

論文内容の要旨

Experimental Test of Bell's Inequality via the $^1\text{H}(d, ^2\text{He})n$ Reaction

($^1\text{H}(d, ^2\text{He})n$ 反応によるベルの不等式の実験的検証)

氏名 齋藤 孝明

1935年にアインシュタイン、ローゼン、ポドルスキーの3人 (EPR) が、量子力学のいわゆるエンタングルメントに関して根本的な問題提起をしたのは有名である。彼らはある思考実験を考えて、量子力学による自然界の記述は完全ではないと結論づけた。EPRの言う完全な理論とは、全ての「物理的実在」の要素に対応して理論の中にも対応する要素が必ず存在するような理論である。また、2つの系が十分遠く離れていれば、一方の系に対して行った観測が他方に影響を及ぼすことはないことを仮定した。量子力学では、例え系の物理状態が確定していても、ある物理量の測定結果が原理的に100%の確率では予測できない場合があり、また、2つの系がエンタングルした状態にあれば、一方に対して観測を行えば、その瞬間に離れたところにある他方の系の状態も確定することがある。このような意味で、量子力学は不完全な理論であると結論づけたのである。

EPRの仮定を満たす完全な理論を「局所実在論」と呼び、量子力学を古典論の立場から再解釈できるような局所実在論を構築しようとする試みがなされたことがあった。しかし、そのような局所実在論は、量子力学の予言を完全に再現することは不可能であることが1964年にベルによって示された。2つの系が量子力学的にエンタングルした状態にある場合、ある物理量に関する2つの系の間に関連は、局所実在論では説明し得ないほど強くなることがあることが、不等式の形で証明されたのである。

ベルの不等式の発見以来、その不等式の検証実験が、エンタングルした2つの光子の偏光状態の相関を測定する方法で数多く行われ、ほとんどの実験が、局所実在論を否定する結果(すなわち、ベルの不等式が破れる)を得ている。しかし、光子以外の系を用いた検証実験は数少なく、特にスピン1/2の粒子系での実験は、1976年のLamehi-RachitiとMittig (LRM) らによる低エネルギー陽子-陽子弾性散乱を用いた実験のみである。LRMは、散乱によって 1S_0 状態に組んだ2陽子の偏極の相関を測定してスピン相関関数を導出し、ベルの不等式の破れを99.4%の信頼度で検証している。

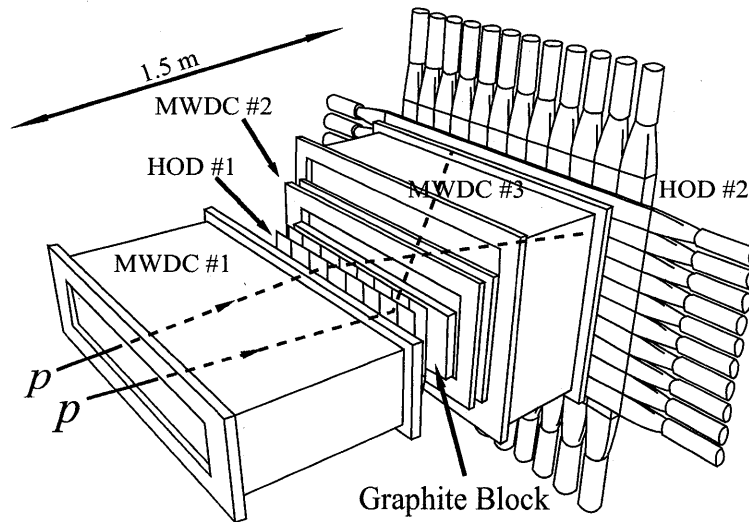


図 1: 焦点面陽子偏極度計 EPOL。

しかし、LRMの実験では陽子のスピンの測定軸の設定に根本的な問題があり、2陽子が必ずしもエンタングルした状態になくとも同じ結果を得ることがあると我々は考えている。

光子を使った実験と異なり、核反応によってエンタングルした粒子対を生成した場合、それぞれの粒子の「波束」の大きさを fm のオーダーにまで小さくすることができる (光子の実験の場合は m 程度)。したがって、2粒子の特徴的な「相関長」と、実際に相関を測定するときの2粒子間の距離の比を、光子の場合よりも桁違いに広げることができる。相関長と比べてこれほど遠く2粒子が互いに離れても、スピン状態に関するエンタングルメントが維持されることを実験的に検証することは非常に興味深い。

また、我々とLRMの実験以外の全ての検証実験は、電磁気相互作用によってエンタングルした粒子対を生成していた。強い相互作用による系に対しても検証実験を行うことは重要である。

以上の目的で、我々は $E_d = 270 \text{ MeV } ^1\text{H}(d, ^2\text{He})n$ 反応を用いて、 1S_0 状態に組んだ2陽子のスピン相関の測定を行った。 $(d, ^2\text{He})$ 反応とは、標的核に重陽子が入射し、終状態相互作用によって 1S_0 状態に組んだ陽子対 (^2He) が同時に出てくる反応である。この反応では、2陽子の相対エネルギーを小さく保ち、高い純度の 1S_0 状態を維持したまま、実験室系での陽子の運動エネルギーを高くすることができる。こうすることで、陽子の偏極の測定が容易になるという利点がある。高純度の 1S_0 状態の陽子対を生成するという点では、重陽子の角運動量 $J^\pi = 1^+$ が残留核の基底状態に完全に移行する $^{12}\text{C}_{g.s.0^+}(d, ^2\text{He})^{12}\text{B}_{g.s.1^+}$ や、 $^6\text{Li}_{g.s.1^+}(d, ^2\text{He})^6\text{He}_{g.s.0^+}$ 反応の方が適している。しかし、これらの反応では水素標的の場合よりも有効断面積が1桁以上小さく、また重陽子の破碎反応によるバックグラウンドの陽子イベントが増えるという問題がある。実験を現実的なビームタイムで完遂するには水素標的が最適であった。

