

上智大学 哲学・物理学・数学研究会
2023年5月13日（75分講演 + 15分質疑応答）

物理学とくに量子論における实在概念

Concept of Reality in Physics, particularly, in Quantum Physics

谷村 省吾

名古屋大学大学院 情報学研究科

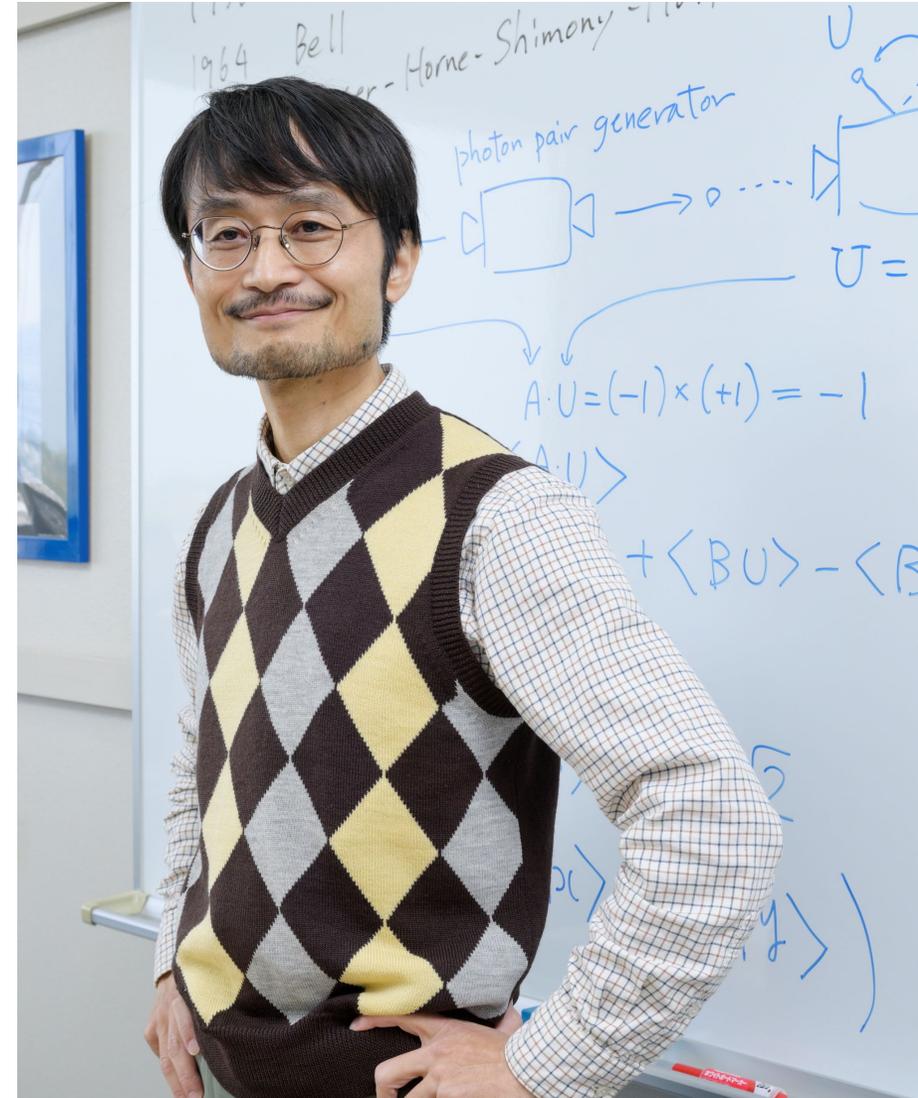
twitter @tani6s

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）

- 名古屋生まれ、名古屋育ち。
- 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）取得。
- 大学院はE研（素粒子論研究室）。2008年にノーベル物理学賞を受賞した小林誠氏と益川敏英氏は同じ研究室の大先輩。
- 職歴：東京大学・京都大学・大阪市立大学・京都大学、2011年から名古屋大学。
- 専門：量子基礎論・量子情報理論・圏論や微分幾何の応用・AIの研究



2022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

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）

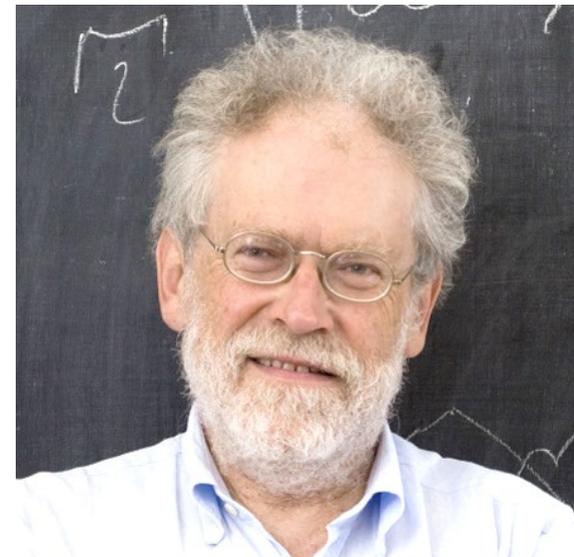
<https://www.johnclausser.com/>

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

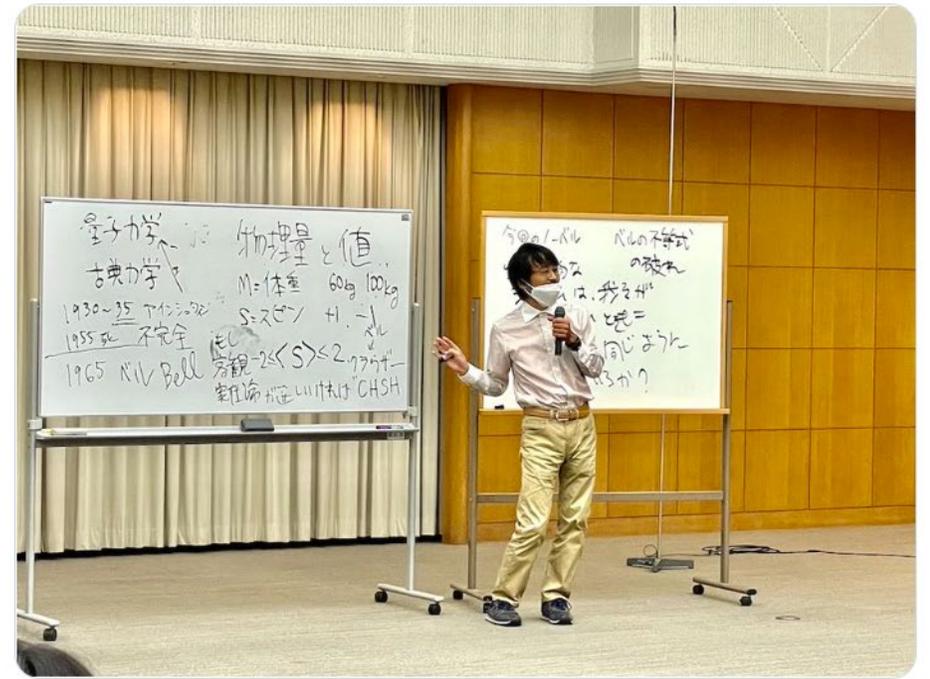
ツイートする

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

2022年10月4日、自分がノーベル賞をもらったわけでもないのに名大の記者会見会場でノーベル賞の解説をした

参考文献

1. アダム・ベッカー（吉田三知世 訳）『実在とは何か』筑摩書房、2021.
2. The Born-Einstein Letters (preface by K. Thorne) 2005.
3. Isobe and Tanimura, A method for systematic construction of Bell-like inequalities and a proposal of a new type of test, [PTEP 2010](#).
4. 谷村省吾「アインシュタインの夢 つ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](#)（[ウェブ補足あり](#)）

今日、解説・議論したいこと

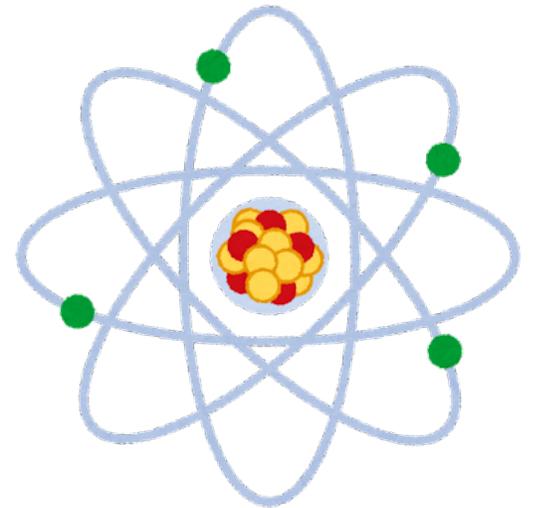
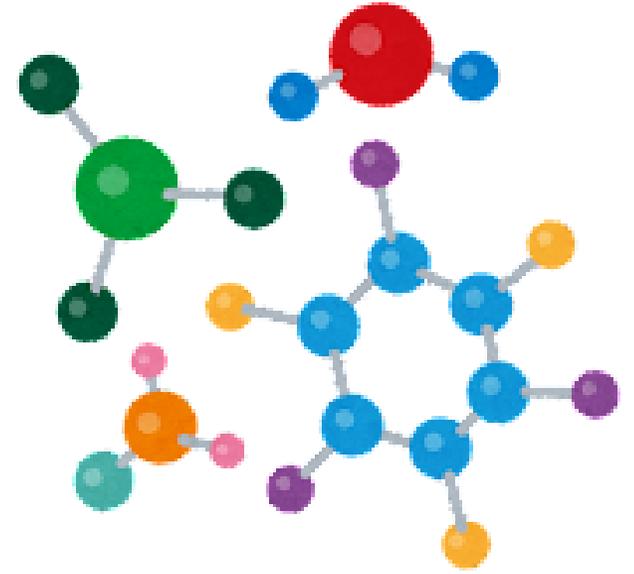
- 原子や電子は人間から乖離した存在ではない。私たちの体を含めてこの世界は「それでできている」ということを認めて話をしたい。
- 量子力学的であるとはいかなることか
- 物理理論の一字一句が実在と対応しているべきなのか
- 実在論はどういうものであるべきか

量子論・量子力学

- 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

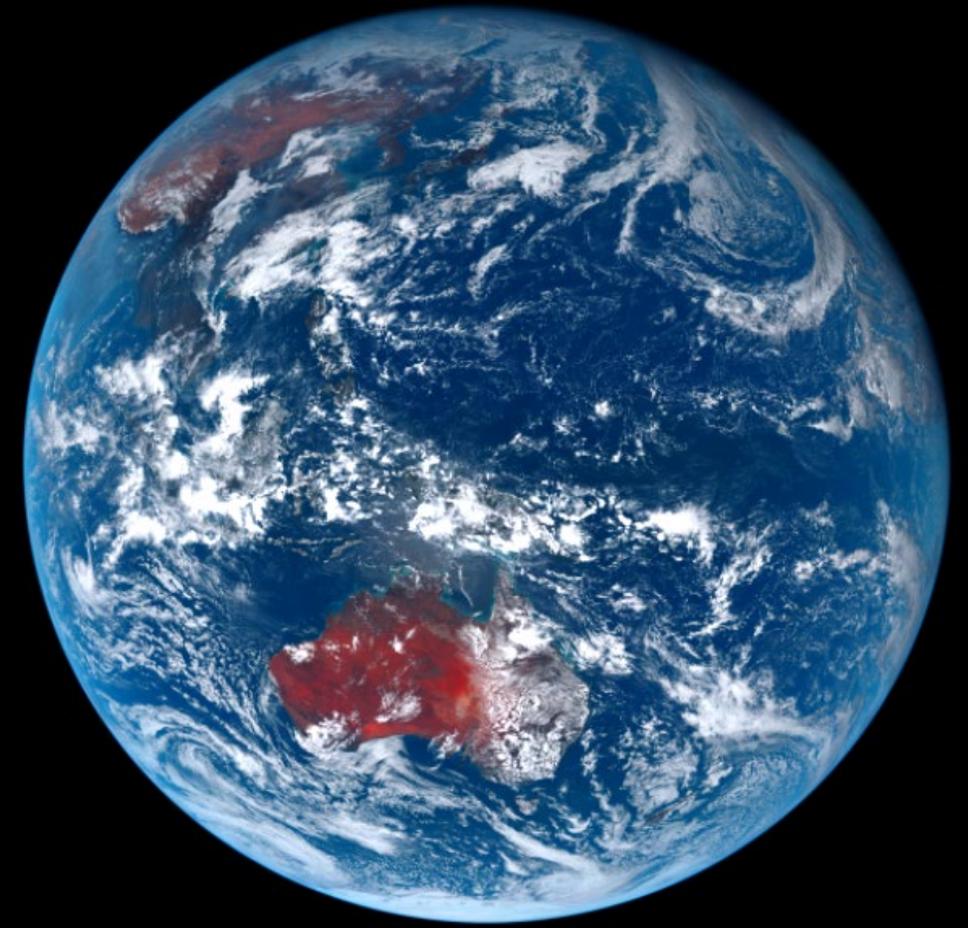
- 分子・原子・電子・原子核・光子・素粒子などの世界
- すべての物質の基本構成要素
- **原子の大きさ、およそ1億分の1cm**
- 見ているはずなのに見えていないことがわからない、指先に触れていることもわからない。



