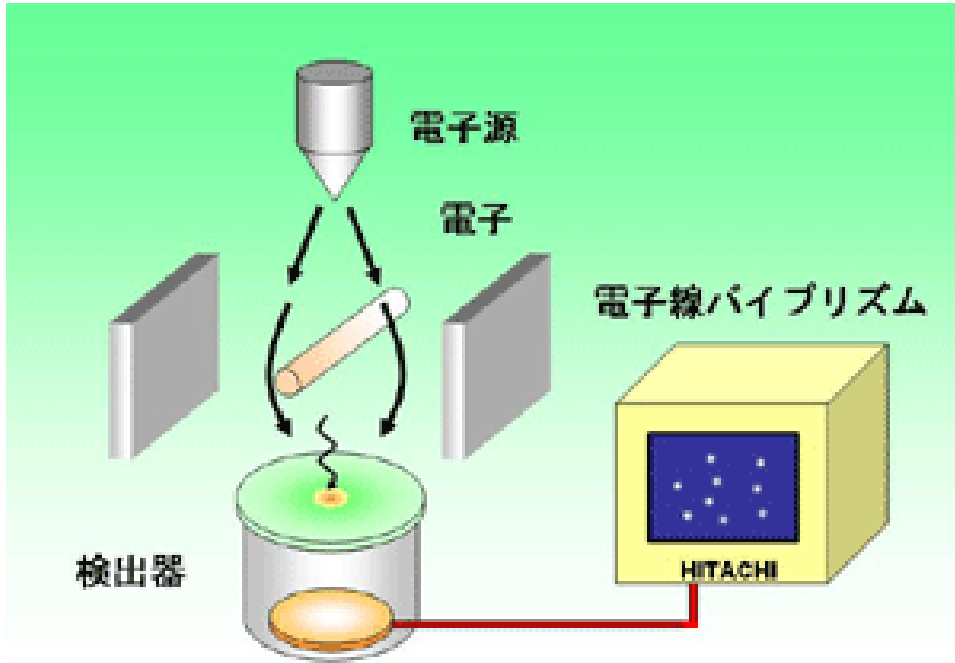
量子論らしさ

- 電子は粒子か？
- 電子は決まった質量と電荷を持っている
- 電子は1つ2つと数えられる
- 電子は割れない



電子のダブルスリット実験

日立の電子線ホログラフィー（外村彰）



<https://www.hitachi.co.jp/rd/research/materials/quantum/doubleslit/index.html>

この実験のどこが不思議か？

- 電子はぽつりぽつりと、ほとんどランダムに当たる
- 1個2個と数えられる粒子のように見える
- しかし、累積すると、波のような濃淡のパターンが浮かび上がる



水面波の実験

<https://www.youtube.com/watch?v=luv6hY6zsd0&t=260s>



波動の干渉

- 山と谷が交互に生じて伝わって行くのが波。
- 波は空間的に広がる。
- 波同士が重なり合うと、強め合ったり、打ち消し合ったりする。



電子の波動性と粒子性

- 飛んでいる電子は一箇所に局在せず、**波動**のように広がって進んでいる、ように見える。
- 電子の波は重なり合って、強め合ったり、弱め合ったりする。
- 強め合った場所に電子は大きな確率で現れる。
- 現れるときは**粒子**のように現れる。電子の「半分のかけら」は決して見つからない。

量子論の不思議 1：偶然まかせ

- 量子論は事象が起こる確率しか予測できない
- 「次の電子がスクリーンのどこに現れるか」を量子論は予測できない。と言うか、それは誰にもわからない。
- **アインシュタイン「神はサイコロを振らない (God does not play dice)」**：電子などの究極的な要素が偶然まかせで動いているとは信じられない。

量子論の不思議 2：見ると見ないで違う

- 電子を探せば必ず「ひとつぶ」の粒子として見つかる。
- 電子を探していないときは、電子は波動のように広がり、2箇所窓を通過しているかのようにふるまう。
- 見たときだけ粒子なのか？
- **アインシュタイン「空を見上げたときにだけ月があると君は信ずるのか？（Do you really believe that the moon exists only when you look at it?）」**

EPR論文（1935年）

- アインシュタイン、ポドルスキー、ローゼンの共著論文。
- アインシュタインの量子論不信の頂点とも言える論文。
- 量子論がうまく行っていることは認めるが、それでも量子論は不完全だ、と主張した。

局所実在論 (Local realism)

- EPRの信念。物理的世界についての常識。
- 局所性：ある場所で起きた出来事が他の場所のものに影響を及ぼすためには、間を光速以下の何かが伝わらなければならない。影響はじわじわと伝わる。
- 実在論：系に影響を及ぼすことなく確実に予測できる性質や数量があるならば、観測していないときもその性質・数量は客観的に存在している。

EPRの主張

- 完全な物理理論であれば局所实在論であるべきだ。つまり、客観的实在と認められるものがあるならば、完全な物理理論はそれを書き表しているべきだ、それについて語れるようになっていくべきだ。
- ところが量子論はそういうものを書き表していない、だから不完全だ。

EPRに対する反響

- EPR論文発表と同年の1935年にボーアが反論（説明しにくいので省略）
- 以後、この手の論争は下火に。
- フォン-ノイマンは「量子論には隠れた変数（実在的変数）は存在しない」こと（No-Go theorem）を証明した、と主張（1932年）。
- グレーテ・ヘルマン（数学者、ネーターの学生）はフォン-ノイマンの誤りを指摘した（1933-1935年）が、注目されなかった。

実在論をテストする

- そもそも「原子や電子は、人に見られていないときも、見られたときと同じ性質を持っているか？」という疑問を検証しようと思っても、「**見ていないときの性質**」を実験で確かめる方法はなさそう。
- アインシュタインは1955年に没。
- **1964年にベルが、見ていないときの性質を検証するための数式を発表した。**
- **1969年にクラウザーたちがベルの不等式を実験検証しやすい形に作り替え、偏光を使う実験を考案した。**

偏光フィルター

- ベルとクラウザーたちの提案を理解するための準備



偏光フィルターを重ねる

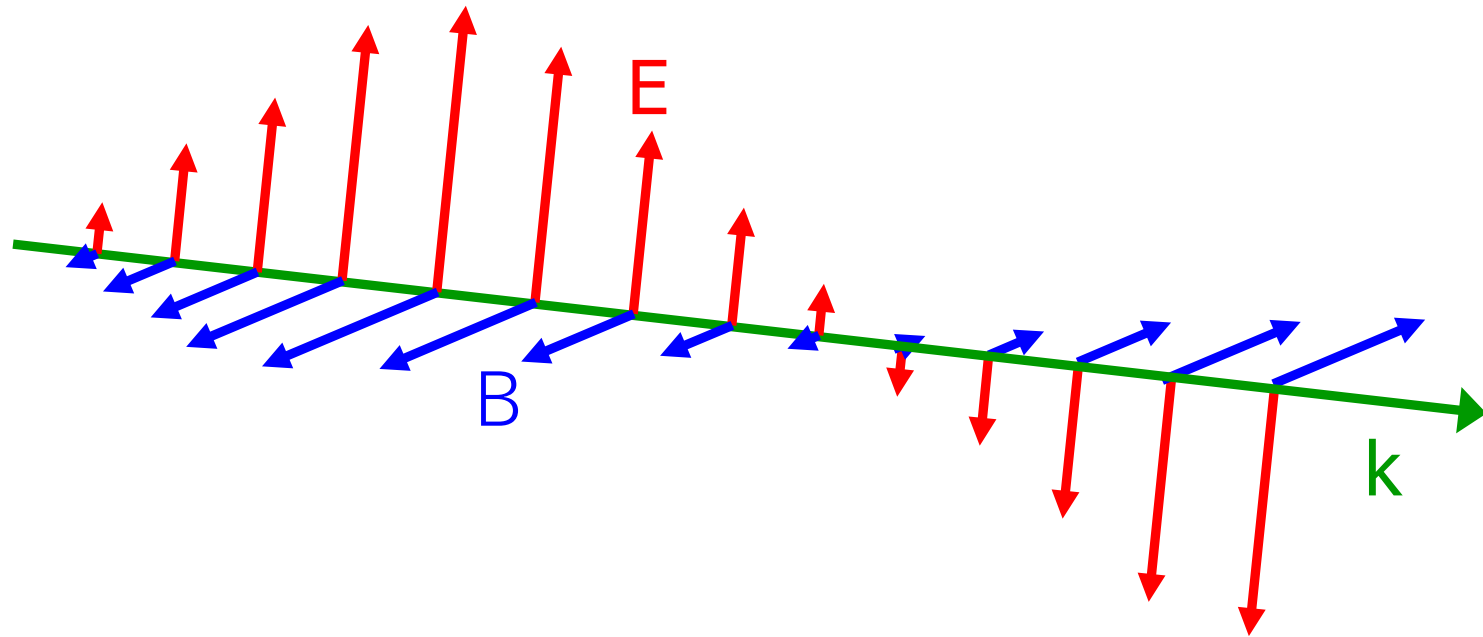


90°回して重ねるとほとんど光を通さない

(科学館 理工館 4 階に偏光の実験コーナーがあります)

