

時間もつれとスピンもつれの統計解釈

白井仁人(Hisato SHIRAI)
一関工業高等専門学校

量子力学が示す内容は実在主義と相容れないと考えられている。その理由は、実在主義の考え方と量子力学から導出される NOGO 定理が矛盾するからである。実在主義の考え方とは、「物質は我々が観測するかどうかに関係なく存在し、何らかの確定した物理量の値を常に持っている」とするものである。量子力学から導出されるベルの定理などの NOGO 定理はこの考え方を完全に否定する。現在では、NOGO 定理は実際の実験で確かめられ実在主義は否定されたと考えられている。では、本当に実在主義に基づいて量子力学的な世界を理解することは不可能なのだろうか。本当に物質や宇宙は我々の観測と独立には存在していないのだろうか。

ベルの定理やコッヘン-シュペッカーの定理など NOGO 定理が主張する内容を振り返ると、その核は非可換物理量の同時非確定値性である。つまり、物質は位置と時間など可換な物理量の組だけならば、我々の観測と関係なく常に値を持つと考えることができるが、しかしそれらと非可換な（運動量のような）物理量も同時に値を持つと考えることはできない。したがって、実在主義を維持するためには、物質は何らかの物理量の値を常に持つが、その物理量と非可換な全ての物理量の値はいかなるときも持たないと考えなければならない。これは逆に、全ての物理量のうち半分の実在性を捨てれば、残りの半分の実在性を保持でき、それによって量子力学と実在主義の間の矛盾を解消できる可能性があるということである。

この可能性を追求したのが、著者が提案する新しい統計解釈（統計力学的アプローチ）である。新しい統計解釈では、位置や時間、角度、スピン内部自由度などは個別の系が持つ実在的な物理量だが、それらと非可換な運動量やエネルギー、角運動量、スピン角運動量などは系の統計性から派生した非実在的な物理量だと考える。今までの発表で、この解釈が量子力学の諸形式と整合的であることやこの解釈により各種 NOGO 定理を克服できることを示してきた。

本発表では新しい統計解釈の立場から、特に、「量子もつれ状態」について議論する。量子もつれ状態はベルの定理や CHSH 定理など NOGO 定理の理論的導出や実験的証明に用いられる状態であり、実在主義の可能性（不可能性）と密接に関係している。量子もつれ状態とは2つの系が相関付けられた状態（もつれた状態）のことであり、次のように表せる。

$$A,B = \{ A(X_1) \cdot B(Y_1) - A(X_2) \cdot B(Y_2) \} / 2 \quad (1)$$

系の状態がこのように表されているとき、系 A を観測して X の値が X_1 とわかれば、系 B を観測しなくても Y の値は Y_1 だとわかる。同様に、系 A の観測で $X = X_2$ だとわかれば、必然的に系 B は $Y = Y_2$ の値を持つことになる。量子もつれ状態の大き

な特徴は基底（測定量）を変えられることである。例えば、

$$\begin{aligned} A(Z_{\pm}) &= \{ A(X_1)_{\pm} \ A(X_2) \} / \sqrt{2}, \\ B(W_{\pm}) &= \{ B(Y_1)_{\pm} \ B(Y_2) \} / \sqrt{2} \end{aligned}$$

とすると、上の（１）の状態は

$$A,B = \{ A(Z+) \cdot B(W-) + A(Z-) \cdot B(W+) \} / \sqrt{2} \quad (2)$$

と表せる。もしも $A(Z_{\pm})$ や $B(W_{\pm})$ を系 A が物理量 Z に対し値 Z_{\pm} を持つ状態、系 B が物理量 W に対し値 W_{\pm} を持つ状態と見なせるのであれば、系 A に対する物理量 X と Z (B に対する物理量 Y と W) は互いに非直交だから非可換な物理量ということになる。

アインシュタインら (EPR) は量子もつれ状態 (位置と運動量のもつれ) の例を持ち出し、実在主義の立場から次のように主張した。「系 A に対して X や Z を測定するとき系 B の観測は行わないのだから系 B は擾乱を受けない (局所性の仮定)。そして、系 A の測定により系 B を乱すことなく Y や W の値が確実に予測できるのだから Y や W は実在の要素である (実在性の基準)。また、量子力学が完全ならば実在の要素を全て同時に含むはずである (完全性の基準) が、量子力学はそれら全てを同時に含まない。よって、量子力学は不完全である。」これが EPR の主張である。ベルは量子もつれ状態 (スピンもつれ状態) にある 2 粒子について考察した。彼はもつれた 2 粒子が各方向に対して確定したスピンの値を持つという実在主義的な仮定から一つの不等式を導出し、量子力学からの理論的な予測がこの不等式を破っていることを示した。その後、ベルの不等式の破れはアスペの実験などによって間接的に証明された。これは系が確定したスピンの値を持つという実在主義的な仮定が成り立たないことを示している。

新しい統計解釈では、スピンもつれ状態の存在とそれがベルの不等式を破っているという事実は矛盾を招かない。それは、新しい統計解釈がスピン角運動量を実在的な物理量 (個別の系が確定した値を持つような物理量) だと見なさないからである。では、もしも位置や時間のように新しい統計解釈において実在的と見なされる物理量 (個別の系が確定した値を持つ物理量) に対して量子もつれ状態が存在した場合、それは矛盾を招かないだろうか。ここが今回議論したい点である。そして、その答えは「矛盾を招かない」というものである。その理由は、位置や時間に対する量子もつれ状態 (位置時間もつれ状態) が存在した場合、その基底 (測定量) を変えて (2) のような新しい表現に変換できるが、新しい基底に対応する物理量 (Z, W) はもはや位置や時間ではありえず、必ず位置や時間と非可換な物理量となるため、我々が非実在的と見なしたグループの物理量となるからである。

スピンの場合には、初めに与えられたスピンもつれ状態 (1) を変換して (2) のもつれ状態にしたとき、そこに現れた測定量 Z や W は元の物理量 (スピン) と同じであった。そのため、全方向にスピンの値を割り振ることができないこと (ベルの定理) からスピンは非実在的と結論せざるを得なかった。しかし、位置時間もつれ状態の場合、(1) を変換して (2) にしたとき、そこに現れる測定量 Z や W は元と同じ物理量 (位置や時間) ではありえない。よって、Z や W を非実在的な物理量と見なせば、位置や運動量を実在的と見なせることになり、実在主義が保たれることになる。