直径13cmの地球儀



直径1万3千kmの地球



1億倍



原子



1億倍



直径1cmの玉



4mm

1億倍

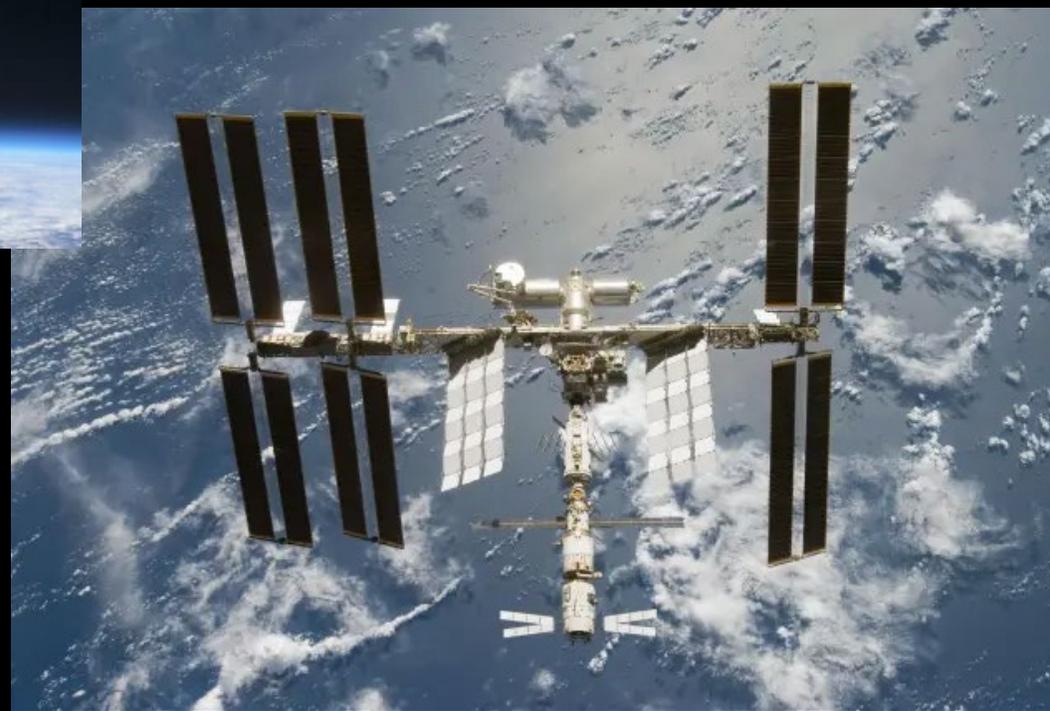


宇宙ステーションの高さ400km

国際宇宙ステーションは地表面から400km離れている。1億分の1にすると 4mm



<https://raag.org/iss-sstv-transmissions-21-26-june-certificate/>



<https://www.themarysue.com/congress-asks-nasa-about-russia/>

すべての物質は原子でできていることを 実感する方法はあるか？

- ものを小さく砕いて原子1個1個の大きさにすることは事実上不可能。
- 薄いものなら作れる：シャボン玉

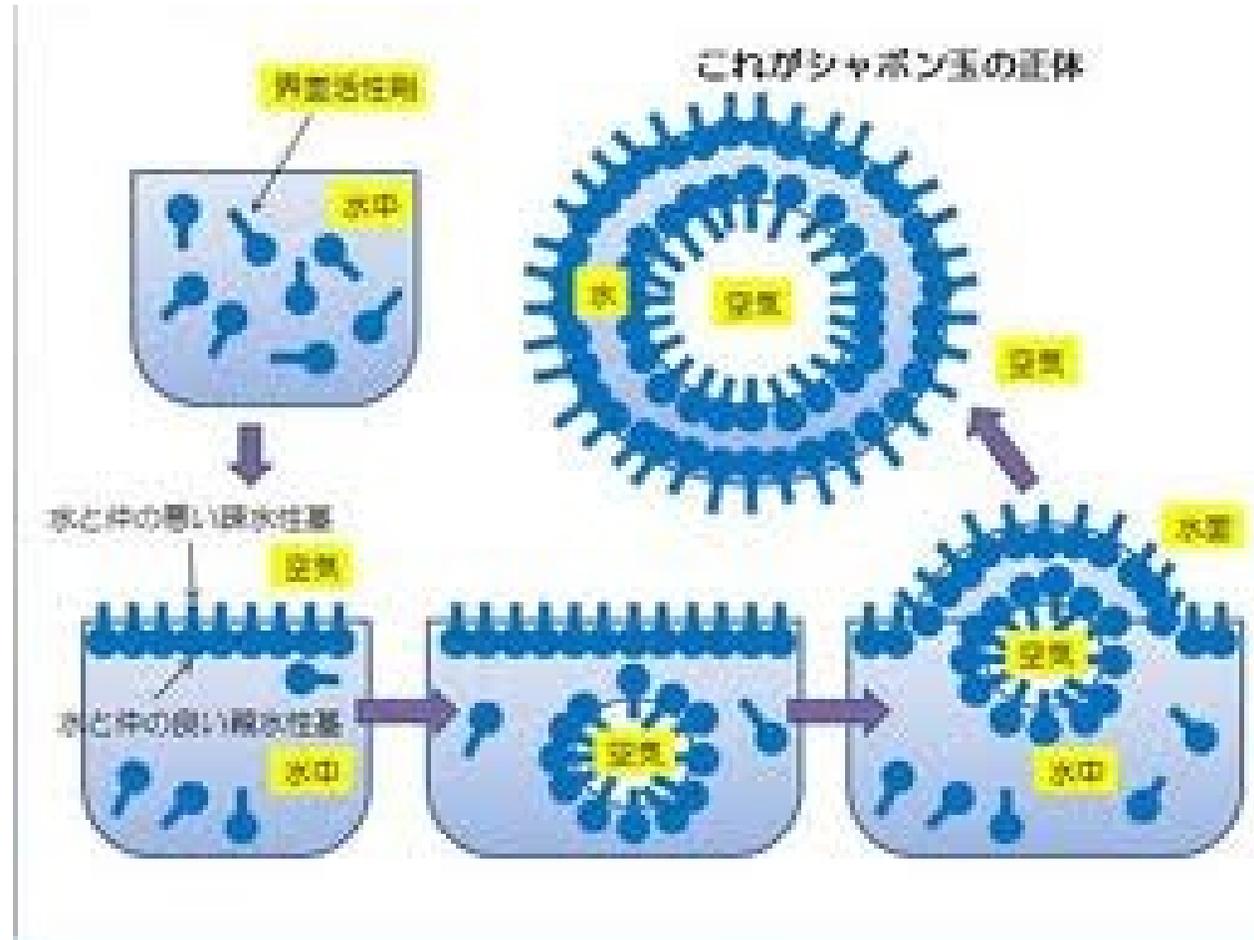


<http://atsunon08.blog.so-net.ne.jp/2008-05-06>



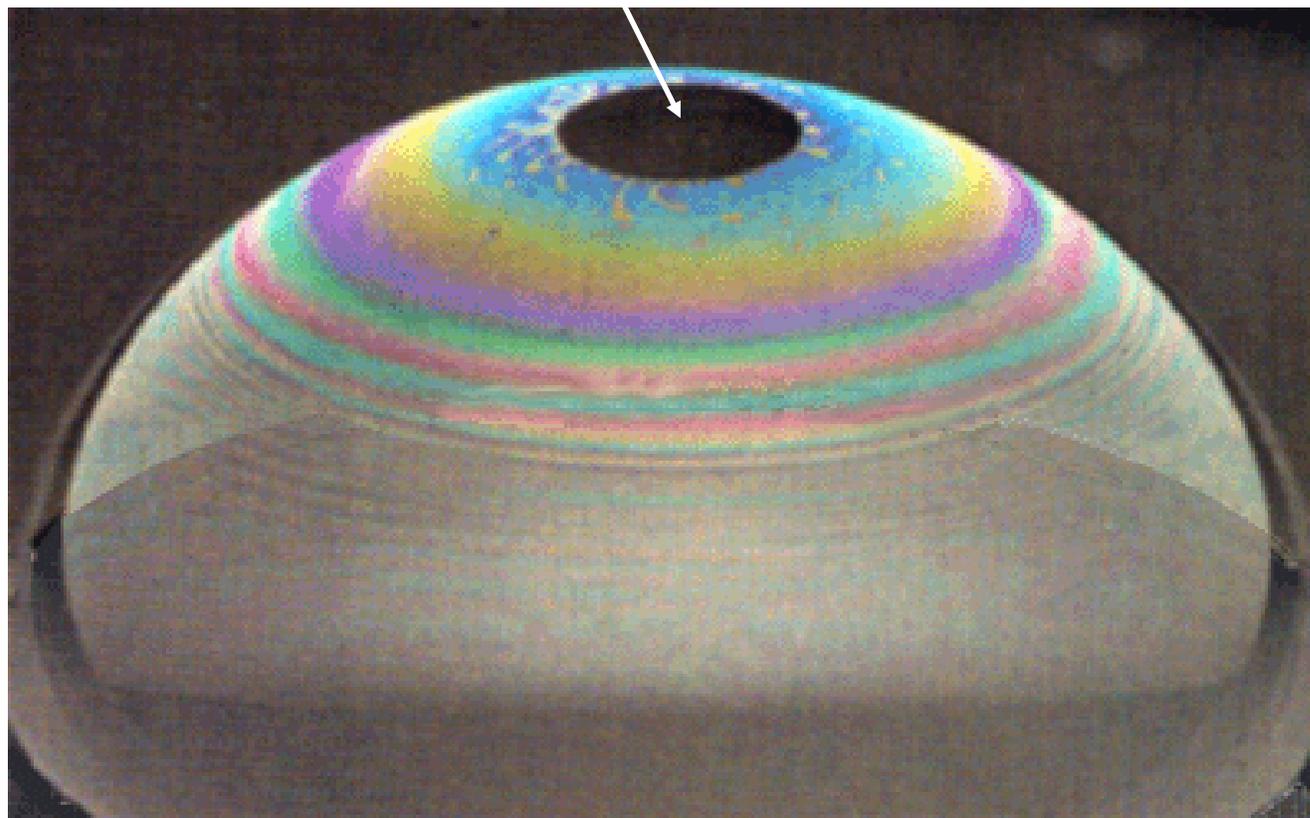
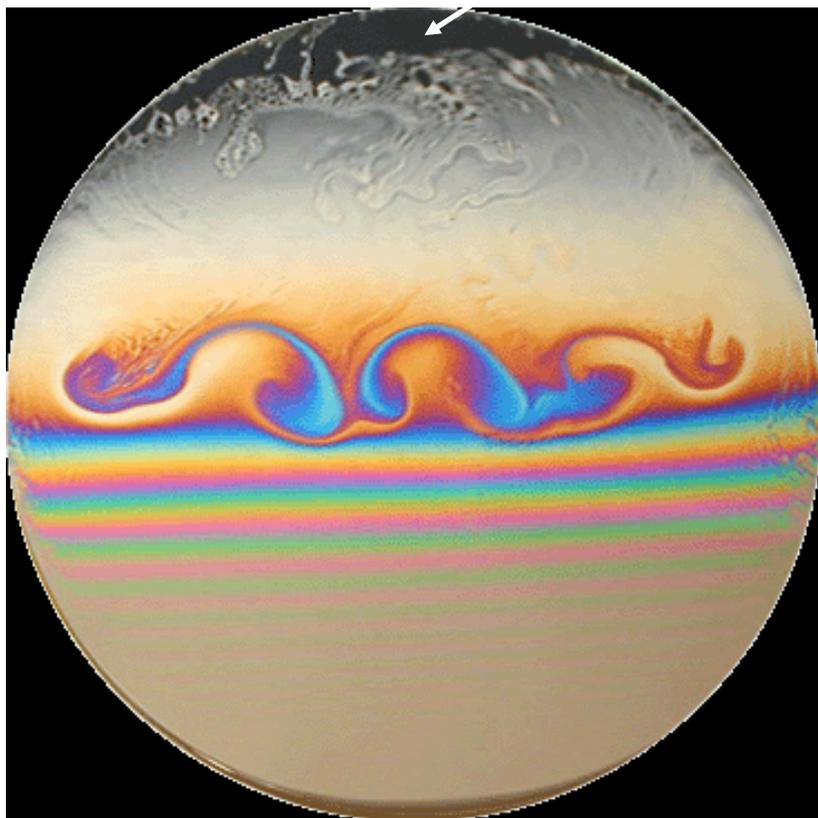
<http://hooktail.sub.jp/wave/interferences1/>

シャボン玉は、水がせっけん分子の二重膜ではさまれてできている



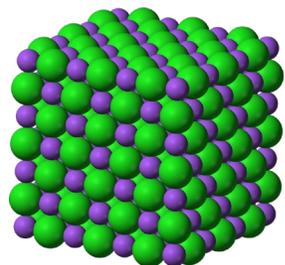
原子の存在の間接的証拠

シャボン膜がこれより薄くならないぎりぎりの厚み（光の波長より薄いので干渉縞を生じない） = 分子サイズ



原子の存在の間接的証拠

塩や砂糖や酸化鉄の結晶。原子が規則正しく並んでいる、と思える。もしもゼリーのような「いくらでも小刻みにできる物体」だったらこのような形が自然にできる理由がない。



<https://ja.wikipedia.org/wiki/塩化ナトリウム>

<https://ameblo.jp/anmasahitomasa/entry-12516417783.html>

<https://www.okatsune.jp/>

<https://sites.google.com/site/fluordoublet/>

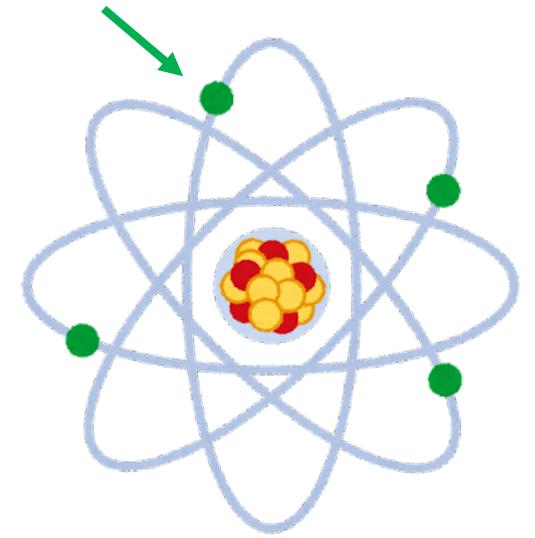
電子 electron

- 陰極線管
Cathode Ray Tube, CRT
マイナス極から
電子を発射している。
- 百年ちょっと前に発見された

<https://www.lymart.com/crookes-tube-cathode-ray-tube-demonstrator-cathode-ray-tube-with-maltese-cross-2-product/>

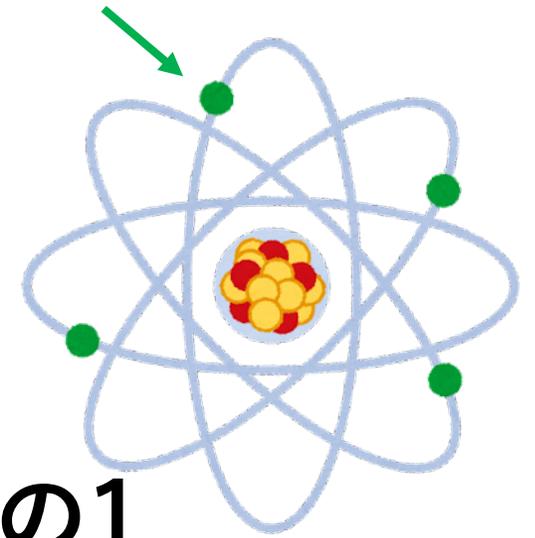


電子の働き



- テレビのブラウン管・蛍光灯・LED
- 電子レンジ・アンテナ
- 金属中の電流は「電子の流れ」
- 発電機やモーターは電子が磁場から受ける力で動いている
- たいていの化学反応は電子の移動によって誘起された原子の並び替え
- 光合成も消化も呼吸も神経伝達も電子の動き

電子はどんなもの？



- 電子の質量

$$m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{kg} = 0.0000 \dots 00091 \text{ kg}$$

0.9グラムの1億分の1の1億分の1の1億分の1

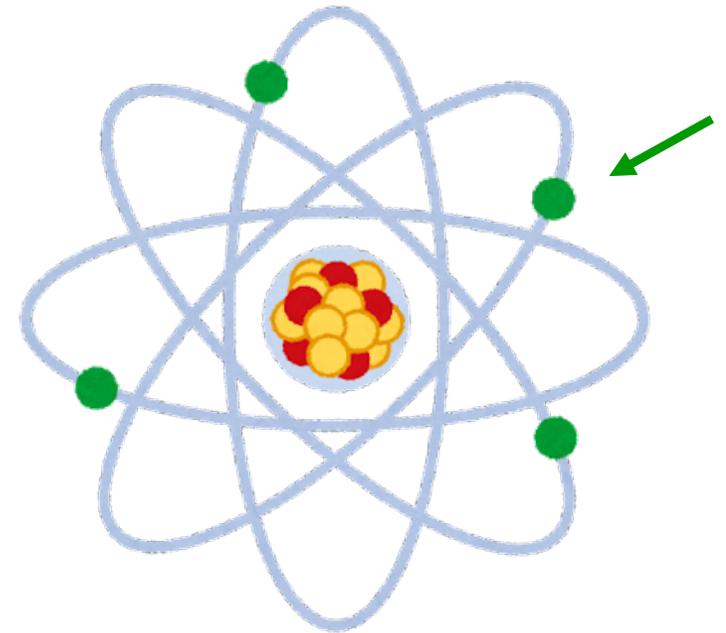
- きわめて軽い・小さい
- 通常のアトミの質量の約4千分の1が電子の質量
- **あなたの体重が60kgなら、15gの電子が入っている**
- **膨大な個数の電子**
- 電子が動くことによって筋肉も神経も脳も活動している。

原子や電子の物理法則

- 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「たんにボールを小さくしたもの」**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年頃に量子論が作られた。**
- アインシュタインも量子論の初期の立役者

