

2022年ノーベル賞からみる最新研究講演会
名古屋市科学館
2022年11月13日
<https://aichi-science.jp/event/detail.html?id=2861>

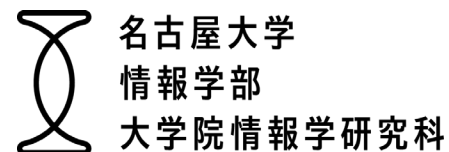


量子もつれとは何か、 なぜそれがノーベル賞級の発見なのか

谷村 省吾

名古屋大学大学院 情報学研究科 教授

twitter @tani6s



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科卒業
- 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、科学館に写真が飾ってあると思います）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）

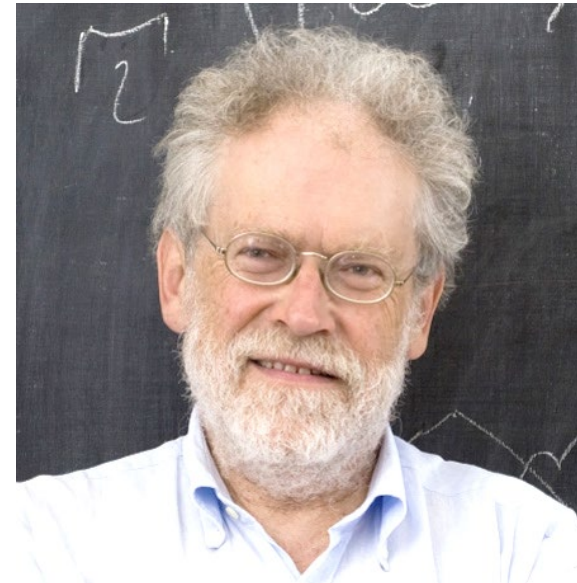
<https://www.johnclausner.com/>

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/>

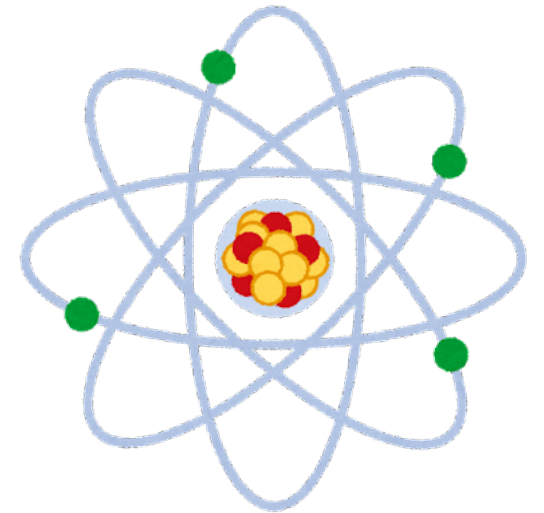
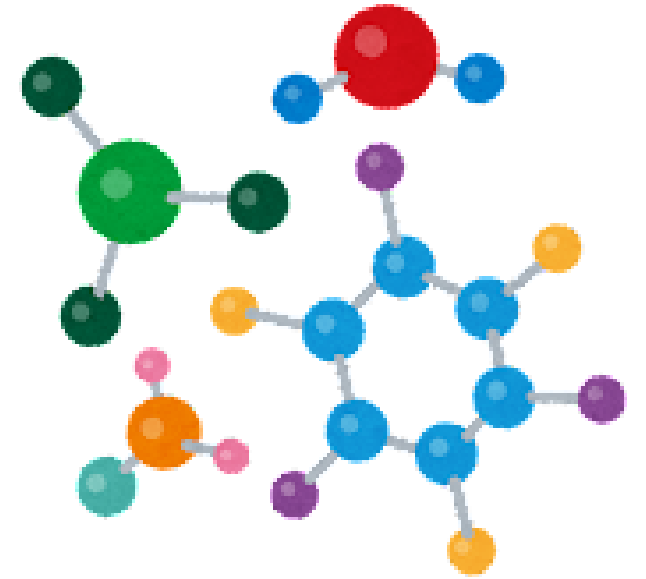


量子論って何？

- ミクロの世界の物理法則をまとめた理論
- 英語では Quantum theory
- 量子力学 Quantum mechanics ともいう。

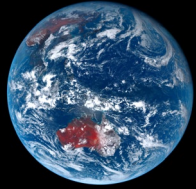
ミクロの世界って？

- 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





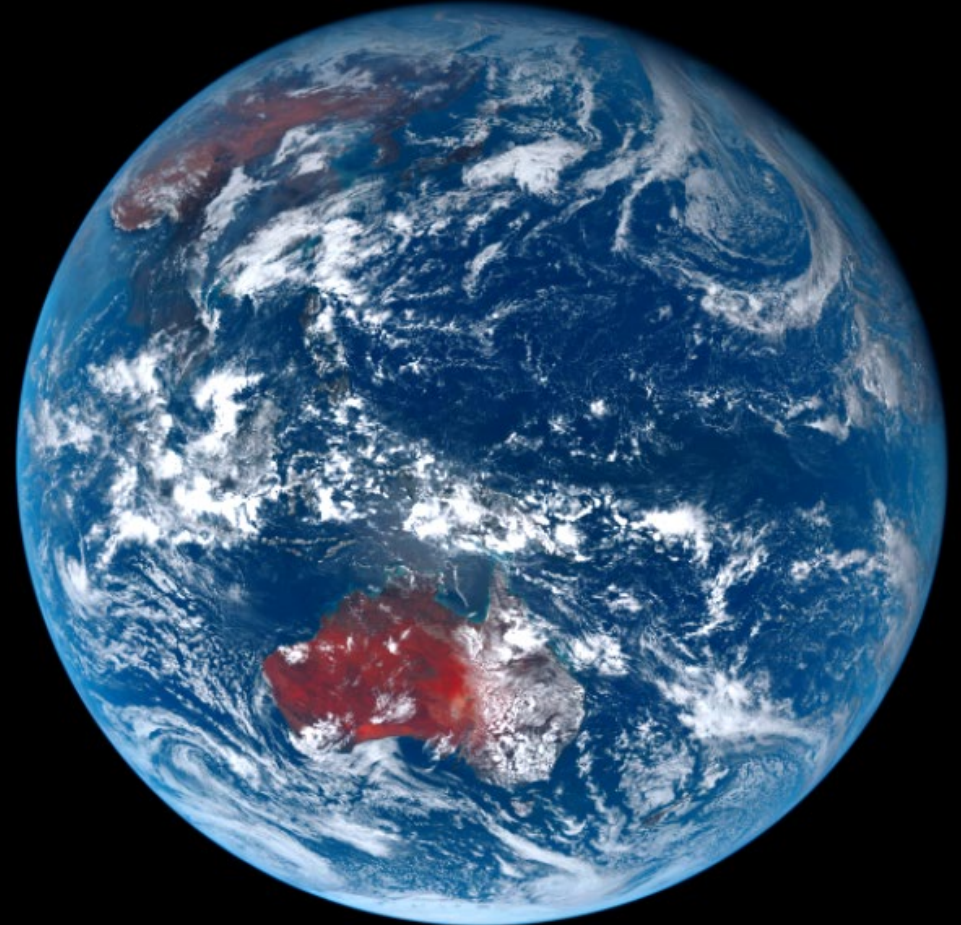
直径13cmの地球儀



1 億倍



直径1万3千kmの地球



原子



1 億倍



直径1cmの玉

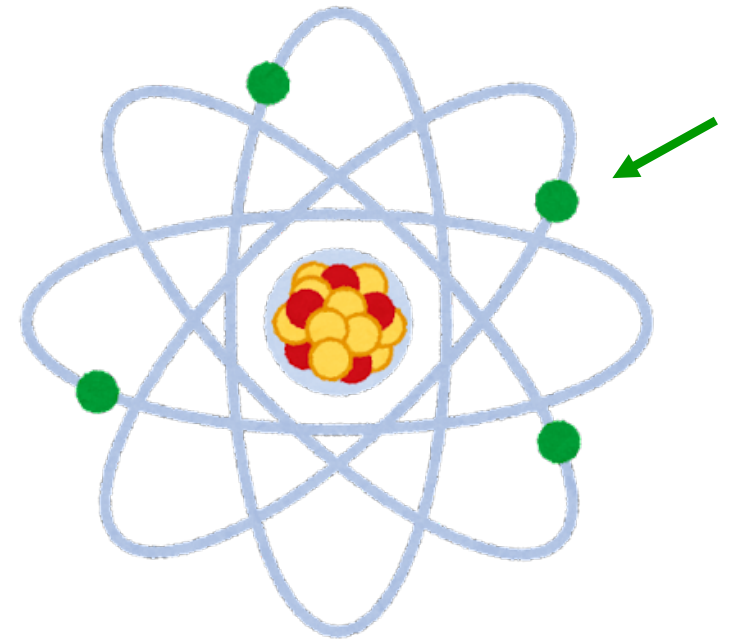


どうして量子論が必要なの？

- ボールや車などマクロのものの運動をつかさどる物理法則は知られていた：ニュートンの力学
- 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がわかり、1900～1926年頃にかけて作られた。
- アインシュタインも量子論の初期の立役者

