

# 目次

## 第1章 私、実在の記述は完全でって言ったよね！

物理科学科4回生 中山 敦貴 1

1.1	実在論と量子論 . . . . .	2
1.1.1	局所実在論 . . . . .	2
1.1.2	EPR 論文 . . . . .	2
1.2	隠れた変数理論 . . . . .	5
1.2.1	ベルの不等式 . . . . .	5
1.2.2	アスぺの実験 . . . . .	6
1.2.3	解釈 . . . . .	10
1.3	おわりに . . . . .	11
1.3.1	まとめ . . . . .	11
1.3.2	今後の展望 . . . . .	12
	参考文献 . . . . .	12



## 第 1 章

# 私、実在の記述は完全でって言った よね！

物理科学科 4 回生

中山 敦貴

### はじめに

いつまで経っても量子力学が理解できなくて右往左往していたら、解釈問題にたどり着いてしまった。量子力学の解釈問題といえば、シュレディンガーの猫だとか多世界解釈だとか粒子の波動性だとか、いくつか思い浮かぶものがあるかと思う。興味深い話は色々あるが、それらは一旦置いておいて、ここでは、**実在**というものについて改めて考えてみようと思う。すなわち、古典力学では当たり前のように仮定されていた、(局所) 実在論という考え方が、量子力学の世界では通用しないという話をする。

1.1 節では、重要な概念である局所性について説明したのちに、アインシュタインらによる「量子力学は実在の記述に関して完全でない」という論証を見る。

1.2 節では、局所実在論であれば必ず成立するベルの不等式が、エンタングルメントという量子論特有の性質を持った系では破れてしまうということを見る。1.2.3 節において、それらの事実がどう解釈されるのか考える。

1.3 節では、全体のまとめと、個人的な今後の展望を記す。

この会誌では書ききれなかったことも多いが、そちらは卒論の方に回そうかと思っている。

## 1.1 実在論と量子論

### 1.1.1 局所実在論

ここでは「局所実在論」という立場について説明する。

まず、普通の人々が持っている「世界は見たままに存在している」という世界観を「**素朴実在論**」と呼ぶことにしよう。例えば、「誰も見ていなくても、月は存在している」や「猫は生きているか死んでいるかのどちらかである」のような、モノや状態の実在についての考え方である。当たり前のことすぎるかもしれないが、古典力学<sup>\*1</sup>はそういう立場にあるということだけ覚えておいてほしい。

また、古典力学の最終形態である相対論から、**局所性**という要請がなされる。局所性とは、「空間的に離れた2点間において、何物も光速を超えて伝わることはない」という要請である<sup>\*2</sup>。これが意味することは、遠く離れた2つの系を考えると、ごくわずかな時間であれば独立な系として扱ってよいということである。詳しくは述べないが、この局所性という要請は、「因果律」を守る<sup>\*3</sup>ための条件として、物理の理論には必要とされるものである。

以上のことから、我々は、素朴実在論に局所性を加えた「**局所実在論**」という立場をとることにしよう。局所実在論とはすなわち、因果律を守るような古典論ということである。そして、アインシュタインもこの立場であった。

(図：光円錐)

### 1.1.2 EPR 論文

20 世期初頭、アインシュタインの特殊相対性理論の発表に少し遅れて、量子力学が成立した。この量子力学というものは、これまでの常識を根本から覆すような予測がいくつもなされたが、それらは実験によって確かに正しいということが確認されていった<sup>\*4</sup>。

<sup>\*1</sup> これから話す相対性理論も古典力学の一種である。古典力学でないものは量子力学と呼ばれる。

<sup>\*2</sup> ニュートン力学では重力などの力は一瞬で伝わるものとされていたが、相対論では力であれ何であれ光速を超えて伝わることはないとする。

<sup>\*3</sup> すなわち、ある2つの事象 (event) について、どの慣性系で見てもどちらが先に起きてどちらが後に起きたかは一意的に決まるということ。