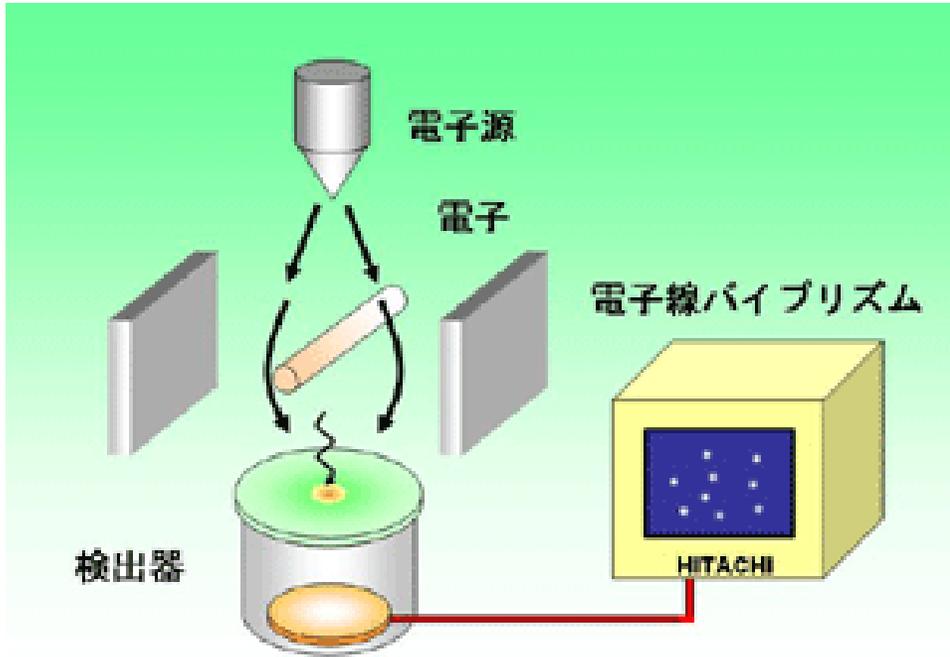
量子論らしさ

- 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

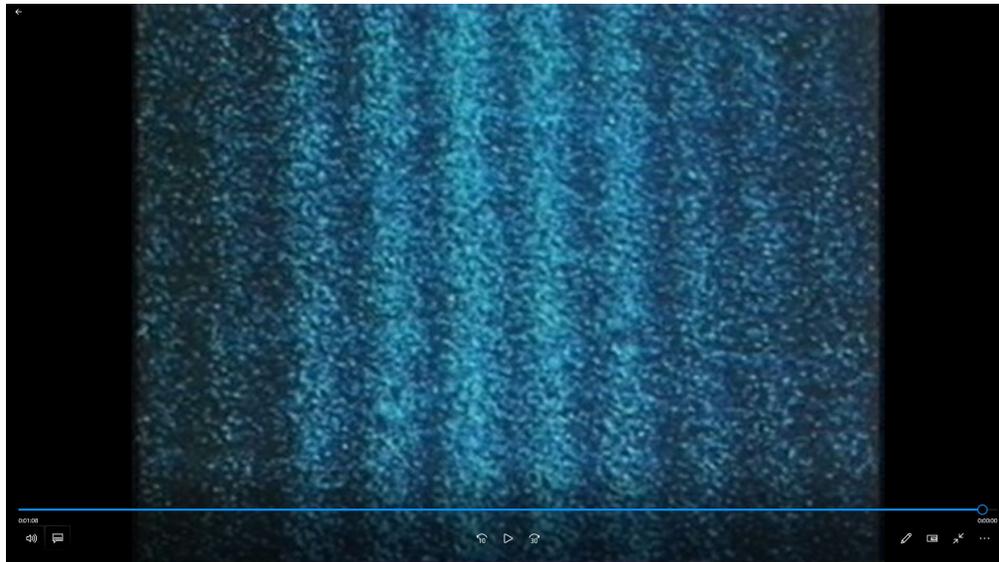
日立の電子線ホログラフィー（外村彰）



<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



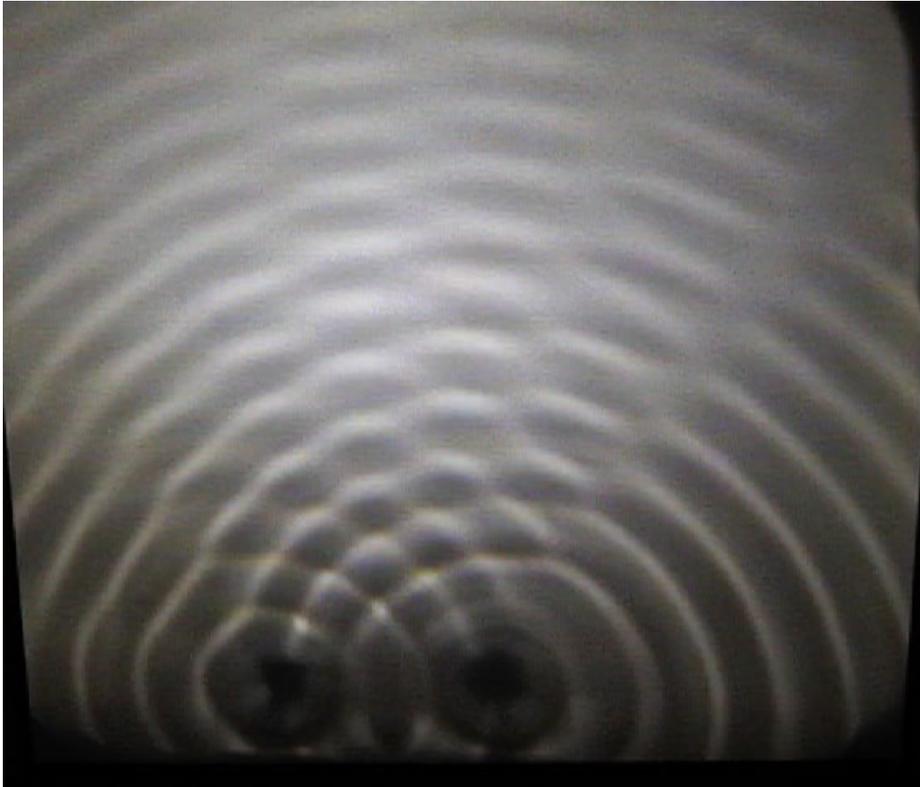
水面波の実験

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

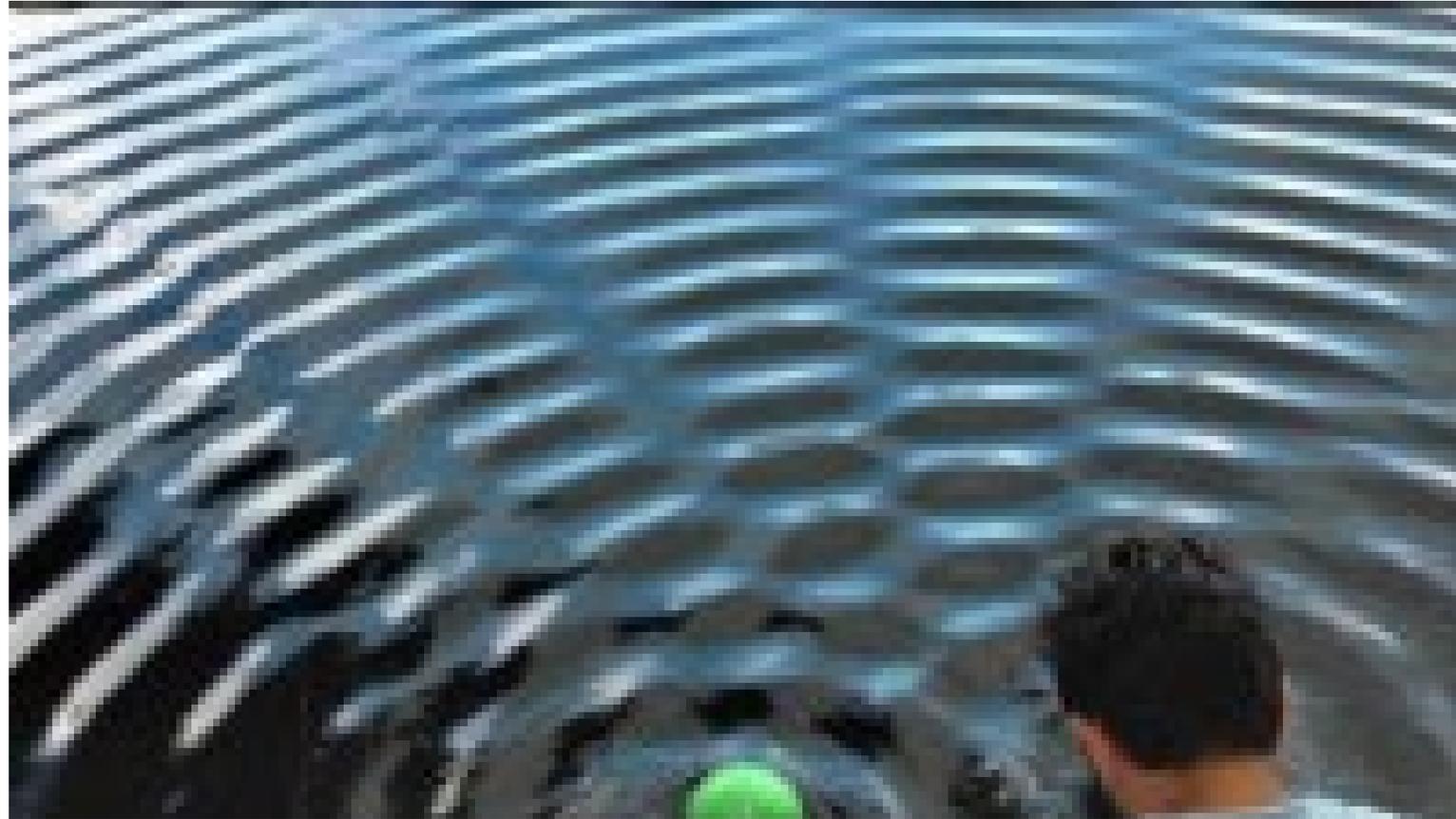


波動の干渉効果

2箇所から発生した水面波



<https://lab.mints.ne.jp/assist/4/kanshou2.htm>

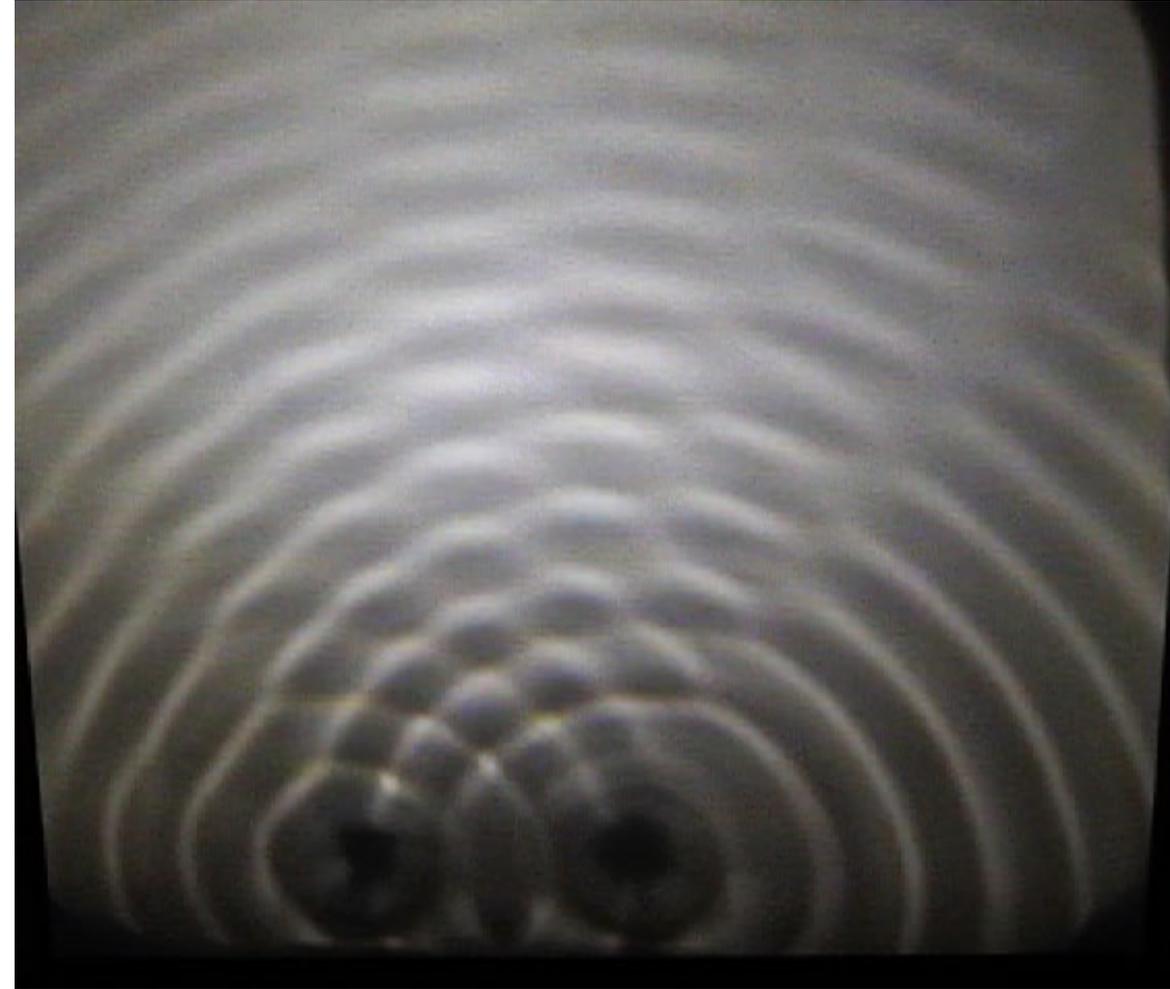


<https://www.youtube.com/watch?v=luv6hY6zsd0&t=260s>

4:25 あたりから観る

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

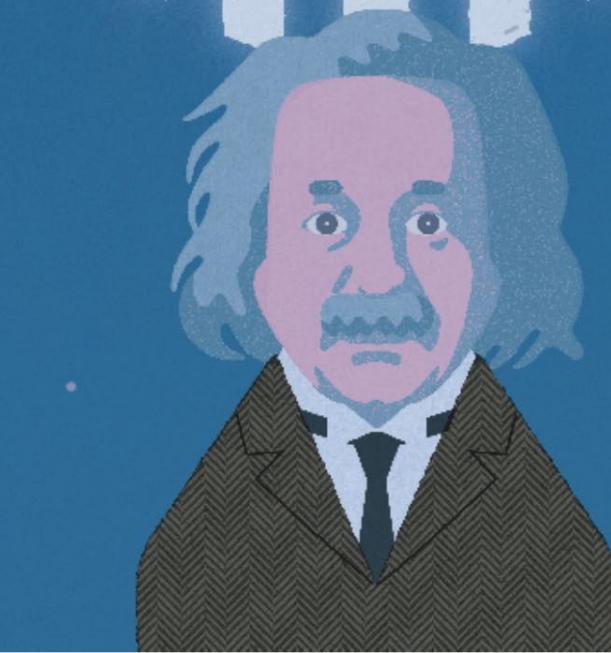
- 電子を探せば必ず「ひとつぶ」の粒子として見つかる。
- 電子を探していないときは、電子は波動のように広がり、同時に2箇所窓を通過して、重なって強め合ったり弱め合ったりしているかのように振る舞う。
- 見たときだけ粒子なのか？

アインシュタインのクレーム

- 電子は見ているときと見ていないときで別物なのか？
- 「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 ?