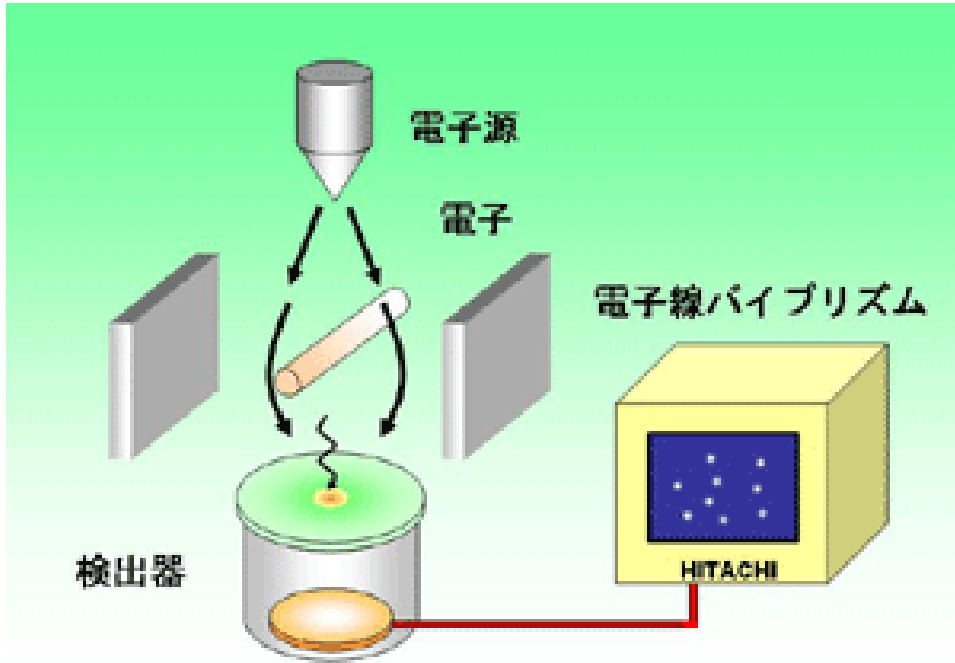
量子論らしさ

- 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

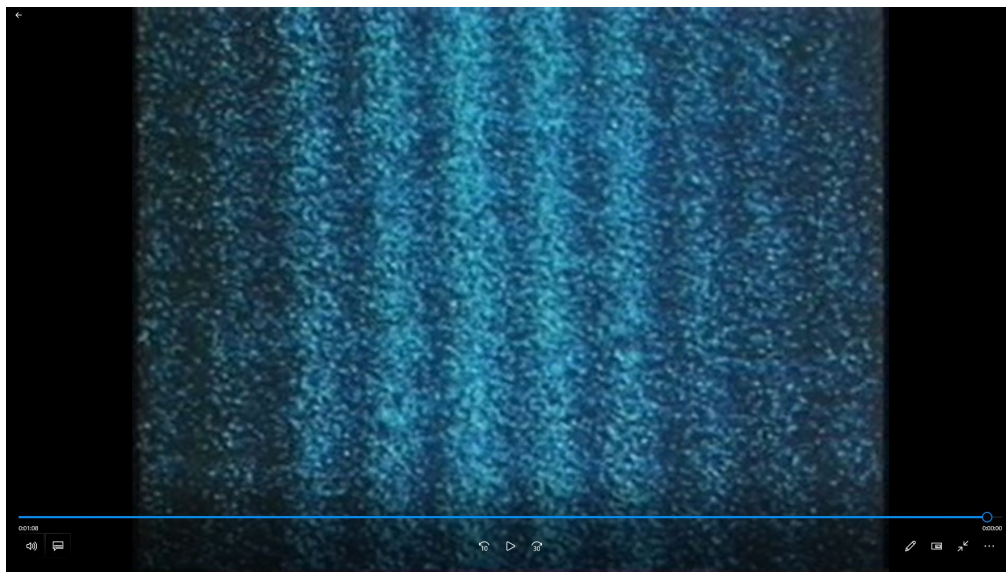
日立の電子線ホログラフィー（外村彰）



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

この実験のどこが不思議なの？

- 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

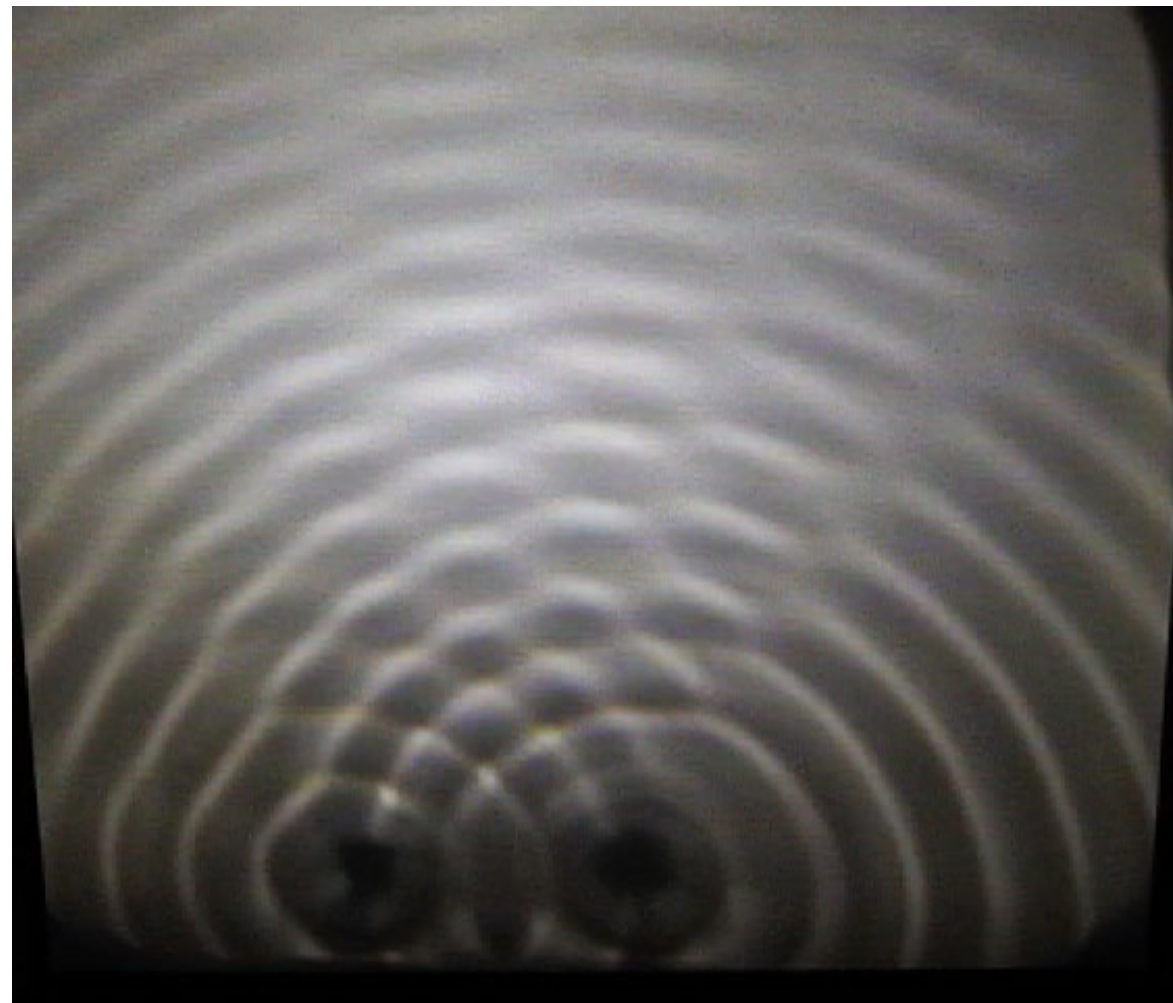


水面波の実験 (科学館理工館 4階でも見れます) <https://www.youtube.com/watch?v=luv6hY6zsd0&t=260s>



波動の干渉効果

- 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

- 電子は空間中の一箇所に閉じ込められず、**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箇所窓も通っ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3人が一緒に発表した論文
- **「客観的に実在する」と考えざるをえないものを量子論は書きあらわしていない。**
- だから量子論は不完全だ、とEPRは主張した。

EPRに対する反響

- 「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

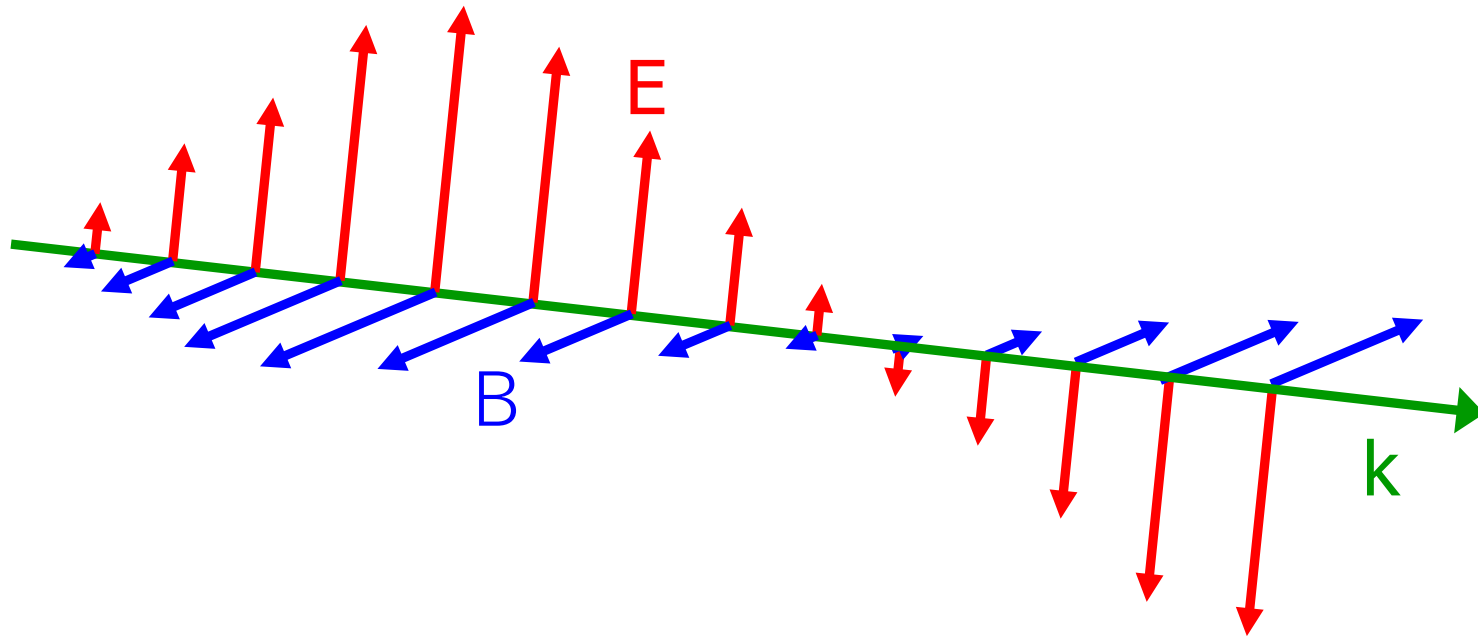


90°回して重ねるとほとんど光を通さない

(科学館 理工館 4 階に偏光の実験コーナーがあります)

