# 物理学賞

[受賞者] アラン・アスペ氏 (フランス) **ジョン・F・クラウザー氏** (アメリカ) **アントン・ツァイリンガー氏**(オーストリア)

# 「量子もつれ状態の光子を用いた実験、 ベルの不等式の破れの確立、および 量子情報科学の先駆的研究」について

東京理科大学 理学部第一部 物理学科 教授

に くに <u>一</u>国 徹郎

# ■2022年ノーベル物理学賞の受賞のテーマ

2022年のノーベル物理学賞は、アラン・アスペ (Alain Aspect) 氏 (フランス), ジョン・F・クラウザー (John Francis Clauser) 氏 (アメリカ), アントン・ツァ イリンガー (Anton Zeilinger) 氏 (オーストリア) に授 与された。受賞理由は「量子もつれ状態の光子を用い た実験、ベルの不等式の破れの確立、および量子情報 科学の先駆的研究」によるものである。

#### ■量子もつれとベルの不等式

素粒子、電子、原子などのミクロな粒子の振る舞い は、日常の感覚とはかけ離れた量子力学とよばれる基 本原理に従う。量子力学によると、粒子の性質を表す 量は確率的にしか分からない。例えば粒子の位置は定 まった値をもたないが、測定を行うことによって初め て粒子の位置が確定する。「量子もつれ」は、粒子が 複数あるときに起きる不思議な現象である。例えば光 は量子力学によると光子とよばれる粒子であると考え られている。光子は「偏光」という性質を持ち、「縦 偏光|か「横偏光|の2つの状態をとることができ る。2つの光子が量子もつれの状態にあると、一方の 光子の状態を測定するだけで他方の光子の状態が定ま ってしまう。2つの光子がどんなに遠く離れたとして もこの性質は変わらない。

このような量子もつれの考え方をアインシュタイン (Albert Einstein) は「不気味な遠隔作用」と呼んで批 判した。彼はポドルスキー (Boris Podolsky), ローゼ ン (Nathan Rosen) とともに、1935 年に量子力学の不 完全さを指摘する論文を発表した。これは今日では3 人の名前を取って「EPR パラドックス」と呼ばれて

いる。彼らは、光子の状態は予め決まっていて、我々 が観測するまでその状態を知ることができないだけで あると考えた。この考え方によれば、観測結果を予め 決定している何らかの隠された(我々が知ることのでき ない)情報があるはずである。このような情報はしば しば「隠れた変数」と呼ばれる。

1964 年にスイスの CERN (欧州原子核研究機構) の 理論物理学者ベル (John Stewart Bell) が、隠れた変数 が存在するかどうかを実験で検証可能であることを発 見した。彼は量子もつれ状態にある2つの粒子に対 するある種の測定を考えた。もしも隠れた変数が存在 するならば(すなわち粒子の状態が測定する前から決まっ ていたならば) 何度も実験を繰り返して測定結果を蓄 積した値はある一定の値を超えないことをベルは理論 的に導いた。これをベルの不等式をいう。実験的にベ ルの不等式が破れていることを示すことができれば, 量子もつれの存在が実証できたことになる。

### ■ベルの不等式の破れの実証実験

1969 年にクラウザー, ホーン (Michael Horne), シ モニー (Abner Shimony), ホルト (Richard Holt) の 4 人がベルの不等式を実験で検証しやすい形(CHSR不 等式) に書き換え、量子もつれを検証する実験を行っ た。【図1】に示すように、中央のカルシウム原子か ら量子もつれ状態の2つの光子がそれぞれ左右に放 出される。両側に設置したフィルターでそれぞれの光 子の偏光を測定する。一連の実験の結果は、ベルの不 等式が破れていることを示していた。しかし、クラウ ザーの実験には問題点もあった。それは、フィルター の角度があらかじめ固定されていたため、もしも実験 装置が何らかの方法で、たまたま相関の強い粒子を選 んで,他の粒子を検出しなかった のだとしたら,「隠れた変数」の 存在は完全には否定し切れないと いうことである。

クラウザーの実験の問題点を解 決するために、1982年、アスペ は【図2】で示したような新たな 実験を考案した。量子もつれ状態 の光子が発生源から放出されてか らフィルターに到達するまでに, フィルターの角度をランダムに変 更できるように装置を改良したの である。こうすることにより、実 験装置の設定が実験結果に影響を 与えないようにした。さらに、実 験装置を改良して量子もつれ状態 の光子の生成, 検出効率を上げる ことにより実験をより高い精度で 行えるようになった。このアスペ の実験によってベルの不等式の破 れは実証され、量子もつれは確か に存在し, 隠れた変数は存在しな いことが確かめられた。

アスペの実験では両側のフィルターどうしが比較的近い場所に置かれていたため、フィルターどうしが何らかの要因によって影響し合っている可能性を捨てきれなかった。ツァイリンガーは、【図 3】に示すように遠くの銀河からの信

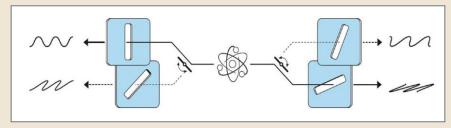
号を使って乱数を発生させてフィルターを選択することによって、フィルターどうしが互いに影響し合わないような実験を行い、この問題を解決した。さらに量子もつれ状態にある光子の放出方法の改良、超高速でフィルターの角度を切り替える装置の開発など、実験方法の大幅な改善に成功した。その結果により量子もつれの存在は完全に実証された。



#### 【図1】クラウザーの実験

中央のカルシウム原子に特殊な光を照射すると量子もつれ状態にある光子が左右に放出される。両側にフィルターを用いて光子の偏光を測定する。一連の測定の後、光子がベルの不等式に反していることが確認できた。

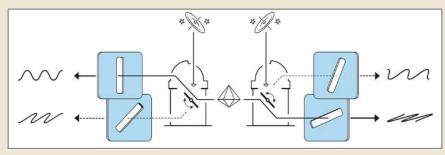
https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/popular-information/



#### 【図2】アスペの実験

クラウザーの実験の問題点を解決するために、フィルターを回転させる装置を埋め込み、光子を放出してから測定に用いるフィルターをランダムに選ぶことで実験結果に影響を与えるような事前情報をシステムに入れないようにした。また、実験装置を改良して量子もつれ状態の光子をより高速に放出させることに成功した。

https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/popular-information/



#### 【図3】ツァイリンガーの実験

遠くの銀河からの信号を使って乱数を発生させてフィルターを選択することによって、フィルターどうしが互いに影響し合わないようにした。この実験では特殊な結晶にレーザーを当てて、もつれた光子のペアを作っている。

https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/popular-information/

能にするものである。このように、3氏による量子もつれに関する研究は、量子力学の解釈という基本的な問題を解決しただけでなく、量子計算機、量子暗号、更には量子インターネットといった最先端の技術の発展につながる重要な意味を持っている。

# ■おわりに

ツァイリンガーはさらに、量子もつれ状態にある光子を使って、遠くの別光子へ量子状態を転送する実験(量子テレポーテーション)や、2組の光子対のもつれ状態を交換させる(エンタングルメント・スワップ)実験に成功した。この技術は、量子情報の長距離伝送を可

1-2001