(アインシュタインがパイースと散歩中に言った)



EPR論文（1935年）（1/3）

- アインシュタイン、ポドルスキー、ローゼンの共著論文。
- 「客観的实在性」の十分条件
- 「物理理論の完全性」の必要条件
- この基準に照らすと量子力学は不完全だ、と論じた。

EPR論文 (1935年) (2/3)

- 「客観的実在性」の十分条件：系を乱すことなく、ある物理量の値を確実に予測できるならば、その物理量に対応する「実在の要素 (element of reality)」があると言ってよい。
- 物理理論の完全性の必要条件：物理理論が完全であると言えるためには、理論は実在の要素に対応する概念を漏れなく記述しているべし。

EPR論文 (1935年) (3/3)

- 量子もつれ状態 ($\hat{q}_1 - \hat{q}_2$ と $\hat{p}_1 + \hat{p}_2$ の同時固有状態) では、1番の粒子を観測したただけで、2番の粒子の位置と運動量の値を確実に予測できる。だから**位置と運動量に対応する実在の要素があるはず**。
- しかし、量子論は位置と運動量の確定値を同時に書き表すことができない。
- だから**量子論は不完全だ**、と論じた。

局所実在論 (Local realism)

- EPRに込められている信念を後人が定式化。
- **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。
- **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に対する反響

- EPR論文発表と同年の1935年にボーアが反論。
- 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、ネオ・カント主義）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

- 「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たくても、「**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

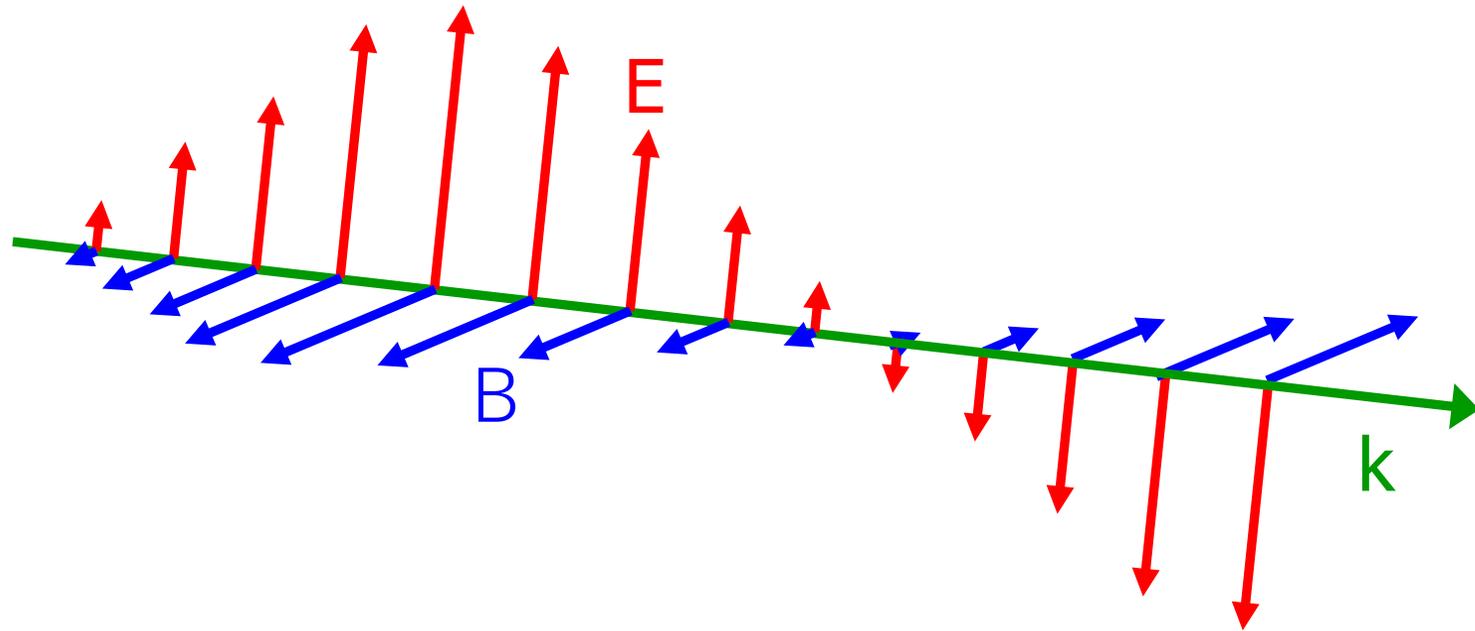


90°回して重ねるとほとんど光を通さない

(科学館 理工館 4 階に偏光の実験コーナーがあります)

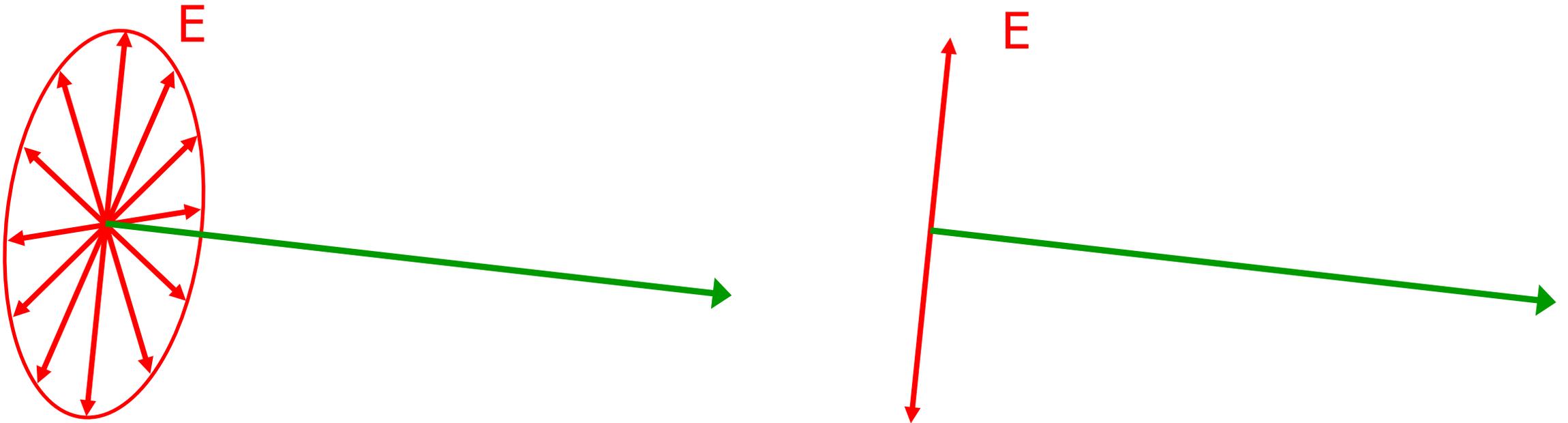
これをどう解釈するか？

- 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。



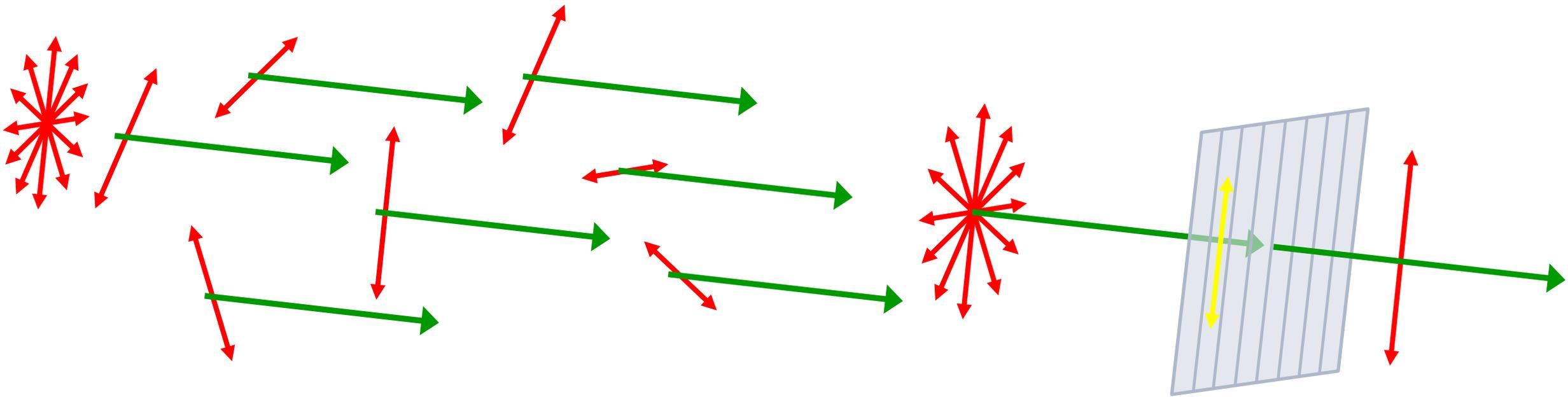
これをどう解釈するか？

- 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。



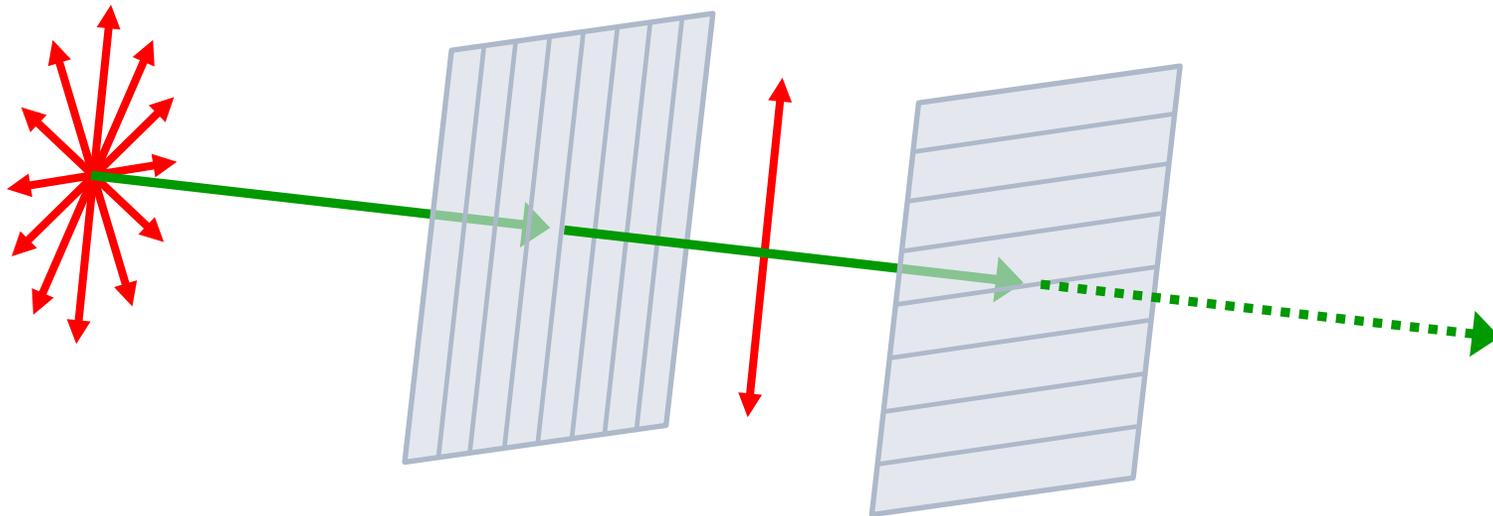
これをどう解釈するか？

- 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

(波長 = 運動量のスペクトル分解射影演算子は可換。角運動量は非可換)

フィルター 3枚重ねの方が光を通す、不思議



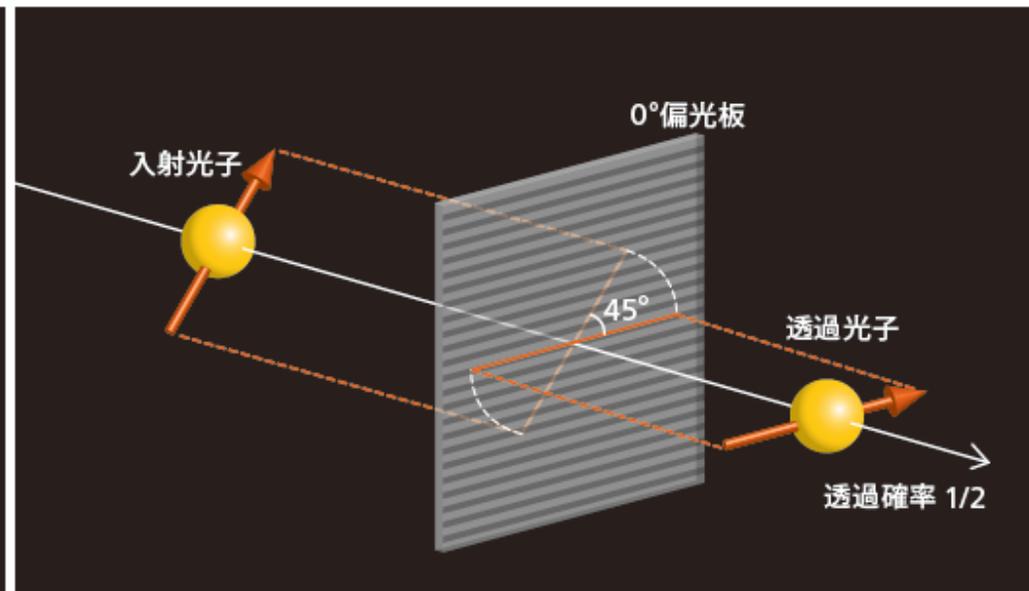
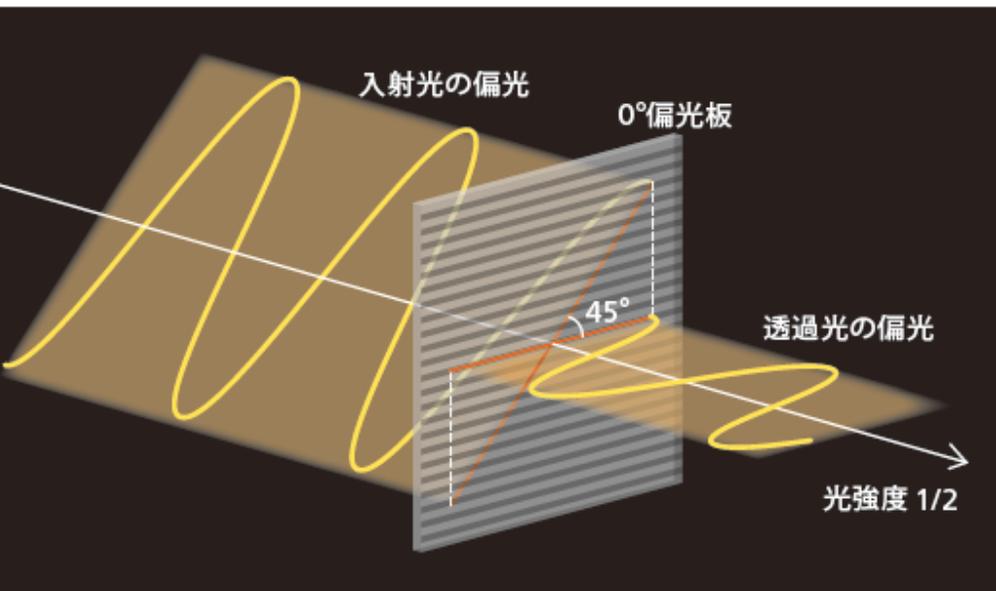
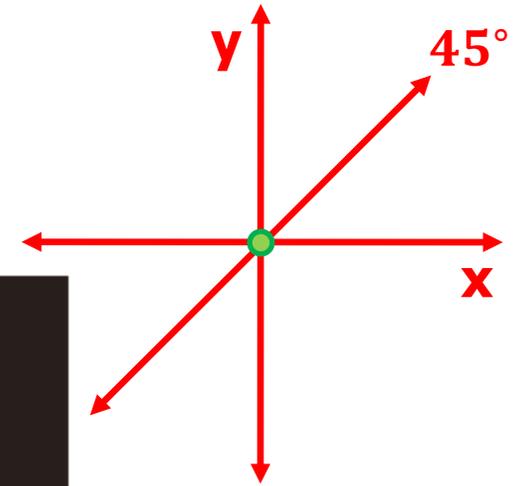
3枚重なっているところのほうが光が通る！
2枚重ねよりも3枚重ねのほうが通りやすい
(光が通る確率が高い)