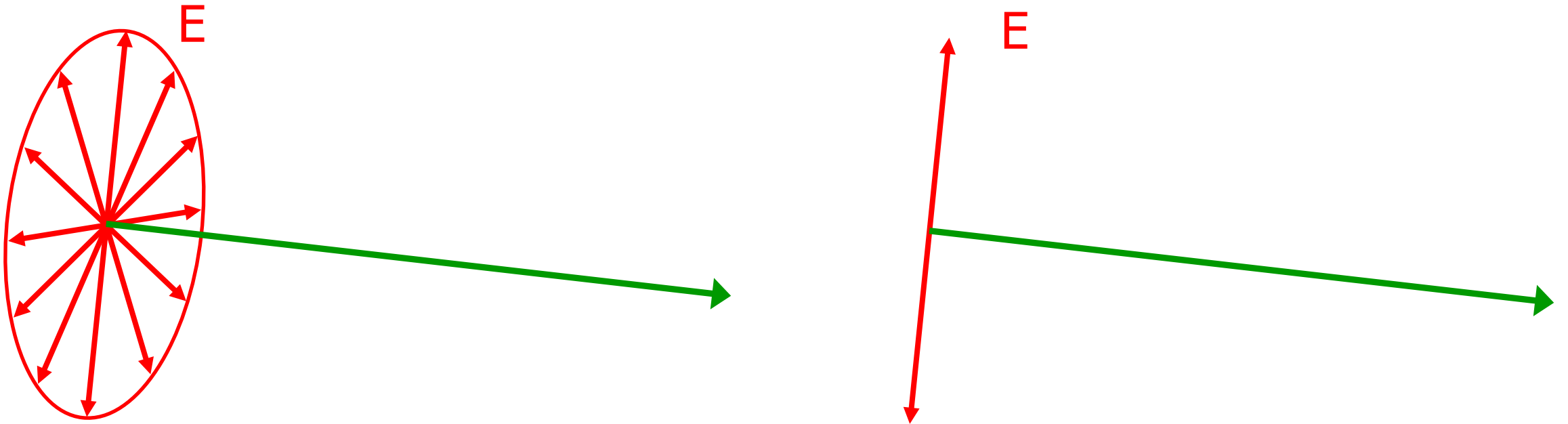
これをどう解釈するか？

- 光は横波（電磁波）
- 進行方向 \mathbf{k} に対して垂直に電場 \mathbf{E} と磁場 \mathbf{B} が振動している。



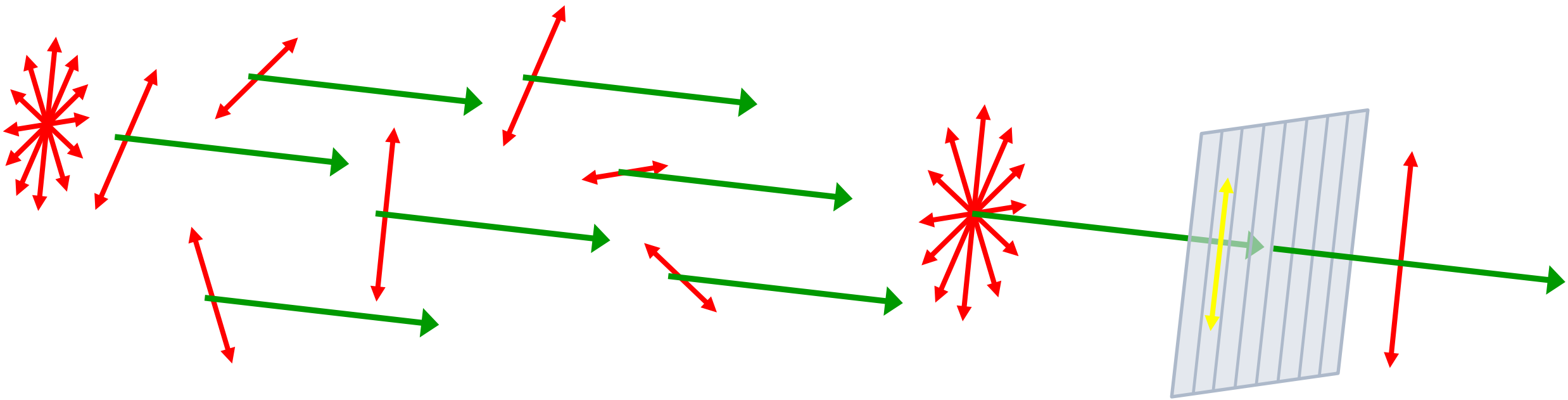
これをどう解釈するか？

- 横波の振動方向には多様性がある。
- 特定の方向だけに振動している波が偏光。



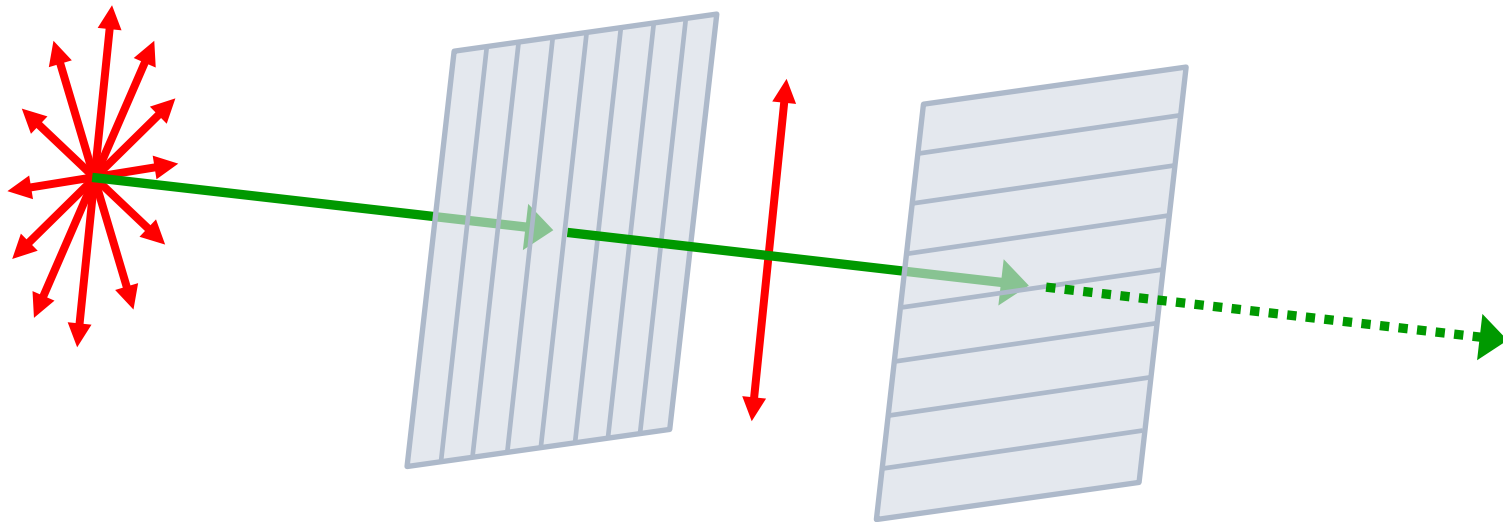
これをどう解釈するか？

- 太陽や電球の光にはいろいろな方向の偏光が混じっている。
- 偏光フィルターは特定の方向の偏光だけを通す。



これをどう解釈するか？

- 透過軸が互いに垂直になるように偏光フィルターを重ねると光は完全にさえぎられる。



フィルター2枚の間にもう1枚挿入



3枚重なっているところがほうが光が通る！
2枚重ねよりも3枚重ねのほうが通りやすい
(光が通る確率が高い)



色付きセロハンを3枚重ねる

赤・青・黄



青・黄・赤



黄・赤・青

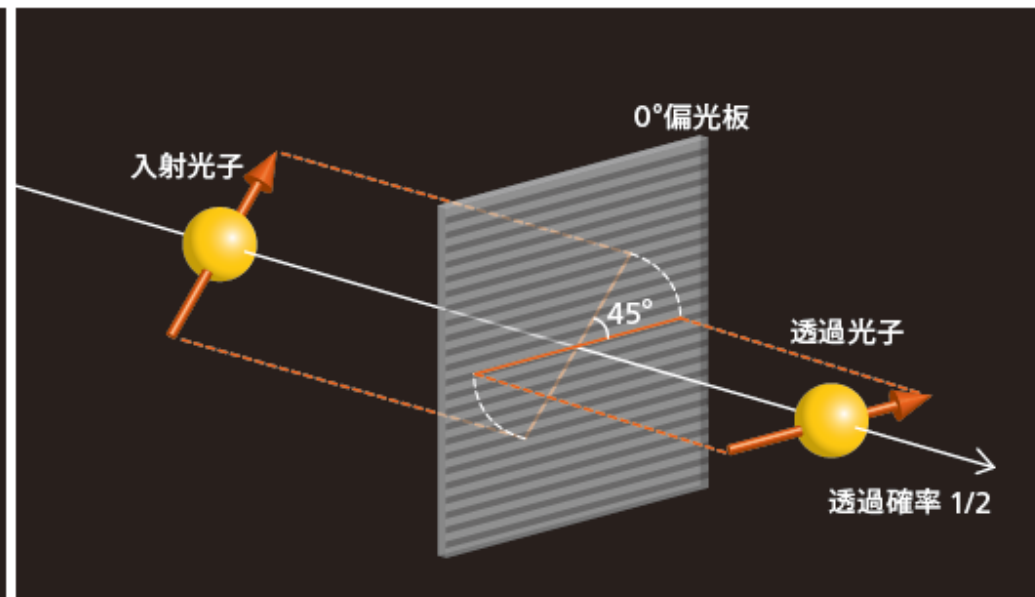
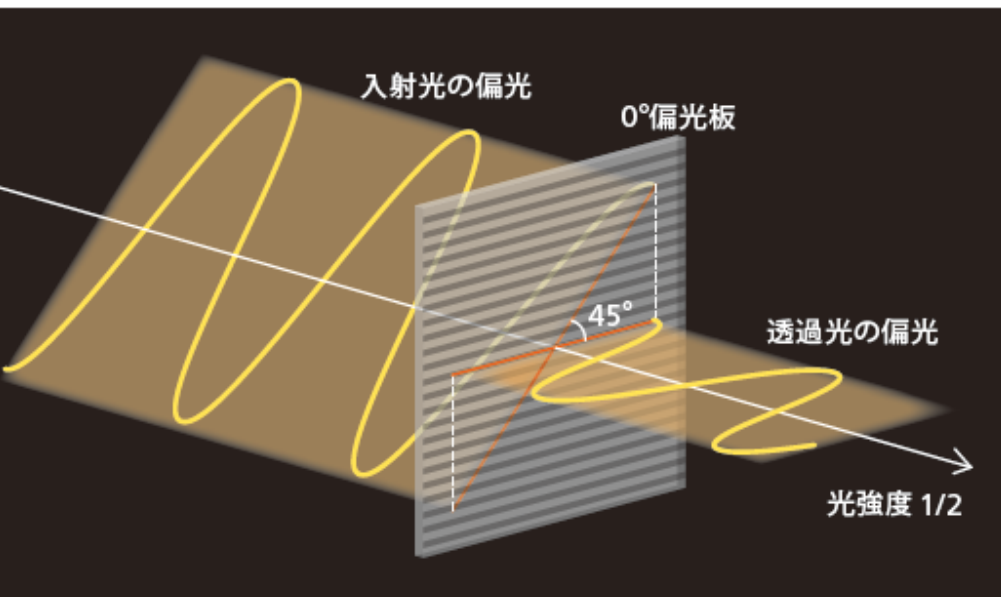
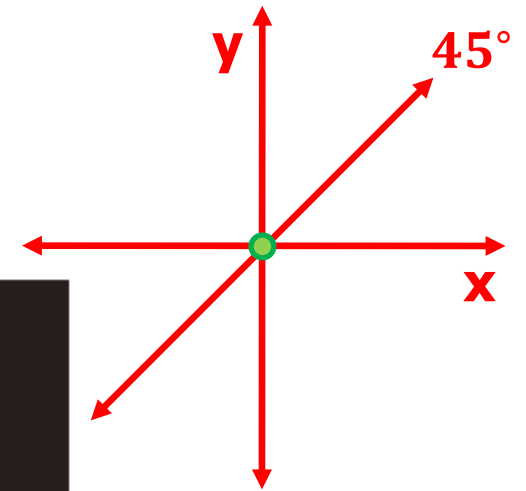


どの順番で重ねても暗い

これを量子力学はどう説明するか？

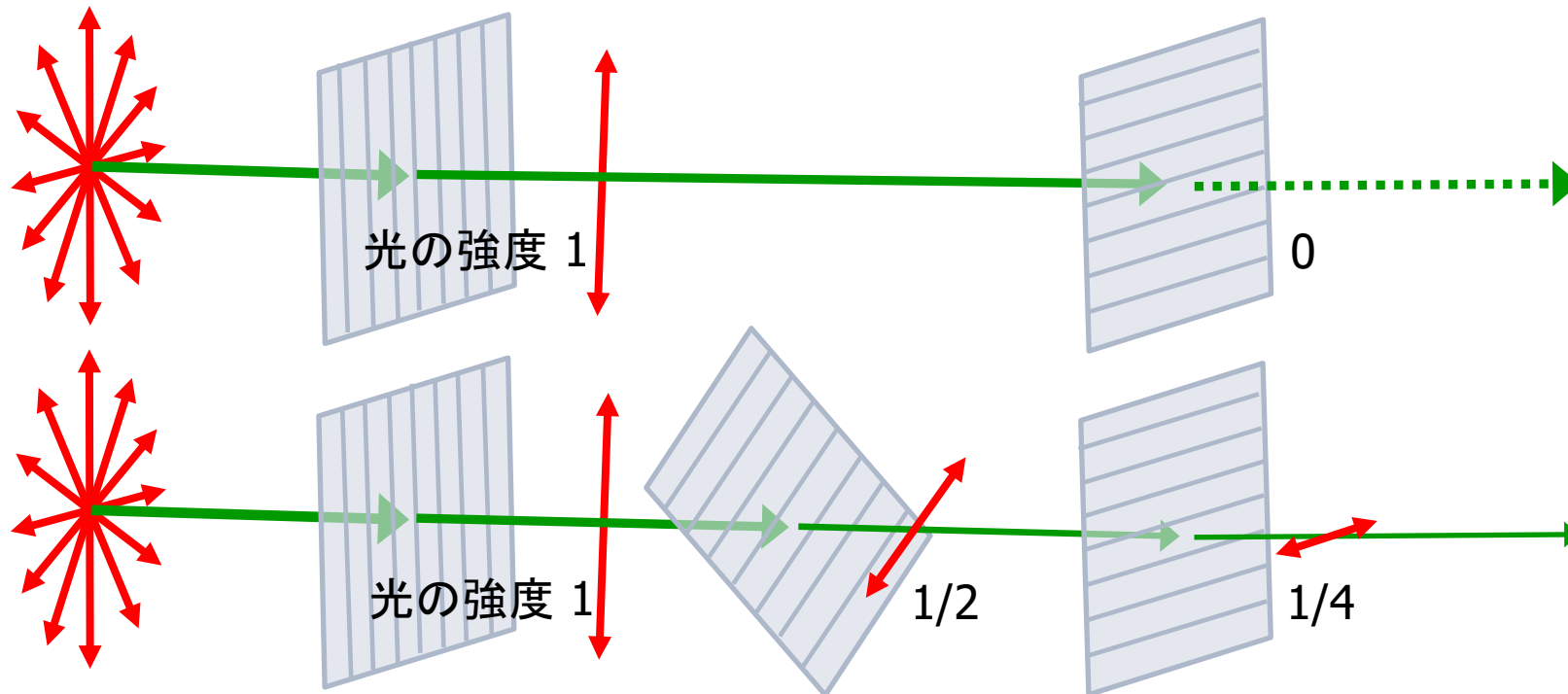
- y偏光が x偏光に変わる確率は 0
- 45°偏光は x偏光とy偏光の重ね合わせ状態 $|45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle + |y\rangle)$
- 45°偏光から x偏光に移る確率は 1/2
- 45°偏光から y偏光に移る確率も 1/2