実験は理化学研究所加速器研究施設で行われた。270 MeV の重陽子ビームを液体水素標的に入射し、 $^1\text{H}(d, ^2\text{He})n$ 反応によって生成された陽子対は磁気スペクトロメータ SMART によって運動量分析され、焦点面に設置された陽子偏極度計 EPOL によって検出された。図 1 に EPOL の概念図を示す。EPOL は、入射陽子の軌道を検出するための多線型ドリフトチェンバー (MWDC)、イベントトリガーを生成するためのプラスチックホドスコープ (HOD)、陽子の偏極を分析するための炭素ブロックの標的から構成される。入射した2陽子は炭素ブロックで同時に散乱される。そ

のときの散乱角の相関を分析することでスピン相関関数 $C(\Phi)$ を導出することができる。ここで、 $C(\Phi)$ とは、次のように定義される関数である。2個の陽子それぞれに対して、スピンの測定軸 $\vec{n}^{(1)}$, $\vec{n}^{(2)}$ を定義し、これらの2つのベクトルの間の角度を Φ とする。 $C(\Phi)$ は、「これらの2つの測定軸に関して得られるスピンの符号の積の期待値」として定義される。EPOLでは、これらのスピンの測定軸はハードウェアでは決まっていない。測定によって2陽子の飛跡はイベント毎に記録されるので、測定軸を実験後にソフトウェア上で自由に設定してスピン相関を解析することが可能である。このような手法を用いた実験は、ベルの不等式の検証実験としては初めてである。また、この手法ではLRMの実験に存在したスピンの測定軸の設定の問題を解決することができる。

EPOLの有効偏極分解能は、スピン相関測定の前に、160 MeVの陽子ビームを炭素の1次標的に入射して、 $\theta_{\text{lab}} = 19^\circ$ における $p + {}^{12}\text{C}$ 弾性散乱で生成した偏極陽子をEPOLに入射し、炭素ブロックにおける散乱の非対称を測定することで校正した。

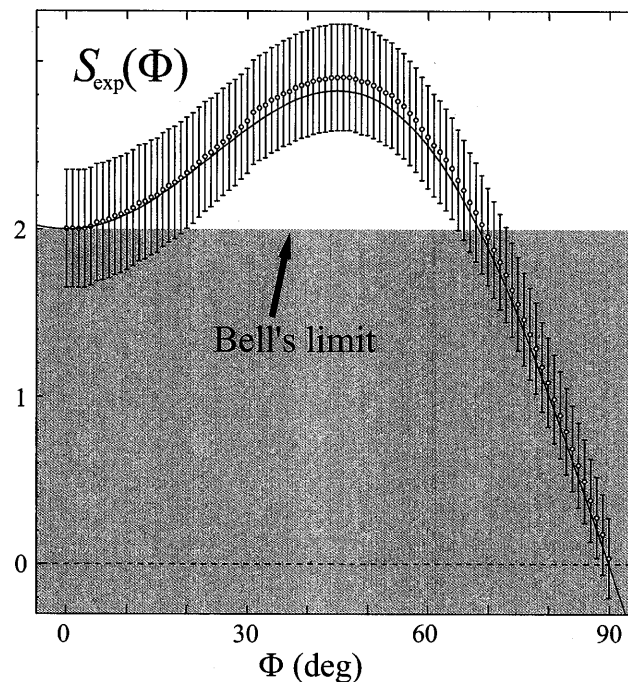


図 2: スピン相関関数の測定結果。実線は量子力学の予言値。ベルの不等式では影の部分のみが許容される。各データ点は同じデータセットからスピン測定軸の向きをソフト上で変えて出したものなので、互いに独立ではないことに注意。

実験で得られたスピン相関関数の結果を図 2 に示す。ベルの不等式と比較するために、上記の $C(\Phi)$ を用いて、 $S(\Phi) \equiv C(3\Phi) - 3C(\Phi)$ という関数を導出した。ベルの不等式は、この $S(\Phi)$ に対して、 $|S(\Phi)| \leq 2$ なる制限を課す。実験結果は $\Phi = 45^\circ$ においてベルの不等式を 2.9σ の精度で破っており、量子力学の予言値の曲線に非常に良く一致している。これは、2陽子が巨視的な距離 (この実験では約 40 cm 以下) だけ離れてもスピン 1 重項状態のエンタングルメントが維持されていることを示している。今回の不等式の検証精度 (2.9σ) は 99.6% の信頼度に相当し、LRM の実験と同程度の精度を達成することができた。

今回得られた結果から、局所实在論の可能性は、実験精度の範囲で 2 陽子系の場合についても

否定されたことになる。(実験条件が理想的な条件を満たさないため、これにはいくつか仮定が必要である。)

我々の実験手法では、2陽子のスピンの測定軸の向きが実験装置では決まっていないというユニークな性質がある。測定軸が実験装置で決まっているか否かの違いは、観測によってエンタングルした状態がどのように変化するか、という根本的な問題と関わっている可能性がある。