



窮理の部屋 199

2022年ノーベル物理学賞(その5)

1. EPRパラドックス

スピン0の状態とは、 $\uparrow\downarrow$ と $\downarrow\uparrow$ が重ね合わされた状態でした。どんなに離れたところで測定しても、Iで \uparrow ならIIでは \downarrow 。Iで \downarrow ならIIでは \uparrow でした。

この実験を何度も何度も繰り返したとします。仮にIでの結果が、 $\uparrow\downarrow\downarrow\uparrow\downarrow\uparrow\uparrow\downarrow$ だったとすれば、量子もつれがあるので、IIでの結果は必ずその逆の $\downarrow\uparrow\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow\downarrow\uparrow$ になっています。もし、測定前には状態が定ま

っていないのなら、サイトIでの測定結果がサイトIIに瞬時に伝わり、サイトIIの結果を決めたかのようにも見えます。しかし、光よりも速く情報が伝わるはずがありません。IとIIの距離が十分離れているとき、Iの測定がIIに影響を与えないことを「局所性」と呼びます。局所性は相対論からの要請です。

局所性が成り立つのであれば測定する前から、あるいは測定しようがしまいが、最初から結果は決まっていたと考えなければなりません。測定に関係なく状態が定まったブツが存在する。これを「実在性」と呼びます。この2つが成り立つことを局所実在性、あるいは素朴実在論と呼びます。古典物理は素朴実在論が成り立つ世界です。

ところが、量子論は、測定する前には状態が決まっていないことが建前です。素朴実在論とは相いれないのです。決まった結果を予測できず、確率分布でしか自然を表すことができない量子力学は、古典物理から見て完全な理論と呼べるのでしょうか？

さらにIIの測定器を90度回転してx軸に沿った向きで測定したら、その結果はどう解釈できるのでしょうか？仮にIは下 \downarrow だったとします。このIでの測定は、IIでの状態を乱していません。そしてIIは前 \leftarrow だったとします。すると、Iは \downarrow かつ \rightarrow 、IIは \uparrow かつ \leftarrow なのではないでしょうか？量子力学は、z軸方向のスピン向きとx軸方向のスピン向きは同時には決められないはずですが、ここでは同時に決まってしまったようにも見えます。これら2つの量を同時に決めることができないとする量子論は不完全な理論なのではないでしょうか？

2. 量子力学を超える?? 決定論的な隠れた変数

ひょっとしたらミクロな世界でも観測しようがしまいが状態は決定論的に決まってい

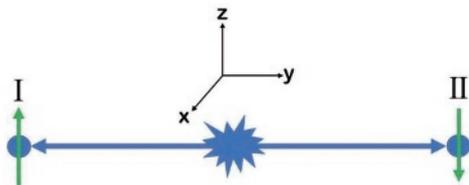


図3(再掲). もしIで測定して \uparrow なら、IIでは必ず \downarrow もしIで \downarrow ならIIでは必ず \uparrow 。

のだけれど、量子力学は不完全であるが故に確率的にしか結果を言えないのではないのでしょうか？

隠れた変数 λ というものがあつたとします。 λ はまだ発見されてないし、今後発見できないかもしれない、 λ の値を決定する法則も理論も分かりません。しかし、未知の λ というパラメータが実験結果を決定しているという仮説です。

ここでは λ は $\lambda_1 \sim \lambda_4$ まで4つの値があり、2電子系が分裂するとき、それぞれの電子に同じ λ の値が同じ確率で(なぜそうなるのか我々は知らないけれど)付与されるとします。

λ_1 が付与された場合、I でz方向のスピンを測れば必ず \uparrow 、x方向のスピンを測れば必ず \rightarrow 、そしてIIでは \downarrow だし \leftarrow

です。表1のように決めておけば、実験事実を完璧に再現できます。量子力学と違うところは、量子もつれなど必要としないし、決定論的です。ただ、我々は λ の値がどのようにして決まるのか法則や理論をまだ知らないだけです。

ここでは、スピンを測る向きを90度回転させましたが、I は30度で、II を60度回転させるなんかであつたりするかもしれません。すると λ の値は4つでなく離散的でもなく連続的なのかもしれません。 λ の他に λ' 、 λ'' なんてものがあつるのかもしれません。

得体のしれないものを導入するのは気持ち悪いし、どういう法則に従うのかも分かりません。でも、慣れ親しんだ素朴実在論を捨てなくてもいい、確率でしかモノが言えない奇妙な量子論よりマシなのではないのでしょうか？

隠れた変数理論がミクロな世界を、我々の知りうる実験事実を、量子力学と同じ結果を与えるのなら、どちらの理論も正しく、ひとつの理論を違う方向から見ただけなのかもしれません。量子力学でハイゼンベルグがやった行列を使ったものと、シュレーディンガーのように波動を使ったものが等価であつたように。

でも、量子力学と隠れた変数理論は本当に同じ理論なのでしょう吗？もし、量子力学と隠れた変数理論が上記実験のようにいつも同じ結果を与えるなら片方は確率的、片方は決定論的ですが、どちらで解釈してもいいということになるのでは？測定するまで状態が決まっていなかったんだ、なんて解釈は捨てて、これまでどおり素朴実在論でいけるのではないのでしょうか。

いつでも、同じ結果を与えることができるのなら……！

	I		II	
	σ_z	σ_x	σ_z	σ_x
λ_1	\uparrow	\rightarrow	\downarrow	\leftarrow
λ_2	\uparrow	\leftarrow	\downarrow	\rightarrow
λ_3	\downarrow	\rightarrow	\uparrow	\leftarrow
λ_4	\downarrow	\leftarrow	\uparrow	\rightarrow

表1. λ は $\lambda_1 \sim \lambda_4$ のいずれかであり、それぞれ装置でスピンを測定したときどんな値になるか決まっている。