日経サイエンス『光子の逆説』 谷村省吾



これを量子力学はどう説明するか？

- y偏光からx偏光に移る確率は 0
- y偏光が 45° フィルターを通ると 45° 偏光になりきって（以前はy偏光だったことを忘れて）x偏光フィルターを通る。



一般の場合の透過確率（遷移確率）

- 角度 θ 傾いた偏光を x軸に射影した成分

$$\alpha = \cos \theta$$

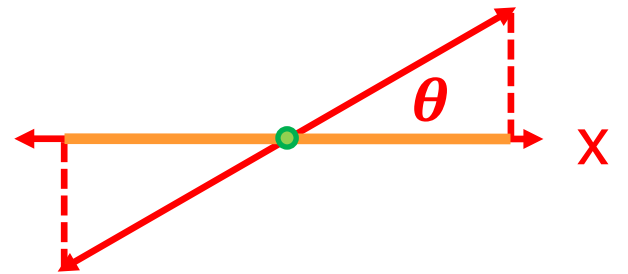
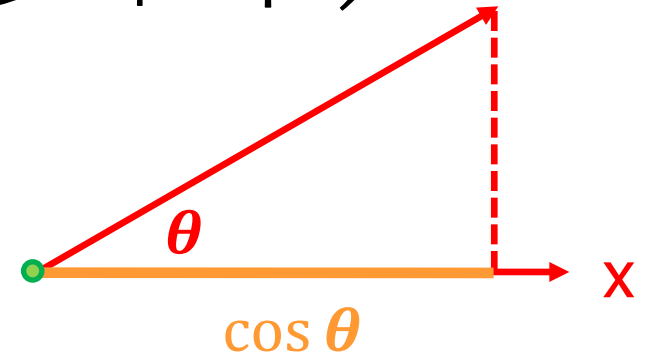
- 角度 θ 傾いた偏光が x偏光フィルターを通る確率

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

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

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

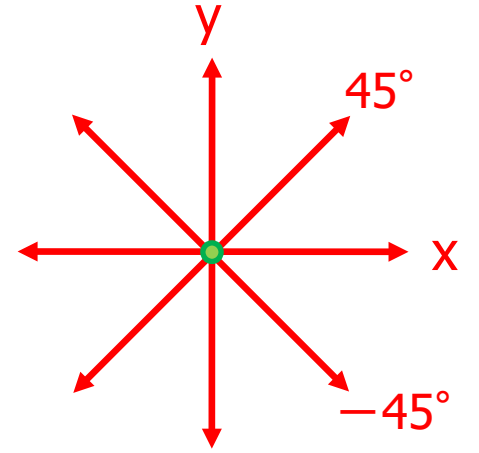
$$P(22.5^\circ) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = 0.8535 \dots$$



重ね合わせ状態

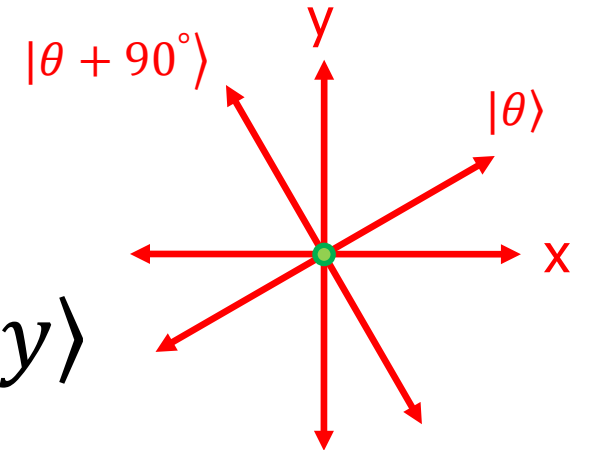
斜め偏光状態：

$$|45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle + |y\rangle), \quad |-45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle - |y\rangle)$$