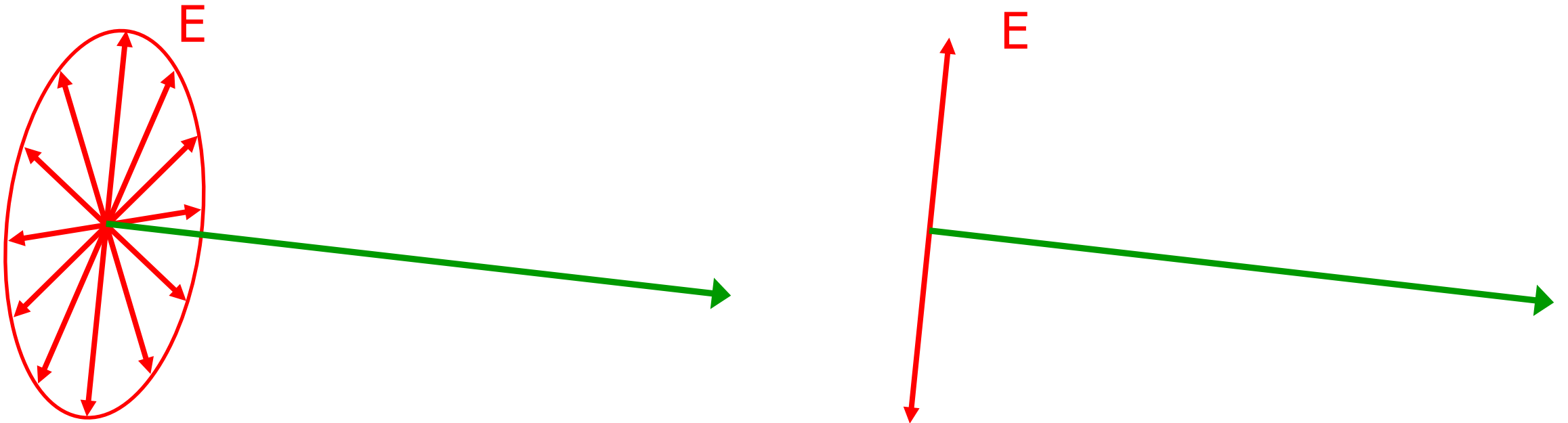
これをどう解釈するか？

- 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



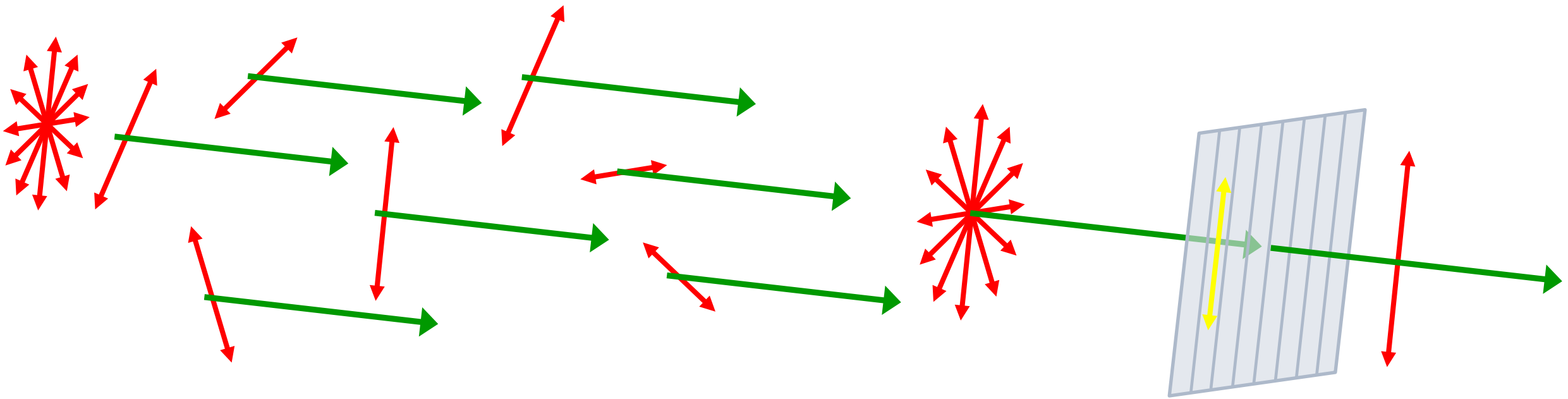
これをどう解釈するか？

- 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



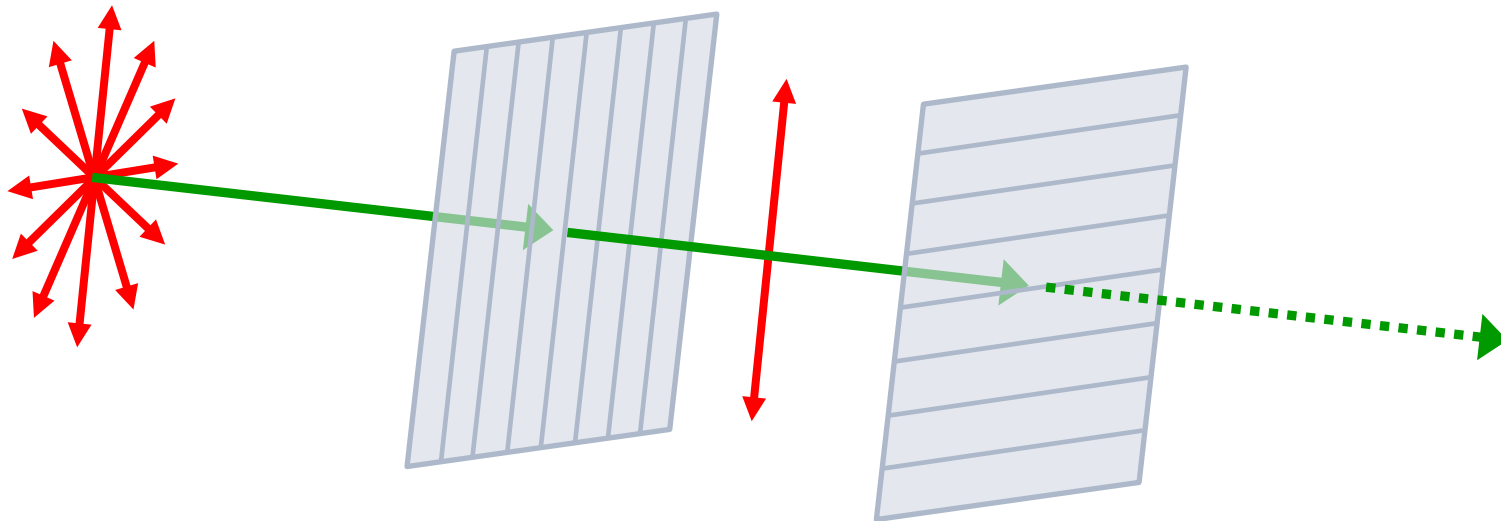
これをどう解釈するか？

- 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

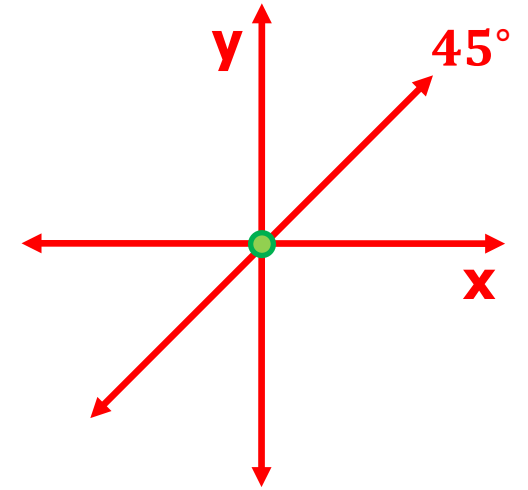


3枚重なっているところが光が通る！
2枚重ねよりも3枚重ねのほうが通りやすい
(光が通る確率が高い)

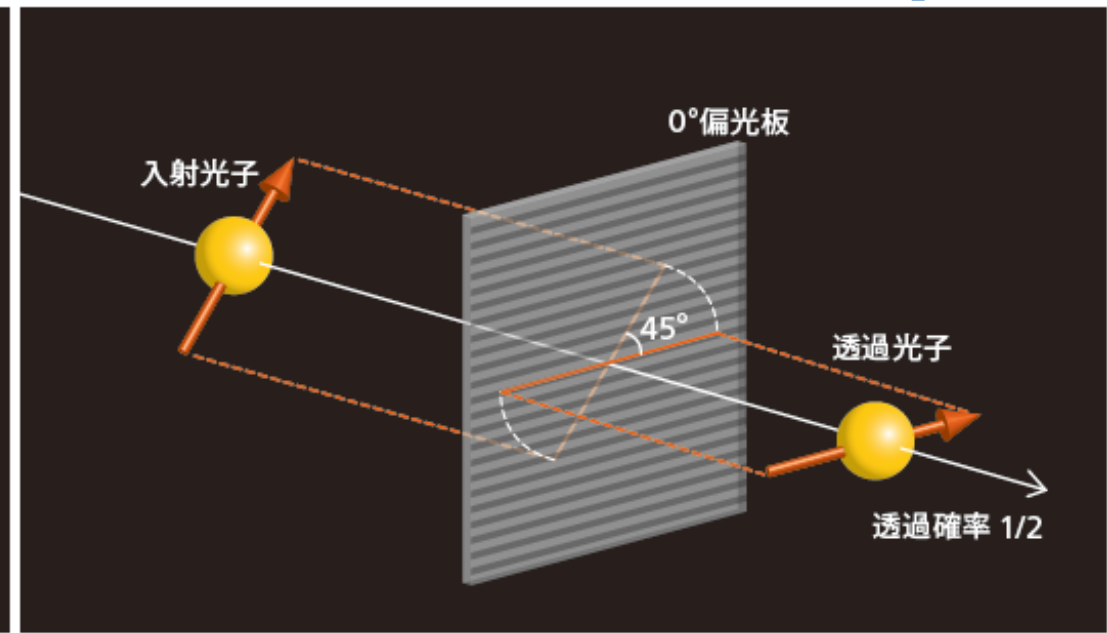
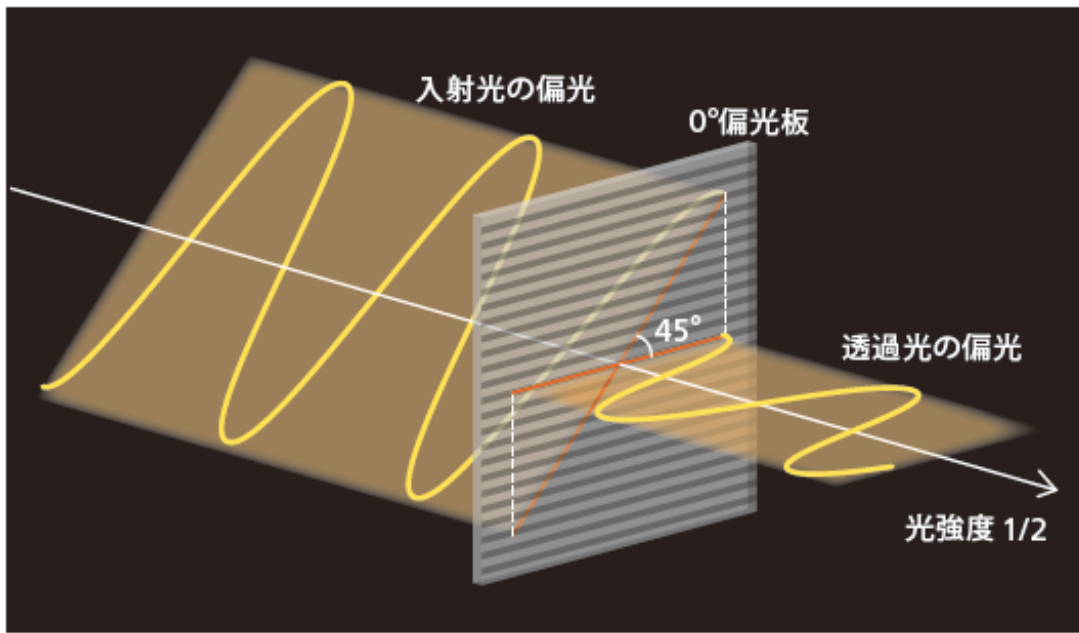


