論文内容の要旨

論文題目:

^{2}H(d,pn) 反応での陽子-中性子スピン相関測定
〜ベルの不等式の検証に向けて〜

(Measurement of proton-neutron spin correlation
via ^{2}H(d,pn) reaction
〜 towards a test of Bell's inequality 〜)

氏名　　久保木 浩功

1935 年、Einstein、Podolsky、Rosen (EPR) が "量子力学は不完全な理論である" として疑問を投げかけた話は有名である [1]。EPR の言う完全な理論とは以下の 2 つの性質を持つ。

- 全ての物理的実在要素は完全な理論の内に対応する物理量を持つ
- 系の状態を乱すことなく、完全な理論によって確率 1 で、ある物理量を予言できるとすればその物理量に対応した物理的実在が存在する

Bohm は EPR の主張を再解釈し、2 粒子系のスピンを例に出して EPR の言う量子力学の不完全さを説明している [2]。

2 粒子をそれぞれ粒子 1、粒子 2 とする。量子力学では、例えば粒子 1 のスピンの x 成分を測定すれば、粒子 2 のスピンの x 成分は粒子 2 の測定を行なわなくても決定する。同様の測定を x、y、z 成分で行なえば、粒子 2 のスピンの全ての成分は確率 1 で予言できる、すなわち全てのスピン成分は実在である。しかし、量子力学では複数のスピンの成分は同時に決定できない、ゆえに量子力学は不完全な理論である、と結論づけている。

さらに Clauser、Shimony は、EPR の主張は次の性質を持つ局所実在論の上に成り立っている、と説明している [3]。

- 局所性 : 2 つの系が空間的に十分離れていて、かつ 2 つの系の間で相互作用がないとき、片方の系で何が起ころうとも、もう片方の系には影響を及ぼさない
- 実在性 : 系が乱されることがないとき、ある物理量が確率 1 で予言できるとすれば、その物理量に対応する物理的実在が存在する

多くの科学者が、量子力学の予言値を全て再現するような理論を、局所実在論で記述しようとした。物理的実在を記述する“隠れた変数”を導入することで、局所実在論は量子力学と一致した予言をすると期待された。

これに対し Bell は、“2 粒子のスピンの相関は、量子力学の予言の方がいかなる局所実在論の予言よりも強くなる場合がある”ことを示した。これがベルの不等式である。2 つの偏極度計のスピン測定軸間の角度を Φ として、2 粒子のスピンの符号の積の期待値をスピン相関関数 $C(\Phi)$ として定義する。量子力学の予言値 C_{QM} は局所実在論による予言値 C_{LRT} が取り得る上限値よりも大きい値を取る場合がある、ということである。ベルの不等式の発見により、局所実在論の破れを実験的に検証することが可能になった。

これまでベルの不等式を検証する実験がいくつもなされており、そのほとんどが量子力学を支持するものである。検証実験は、スピンの向き (偏光) を測定することの容易さから、主に光子対を用いて行われており、ハドロンを用いた実験は例が少ない。さらに不等式の破れを検証するまでに至った実験は 2 例しかなく、双方とも 2 陽子対を用いた実験である。

我々はハドロンの異粒子の系でベルの不等式を検証するため、陽子-中性子対のスピン偏極相関測定実験を行った。(d,pn) 反応を用いてスピン一重項 $^1S_0$ 状態の陽子-中性子対を生成し、それぞれの偏極を測定することでスピン相関関数 $C_{\exp}(\Phi)$ を得た。中性子は電荷を持たないため、磁石により陽子と中性子の経路を分離する事ができる。したがって 2 つの偏極度計も空間的に離すことが可能になり、2 つの偏極度計間でスピンの向きの情報伝達がない空間分離を実現した。