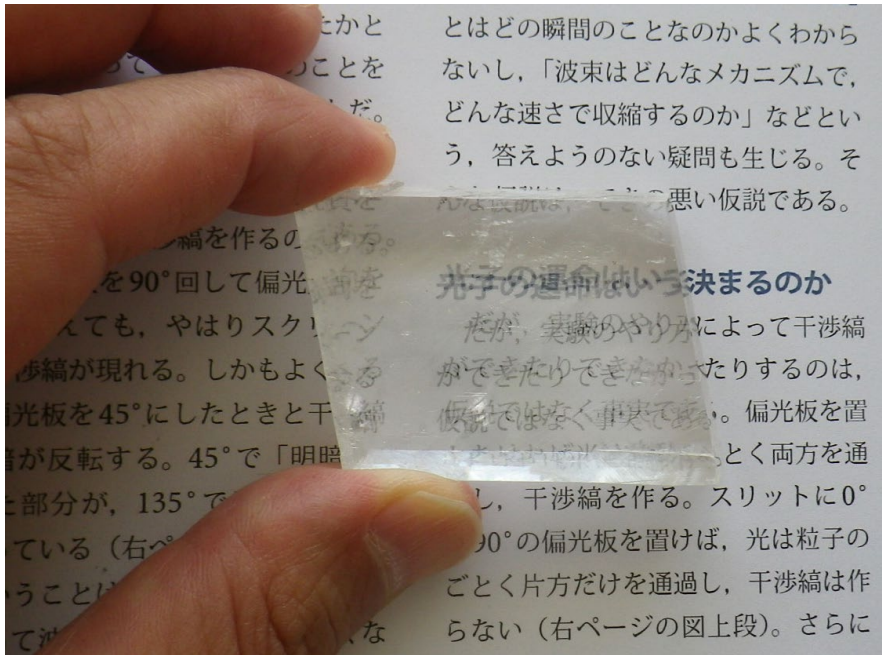
一般の重ね合わせ状態：

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

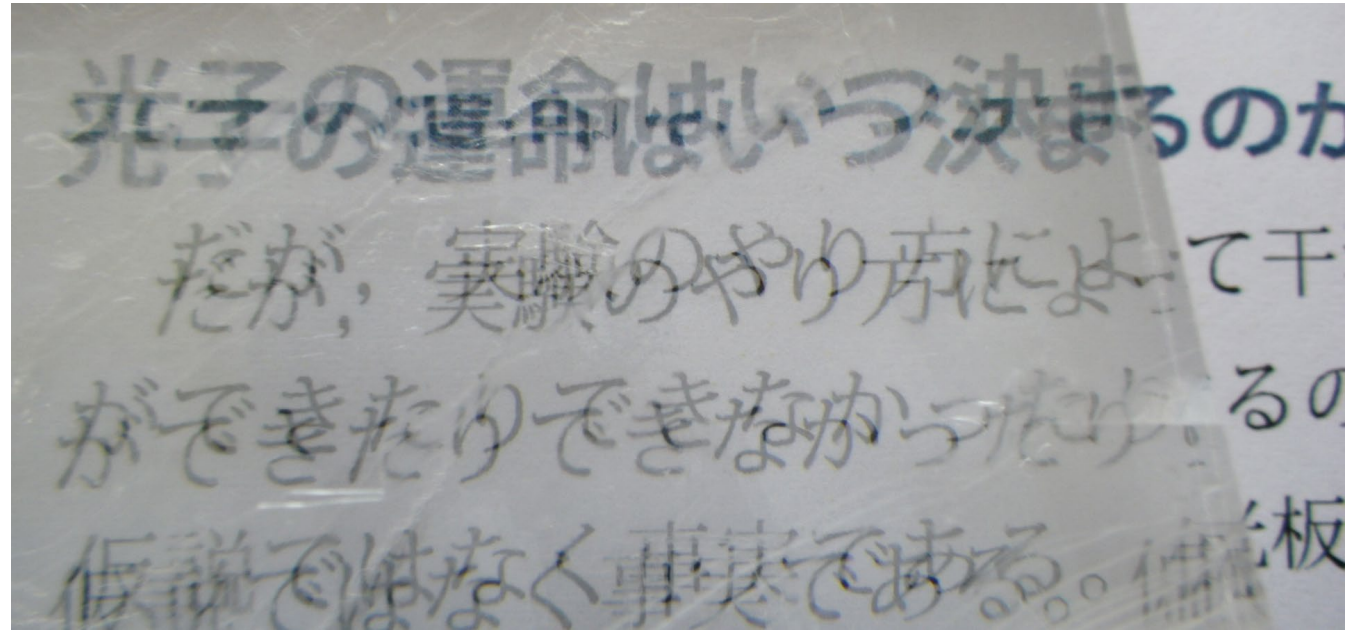


複屈折

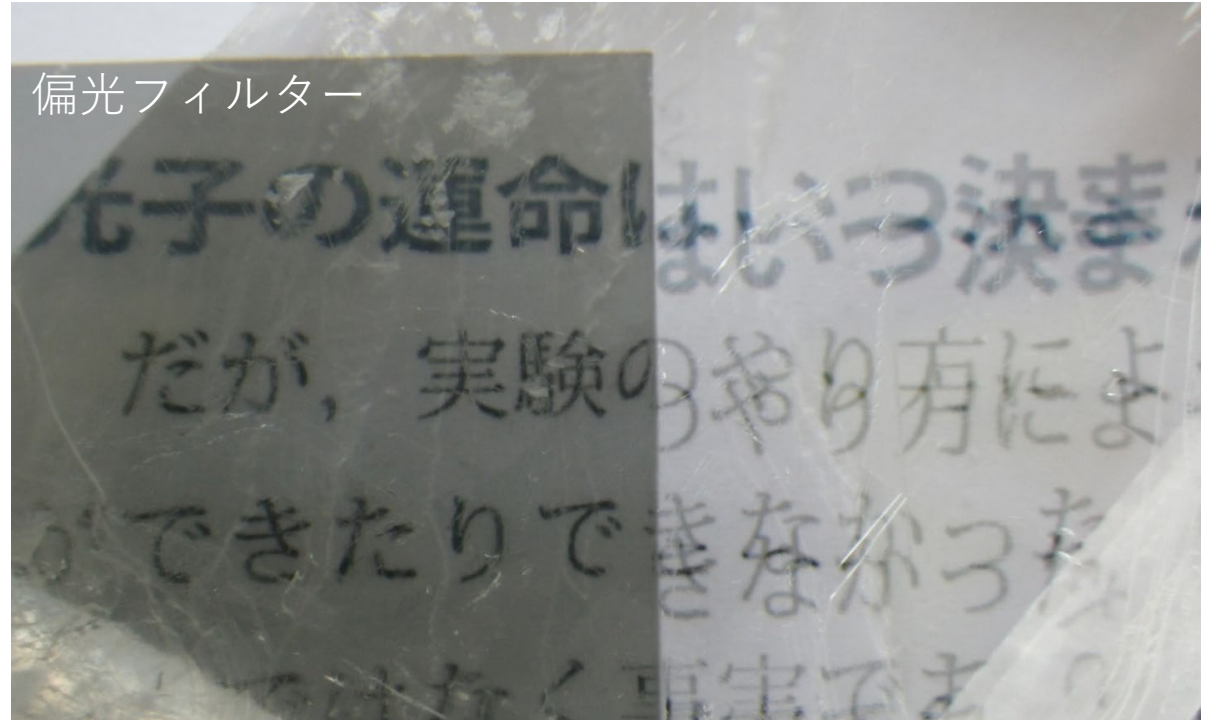
方解石（炭酸カルシウムの結晶）は光をx偏光とy偏光に分けて屈折させる。



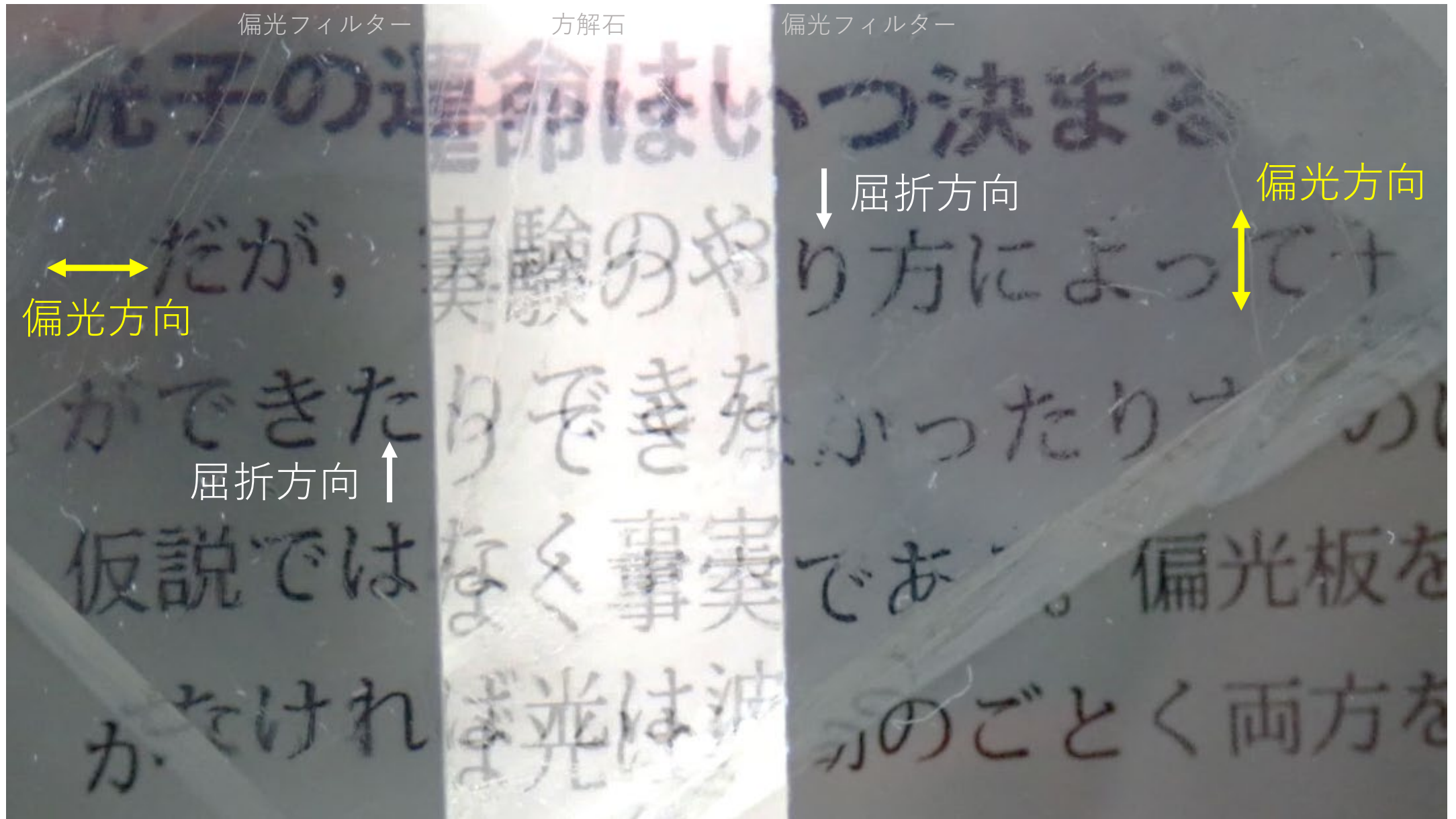
方解石を通して見る



偏光フィルター



複屈折は偏光を分離している



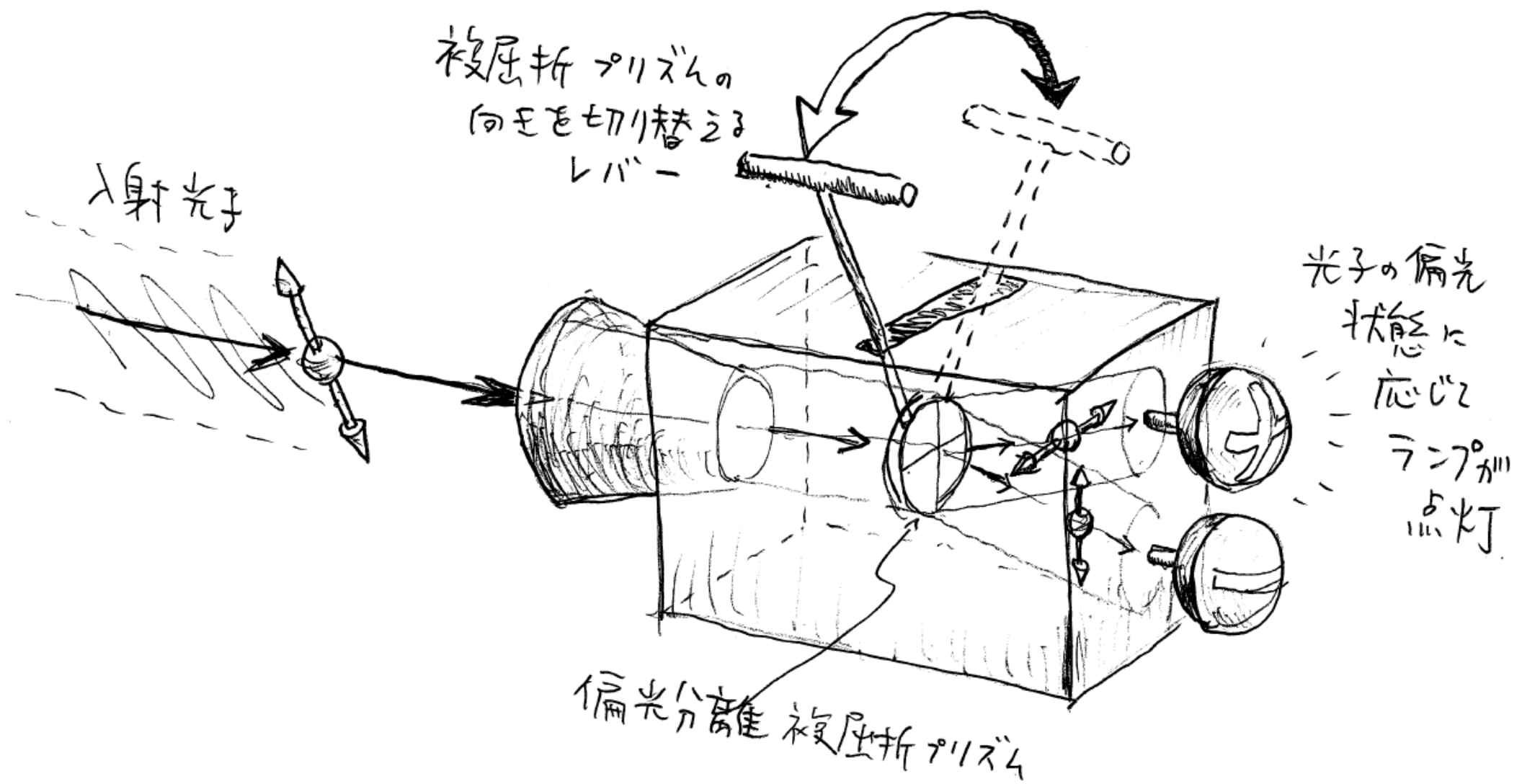
準備完了

- 実験設定を説明する準備が整いました。
- 1969年にクラウザー、ホーン、シモニー、ホルト（CHSH）の4人が、ベルが提案した不等式を実験検証しやすい形に改良した。

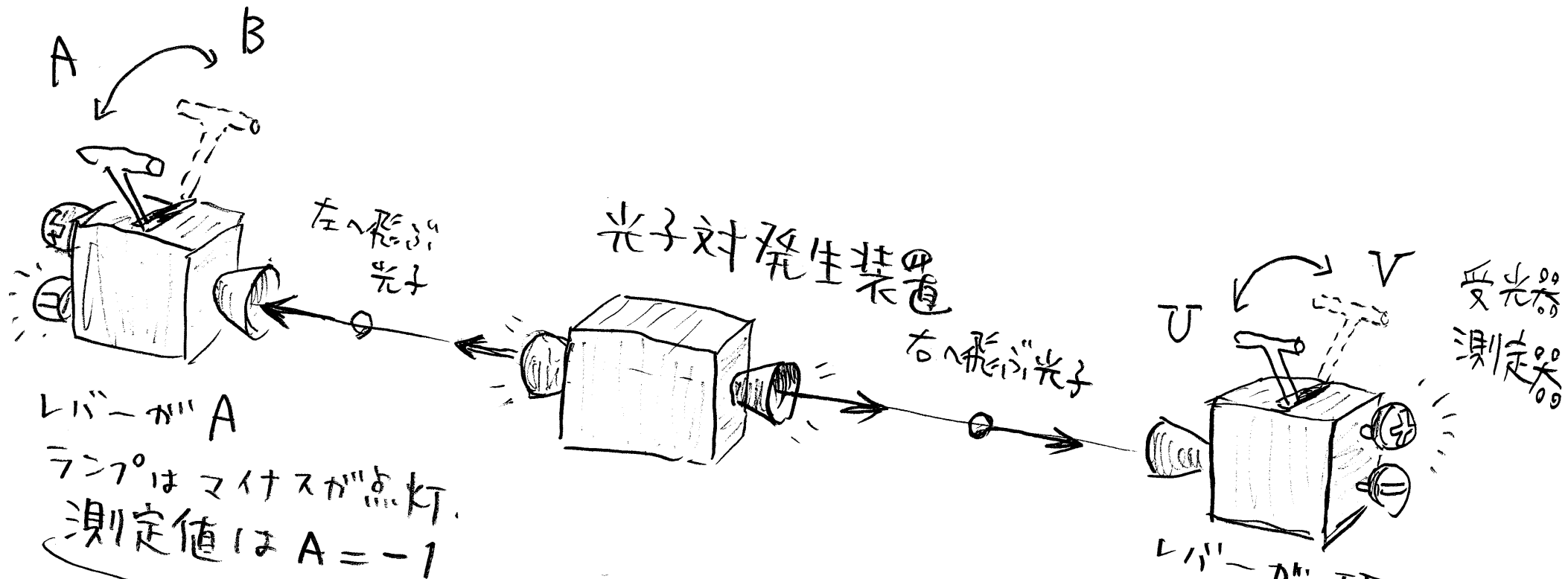
（シモニーはカルナップのもとで哲学の博士を取り、ワイトマンとウィグナーのもとで物理の博士を取った。ワイトマンに「EPR論文の間違いを指摘せよ」と指示されてEPR論文を読んだが、どこも間違っていないと思った、という。ホーンはシモニーの学生。参照：アダム・ベッカー『実在とは何か』）