<sup>\*4</sup> 検証実験の繰り返しによって理論の正しさを推論するのは帰納法であるから、何度検証を行おうが理論が 100% 正しいと推論することはできない。ただし、もし検証結果が理論の予測と異なる場合に、その理論は正しくないと言論することは演繹法であるから、その理論は 100% 正しくないと断言できる。

科学における推論では演繹法だけでなく、帰納法も用いられているため、一般には絶対的に正しいという推論はできない。しかしこの演繹と帰納の絶妙なバランスこそが、今日の目覚ましい科学の発展の要因のひとつであろうと思う。

そんな中、1935年5月にアインシュタイン・ポドルスキー・ローゼンらは、「量子力学は実在の記述に関して完全でない」という主張の論文を発表した。のちにEPRパラドックス<sup>\*5</sup>などと呼ばれるようになるこの論文の内容について、これから詳しく見ていく。

### EPR 論証（思考実験）

EPR 論文では、まず次の2つを前提としている：

- [1] 完全な理論においては、実在の要素のそれぞれに対する要素が存在する。
- [2] 系を乱さずに値を確率1で予測できる物理量には、それに対応する実在の要素が存在する。

前提 [1] では、完全な理論がどういうものかを定義している。例えば、完全な理論では、もしある電子の運動量が実在するならば、その運動量の測定値を予測できるようなものでなければならない。

前提 [2] では、物理量が実在するとはどういうこのなのかを定義している。例えば、ある電子の運動量の測定値が、ある時刻にはいくらであるかを、その電子にはなんら影響を与えずに予測できるなら、その電子の運動量は**実在する**と言える。

これらの前提を踏まえた上で論証を行う。初めに、次の2つの仮定をする：

- ・ 2つの電子 I, II があり、これらの「位置の差」と「運動量の和」は分かっていると  
する。
- ・ 電子 I と II は、互いに空間的に離れているので、電子 I に対する測定が一瞬で電子  
II の状態に影響を与えることはない。

ハイゼンベルクの不確定性原理として知られているように、一般に非可換な物理量<sup>\*6</sup>に同時に決まった値を持たせることはできない（同時固有状態は存在しない）。しかし、「位置の差」と「運動量の和」の交換関係を調べてみると

$$\begin{aligned} [\hat{r}_I - \hat{r}_{II}, \hat{p}_I + \hat{p}_{II}] &= [\hat{r}_I, \hat{p}_I] + [\hat{r}_I, \hat{p}_{II}] - [\hat{r}_{II}, \hat{p}_I] - [\hat{r}_{II}, \hat{p}_{II}] \\ &= i\hbar + 0 - i\hbar - 0 = 0 \end{aligned}$$

となるので、2つの電子 I, II の「位置の差」と「運動量の和」が同時に分かっているという状況（同時固有状態）はあり得る。よって、1つ目の仮定は量子力学に反していない。また、2つ目の仮定は、前のセクションで述べた局所実在論という立場によるものである。

すると、2つの電子 I, II の「位置の差」が分かっているのに、電子 I の位置を測定するこ

<sup>\*5</sup> 実際は、この論文にパラドックス（矛盾）はない。

<sup>\*6</sup> 量子力学では、物理量と測定値の概念は区別される。物理量はエルミートな演算子（行列）であり、測定値はその固有値（ただの数）とされる。線形代数で習ったように、行列は一般には非可換であるから、物理量も一般には非可換である。

とで、電子Ⅱの系を乱すことなく、電子Ⅱの位置も測定することができるはずである。また、運動量についても同様である。

ここで、前提 [2] より、電子Ⅱの位置と運動量はともに実在の要素であると言える。

ところが、電子Ⅱの位置と運動量は非可換な物理量であるから、位置と運動量の同時固有状態は存在しない。すなわち、量子力学の理論では、電子の位置と運動量という実在の要素に対して、それらに対応する要素（固有状態）を同時に用意することはできない。