これを量子力学はどう説明するか？

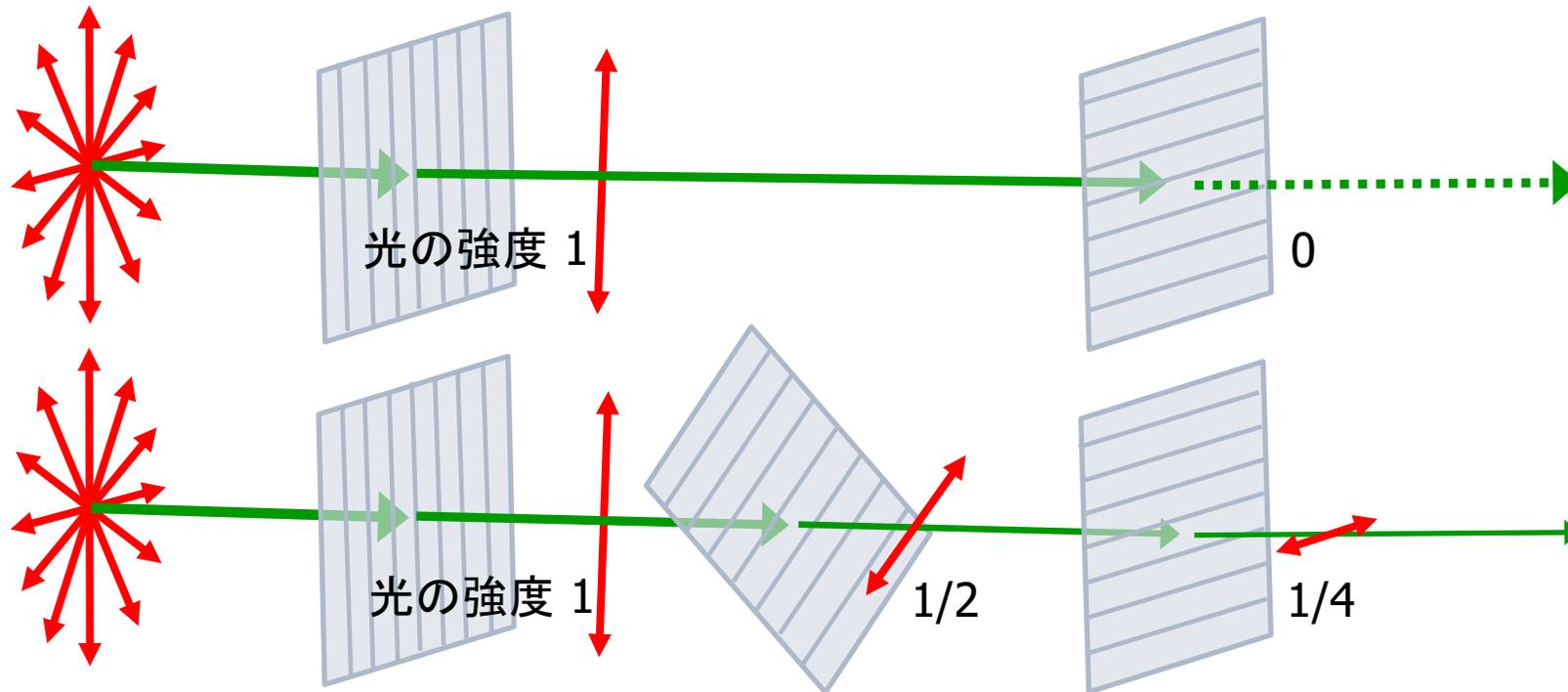
- y偏光が x偏光に変わる確率は 0
- 45°偏光は x偏光とy偏光の重ね合わせ状態 $|45^\circ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle + |y\rangle)$
- 45°偏光から x偏光に移る確率は 1/2
- 45°偏光から y偏光に移る確率も 1/2

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**

$$\alpha = \cos \theta$$

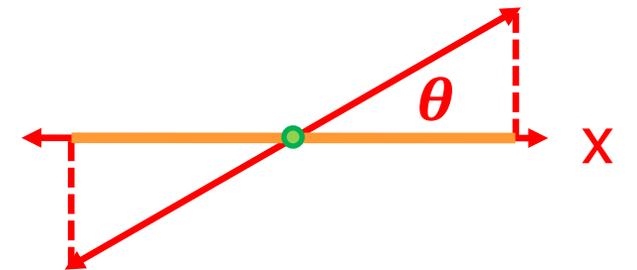
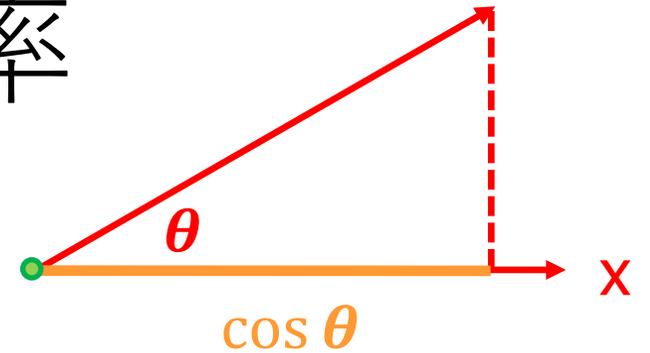
- 角度 θ 傾いた偏光が x偏光フィルターを通る確率は**振幅の絶対値 2 乗**

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

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

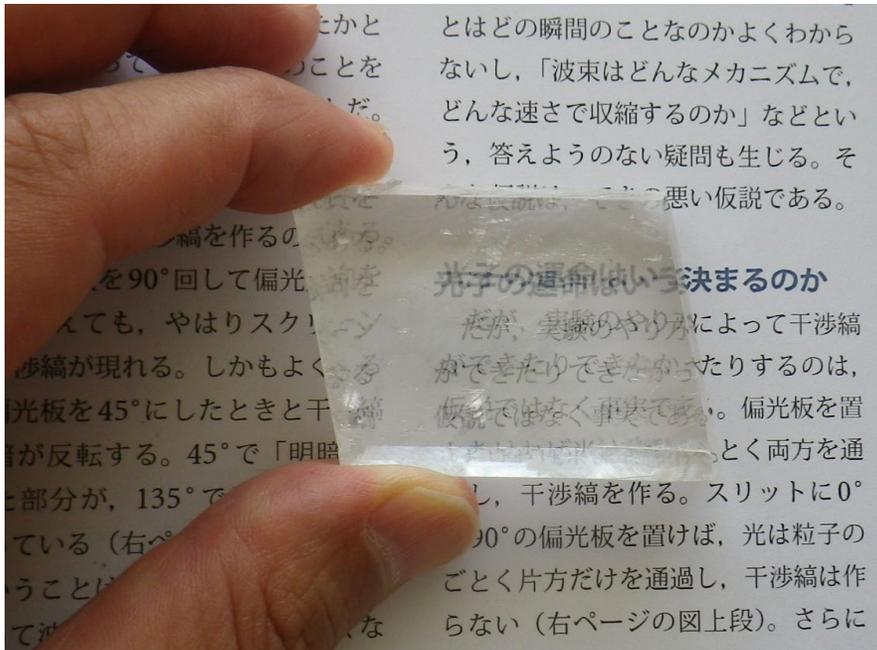
$$P(45^\circ) = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 = \frac{1}{2}$$