これを量子力学はどう説明するか？

- 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°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

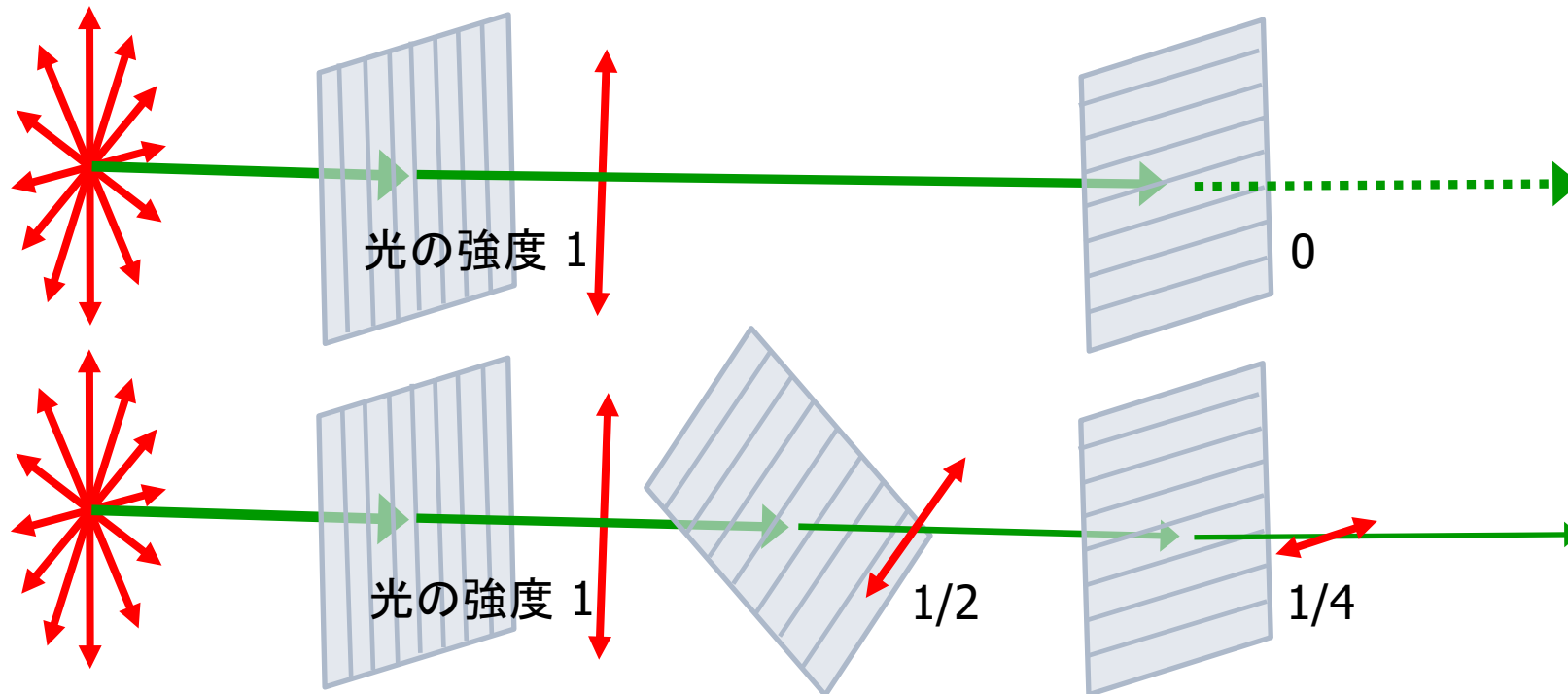


日経サイエンス『光子の逆説』谷村省吾



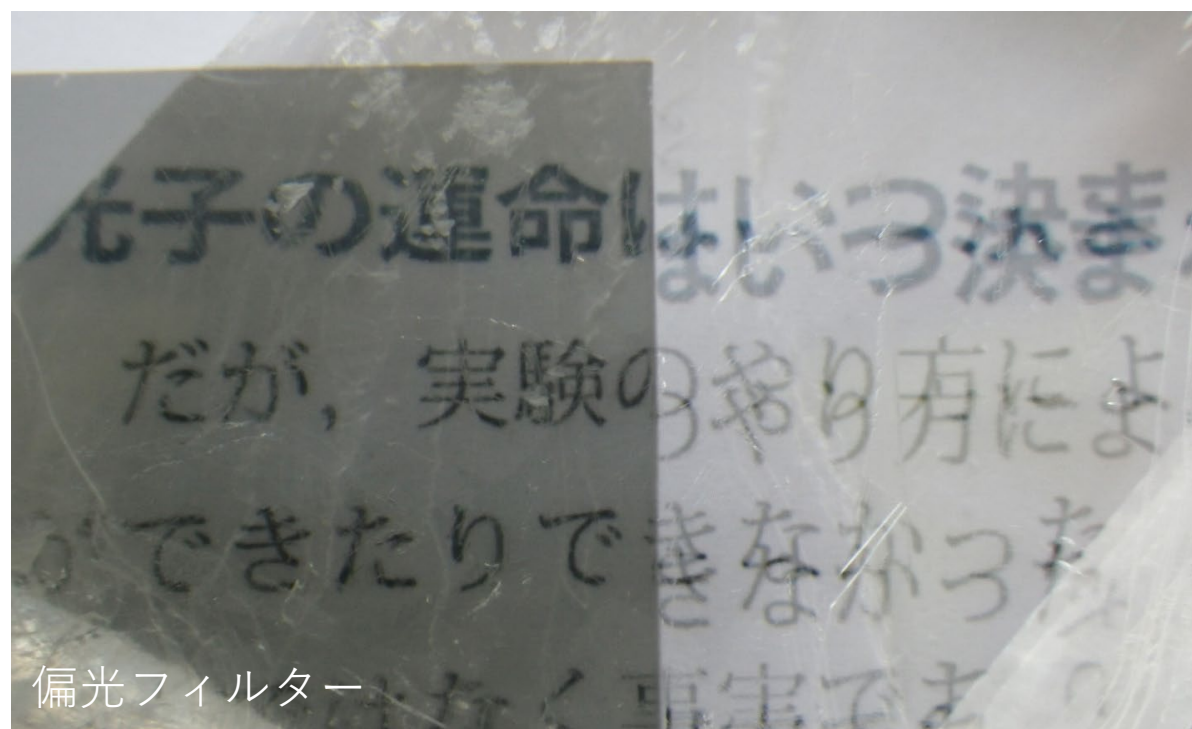
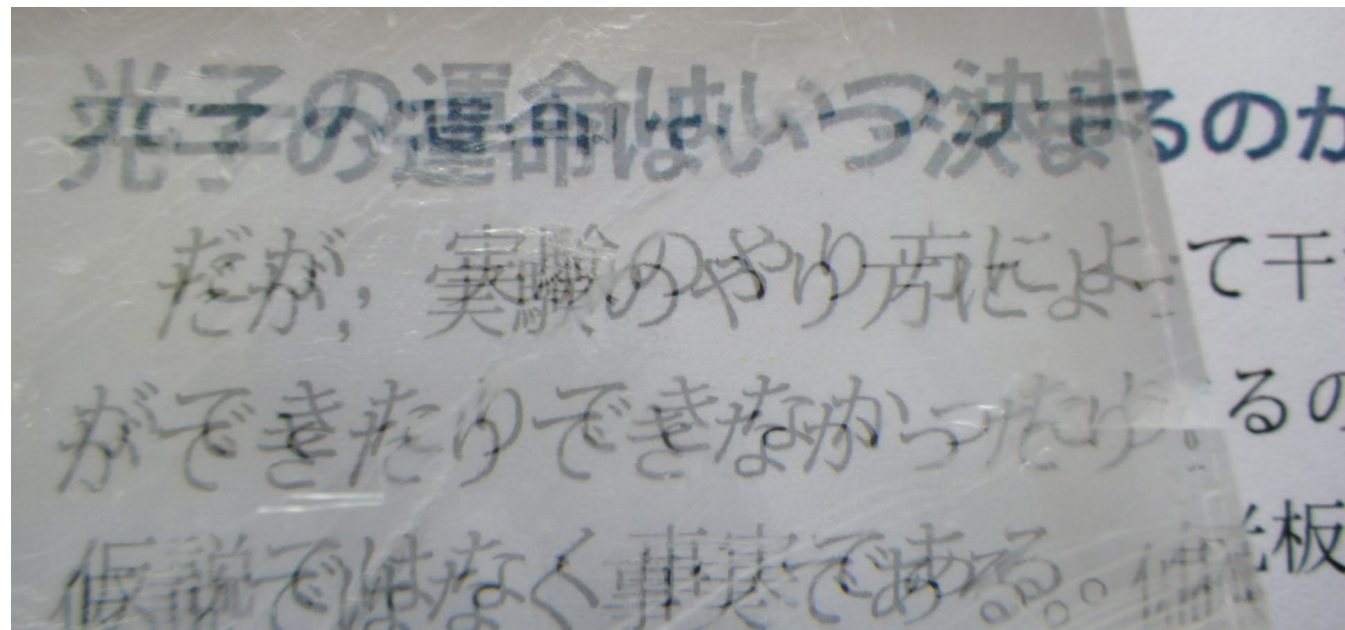
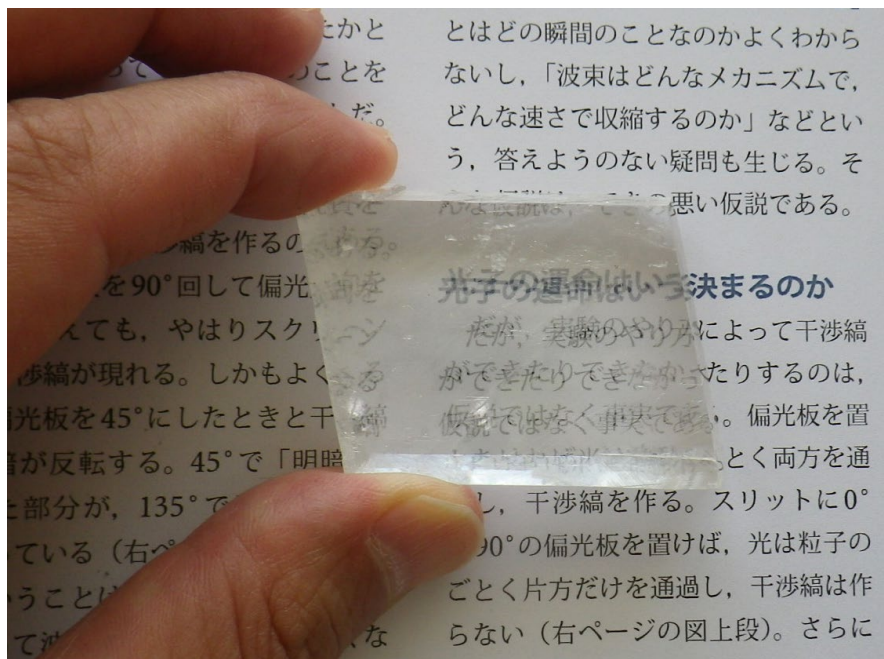
これを量子力学はどう説明するか？