よって、前提 [1] より、量子力学は完全な理論でないと結論づけられる。

### EPR 論証に対する反応

ここで行った論証は、量子力学という理論は実在の記述に関しては完全でないという主張を示したものであって、決して量子力学が間違っているといった主張ではない。さらに言えば、「完全な理論」や「実在」という概念も上で定義した意味で用いているのであって、この定義が妥当かどうかにも議論の余地がある。

物理量の実在に関して、ボーアは「どの物理量が実在するかは実験の状況に依存する」という意見を持っていた。すなわち、電子の位置を測定するときには確かに電子の位置は実在しているが、この状況においては電子の運動量は実在していないということである。このように、どの物理量を測定するかによって、どの物理量が実在するか変わってしまうというボーアの解釈は、今日では様相解釈の一種とされる。

これに対し、アインシュタインらは、もし EPR 論文での実在の定義が妥当でないにしても、どのような実験をするかによって物理量の実在性が決まるといった議論は認められないとしている。そのようなものは、もはや実在とは呼べないということであろう。

また、現在では電子ⅠとⅡの間に非局所的な相関があったと解釈するのが主流である（コペンハーゲン解釈）。この解釈の相対論との整合性は、1.2.3 節で説明することにする。

EPR 論文が発表された当時は、このような議論は形而上学の問題<sup>\*7</sup>であるとされ、多くの物理学者からは無視されていた。また、物理量に実在を持たせるため、既存の量子力学に代わるようなものとして、隠れた変数理論<sup>\*8</sup>というものがいくつか提案された。しかし、どれも既存の量子力学と同じ予測能力しかなく、やはりこれもただの解釈問題とされてきた。

このような状況の中、1964 年にベルはある論文を発表する。それは、「局所的な隠れた変数理論であれば、ある不等式（ベルの不等式）を必ず満たすが、（既存の）量子力学で考えるとこの不等式を満たさない場合がある」ということを示すものであった。すなわち、

<sup>\*7</sup> 反証可能性のないただの哲学の問題であって、どのような解釈をしようが結果は同じということ。それに対し、物理学は形而下学とも呼ばれる。

<sup>\*8</sup> 既存の量子力学では、系の時間発展が一般には確率的にしか予測できないということ（射影公準）は公理に含まれているが、この性質は統計的なものであって、本当は未だ観測されていない隠れた変数が存在し、それによって系の時間発展は決定論的に予測できるとする理論。

局所的な隠れた変数理論（局所实在論）と量子力学では異なる予測をするということが分かったのである。このことは、自然を正しく記述する局所的な隠れた変数理論が存在するか否かを、実験で（科学的に）検証できるということを意味する！

その後、アスペによる検証が行われ、自然は量子力学の予想通りベルの不等式を破ることが実証された。それによって、自然を正しく記述することができる局所的な隠れた変数理論は存在しないということが示された。すなわち、局所性を満たすどんな隠れた変数理論を作ったとしても、それで自然を正しく記述することはできない。それができるのは、（今のところ）量子力学だけである<sup>\*9</sup>。

このベルの不等式とアスペの実験については、これから詳しく見ていく。

## 1.2 隠れた変数理論

このセクションでは、局所的な隠れた変数理論あれば必ずベルの不等式を満たすことを証明する。さらに、量子力学の理論で考えると、ベルの不等式を破る場合があることを示す。のちに、アスペによる検証で、実験的にベルの不等式が破れる場合があることを認めざるを得なくなる。もちろん、物理学は実験科学であるから、経験を否定することはできない。

まずは、局所的な隠れた変数理論において、ベルの不等式が成り立つことを示そう。

### 1.2.1 ベルの不等式

ベルの不等式（ベル型の不等式）にはいくつか種類があるが、ここではベルのオリジナルのものではなく、CHSH<sup>\*10</sup>不等式と呼ばれるものを示すことにする。

