

2022 年ノーベル物理学賞解説

Ryutaroh Matsumoto

Tokyo Institute of Technology, Japan
Send your comments to ryutaroh@ict.e.titech.ac.jp

October 2022
@ Tokyo Tech.

本資料の著作権は CC BY-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.ja>

https:

[//www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/press-release/
Entangled states – from theory to technology](https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/press-release/Entangled-states-from-theory-to-technology)

Alain Aspect, John Clauser and Anton Zeilinger have each conducted groundbreaking experiments using entangled quantum states, where two particles behave like a single unit even when they are separated. Their results have cleared the way for new technology based upon quantum information.

For a long time, the question was whether the correlation was because the particles in an entangled pair contained hidden variables, instructions that tell them which result they should give in an experiment. In the 1960s, **John Stewart Bell** developed the mathematical inequality that is named after him. This states that if there are hidden variables, the correlation between the results of a large number of measurements will

never exceed a certain value. However, quantum mechanics predicts that a certain type of experiment will violate Bell's inequality, thus resulting in a stronger correlation than would otherwise be possible.

John Clauser developed John Bell's ideas, leading to a practical experiment. When he took the measurements, they supported quantum mechanics by clearly violating a Bell inequality. This means that quantum mechanics cannot be replaced by a theory that uses hidden variables.

Some loopholes remained after John Clauser's experiment. Alain Aspect developed the setup, using it in a way that closed an important loophole. He was able to switch the measurement settings after an entangled pair had left its source, so the setting that existed when they were emitted could not affect the result.

量子力学以前の物理学における暗黙の仮定

- 1 何かの出来事の影響は光速より速く伝わらない(これを局所性と呼ぶ)
- 2 測定の有無に関係なく、ものごとを記述する(隠れた)変数が存在する(これを実在性とか隠れた変数理論と呼ぶ)

とくに高校までの物理学は、隠れた変数の存在を仮定して、それに適当な変数名をつけてものごとを記述している

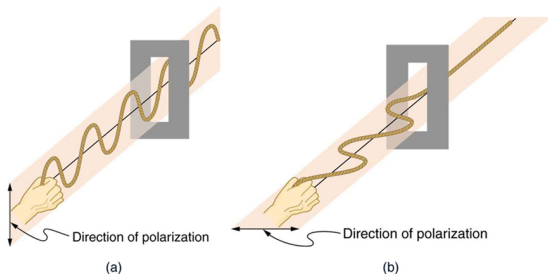
J.S. Bell はこれら2つの仮定の両方が同時に正しいか、少なくとも片方が正しくないか、見分ける実験を考案した。

は John Clauser (2022 年のベール賞受賞), Michael Horne, Abner Shimony, Richard Holt により 1969 年に発見された。これは Bell の先行研究に基づいていた。

CHSH 不等式の説明に必要な高校物理の内容をまず紹介する

光の偏光とスリット

- 光は電界の振動であり、振動の方向は光路に垂直である(横波)
- 電界の振動方向を**偏光**と呼ぶ
- 光の強度はスリットを通過したときに $\cos^2 \theta$ 倍に減少する(θ : 偏光とスリットがなす角度)
- 特に角度 θ が 45 度のときに半分になり、平行であれば強度は減らない
- スリットを通過した後の偏光はスリットの方向に等しくなる



©OpenStax College, excerpted from <http://cnx.org/contents/0119fe7d-4d1a-42de-b580-aa46659f8228@4/Polarization>

光は粒子(つぶつぶ)の集まりである

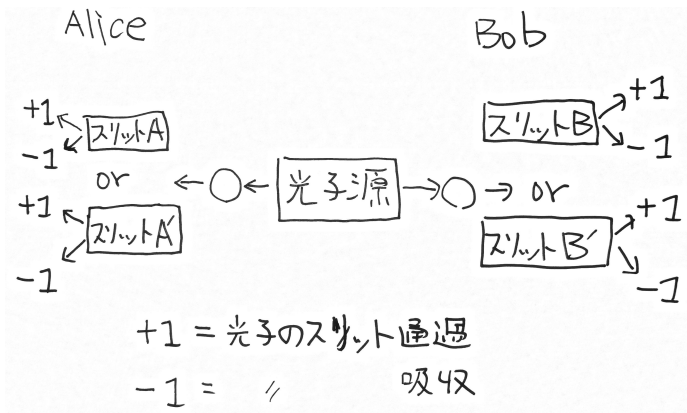
光の粒1つを**光子**とよび、光子はそれ以上分割できない

Q: 光子を1つスリットに通したときに $\cos \theta$ 個通過するのか?

A: 光子が $\cos^2 \theta$ の確率でスリットを通過する。多くの光子が光に含まれるときに、通過する光子の数はもとの $\cos^2 \theta$ 倍になる

スリットを通過した後の光子の偏光はスリットに方向に等しくなる。この現象は、**読み出すと情報が変わる量子力学特有の現象**のもっとも単純なものの一つである

CHSH 不等式の変数



- 確率変数 A, A', B, B' はスリットによる測定結果 (± 1) を表す
- Alice は向きが異なる2つのスリット A および A' をランダムに選ぶ。Bob も同様

実在性を仮定したときの帰結

スリット B の測定をしたときでも、仮にスリット B' を測定した場合の値が(ランダムであるにせよ)存在するはずである。したがって

- $B - B'$ または $B + B'$ のどちらかはゼロ
- ゼロでなかったほうの値は ± 2

したがって期待値の記号 E と、新たに定義する確率変数

$S = AB + A'B - AB' + A'B'$ を用いて

$$E[S] = E[AB] + E[A'B] - E[AB'] + E[A'B'] = E[A(B - B')] + E[A'(B + B')] \leq 2. \quad (1)$$

一方、量子力学は S の標本平均が 2 を超えることを予想し、局所実在性を仮定した予想と異なる。このため、実験によりどちらが妥当な物理理論か検証することができる。

実験の留意事項と困難さ

- 光子は Alice と Bob の場所にほぼ同時に届く必要がある。そうしないと、Alice の測定結果 A, A' に依存して $(B \pm B')$ の値を調整され $S > 2$ されている可能性を排除できない
- Alice と Bob は光子源が光子を打ち出したあとにスリットを選ぶ必要がある。そうしないとスリット選択が光子源に影響し S の値が調整されている可能性を排除できない
- Alice および Bob は相手側の測定結果が光速で伝わる時刻よりも前にスリットを選ぶ必要がある。そうしないと相手側のスリット選択がスリット選択に影響し S の値が調整されている可能性を排除できない

スリット選択などのタイミングが非常にシビアである

量子力学による CHSH 不等式の値

光子源が「量子エンタングルメント」を生成するようにし、スリットの向きをいい感じに調整し(具体的な角度はウィキペディアなどを参照)実験を多数繰り返し、確率変数 $AB, A'B, AB', A'B'$ の標本平均を求め合計するとなぜか $2\sqrt{2}$ となり、量子力学の予言と一致する。

局所性が正しいとすれば、「測定していない値も存在する」と仮定したことが間違いだった。したがって「測定していない値は無い」と考えることが妥当である。

- Bell は実験により量子力学の間違いが実証されると信じていた
- 実験結果がわかるにつれ Bell は実在性ではなくて局所性を捨てるべきだと考えるようになった
- 1990 年には Bell はノーベル物理学賞の候補のなっていたが、受賞する前に亡くなった

出典 http://en.wikipedia.org/wiki/John_Stewart_Bell