- 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。

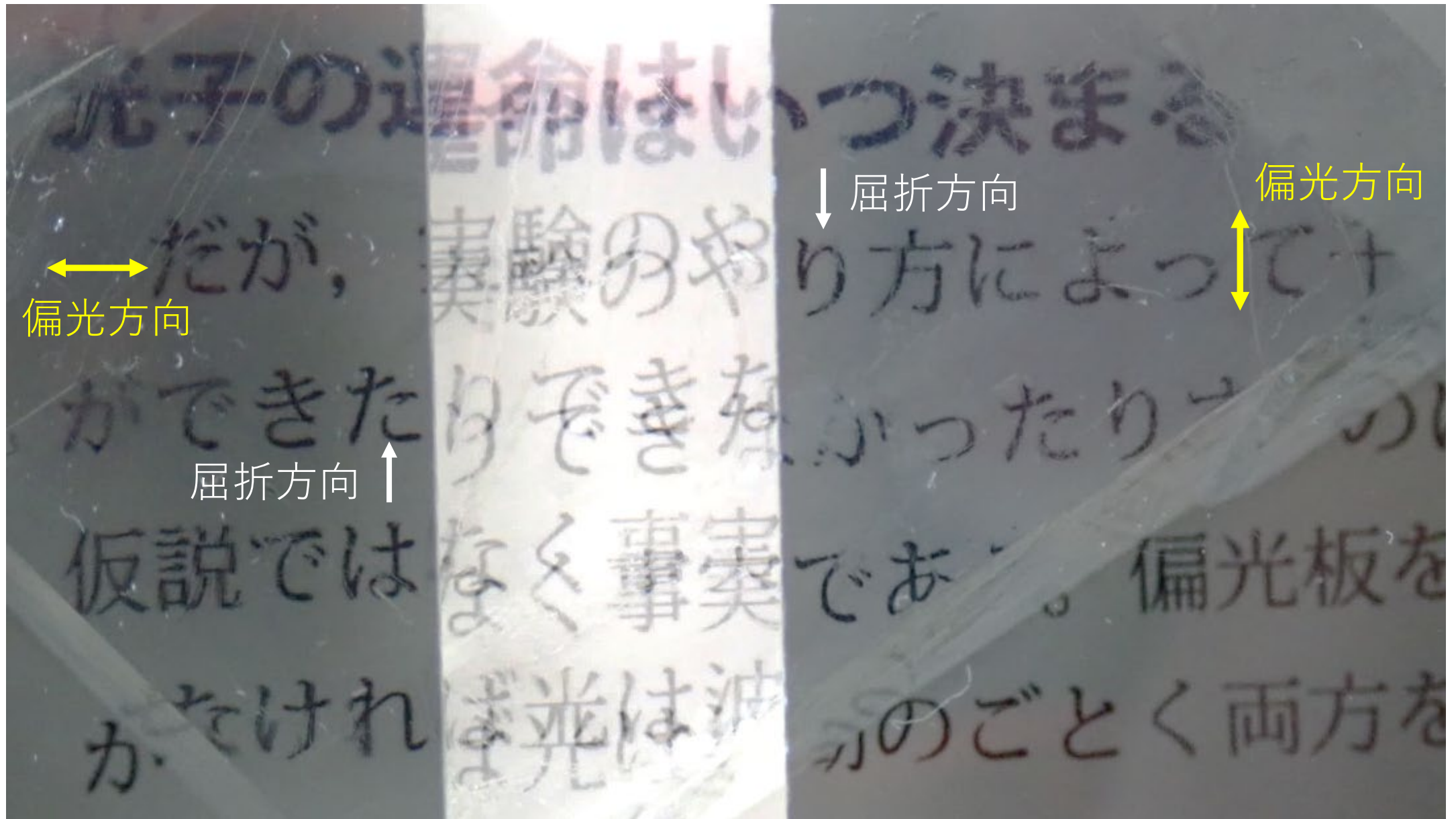


複屈折

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。



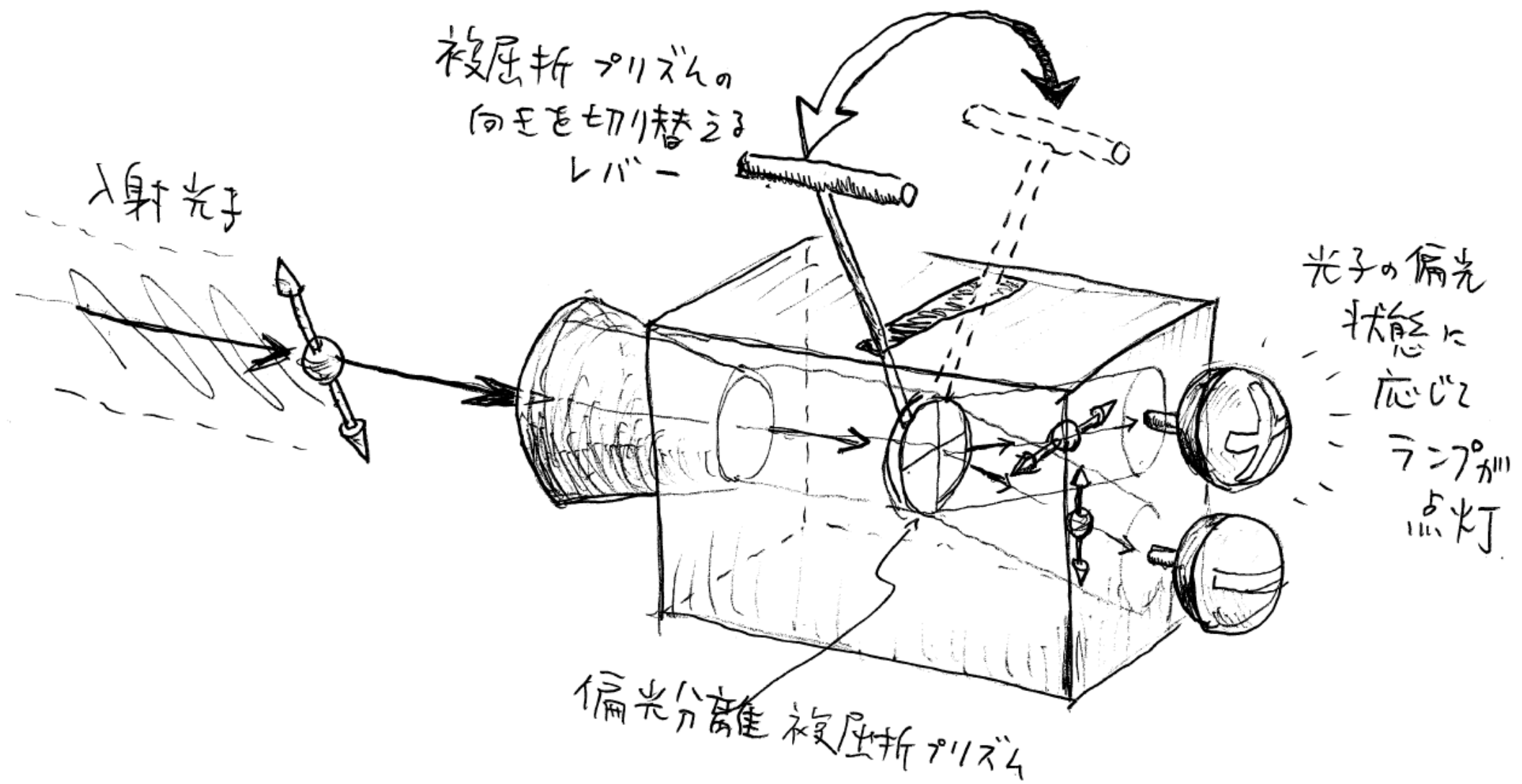
複屈折は偏光を分離している



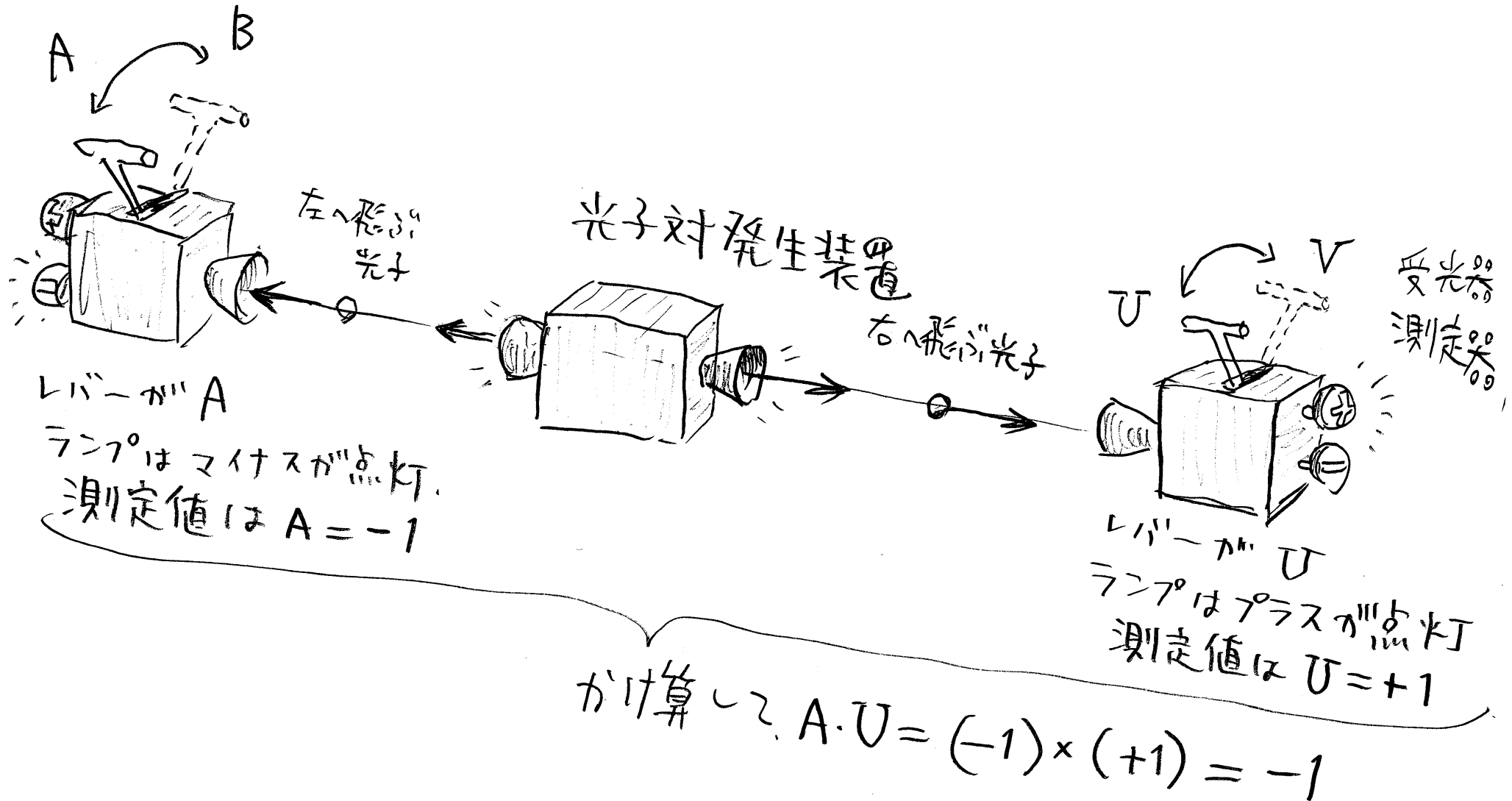
準備完了

- 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。
- 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



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。

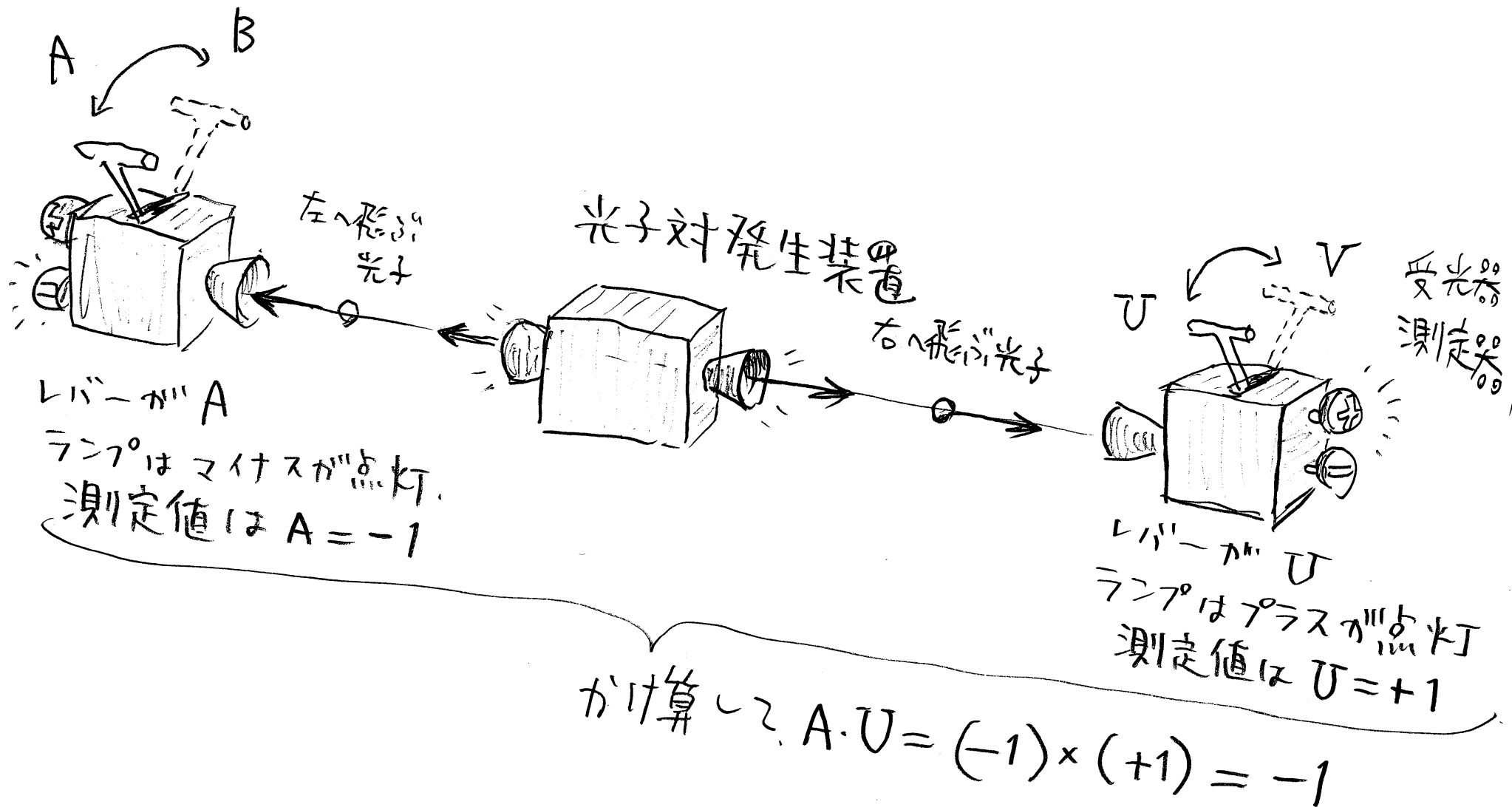
測定値の定義