#### 不等式の証明

表 1.1 のように  $x, \theta, \phi$  の 3 列に  $+, -$  を好きに割り振るゲームを考える。この表の中で  $x$  と  $\phi$  にそれぞれ  $+$  があるものの個数を  $n(x = +, \phi = +)$  のように書くと、次の不等式が必ず成り立つ：

$$n(x = +, \phi = +) + n(\phi = -, \theta = +) \geq n(x = +, \theta = +). \quad (1.1)$$

証明：

表 1.1 において  $n(x = +, \phi = +)$  は、 $\theta = +$  の場合と  $\theta = -$  の場合の和で書けるはずであ

<sup>\*9</sup> 自然を正しく記述できる局所实在論が存在しないという推論は、演繹法であるから 100% 正しい。しかし、そのことは量子力学の正しさを論理的に保証するものではない。この検証によって量子力学はただ生き残っただけであり、その正しさが増したと主張する根拠は論理的には全くない。とはいえ、感覚的には確かに量子力学の信頼性は向上したように思える。

<sup>\*10</sup> John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony, and Richard Holt.

表 1.1  $+$ ,  $-$  の割り振り

$x$	$\theta$	$\phi$
$+$	$+$	$-$
$-$	$+$	$+$
$-$	$-$	$-$
$+$	$+$	$-$
$+$	$-$	$+$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

る<sup>\*11</sup>。すなわち

$$n(x = +, \phi = +) = n(x = +, \phi = +, \theta = +) + n(x = +, \phi = +, \theta = -). \quad (1.2)$$

同様にして

$$n(\phi = -, \theta = +) = n(x = +, \phi = -, \theta = +) + n(x = -, \phi = -, \theta = +), \quad (1.3)$$

$$n(x = +, \theta = +) = n(x = +, \phi = +, \theta = +) + n(x = +, \phi = -, \theta = +). \quad (1.4)$$

(1.2) と (1.3) の和と (1.4) を比較すると、(1.2) と (1.3) の第 2 項の分だけ (1.4) の方が小さい。よって、ベルの不等式 (1.1) が成り立つ。□

### 1.2.2 アスぺの実験

Ca 原子から放出される 2 つの光子を検出する実験を考える。すると、量子論から予想される値を用いたのでは、ベルの不等式が破れてしまう場合があることが導かれてしまう。自然をより正しく記述するのは局所实在論か量子論か、それらは実験によって判断される。そして、アスぺによる検証で、後者が正しいことが示された。

このことについて詳しく見ていく。まずは、光子の性質から確認していこう。

#### 光子の偏光

光子の電場の振動の方向を、光子の偏光と呼ぶ<sup>\*12</sup>。光子の進行方向、電場（偏光）および磁場の方向は、それぞれ互いに直交している（図 1.1）。

また、偏光子<sup>\*13</sup>と呼ばれるものが存在し、次のような性質を持つ：

<sup>\*11</sup>  $n(x = +, \phi = +)$  と書いたとき、隠れた変数である  $\theta$  の値については何も言及されていない。实在論の立場では、たとえ隠れていようが、 $\theta$  は必ずある値（ $+$  か  $-$  のどちらか一方）を持っているものとする。