- 以下では、CHSHのバージョンを説明する。

光子の偏光測定器の概念図



この絵を見ながら説明を聞いてください



かけ算して $A \cdot U = (-1) \times (+1) = -1$

実験のセッティング

- 中央に光子ペア発生装置があり、2つの光子を同時に発生させて左右に1つずつ飛ばす。
- 左右の端に受光器。飛び込んで来た光子の偏光状態を測る。x偏光ならプラスのランプ、y偏光ならマイナスのランプが点灯。
- 左右の受光器にはレバーが付いていて、レバーの向きによって偏光の分離角度が変わる。レバーは左右の受光器に付き添っている実験者が切り替える。

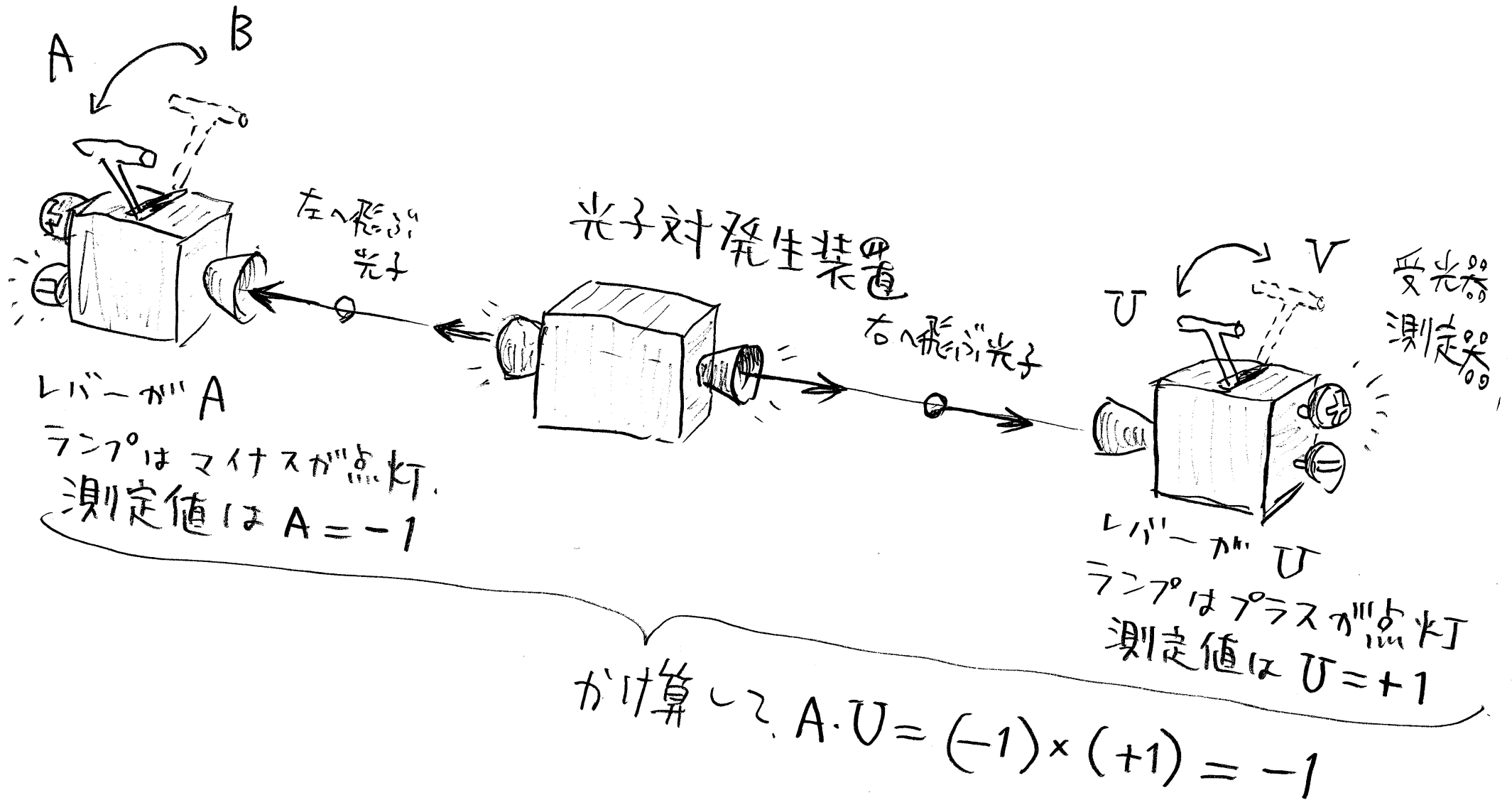
測定値の定義

- 光子が左右の受光装置に飛び込む。
- **レバーがAの位置になっている左の受光器のプラスランプが点灯したら測定値は $A=+1$ とする。**
- レバーがAの位置になっている左の受光器のマイナスランプが点灯したら測定値は $A=-1$ とする。
- レバーがBの位置になっていたら、測定値は $B=\pm 1$.
- 右の受光器についてもレバーの位置とランプの点灯に応じて $U=\pm 1$ または $V=\pm 1$ を測定。

測定を繰り返す

- **1組の光子ペアに対して左の受光器がA、右の受光器がUを測ったなら、掛け算してAUの値を求める。**
- 光子ペアを何回も発生させてAUの値を多数回記録して、その**平均値 $\langle AU \rangle$** を求める。
- 同様に、AとVを測って掛け算値AVを求め、光子ペアの発生を繰り返して、**平均値 $\langle AV \rangle$** を求める。
- 同様に、 **$\langle BU \rangle$** , **$\langle BV \rangle$** を求める。

やることはわかりましたか？



測定データの最終処理

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

を求める。

局所实在論によれば、

$$-2 \leq \langle \mathbf{S} \rangle \leq +2 \quad (\text{CHSHの不等式})$$

となるはずである。

CHSHの不等式の証明 1

平均を計算する前の式を書く：

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

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 は 必ず一方が 0 で、もう一方が ±2.

CHSHの不等式の証明 2

$$S = A(\mathbf{U} + \mathbf{V}) + B(\mathbf{U} - \mathbf{V})$$

$U+V$ 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、

$$-2 \leq \langle S \rangle \leq +2 \quad (\text{CHSHの不等式})$$

**$\langle S \rangle$ がこの不等式の外にはみ出るなんてありえない！
と想像していただけではないでしょうか？**

量子論では

$$-2 \leq \langle S \rangle \leq +2 \quad (\text{CHSHの不等式})$$

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

CHSHの不等式が成り立たないことを「CHSH不等式の破れ (violation)」という。

常識では考えられないことが量子論では起こる！

量子もつれ (entanglement)

- ペアで発生した光子を片方ずつ見る限り、 $1/2$ の確率で x偏光だったり、y偏光だったり、ランダムに見える。
- 左の光子がx偏光のときは、右の光子もx偏光。
- 左の光子がy偏光のときは、右の光子もy偏光。
- 左の光子が 45° 偏光のときは右の光子も 45° 偏光。
- 左の光子が -45° 偏光のときは右の光子も -45° 偏光。
- **どんな角度でも 同じ測定軸で比べれば完全な相関。**

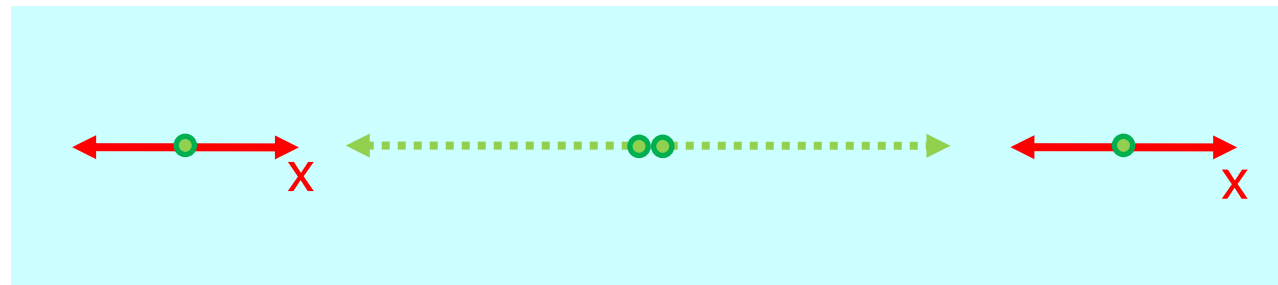


量子もつれは古典モデルで再現できるか？

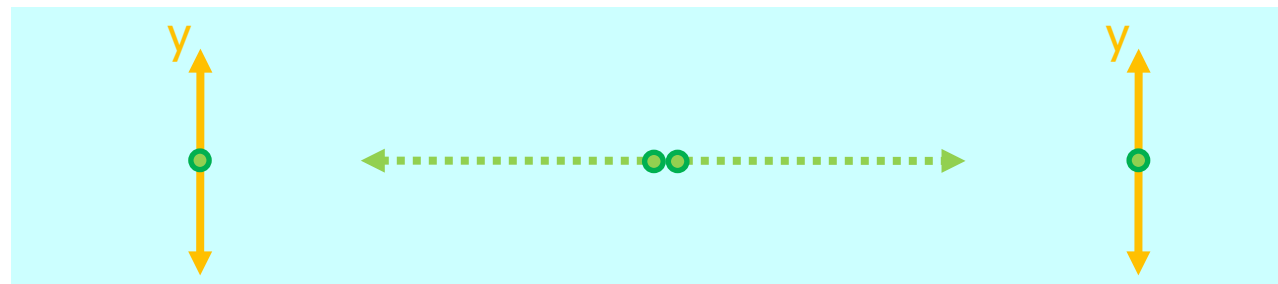
- 量子もつれの「どこが当たり前でない」のか？

- 古典物理的モデル：

1/2の確率で「x偏光 and x偏光」のペアが発生し、
1/2の確率で「y偏光 and y偏光」のペアが発生している、
と考える。

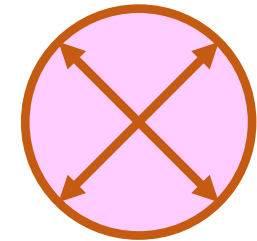
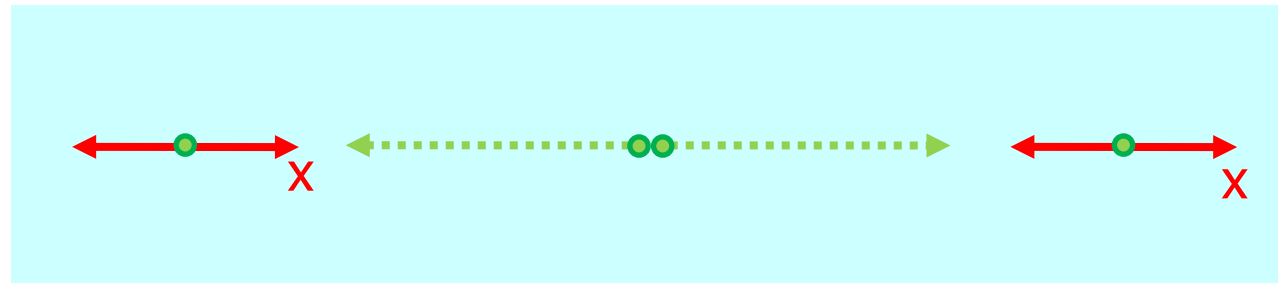
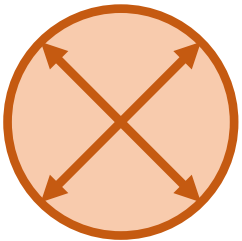


または



再現できない

- このモデルで行くと、**左の光子が x 偏光だったら、45° 傾けた分離器に通すと、半々の確率でランダムに +45° または -45° の結果が出るし、このとき、右の光子は確実に x 偏光なので、半々の確率で +45° または -45° の結果が出て、左右の光子の相関は見られないはず。**