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

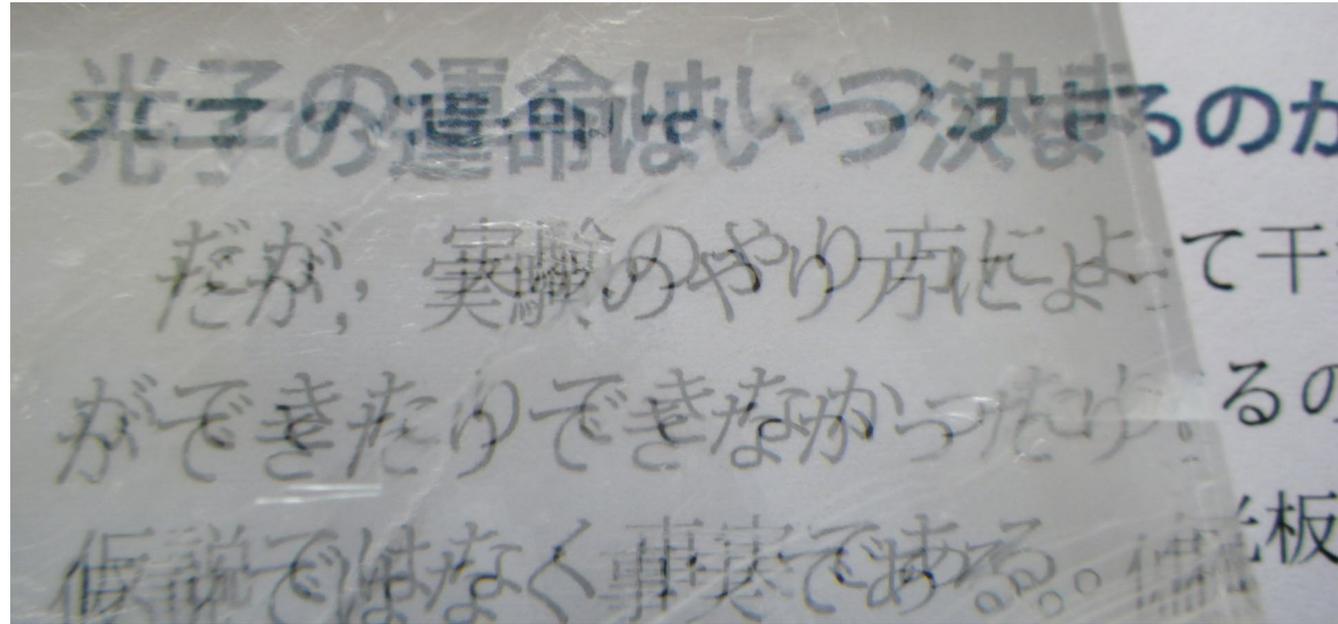


複屈折

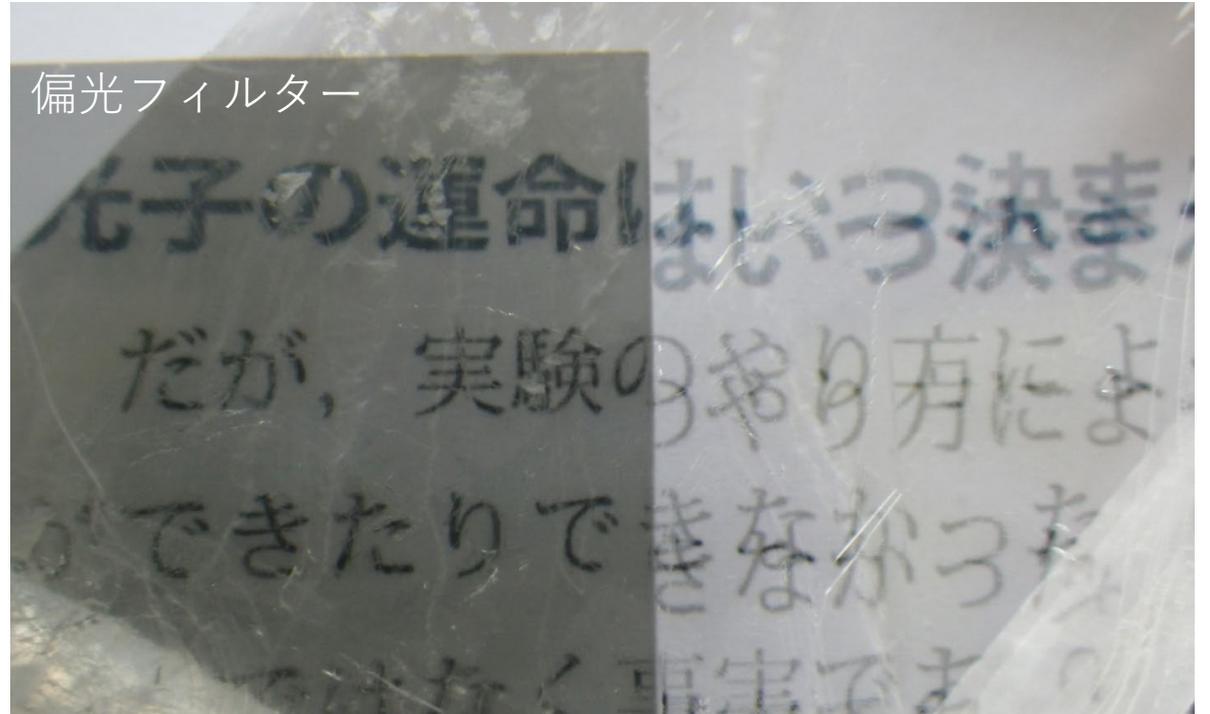
方解石（炭酸カルシウム結晶）は混合状態の光をx偏光とy偏光に分けて屈折させる。



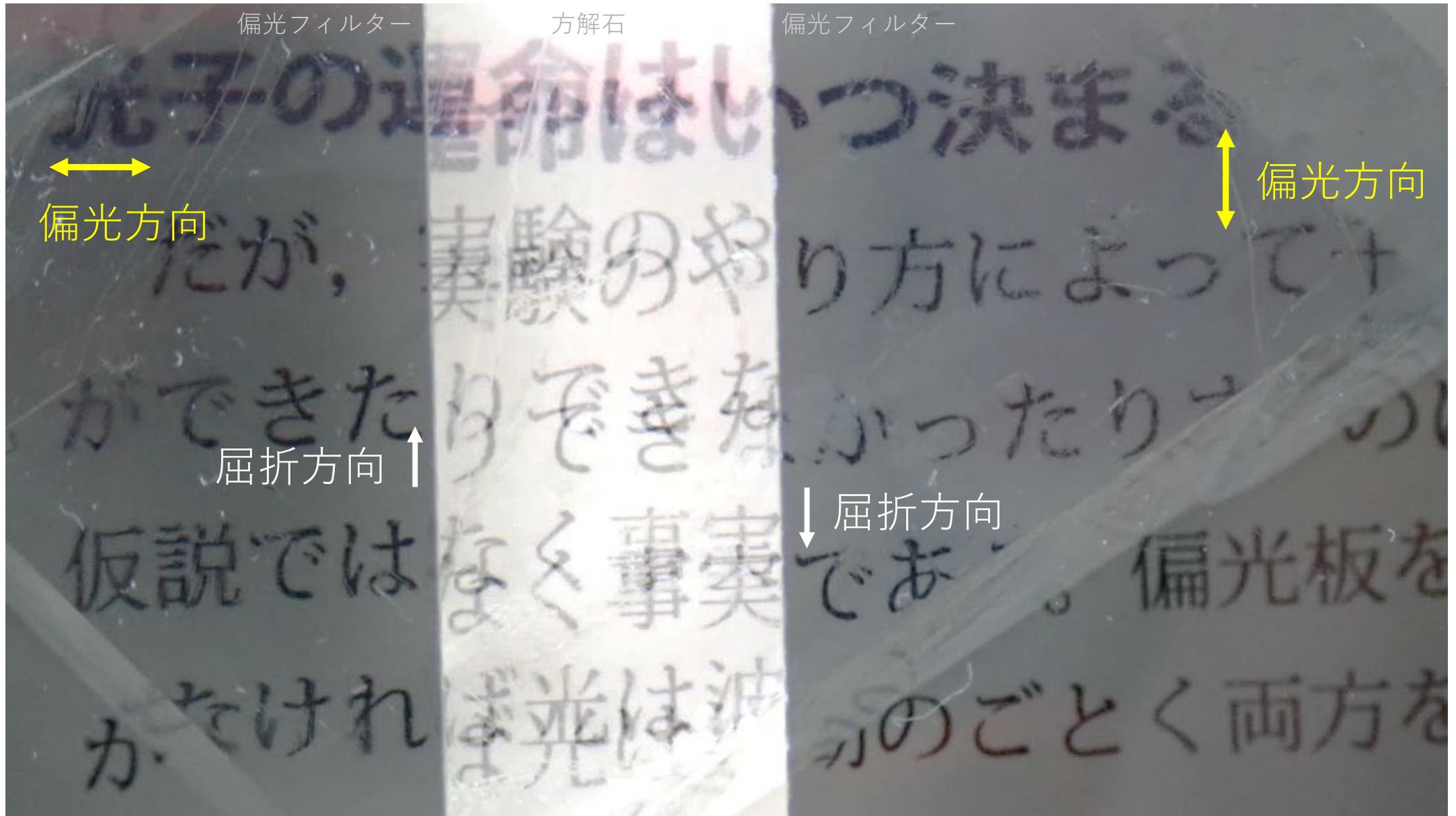
方解石を通して見る



偏光フィルター



複屈折は偏光を分離している



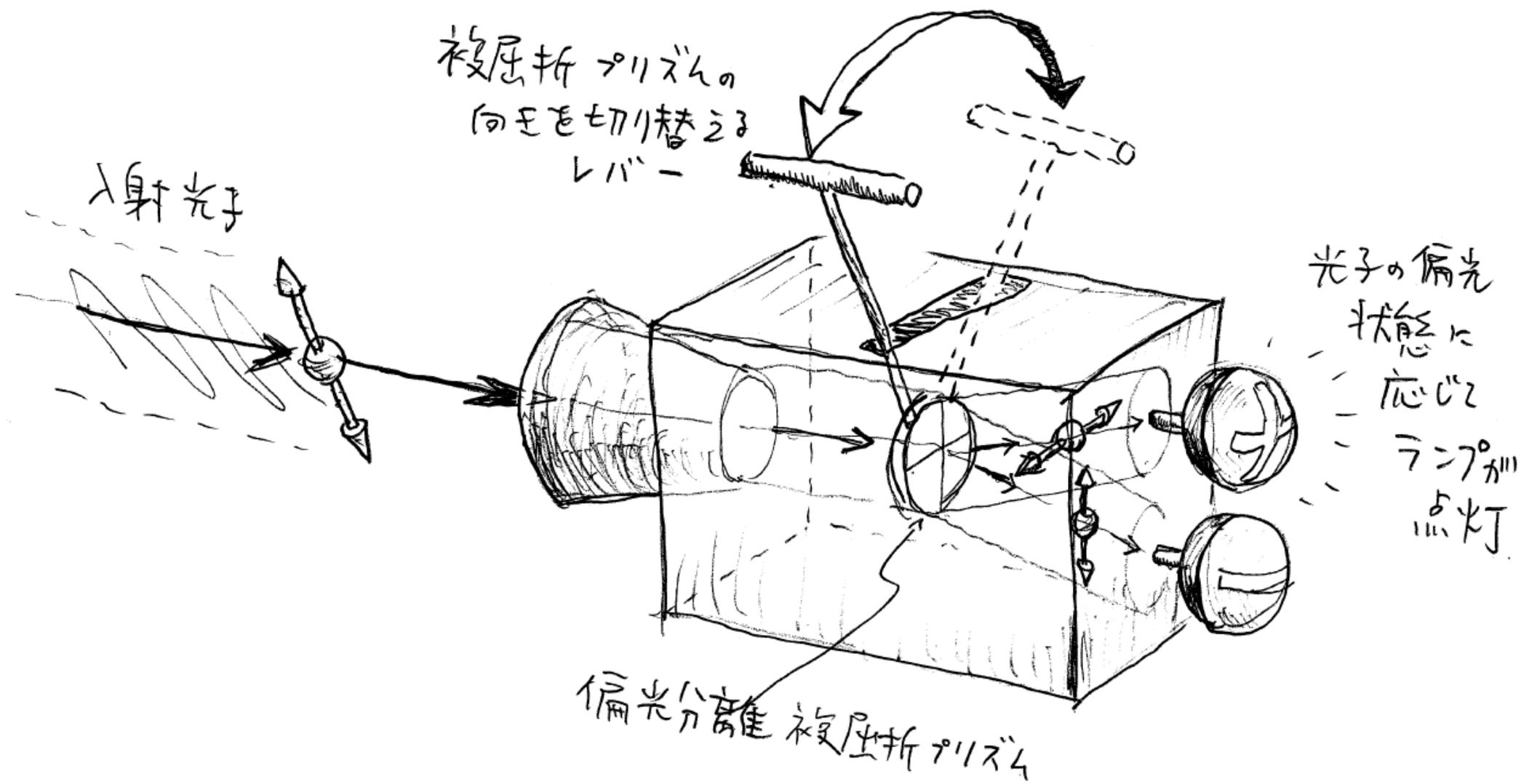
CHSHの実験設定

- 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。

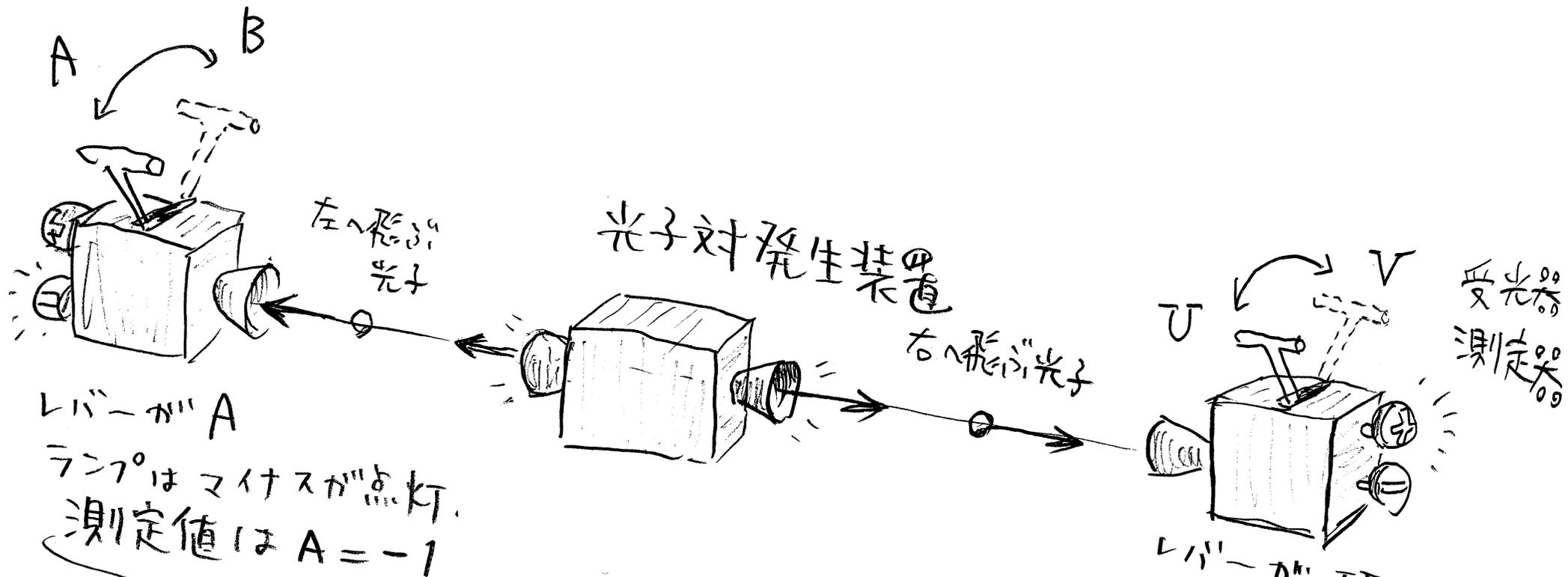
（シモニーはカルナップのもとで哲学の博士を取り、ワイトマンとウィグナーのもとで物理の博士を取った。ワイトマンに「EPR論文の間違いを指摘せよ」と指示されてEPR論文を読んだが、どこも間違っていないと思った、という。ホーンはシモニーの学生。参照：アダム・ベッカー『実在とは何か』）

- CHSHの設定を説明する。

光子の偏光測定器の概念図



この絵を見ながら説明を聞いてください



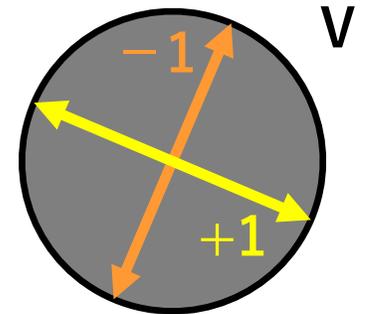
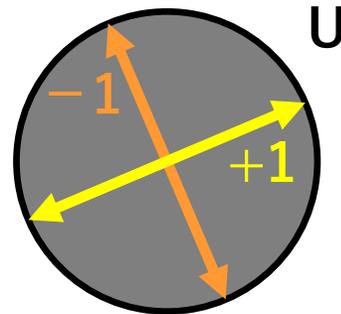
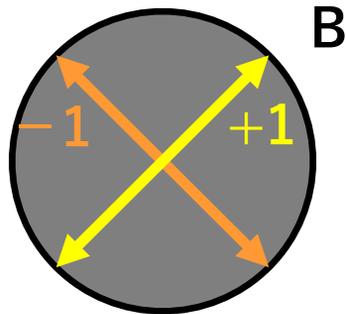
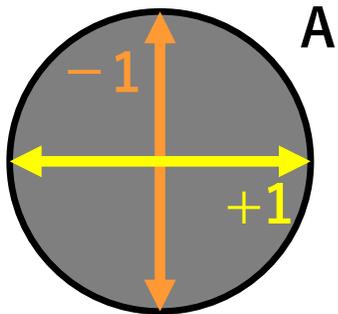
レバーが A
ランプはマイナスが点灯。
測定値は $A = -1$

レバーが U
ランプはプラスが点灯
測定値は $U = +1$

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

偏光分離器

- 複屈折器 A で偏光を分けて、一方の偏光成分を +1、他方を -1 と定める。
- 複屈折の分離方向を切り替えたのが B
- もう一つの複屈折器の U と V も同様。



実験の手順

- 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。

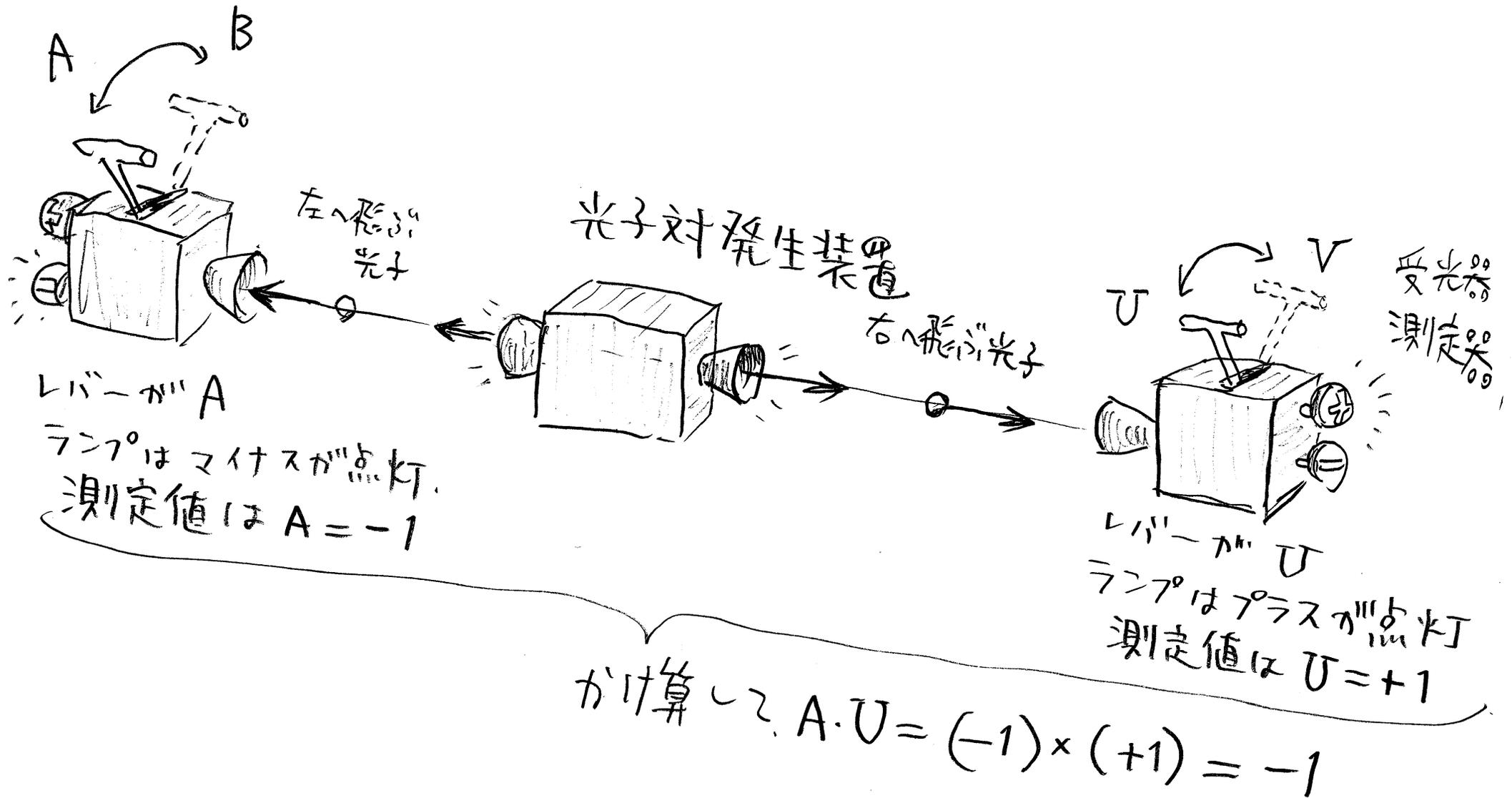
測定値の定義

- 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

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

$U+V$ 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？**

実在論 vs. 量子論

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

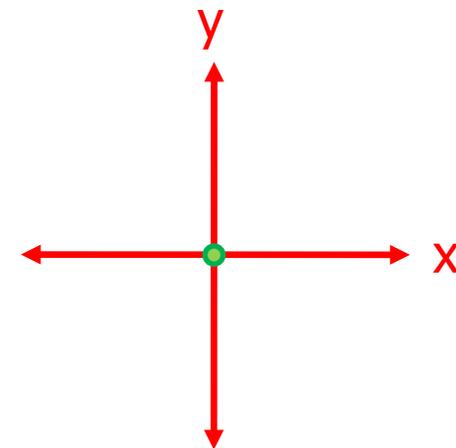
$$-2.828 = -2\sqrt{2} \leq \langle S \rangle \leq +2\sqrt{2} = 2.828 \quad (\text{量子論})$$