<sup>\*12</sup> 光子は粒子だが、波動としての性質（偏光）も同時に持っている。

<sup>\*13</sup> サングラスとかに使われる偏光板のようなものだと思えば良い。



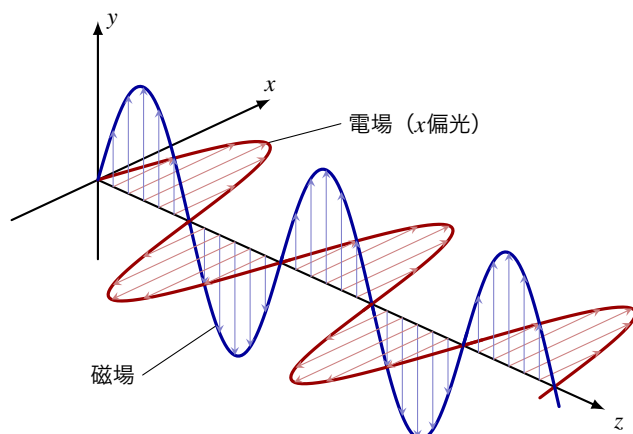


図 1.1 光子の偏光。進行方向を  $z$  軸とし、 $x$ - $y$  平面内の偏角で偏光軸を表現する。

- 偏光子を通過した後の光子の偏光は、偏光子の偏光軸と一致する。
- 量子力学によると、光子が偏光子を通過する確率は、光子と偏光子の偏光軸のなす角を  $\theta$  として

$$P(\theta) = \frac{1}{2} \cos^2 \theta \quad (1.5)$$

と書ける。

### Ca 原子の放射光の検出

Ca 原子にレーザー光を照射して、特定のエネルギーレベルに励起させると、基底状態に戻る際に 2 個の互いに直交した偏光を持つ光子（緑色と紫色）が放出される<sup>\*14</sup>。

以上を踏まえ、図 1.2 のような装置で 2 つの光子を検出することを考える。

### 検出器の偏光軸

光子の進行方向を  $z$  軸正の向きとし、水平方向に  $x$  軸、鉛直方向に  $y$  軸をとる<sup>\*15</sup>。p 検出器と g 検出器に付いている偏光子の偏光軸は、図 1.4 のように、それぞれ 2 種類の設定を使う。

<sup>\*14</sup> これについても、ここでは実験事実として認めていただきたい。

<sup>\*15</sup> 実験系に固定した座標系を取るのではなく、光子それぞれに対して座標系を取ることに注意。g 光子と正反対の方向に進行している p 光子との間では、それぞれの座標系の  $y$  軸の方向は同じだが、 $x$  軸と  $z$  軸の方向は逆向きになっている。

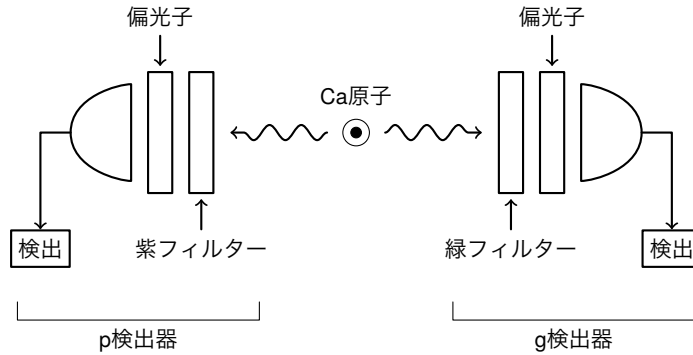


図 1.2 Ca 原子から出た 2 つの光子の偏光を検出する装置。

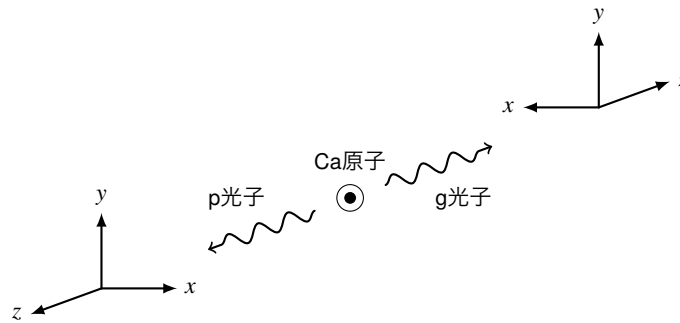


図 1.3 偏光を表すための座標軸の設定。

### 光子の測定

p 検出器の偏光子の偏光軸を y 軸方向に (1.4b)、g 検出器の偏光軸を x 軸から  $\phi$  だけ回して (1.4c) セットし、単位時間あたりに両検出器が**同時に**光子を検出する回数  $n(x = +, \phi = +)$  を観測する。同様に、検出器の偏光子の偏光軸を (1.4a) と (1.4d) にセットしたときの  $n(x = +, \theta = +)$  と、(1.4b) と (1.4d) にセットしたときの  $n(\phi = -, \theta = +)$  を観測する<sup>\*16</sup>。