- どんな古典的モデルを作っても量子もつれのマネはできない。

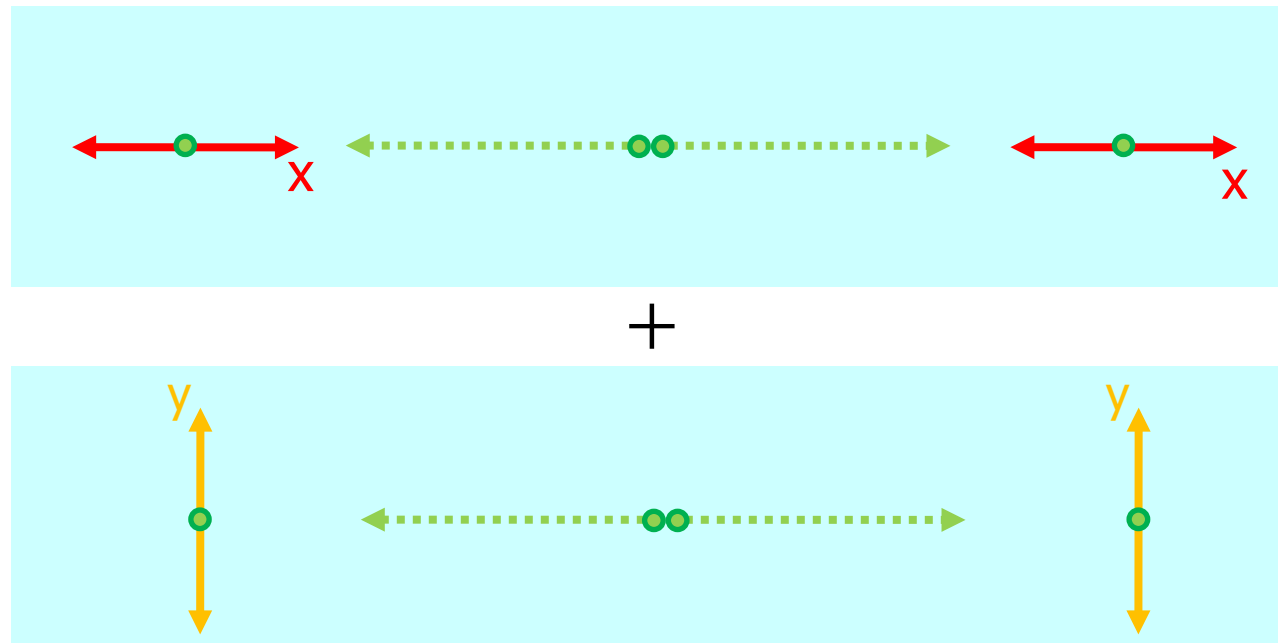
量子もつれ状態

量子もつれ状態とは、

「x偏光 and x偏光のペア状態」と

「y偏光 and y偏光のペア状態」の**重ね合わせ状態**である。

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



量子もつれ状態は完全な相関状態

2光子の量子もつれ状態：

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

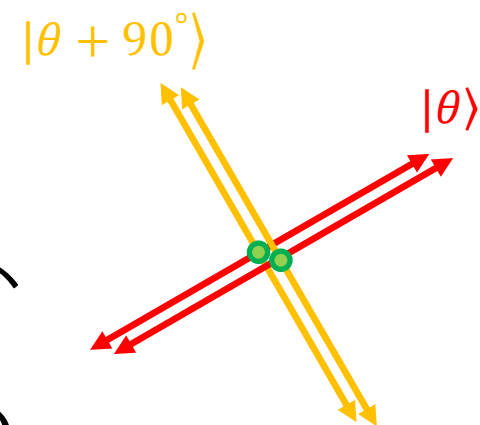
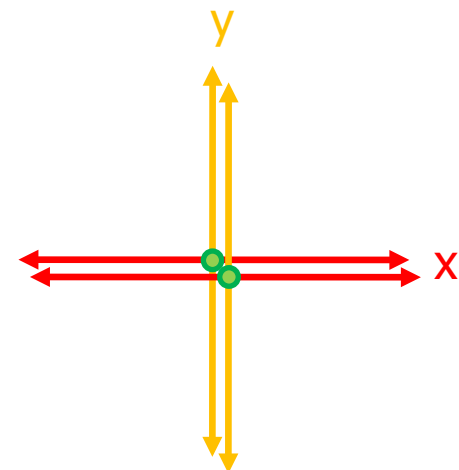
任意の1光子偏光状態：

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

$$|\theta + 90^\circ\rangle = -\sin\theta |x\rangle + \cos\theta |y\rangle$$

$|\theta\rangle|\theta + 90^\circ\rangle$ のような余計な項は打ち消し合って、

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



左右の“ランプ”が同符号になる確率

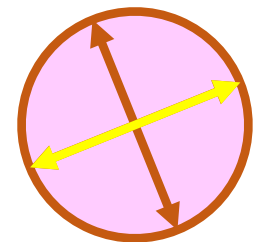
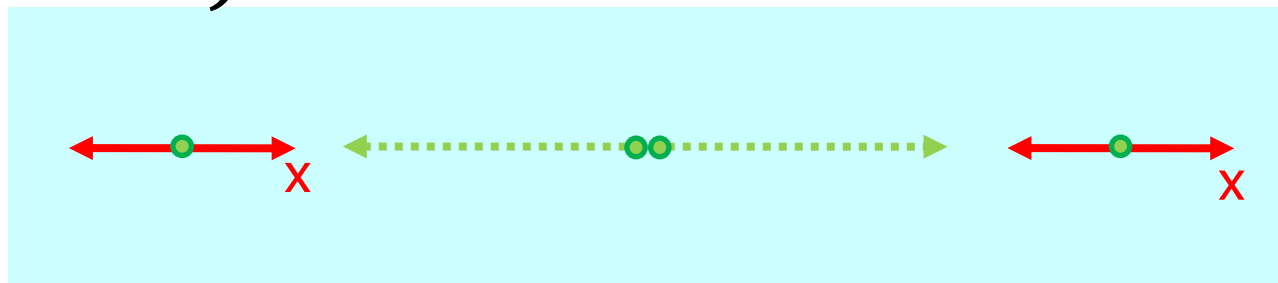
- 量子もつれの2光子を、左右で異なる角度の偏光分離器で検出したときの相関を求めよう。

- 左の光子がx偏光だったとき、右の光子もx偏光。

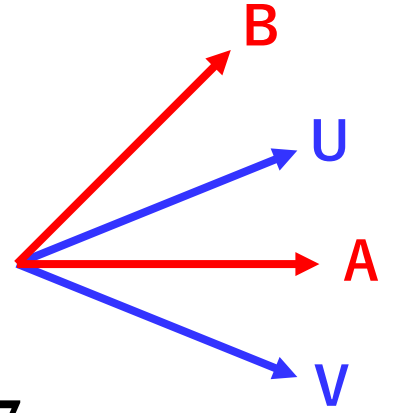
- 右の光子が角度 θ の偏光フィルターを通る確率は

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

- とくに、 $P(22.5^\circ) = 0.85 \dots$



平均値 $\langle AU \rangle$ 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 $45^\circ + 22.5^\circ = 67.5^\circ$, $P(67.5^\circ) = 0.15 \dots$

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

- 集計すると、

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

量子力学の由緒正しい数学：非可換代数

$A^2 = 1, B^2 = 1$ でも $BA = -AB$ ならば

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

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

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」ことがビルトインされている。

量子力学の由緒正しい数学：非可換代数

離れた場所の物理量は可換

同一場所の物理量は非可換

$$A^2 = 1, \quad B^2 = 1, \quad U^2 = 1, \quad V^2 = 1$$

$$AU = UA, \quad AV = VA, \quad BU = UB, \quad VB = VB$$

$$AB = -BA, \quad UV = -VU$$

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

以上の仮定から S の値は $\pm 2\sqrt{2}, 0$ であることが証明できる。

(谷村『量子論と代数—思考と表現の進化論』数理科学2018年3月号、[名大リポジトリで無料公開](#))

量子力学の結果

いまのは代数的量子論の方法。

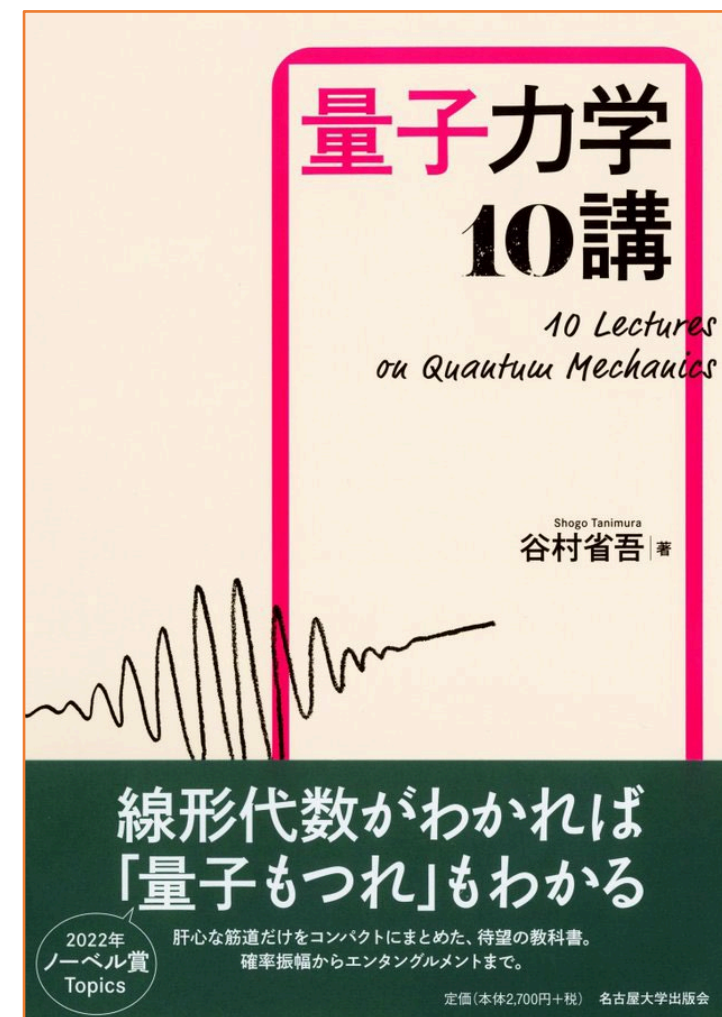
演算子（行列）形式の量子力学でも
同様の計算を（泥臭く）やれる。

結果は

$$\langle \Psi | \hat{S} | \Psi \rangle = 2\sqrt{2} = 2.828 \dots$$

詳しくは、
拙著『量子力学10講』 ⇒

<https://www.unp.or.jp/ISBN/ISBN978-4-8158-1049-8.html>



CHSHの不等式のどこが間違っていたのか？

証明の途中で、 $S = A(U + V) + B(U - V)$

UとVの値は ± 1 なので、

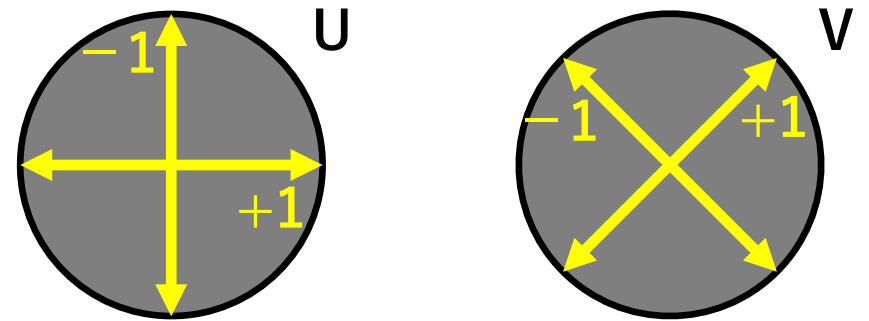
U+Vの値は ± 2 または 0.