量子論では、CHSH不等式の破れ (violation) が起きうる。

一光子の重ね合わせ状態

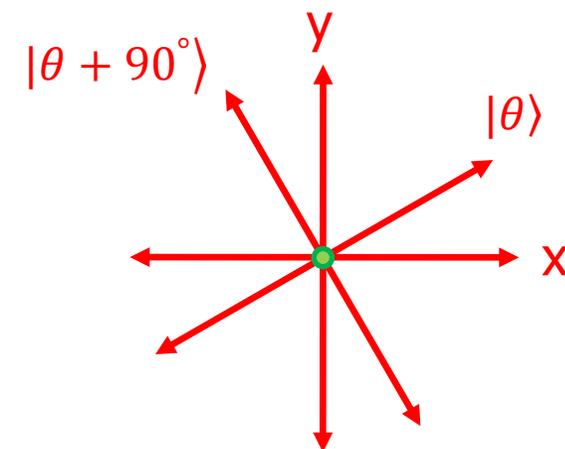
一光子の直線偏光状態（基底ベクトル）：

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



重ね合わせ状態：

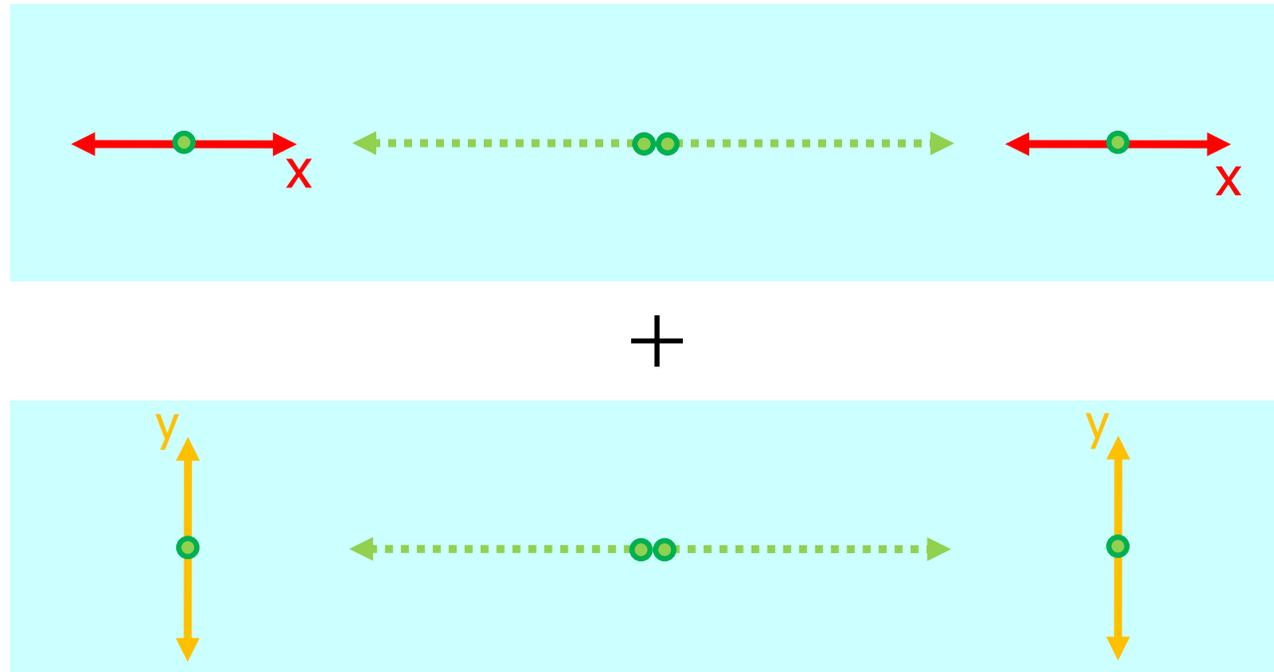
$$\begin{cases} |\theta\rangle = \cos \theta |x\rangle + \sin \theta |y\rangle \\ |\theta + 90^\circ\rangle = -\sin \theta |x\rangle + \cos \theta |y\rangle \end{cases}$$



二光子の量子もつれ状態

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

「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：

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

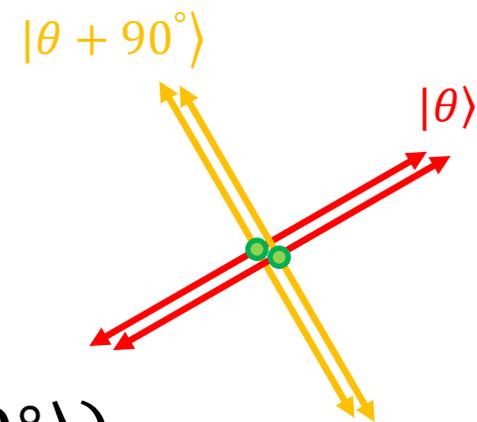
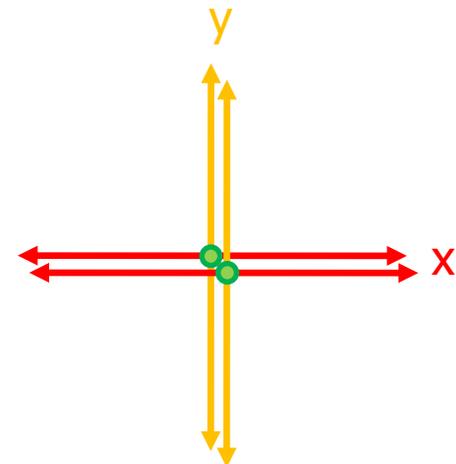
別の観測基底

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

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

で見ても、

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

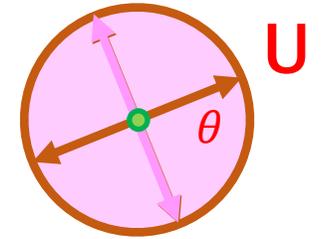
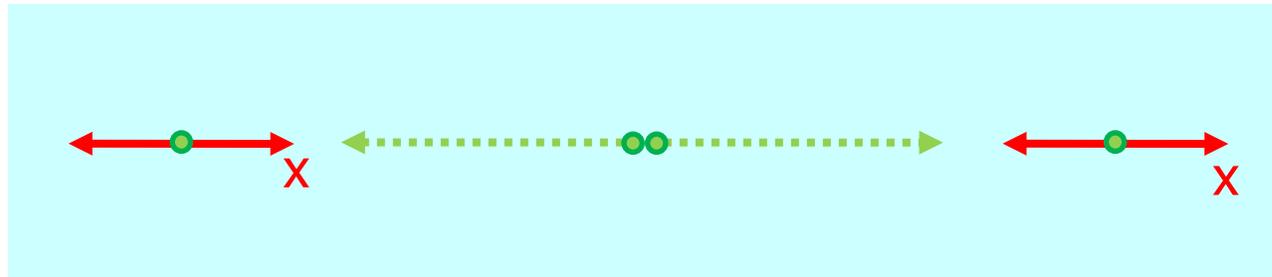
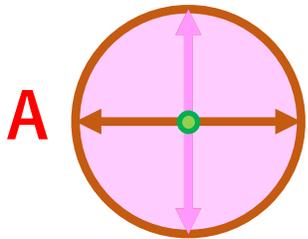


AとUが同符号になる確率

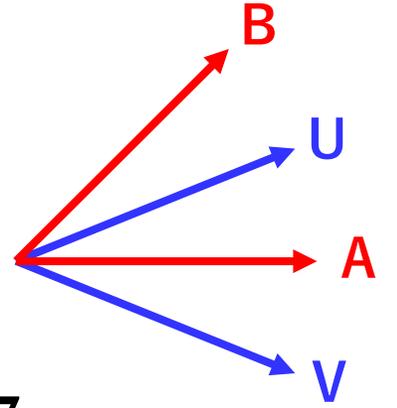
- 左の光子がx偏光であることが確定したとき、
右の光子もx偏光なのだから
右の光子が角度 θ の偏光フィルターを通る確率は

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

- とくに、 $P(22.5^\circ) = 0.85 \dots$



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」ことが量子力学にはビルトインされている。

代数的量子論で解く

左でAまたはBを測る。右でUまたはVを測る。

離れた場所の物理量は可換。同一地点の物理量は非可換

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

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

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

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

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。

ヒルベルト空間フォーマリズムで解く

$|x\rangle = |\uparrow\rangle$, $|y\rangle = |\downarrow\rangle$ を基底ベクトルとして行列表現

$$A = \sigma_z \otimes I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \otimes I, \quad B = \sigma_x \otimes I = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \otimes I$$

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

エンタングル状態 $|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \otimes |\downarrow\rangle)$

$$\langle \Psi | \sigma_z \otimes \sigma_z | \Psi \rangle = 1, \quad \langle \Psi | \sigma_x \otimes \sigma_x | \Psi \rangle = 1, \quad \langle \Psi | \sigma_z \otimes \sigma_x | \Psi \rangle = 0$$

$$\langle \Psi | A \otimes U | \Psi \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \langle \Psi | A \otimes V | \Psi \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\langle \Psi | B \otimes U | \Psi \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \langle \Psi | B \otimes V | \Psi \rangle = \frac{-1}{\sqrt{2}}$$

$$\langle S \rangle = \langle AU \rangle + \langle AV \rangle + \langle BU \rangle - \langle BV \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (1 + 1 + 1 - (-1)) = \frac{4}{\sqrt{2}} = 2\sqrt{2} = 2.8$$

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、

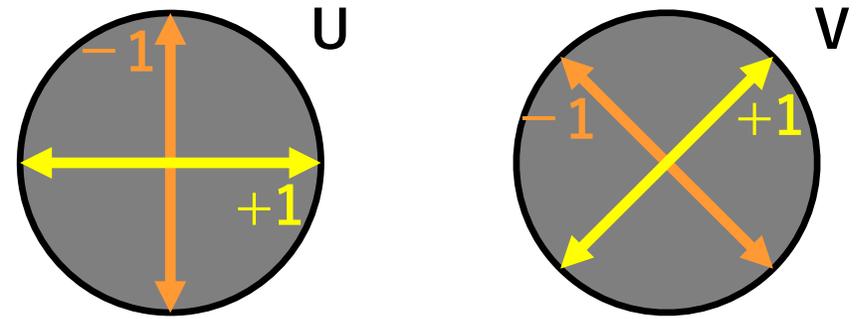
U+Vの値は ± 2 または 0.

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

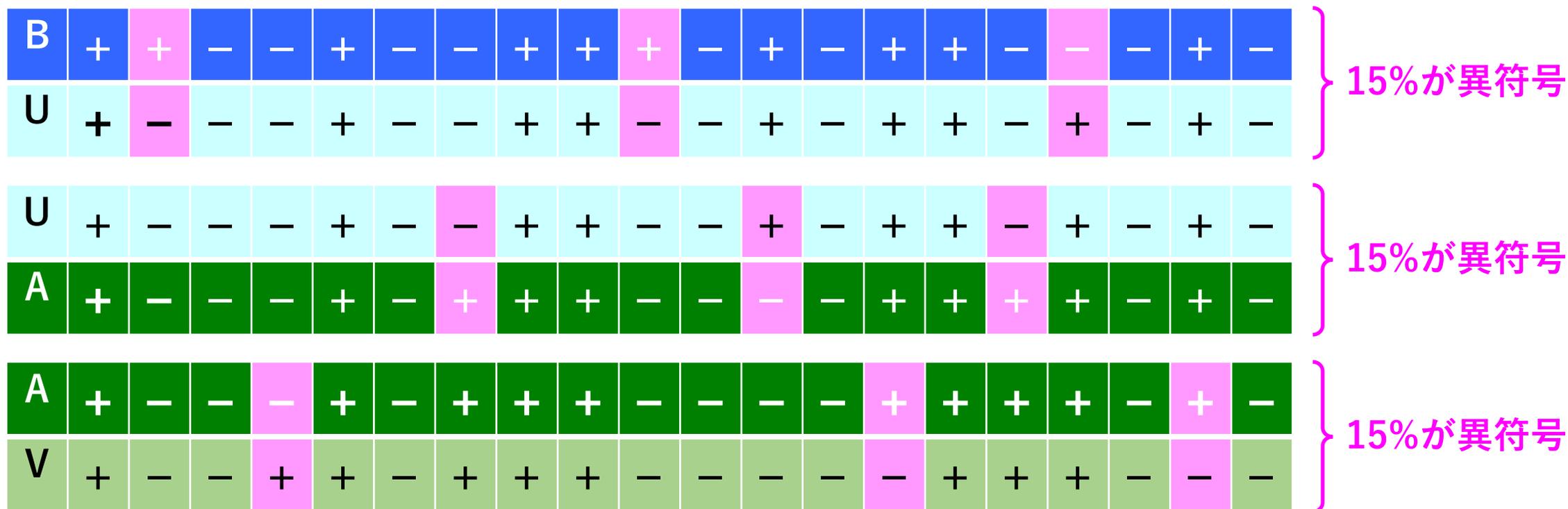
と考えた。しかし、UとVは同時には測れない！

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、

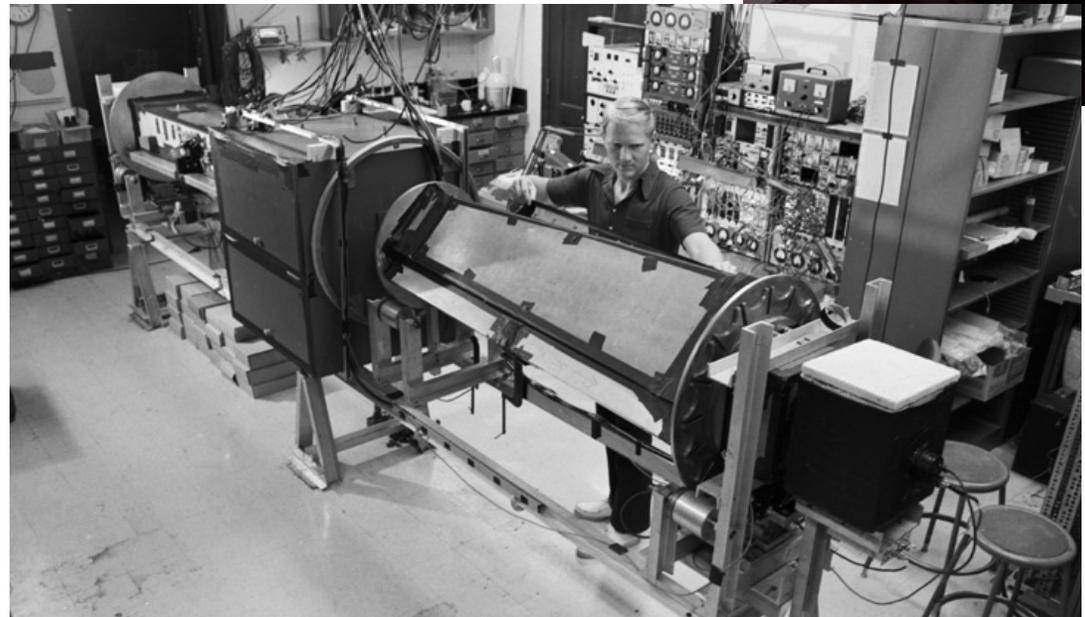
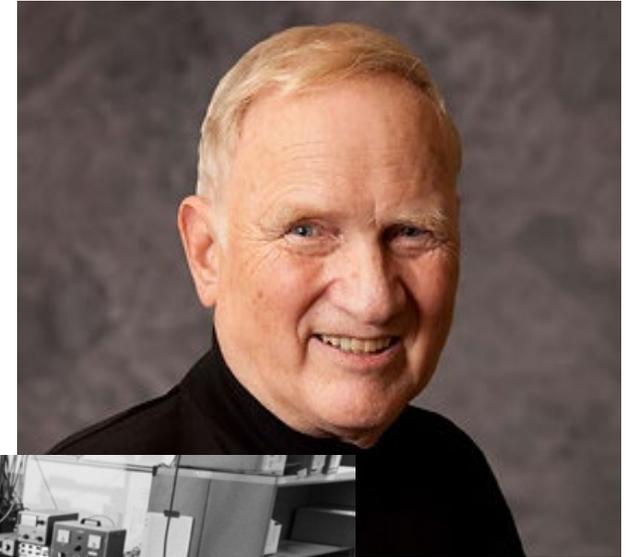