単位時間あたりに p 検出器が検出する光子の数を  $N (\gg 1)$  個とすると、**同時に** g 検出

<sup>\*16</sup> (1.4b) と (1.4c) の組み合わせの場合は、それぞれの検出器の偏光子の偏光軸が平行なので  $n(\phi = -, \phi = +) = 0$  である。(引数の表記からも明らかであるが。)

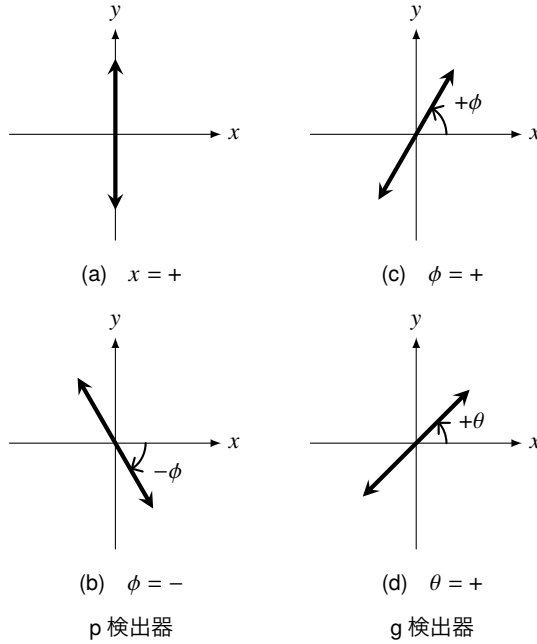


図 1.4 p 検出器と g 検出器の偏光子の偏光軸の方向。

器が光子を検出する数<sup>\*17</sup>は、量子力学で示される式 (1.5) からそれぞれ

$$n(x = +, \phi = +) = N \cos^2 \phi, \quad (1.6)$$

$$n(x = +, \theta = +) = N \cos^2 \theta, \quad (1.7)$$

$$n(\phi = -, \theta = +) = N \cos^2(\phi + \pi/2 - \theta) = N \sin^2(\phi - \theta) \quad (1.8)$$

であると予想される<sup>\*18</sup>。

### ベルの不等式の破れ

上で示した (1.6) から (1.8) を、ベルの不等式 (1.1) に代入すると、次のようになる：

$$\cos^2 \phi + \sin^2(\phi - \theta) \geq \cos^2 \theta.$$

<sup>\*17</sup> つまり、p 光子が観測されたときに、同時に g 光子も観測されるという確率に  $N$  をかければ良い。

<sup>\*18</sup> 例えば、検出器の偏光軸を (1.4a) と (1.4c) にセットしたときでは、p 光子が観測される確率が 1 であるなら、g 光子の偏光は  $x$  軸であるので、g 光子と g 検出器の偏光子とのなす角は  $\phi$  である。(1.4a) と (1.4d) にセットしたときも上と同様に考えればすぐにわかる。(1.4b) と (1.4d) にセットしたときは、p 光子が観測される確率が 1 であるということは、p 光子の偏光は (p 検出器の座標系で)  $x$  軸から  $-\phi$  だけ傾いているから、それと直交している g 光子の偏光は (g 検出器の座標系で)  $x$  軸から  $\phi + \pi/2$  だけ傾いている。よって、g 光子と g 検出器の偏光子のなす角は  $\phi + \pi/2 - \theta$  である。