U-Vの値も 0 または ± 2 .

U+V と U-V は 必ず一方が0 で、もう一方が ± 2

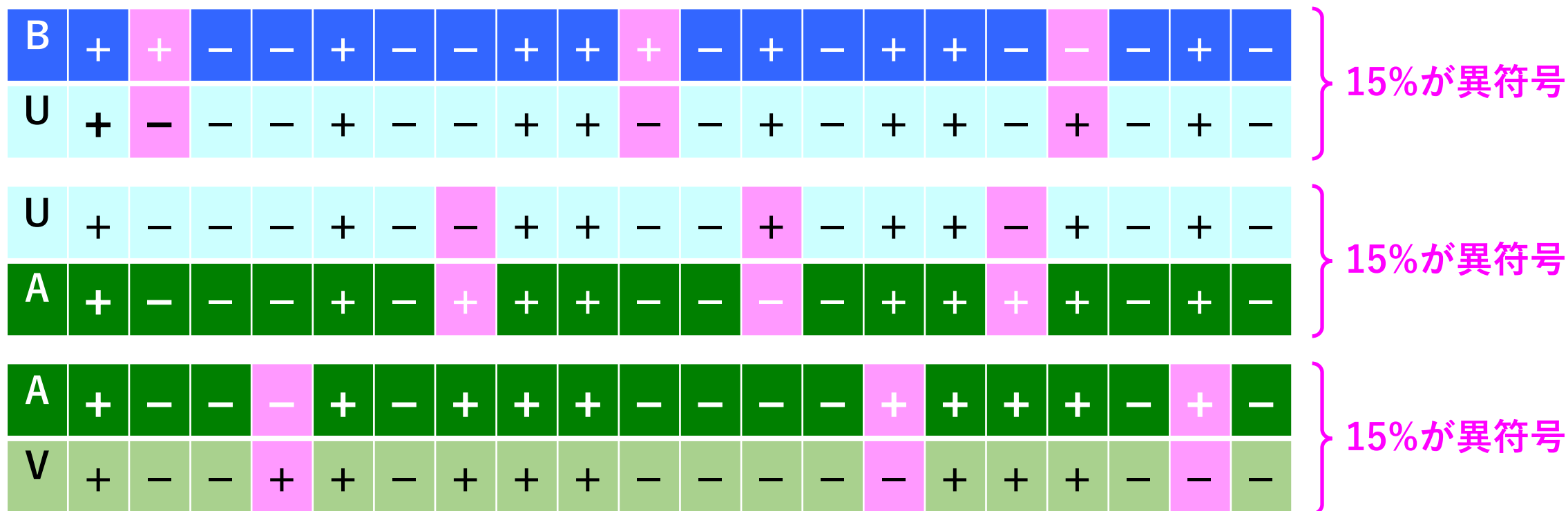
と考えた。しかし、UとVは同時には測れない！

Uを測っているときはVは測れないのに、UとVの両方の値が実在していると仮定したことが誤り。



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、

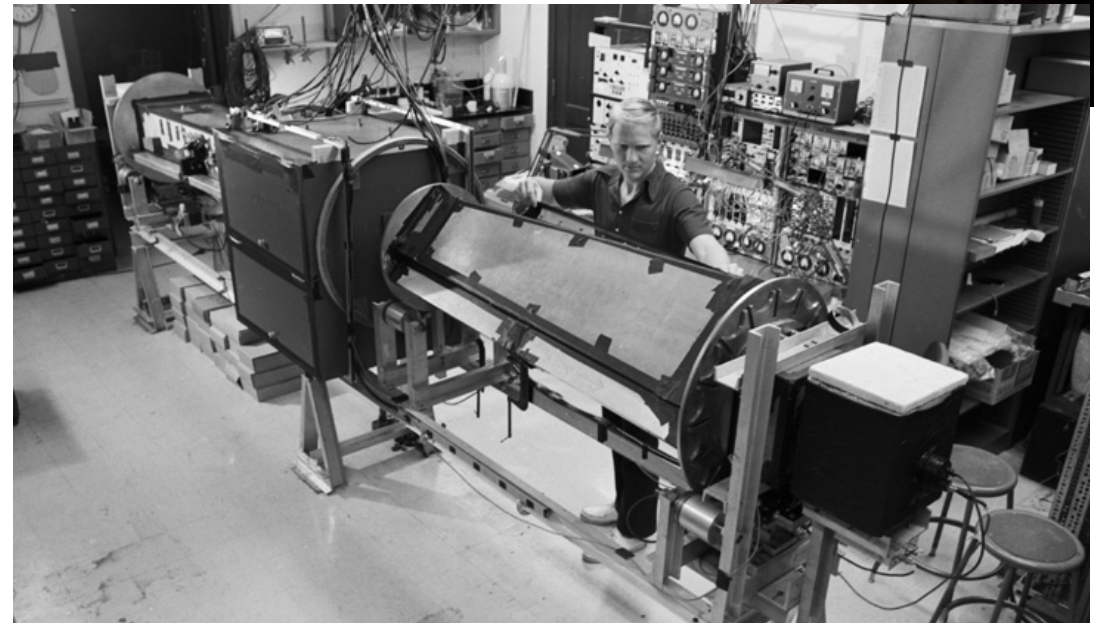
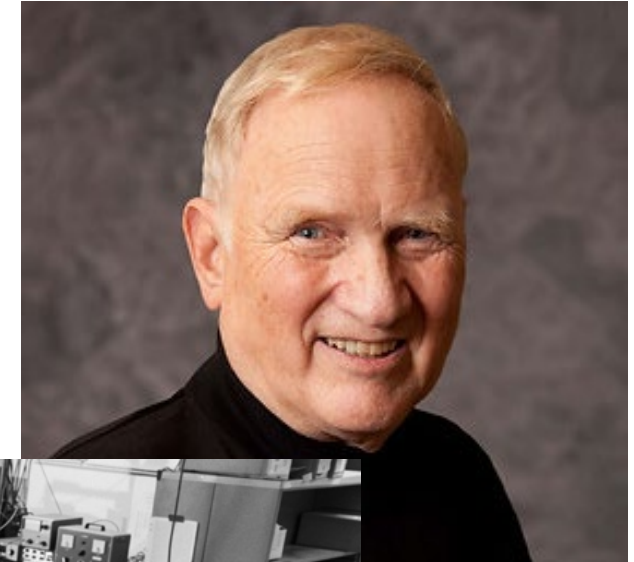


どう頑張っても一番上のBと一番下のVの異符号箇所は45%以下。

〈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！

ジョン・クラウザーの実験（1972年）

大学院では宇宙物理（分子分光）を研究していたが、ベルの論文を知ってCHSHの共同研究を行った。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。