どう頑張っても一番上のBと一番下のVの異符号箇所は45%以下。

〈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者となり、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。CHSHの不等式の破れを示した。



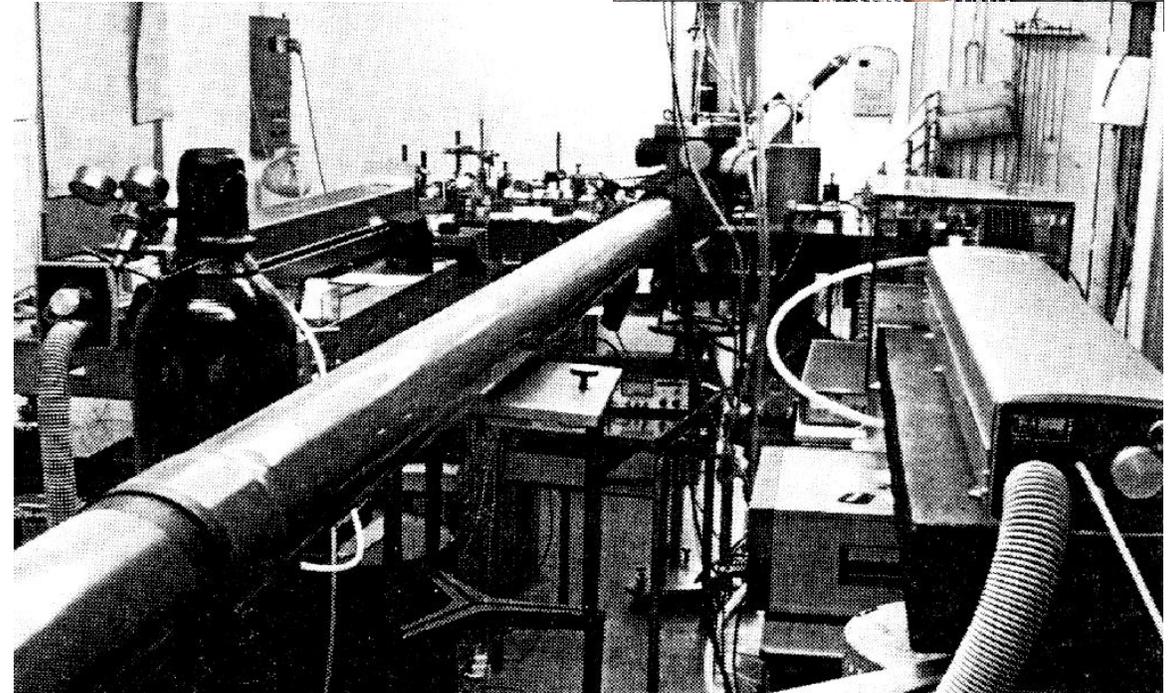
<https://www.johnclausser.com/>

<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。

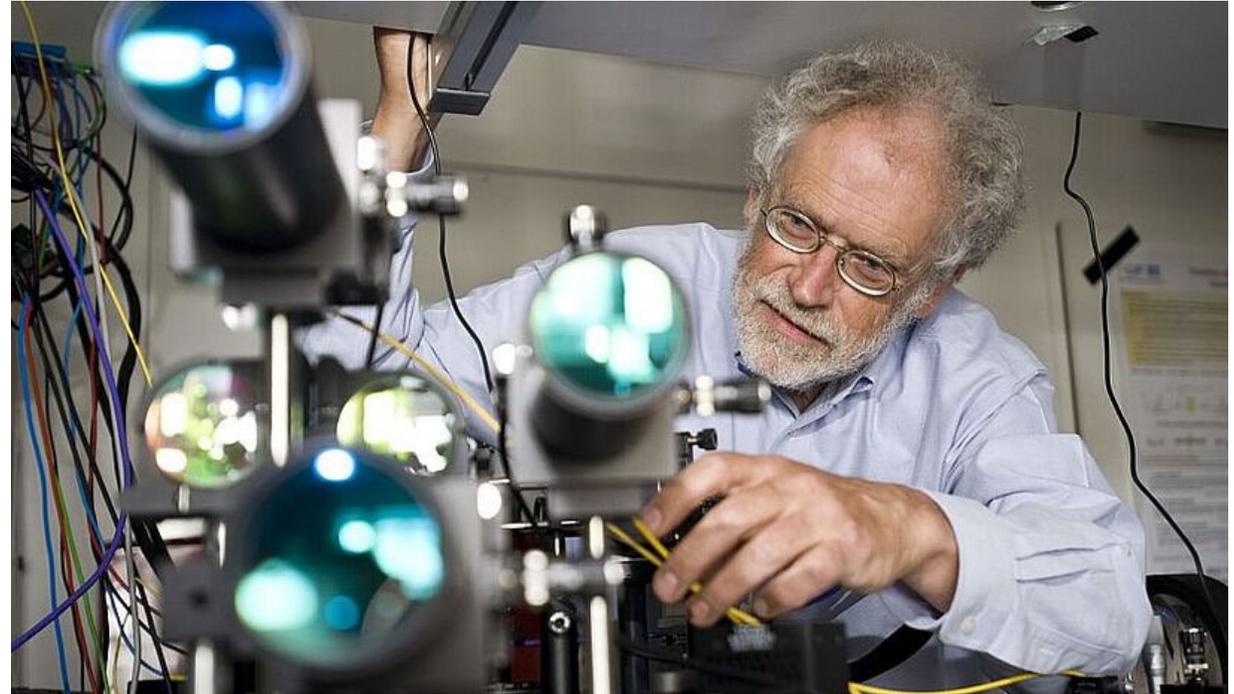
この研究でアスぺは博士学位を取った。



アントン・ツァイリンガーの実験（1998年）

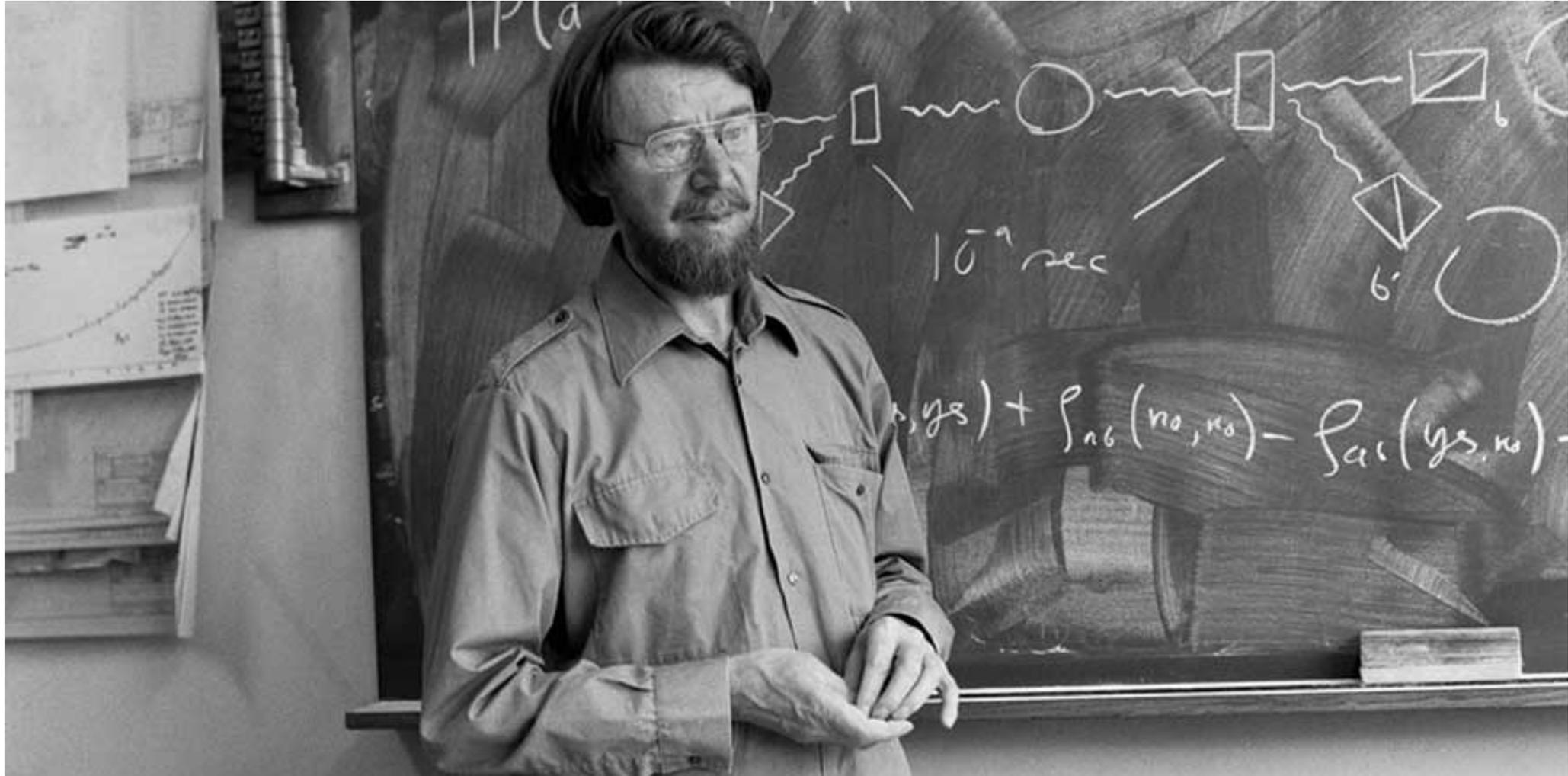
左右の測定器が互いに相手の状態を知らないようにするため、また、あらかじめ光子が測定器の状態を知るチャンスがないようにするため、左右の測定器のそばに乱数発生器を置いて、光子が発生して測定器に飛び込むまでの間に乱数を振って、それに応じて測定器を切り替える実験を行った。

$\langle S \rangle = 2.73$ を得た。



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

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. 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「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 $\langle AU \rangle$ 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Uの測定結果に影響すれば（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いわけではない。

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)
 $P(a, u) = \sum_{b, v}^{\pm 1} P(a, b, u, v)$, $P(b, v) = \sum_{a, u}^{\pm 1} P(a, b, u, v)$ 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。**
- **「負の確率で出現すること」を実在と呼んでよいか？**

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。 **(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。）

谷村の受け止め方 1/5

- 物理的世界の記述のために人間の日常感覚からかけ離れた概念や理論が必要になるのは、我々がミドルサイズ（知覚・実感できるものの大きさ・速さ・時間スケール）の生き物であることからして避けがたい帰結であり、そのこと自体を否定的に捉える必要はない。
- 少なくとも、言葉を現実に合わせるべきであり、現実を言葉に合わせようとすべきではない。

谷村の受け止め方 2/5

- 事物を直接的・感覚的に指す概念と、間接的・数学的概念との境界は曖昧であり、両極端の間には連続的とも言えるグラデーションがある。
- 「何の实在を認めて、何の实在性は認めない」という線引きは、大した意味を持たない。

卑近な概念

遠い概念

連続体・流体

質点・力

エネルギー・運動量

場

波動関数

状態ベクトル

量子場

熱

ポテンシャル

ヒルベルト空間

エントロピー

ハミルトニアン

谷村の受け止め方 3/5

- ボーアは、**マクロ古典物理学の概念や言葉は、雑な近似概念としてあるのではなく、ミクロ量子世界の物理現象も実験方法も、古典物理学の言葉で語られ解釈するしかない、**というようなことを述べている。
- 例：「演算子の固有値」を「粒子の位置」や「粒子のスピンのエネルギー」と言い表し、実験装置をデザインし、操作し、解釈している。
- **古典物理学を量子物理学の「鏡」とする考え方。**

谷村の受け止め方 4/5

- 「量子力学が正しく、古典力学は断然破棄すべし」とか、「**なんとかして古典物理的描像（粒子と波動とか、波束の収縮とか、観測者の意思とか、隠れた変数とか）を量子力学におしつけよう**」とか、「**いかなる実在性なら認めるか**」などと議論するのは、いずれも見当違いである。少なくとも建設的ではない。
- 実在概念のバラエティーを増やせばよい。

谷村の受け止め方 5/5

- 量子論や相対論や宇宙論が描く世界像を無批判に受け入れるべきだとは思わないが、我々の素朴な日常感覚や貧弱な想像力を超えた**現実世界に肉薄する世界像**として自分のものにしていった方が豊かである。
- 「物理理論イコール現実」である必要はない。現実世界に近いものを我々は捉えているんだ、しかも、ますます精度よく近づいているんだ、というだけでも世界理解としては上出来。

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.

補足 1/6

- 今回の講演では強調しませんでしたでしたが、「○○は実在するか？」の○○にはいろいろなものが入ります。
 - **システム**（原子や電子や電磁場など）の実在性
 - **物理量**（エネルギーやスピン）の実在性
 - **物理量の値**（測ればプラスかマイナスか）の実在性など、レベルの異なる実在の問いがあります。
- 今回議論したのは、「物理量の値」の実在性のつもりです。
- 「物理法則は実在するか？」、「現象と現象の関係は実在するか？」、「構造が実在するのか？」と言い出すと哲学ぽくなります。

補足 2/6

- 今回の研究会では触れませんでしたでしたが、「科学的实在論」の外に「**形而上学的实在論**」というのものもあるようです。
- **普遍論争**：「ミケ」や「タマ」などの具体的な個物を超えた「ネコ」という**普遍者**は実在するのか？という論争。スコラ哲学で問題にされた。現代人（少なくとも私）から見ると何を問題にしているのか、わからない。

補足 3/6

- いまでも

「過去は実在するか？」

「未来は実在するか？」

「時間の流れは実在するか？」

「自由意志は実在するか？」

「クオリアは実在するか？」

などの実在論テーマは続いているように見えます。

- こういうのは「疑いだしたらキリがない」類の問題ですし、「何をもって実在とするか」という思い入れが各人異なるので、ちょっとどうしようもなさそうに思います。

補足 4/6

- 実在に関する問題は、結局のところ、「世界はどのようなものだと思えば納得がいくか」という類の問題に思えます。
- 実在像というのはそんなに固定的なものではなく、時代とともに世界理解のしかたが変化すれば、実在像も変化しているように思えます。
- 「素粒子」や「波動関数」がどういう意味で実在なのか（どういう意味で実在を捉えているのか）、現代の物理学者たちは百年前の物理学者とは異なった見方をしていると思われるし、それで悪いことはないように思います。

補足 5/6

- ものの見方というのは、じつはそんなに首尾一貫している必要はなく、「つぎはぎ」でもかまわないように思えます。
- 例：素粒子の加速器をデザインするときは、陽子や電子が古典力学的荷電粒子であると思って作り、素粒子の反応確率は場の量子論で計算し、検出した素粒子の軌跡を古典力学で分析して運動量を求める。
- 科学者の実践はそういうもの。

補足 6/6

- 今後、AI（人工知能）が発達すると、人間の世界理解のしかたに新しいオプションが付け加わっていき、世界理解が変容していく可能性があると思われます。
- そのときは新たな実在概念を獲得することあるでしょうし、「昔の人はなんでこんなことを問題にしていたのかわからない」と思われる日が来るかもしれません。