ここで、 $\phi = 3\theta$  とし、右辺を左辺へ移項すると

$$\cos^2 3\theta + \sin^2 2\theta - \cos^2 \theta \geq 0 \quad (1.9)$$

となる。しかし、左辺を  $\theta$  の関数として図示すると、 $0 < \theta < 30^\circ$  の範囲で不等式を満足しないことがわかる（図 1.5）。

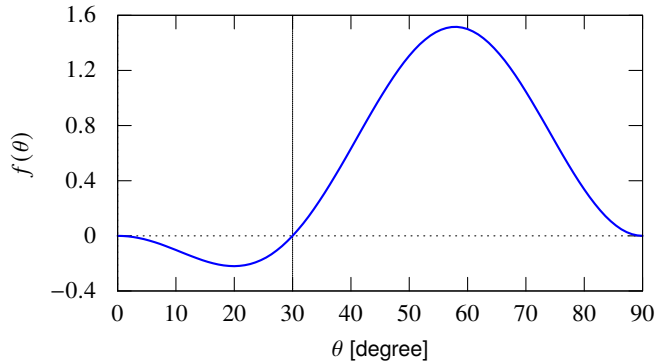


図 1.5 不等式の左辺  $f(\theta) = \cos^2 3\theta + \sin^2 2\theta - \cos^2 \theta$  のプロット。  
 $0 < \theta < 30^\circ$  のとき  $f(\theta) < 0$  である。

ここで、局所实在論と量子論とによる予想の間で矛盾が生じている。もし隠れた変数が存在するならば、必ずベルの不等式を満たす。しかし、量子力学の理論では、ベルの不等式を破る場合がある。

初めにも述べたとおり、結局、アスペらによる検証実験によって、量子論の予想通りベルの不等式を満たさない場合があることが示された。さらに、実験によって得られた値は、量子論で予想された値とピッタリと一致した<sup>\*19</sup>。この実験結果によって、自然を正しく記述できる局所实在論（隠れた変数理論）の存在は否定され、量子論の信頼性はより強固なものとなった。

### 1.2.3 解釈

最後に、以上の結果がどのように解釈されるかを改めて述べることにする。

アスペの実験において、例えば、 $n(x=+, \phi=+)$  を測定したとき、 $\theta$  が何であったかには言及していない（測定していない）。一方、ベルの不等式を導く際は、 $\theta$  は隠れているだけで、 $\theta$  は + か - どちらか一方の値を持っているはずだと仮定していた。しかし、両者の不整合から、実はこの仮定が間違っており、3 列に +, - を割り振るゲームと、アスペの実

<sup>\*19</sup> もちろん、エラーバーはあるが、標準偏差は不等式の破れに比べて何倍も小さいものであったらしい [9]。

験で考えた状況は異なるものであったといえる。つまり、測定していない物理量に対し、確定したある値を常に持っている（実在している）とするのは間違いなのである。

しかし、古典論では物理量に実在を持たしても問題はなかった。量子論は古典論を含む理論であるから、このような不可解な現象は量子論特有のものであると言える。上の説明ではさらっと流してしまっただが、Ca 原子から放出される 2 つの光子の偏光は必ず直交しているという事実が、ここでのポイントなのである。一方の光子の偏光が分かると、もう一方の光子の偏光も瞬時に分かるということは、ここには非局所的な相関があることになる。このような状態にある 2 つの光子は**エンタングル (entangle)** しているという<sup>\*20</sup>。

現在主流のコペンハーゲン解釈では、相対論からの要請を周知の上で、エンタングルメントのような非局所的な相関が、この自然に存在することを認めている。では、この解釈はどう相対論と整合するのであろうか。ここで、相対論から要請される局所性とは、情報伝達可能性のことであると解釈される。つまり、エンタングルメントのような非局所的な相関を用いて、超光速な情報伝達が可能であるかどうかが問題となる。しかし、実際、エンタングルメントのような非局所的な相関を用いても、超光速な情報伝達はできないとされている。よって、因果律を破るような非局所的な相関はないので問題ないと結論づけられる<sup>\*21</sup>。