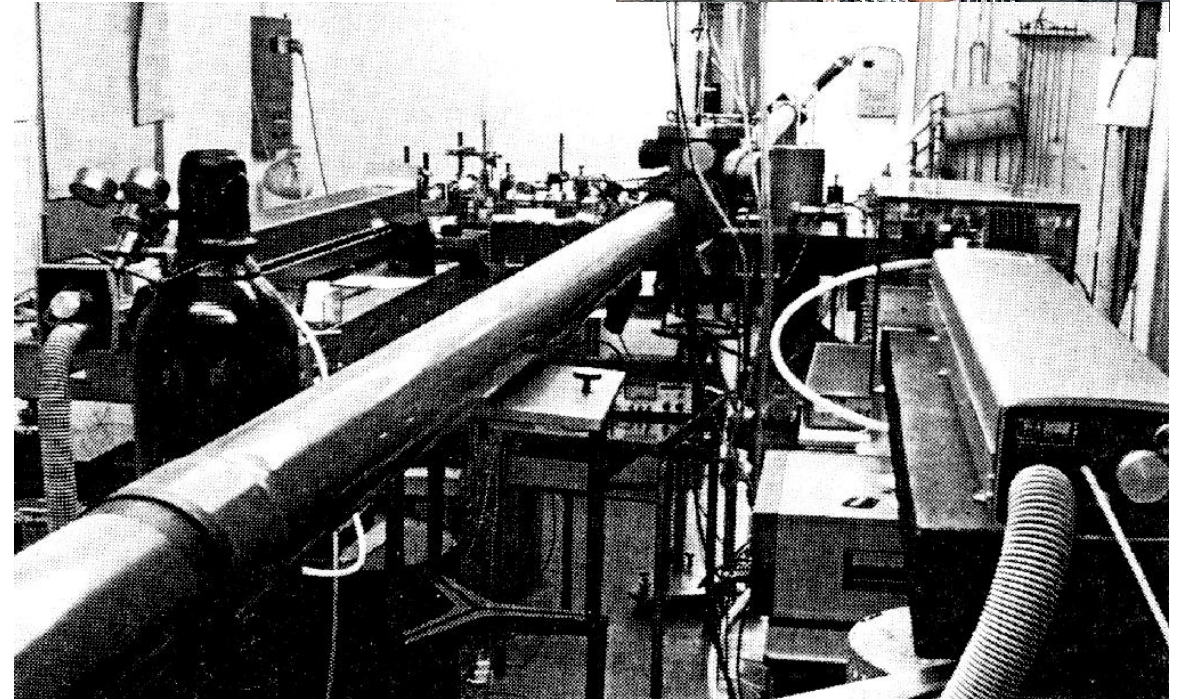
<https://www.johnclouser.com/>

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

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。

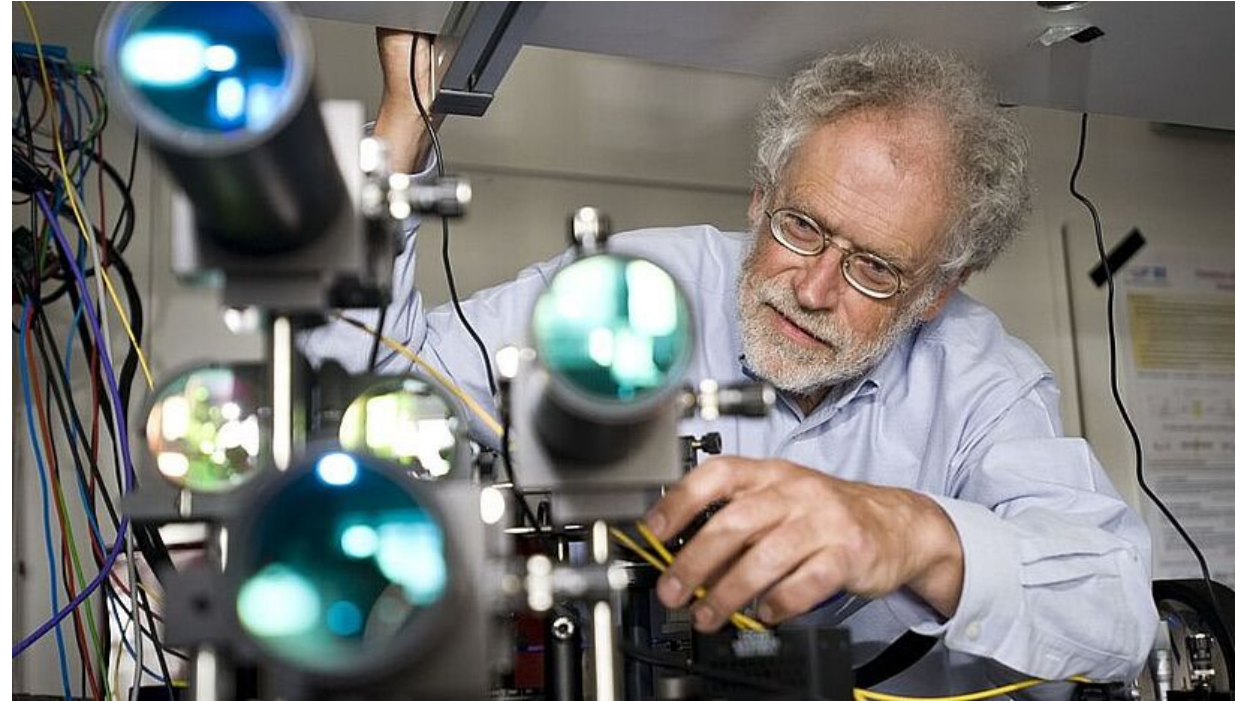
この研究でアスぺは博士学位を取った。



アントン・ツァイリンガーの実験（1998年）

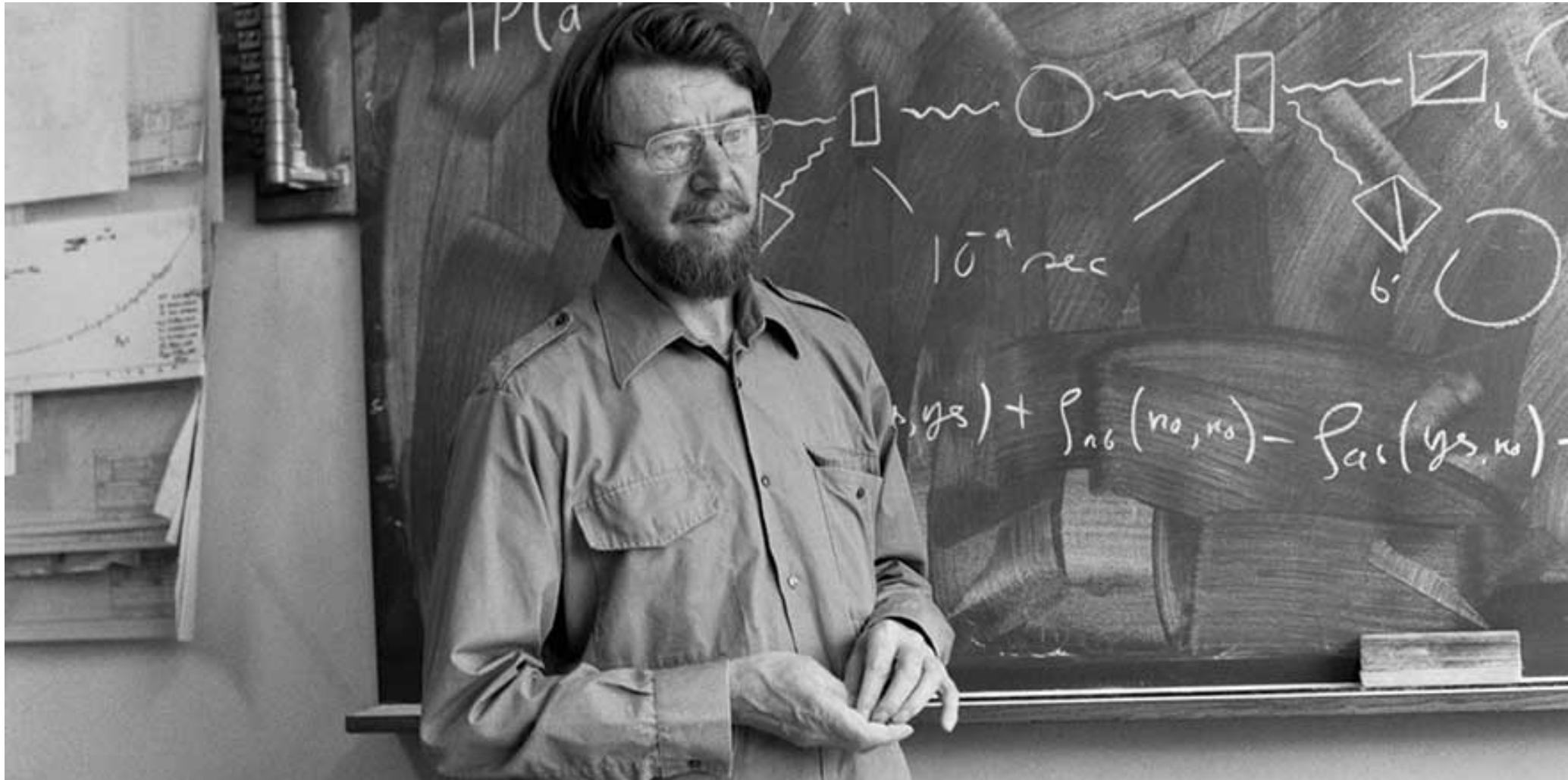
左右の測定器が互いに相手の状態を知らないようにするため、また、あらかじめ光子が測定器の状態を知るチャンスがないようにするため、左右の測定器のそばに乱数発生器を置いて、光子が発生して測定器に飛び込むまでの間に乱数を振って、それに応じて測定器を切り替える実験を行った。

$\langle S \rangle = 2.73$ を得た。



ジョン・ベル (1928-1990)

北アイルランド、ベルファスト出身。CERNの加速器設計部門在職中に亡くなった。



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. 实在論が間違っている
3. 实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. 古典物理的言葉づかい・考え方・ロジックが間違っている

1. 局所性が誤り

- $\langle AU \rangle + \langle BU \rangle = \langle AU+BU \rangle$ といった式変形をする際に「同一の結合確率がある」ことを仮定していた。
- 数学的には、平均値 $\langle AU \rangle$ を求めるときの確率と平均値 $\langle BU \rangle$ 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、右の測定器の測定結果に影響すれば、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。**

2. 实在論が誤り

- 客観的・实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。
- 「**実際はBを測ってAを測らなかったけれども、Aを測ってBを測らなかったとしても、Uの出方は同じであったろう**」という論法が誤り。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いわけではない。

力学の構文

Aという系(system)が

Bという状態(state)にあるとき

Cという物理量(observable)が

Dという値(value)を持つ。

B, CがEという運動・変換則(dynamics, transformation law)に従う。

古典力学の文

系……………質量144グラムのボールが
状態………時速120キロメートルで飛んでいるとき
物理量……運動エネルギーは
値……………80ジュール。

量子力学の文

状態……ナトリウムランプから出た

系……………光子の

物理量…エネルギーは

値……………2.1エレクトロンボルト（波長589nm）。

熱力学の文

系……………1モルの気体は

状態………20°C, 1気圧の状態

物理量…体積は

値……………24リットル。

変化の法則…100ジュールの仕事がこの気体にすれば
(二原子分子気体の定圧変化なら) 温度は3.4°C上がる。

いま問題にしているのは値の実在性

ただいまの議論では、光子や電子（系そのもの）の実在性を疑っているわけではない。

「偏光の値」、「スピンの値」といった「物理量の値」の実在性を問題にしている。

$v(A) = +1, v(U) = -1$ といった値を指定しなくても抽象的な物理量の和 $A + B$ や積 AU の演算は定められる。それが物理量代数(observable algebra)。

量子論では物理量の積 $BA \neq AB$ が非可換。

3. 実在の確率が誤り

- 結合確率(joint probability) $P(a, b, u, v)$ ($a, b, u, v = \pm 1$)

- 周辺確率(marginal probability)

$$P(a, u) = \sum_{b, v}^{\pm 1} P(a, b, u, v) , P(b, v) = \sum_{a, u}^{\pm 1} P(a, b, u, v) \text{ など}$$

- 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**

$$P(1, 1, -1, -1) = -0.0884$$

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。

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

念のため定理

- 確率 $P(\lambda)$; 非負性 $P(\lambda) \geq 0$; 規格化条件 $\sum_{\lambda} P(\lambda) = 1$
- 関数 $S(\lambda)$ は有界だとする :

$$S_{\min} \leq S(\lambda) \leq S_{\max}$$

$A \leq B$ かつ $C \geq 0$ ならば、 $AC \leq BC$ なので、

$$S_{\min}P(\lambda) \leq S(\lambda)P(\lambda) \leq S_{\max}P(\lambda)$$

$$\sum_{\lambda} S_{\min}P(\lambda) \leq \sum_{\lambda} S(\lambda)P(\lambda) \leq \sum_{\lambda} S_{\max}P(\lambda)$$

$$S_{\min} \leq \langle S \rangle \leq S_{\max}$$

対偶として、もしこの不等式が成り立たないならば、確率の非負性か規格化条件のどちらかが成り立っていない。

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き、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。
- **本当は局所实在論が正しく、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。
- 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. 量子論でいいじゃないか

- 量子論は「計算すればこうなる」「観測すればこうなる」ということを教えてくれる。それでいいじゃん。
- 観測していないときの物理系のありようは、演算子と状態ベクトルで記述できているが（経路積分でもいい）、そのような数学的形式が「現実の姿」だと思ふ必要はない（そう思ってもよいが、量子論以外の描像は思わないほうがよい）。
- **「文脈依存的な実在」とか「相補性」とか「不確定性」とか**いった言葉や概念をこしらえてもよいが、結局、ミドルサイズの人間が納得しやすい概念におとしこもうとしているだけ。
「実在」という観念がはじめから古典物理的。

谷村の考え 1/4

- 局所性は放棄しないほうがよい。経験的には正しいし、数学的定式化も整っている。
- 实在論は放棄しやすい。もともと「見ていないときも、ものは見たときのままにある」という信念は経験的方法で検証できない。
- ただし、ベルは（意外にも）局所性を放棄して、实在論を擁護するつもりだったらしい。
- **实在論の修正を重ねるよりも、量子論が自然物のありのままの姿に肉薄していると考えたほうがよい。**

谷村の考え 2/4

- 波束の収縮問題：重ね合わせ不確定状態から観測結果の確定状態への飛躍はいかにして起こるか？という問題。
- 観測問題、とくに、波束の収縮問題の根っこには、「観測者は意識を持った人間でなくてはならない」という思い込みがある。
- そういう扱いでは、人間不在の場面では物理現象が確定しないことになってしまう。
- **「量子系 vs.観測者」という二項対立ではなく、「量子系 vs.古典系」という対比で捉えるべき。**

谷村の考え 3/4

- 「物理が邪魔に思える問題」や「物理では解決できないだろうと思える問題」は、多くの場合、人間が物理的システムでありかつ動物であることを忘れて（あるいは故意に無視して）、人間を特別なものと思い、物理と人間を対立するものと捉えるところから生じていると思う。「天動説」の変種。
- 例) 自由意志と決定論、クオリアと物理主義
- そういう問題の立て方は、みのりなさそうに思える。
- ドーキンスは遺伝子の立場から生き物を見た。
- アンダーソンは電子の立場から古典的物体を見た。

谷村の考え 4/4

- 論理法則はアプリアリに正しい法則か？ それとも自然法則の一部か？ 絶対的真か近似的経験則か便宜的ルールか？ ということはまじめに考える価値があると思う。

- 例) 量子論理では分配律

$$(A \vee B) \wedge C = (A \wedge C) \vee (B \wedge C)$$

は成り立たない。

- 人間言語や人間の推論規則はローカルなものと思ったほうがよいと思う。宇宙の全歴史や、ミクロ・マクロのすべてのスケールで（古典）論理法則が通用するかどうかは疑ったほうがよいと思う。

今年のノーベル物理学賞について

- 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
- ものすごく「役に立たなさそう」な研究。いちおう「量子情報科学の先駆的研究」という断り書きも付けられているが、どう見ても、**好奇心駆動型**の研究。
- **こんなにも宇宙の摂理がわかったなんて素晴らしいじゃないか！**
- 素人が「それが何の役に立つの？」と尋ねるのは当たり前。
- **研究者は「使い道」を思いつかなくてはいけない。**
- いにしえのアイデア・発見がどこで役に立つかわかったもんじゃない（真空放電→真空管・ブラウン管・X線管）（原子のエネルギー準位構造→ネオン灯・蛍光灯・半導体）（黒体輻射→光の誘導放射→レーザー）（偏光→液晶ディスプレイ）
- **アイデアをオープンにしていることが大事。**

それは私たちの身に起きていていることだ

- 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
- ともかく、この世は局所实在論的ではないということははっきりした。
- しかもそれは我々とは無縁な話ではない。
- **見ていないときは見たときのままの姿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。**

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.