

論文審査の結果の要旨

氏名 齋藤 孝明

本論文は、7章からなる。第1章の序文に続き、第2章では実験のセットアップが述べられている。使用した加速器施設、磁気スペクトロメータ SMART、偏極度計 EPOL、検出器群、種々の実験条件についてその詳細が示されている。第3章では、偏極度計 EPOL の較正実験の方法とその結果について述べられており、偏極陽子生成法、実験条件、有効偏極分解能の導出・解析手法および有効偏極分解能の実験値と系統・統計誤差が示されている。第4章では、 $(d,^2\text{He})$ 反応で生成された二つの陽子間のスピン相関を決定する方法とスピン相関関数の導出法が述べられている。第5章では、最終的な測定量であるスピン相関を導出するための解析手順が詳細に述べられている。検出器群のデータ解析を通じて、スピン一重項状態にある2陽子事象を選び出す方法、2陽子に対する検出効率、一重項状態の純度、同時係数率などが定量的に示されている。第6章では、スピン相関関数を導出する新手法と相関関数の実験値が示され、これに基づいた議論が展開されている。スピン相関関数のトリガー依存性と補正量、同時係数に起因するバックグラウンドが述べられており、統計誤差、系統誤差が評価されている。実験データとベルの不等式間の有意なずれを明らかにし、理想的な実験条件と本実験の条件との比較から、量子力学的にもつれた状態の頑丈さや本実験の評価と特徴を述べている。これら第2章から第6章までの5章が本論文の中心である。最後の第7章では結論が述べられている。この他、付録としてスピン一重項状態の相関関数、スピン三重項状態の相関関数、CHSH 不等式の導出、一重項状態に対するスピン歳差の影響が収録されている。

本論文は、ベルの不等式の検証実験をスピン 1/2 系について行った研究であり、量子力学の観測問題に関する極めて基礎的な研究である。ベルの不等式の検証実験は、もつれた状態にある光子（スピン 1）の偏光状態の相関を測定する方法で行われ、殆どの実験は、局所实在論を否定し、量子力学を支持する結果を得ている。光子をもちいた実験では、(1) スピンの測定軸が事前に決まっていること、(2) 原子状態を利用しているため相関長が 1m 程度あり、2粒子の測定距離との比が大きいこと、といった不完全さが残っている。また、スピン 1/2 系の実験としては、低エネルギー陽子-陽子弾性散乱を用いてスピン一重項状態から放出される2陽子についての実験がある (LRM 実験)。この実験では強い相互作用が関連しているため、(2) の相関長は fm レベルである。しかし、(1) の問題には触れておらず、また (3) スピン一重項状態の純度にも問題がある、

と考えられていた。

本研究では、270MeV の高エネルギー重陽子ビームを用いることで(1)と(3)の問題を解決したことがポイントである。 $^1\text{H}(d, ^2\text{He})$ 反応を起こさせることによりスピン-重項状態の純度を 98%レベルまで上げることができる。また、反応で放出された粒子のエネルギーは 130MeV 程度で超前方に放出されるため、粒子軌道を抑えることが容易であり、また 2 粒子共通の偏極度計を用いることで量子化軸を任意に選ぶことが可能になる。

実験は、理化学研究所加速器研究施設で行われた。 $^1\text{H}(d, ^2\text{He})$ で生成された二つの陽子は、SMART スペクトロメータで分析し、スペクトロメータの下流に偏極度計 EPOL を配置した。EPOL は、散乱体、これを挟むように置かれた MWDC、およびトリガー・粒子識別用のプラスチックホドスコープからなる。トリガーとして、 ^2He 状態を選択的に選び出す条件をつくり、効率よくデータが収集された。また、160MeV の陽子と炭素標的とを弾性散乱させることによって得られた偏極 2 次陽子ビームを用いて、偏極度計 EPOL の偏極分解能の較正を行っている。

実験で得られた 2 陽子のスピン相関は、量子力学で予想されている相関を示した。またベルの不等式の破れを信頼度 99.6% で検証した。この結果から局所实在論の可能性は、強い相互作用においても、またスピン 1/2 の陽子の場合についても否定されたことになる。また、この研究ではスピンの測定軸の向きが実験装置では決まっていなかったため、測定軸が装置で決まっているかいないかの違いは、観測によってもつれ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。

以上のように本研究は、従来の実験の枠を越えた野心的なもので、また量子力学の基礎に関連した教科書レベルの成果が得られており、学術的な価値も十分にある。

なお、本論文は共同研究であるが、論文提出者が主体となって本実験で用いられた EPOL の設計と建設、検出器群の建設とトリガー条件の決定、実験遂行、及び解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分高いと判断する。

従って、博士(理学)の学位を授与できると認める。