- 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。

わかりましたか？



測定データの最終処理

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

を求める。

局所实在論によれば、

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

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

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

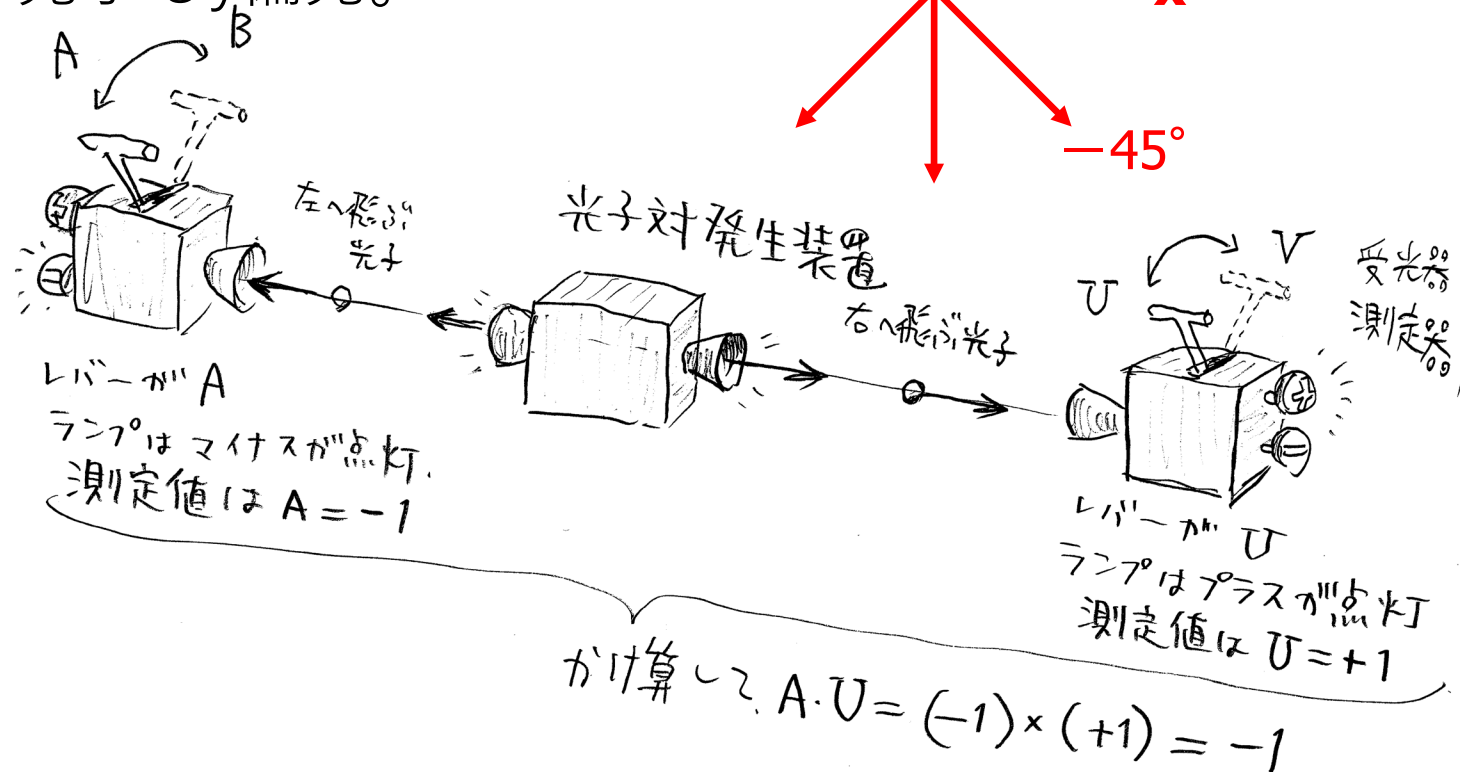
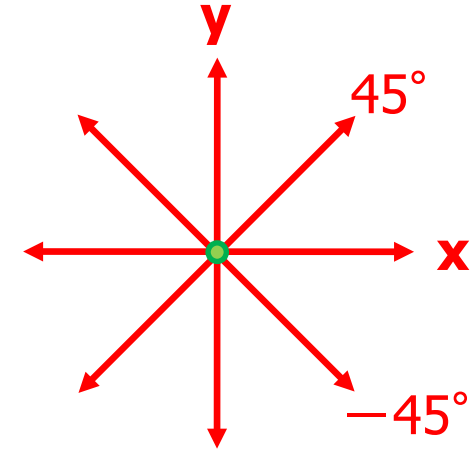
$$-2.828 = -2\sqrt{2} \leq \langle S \rangle \leq +2\sqrt{2} = 2.828 \quad (\text{量子論})$$