## 1.3 おわりに

### 1.3.1 まとめ

以上の内容を箇条書きでまとめておく：

- 1935 年、アインシュタインらは、量子力学が不完全であることを論証する EPR 論文を発表した。しかし、物理量の実在は形而上学の問題だと思われていた。
- 1964 年、ベルによって、局所的な隠れた変数理論であれば、必ずベルの不等式を満たすことが示された。つまり、物理量の実在の問題は、科学的に解決できる。
- 1982 年、アスペらによる、偏光軸が直交した（エンタングルした）2 つの光子を用いた検証実験で、ベルの不等式を満たさない場合があることがわかった。つまり、局所的な隠れた変数理論（局所実在論）では記述できないような現象があることが科学的に示された。
- 現在主流のコペンハーゲン解釈では、非局所的な相関を認めている。しかし、非局所相関を認めても超光速通信はできないので、相対論には反しないと考えられている。

---

<sup>\*20</sup> 量子エンタングルメント、量子もつれ、絡まっているなどともいわれる

<sup>\*21</sup> 超高速な情報伝達の可能性についての議論は、参考文献 [9] を見てもらうということで。

- ・量子力学では、ベルの不等式が破れるような現象も問題なく予測できる。つまり、量子力学は古典論を含み、かつ実在論を超えた理論であるといえる\*22。

### 1.3.2 今後の展望

上で見た通り、量子力学の経験的正しさを認めるなら、局所的な隠れた変数理論は存在しないということが示された。この一連の流れは、ベルの定理と呼ばれることもある。ベルの定理のような、～～できないという内容の定理は一般に NO-GO 定理と呼ばれる。

関連したものとして、コッヘン・シュベッカーの NO-GO 定理がある。その内容は、量子力学の経験的正しさを認めるなら、**状況に依存した**隠れた変数理論は存在しない、というものである。つまり、もし物理量が実在しているなら、それは測定の状況（何を測定するか）には依存するようなものではないということである。

まあ私はもう4回生なので、形だけでも卒論を書かなくてはならない。春学期に学んだことをとりあえず会誌として output したが、これらの話をもう少し発展させれば卒研として認めていただけるかと思っている。このような問題を扱っている教科書では、大抵、EPR 論証→ベルの不等式→コッヘン・シュベッカーの NO-GO 定理→解釈問題というような順序で話が展開されている。こんな私にも、物理屋としての誇りはまだ微かに残っているので、卒研では、形而上学寄りな解釈問題にはあまり触れず、あくまで物理学や科学の問題として、これらの問題をまとめられれば良いかなと考えている。

## 参考文献

- [1] 清水明、『新版 量子論の基礎』、サイエンス社、2004。
- [2] 清水明、スライド『EPR パラドックスからベルの不等式へ』、  
([http://as2.c.u-tokyo.ac.jp/lecture\\_note/kstext04\\_ohp.pdf](http://as2.c.u-tokyo.ac.jp/lecture_note/kstext04_ohp.pdf))。
- [3] J.J. サクライ、『現代の量子力学（上）』、吉岡書店。
- [4] 森田邦久、『アインシュタイン vs. 量子力学』、化学同人。
- [5] 森田邦久、『量子力学の哲学』、講談社現代新書。
- [6] 白井仁人・東克明・森田邦久・渡部鉄兵、『量子という謎』、勁草書房、2012。
- [7] 小澤正直、『量子と情報』、青土社、2018。
- [8] 宮野健次郎、古澤明、『量子コンピュータ入門』、日本評論社、2019。
- [9] 荒船次郎 他、『現代物理学の歴史 I』、朝倉書店。
- [10] 戸田山和久、『科学哲学の冒険』、日本放送出版協会、2005。

\*22 次のような包含関係にある：古典論  $\subset$  実在論  $\subset$  量子論。