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)

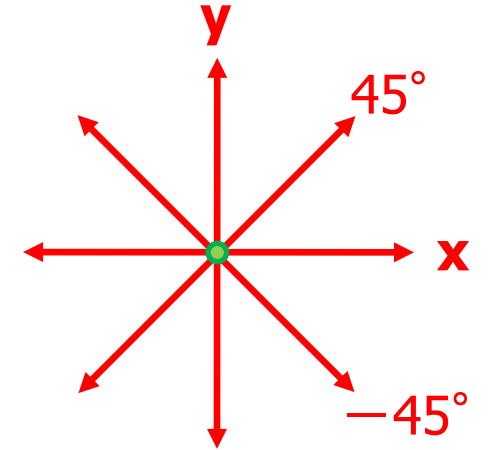
- 光子ペアの光子を片方ずつ見る限り、x偏光だったり、y偏光だったり、ランダムに見える。
- 左の光子がx偏光のときは、右の光子もx偏光。
- 左の光子がy偏光のときは、右の光子もy偏光。
- 左の光子が45°偏光のときは、右の光子も45°偏光。
- 左の光子が-45°偏光のときは、右の光子も-45°偏光。
- 左の光子が-45°偏光のときは、右の光子も-45°偏光。
- でも45°偏光は半々の確率でx偏光になったり、y偏光になったりする。



量子もつれ

数式で書くと、これが量子もつれ状態：

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



斜め偏光状態：

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

を代入すると、

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|45^\circ\rangle|45^\circ\rangle + |-45^\circ\rangle|-45^\circ\rangle)$$

量子もつれはCHSHの不等式を破る

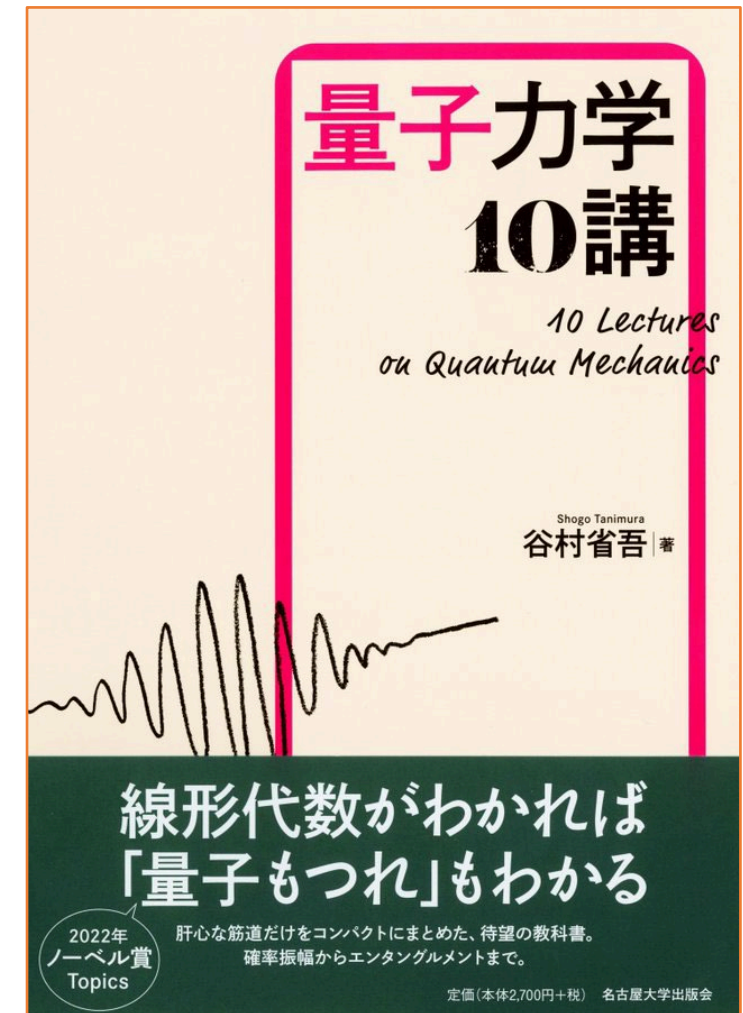
量子力学に従って計算すると、

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

この計算・理屈は難しいので（と言っても、高校数学に毛の生えたような程度の計算なのですが・・・）、省略。

私の本『量子力学10講』⇒
をぜひ読んでください。

<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、

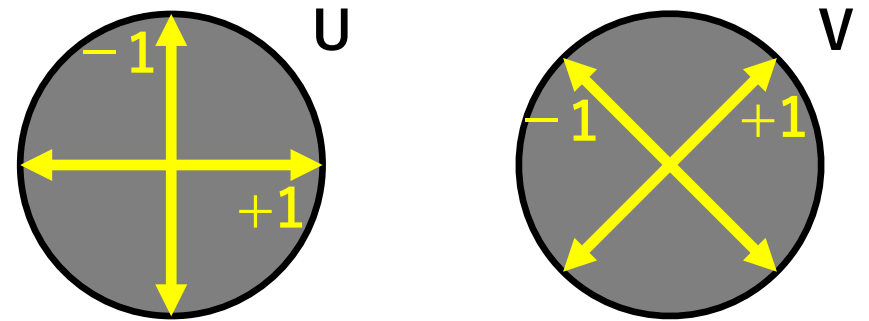
U+Vの値は ± 2 または 0.

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！

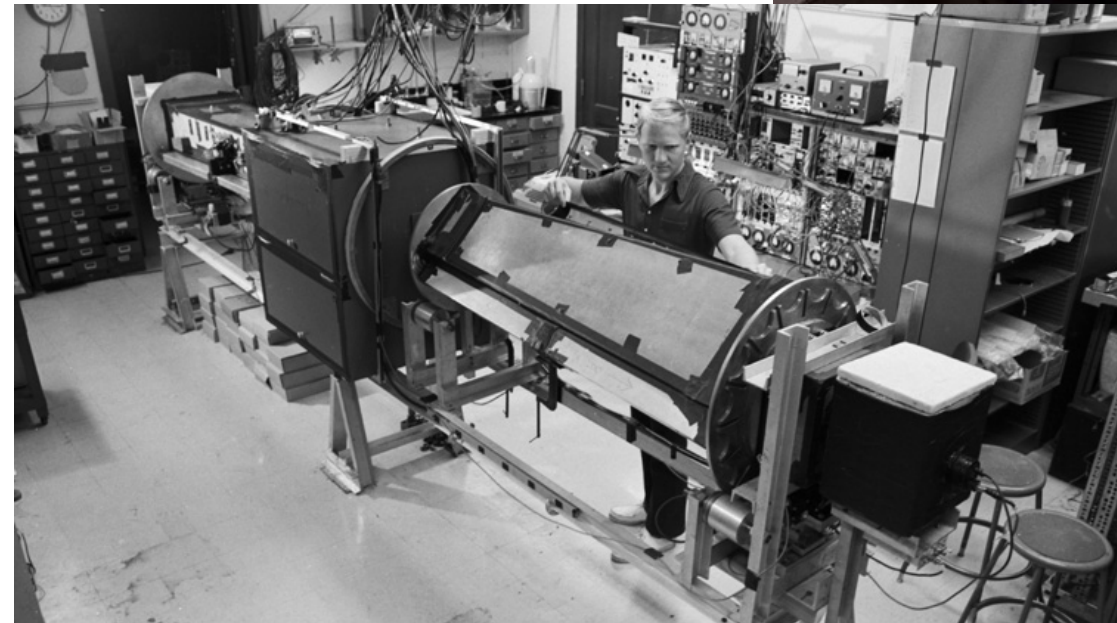
Uを測っているときはVは測れないのに、UとVの両方の値が実在していると仮定したことが誤り。



ジョン・クラウザーの実験（1972年）

大学院を卒業してすぐに、量子もつれ光子ペアを作る実験をや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実験を行った。

〈S〉とは少し異なる数量を測定して、CHSH的な不等式の破れを実証した。



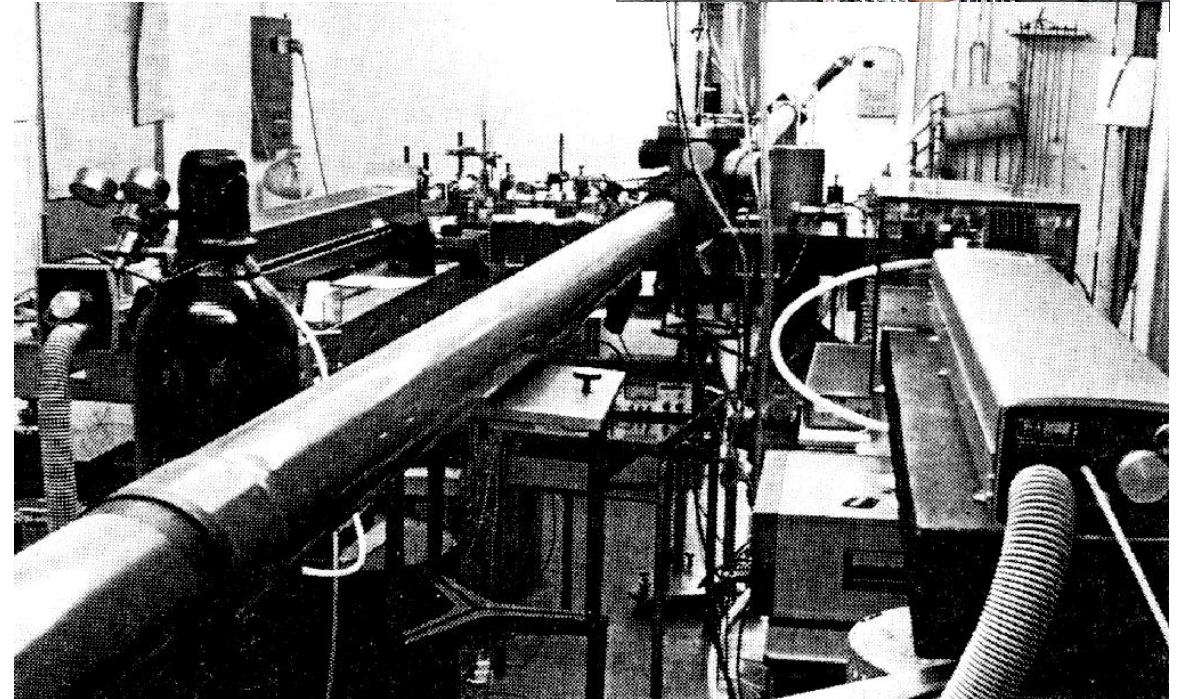
<https://www.johnclausser.com/>

<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。

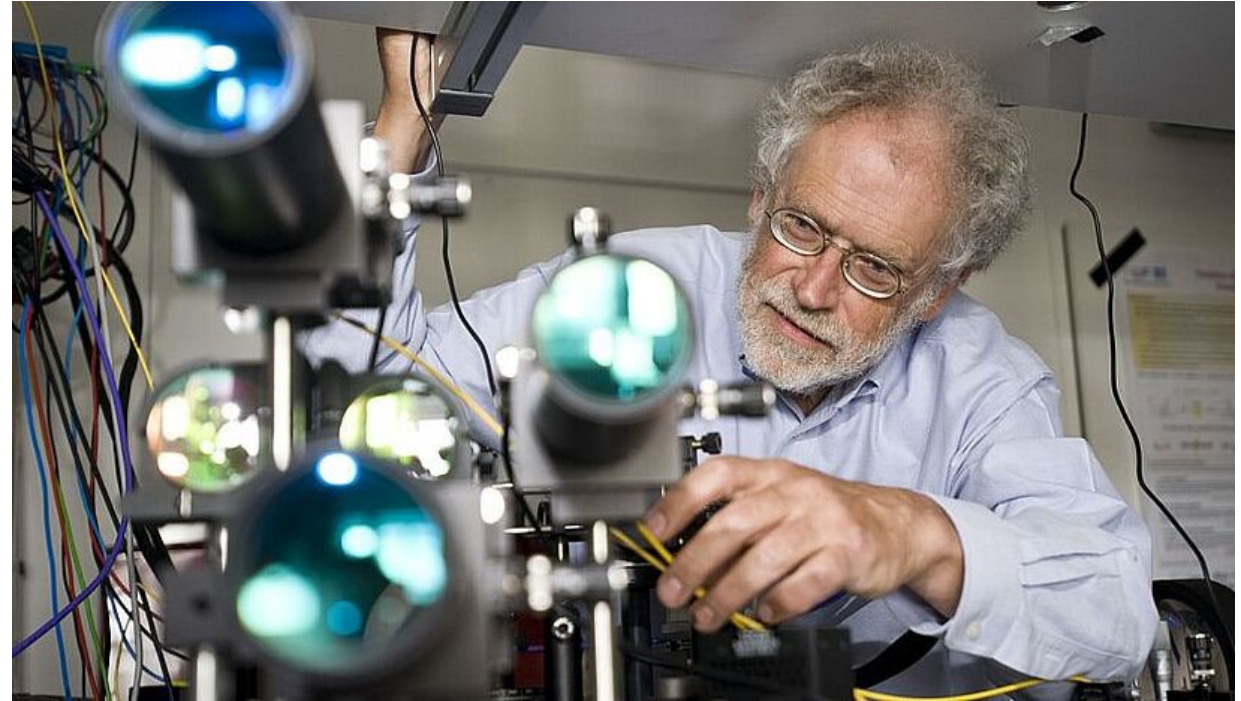
この研究でアスぺは博士学位を取った。



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。

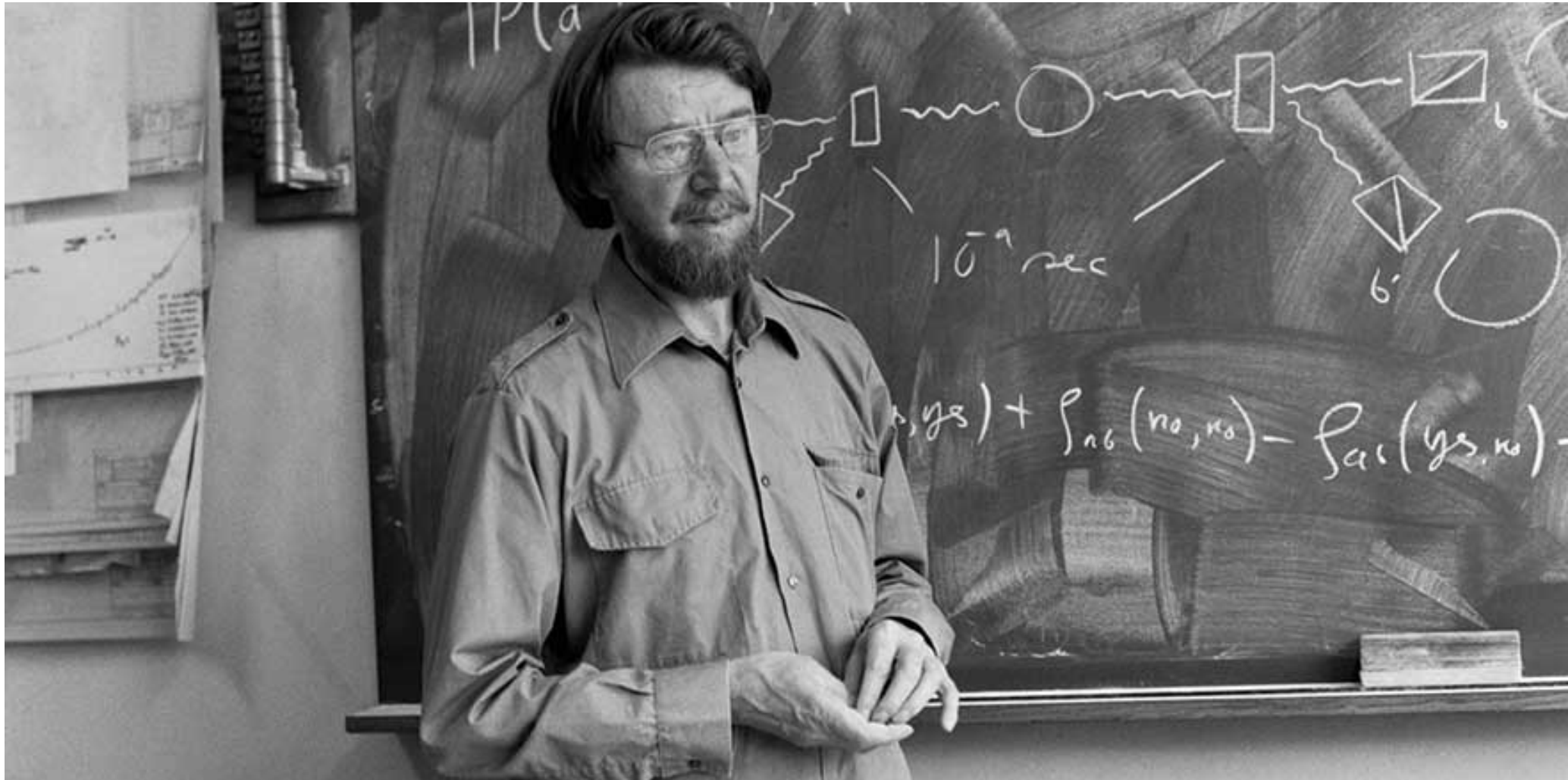


教訓：科学の研究は伝言ゲーム・リレーだ

- 1935年にアインシュタインが量子論は不完全だとクレームを付けて、CHSHの不等式の破れの完璧な実証実験が行われたのは2015年、ノーベル賞は2022年。
- その間、一部の人たちが、量子論に対する反論と擁護の論争と実験の改良を重ねていた。
- **時代を超え、国を超えて、前の人アイデアに少しずつ修正や追加の手を加えていった。**
- **最後のゴールを決めた人だけがヒーローではない。**

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。



発明・発見の使い道はわからない

- トーマス・エジソンが蓄音機を発明したとき、エジソンが挙げた蓄音機の使い道は、遺言の録音・盲人用の本の朗読・時報・英語の教材などだった。
- 音楽の録音／再生には重きはおかれていなかった。
- エジソン自身、「蓄音機には商品価値がない」と、ぼやいたことがある。 <https://www.kidcyber.com.au/thomas-alva-edison>
- 蓄音機をジュークボックスに作りかえて売り出す人が現れると、「私の発明の品位を汚している」と文句を言った。 ジャレド・ダイヤモンド『銃・病原菌・鉄』より



未来に向かって

- 量子もつれ状態を、暗号通信や量子コンピュータに使おうというアイデアがある。しかもかなり実用に近づきつつある。
- アインシュタインも自分が言い出した問題がそんなことに使われるとは思っていなかっただろう。
- この他にも、原子が光を出す確率（誘導放射）についてアインシュタインが考えたことが、レーザーの原理になっている。DVD, 光ファイバー、測量、時計などに利用。
- **世の中、何がどこで役に立つかわからない。**

本当に重要だと思う問題を見つけて徹底的に研究する、
面白いことを見つけたら使い道を考えて実行する、
そういうことをやった人が世の中を変えていっていると思います。
私も挑戦していききたいと思います。
ご清聴ありがとうございました。