実験は理化学研究所加速器施設で行った。270 MeV の重陽子ビームを液体重水素標的に照射し、$^2\mathrm{H}(d,pn)$ 反応によって陽子-中性子対を生成した。測定角度は陽子、中性子共に $\theta_{\mathrm{lab}} = 0^\circ$ である。陽子は磁気スペクトロメータ SMART により運動量分析され、第二焦点面に設置された陽子偏極度計 EPOL にて偏極測定された。中性子は標的より下流 18 m に設置された中性子偏極度計 SMART-NPOL によって偏極測定された。中性子のエネルギーは飛行時間測定法によって得られた。陽子偏極度計の有効偏極分解能 A_p^{eff} の値は、本実験での陽子の典型的なエネルギー $E_p = 133$ MeV において、$A_p^{\mathrm{eff}} = 0.183 \pm 0.003_{stat} \pm 0.003_{sys}$ [4]、中性子偏極度計の有効偏極分解能は $A_n^{\mathrm{eff}} = 0.26 \pm 0.01_{stat} \pm 0.03_{sys}$ [5] である。陽子偏極度計と中性子偏極度計は 6 m 離れて設置されており、各々のスピン偏極の情報が他方に伝わるには光速でも 20 nsec かかる。解析上で陽子検出と中性子検出の時間差が ± 9 nsec 以内の事象だけを選択しており、偏極度計間でスピンの向きの情報伝達がない状態を実現できた。$^1S_0$ 状態の選定は、陽子と中性子の相対運動エネルギー E_{rel} を選択することで行った。$E_{\mathrm{rel}} < 0.14$ MeV の領域を選択することにより、$^1S_0$ 状態の純度は 95±9%であった [6]。

実験で得られるスピン相関関数 $C_{\exp}(\Phi)$ は

$$C_{\exp}(\Phi) = \frac{LL(A) + RR(A) - LR(A) - RL(A)}{A_n(LL(A^2) + RR(A^2) + LR(A^2) + RL(A^2))}, \tag{1}$$

と表される。ここで LR 等は EPOL で左散乱、NPOL で右散乱した事象数を示す。A_p^{eff} は陽子エネルギーに強く依存するので、事象毎に A_p^{eff} の値を考慮して LR 等の計数を導出しなければならない。$A_p^{\mathrm{eff}} = A_i^p$ となったときの LR_i 事象を全ての i で平均化するため、

$LR(A) \equiv LR$ 事象について A_i^p という重みをつけて足し上げたもの、
$LR(A^2) \equiv LR$ 事象について $(A_i^p)^2$ という重みをつけて足し上げたもの、

という量を導入した。A_n^{eff} のエネルギー依存性は小さいので、$A_n = A_n^{\mathrm{eff}} = const.$ である。得られた $C_{\exp}(\Phi)$ は、ベルの不等式と量子力学の予言値の差が最大となる $\Phi = 45^\circ$ で $C_{\exp}(45^\circ) =$

$-0.81 \pm 0.57_{stat} \pm 0.14_{sys}$ の値が得られた。スピン相関関数を導出する際に、1. 偏極度計の偽非対称度、2. 偶然同時事象の寄与、を補正した。偽非対称度 $\delta = \frac{L-R}{L+R}$ (L、R はそれぞれ左散乱、右散乱した事象数) は偏極度計の検出効率、立体角の非一様性に起因する検出器固有の非対称度である。陽子、中性子偏極度計の偽非対称度をそれぞれ δ_p、δ_n として、偶然同時事象を用いて各 Φ のビン毎に見積もった。$\delta_p = 0.01 \sim 0.06$、$\delta_n = -0.06 \sim 0.10$ であった。また、偶然同時事象の寄与は陽子検出と中性子検出の時間差情報から見積もることができる。真の事象数を $N_{\rm true}$、偶然同時事象数を $N_{\rm acc}$、$N_{\rm tot} = N_{\rm true} + N_{\rm acc}$ として、$\alpha = N_{\rm acc}/N_{\rm tot}$ を定義し、$\alpha = 0.28 \pm 0.01$ と見積もられた。系統誤差は有効偏極分解能の統計誤差・系統誤差に起因する。

スピン相関関数 $C_{\rm exp}(\Phi)$ をベルの不等式 (CHSH 型) と比較するため $S_{\rm exp}(\Phi) = | \cos\Phi - \cos3\Phi | + | \cos(-\Phi) + \cos\Phi |$ という量を導入した。不等式の上限値 $(S_{\rm LRT})_{\rm max} = 2$ との差が最も大きくなる $\Phi = 45°$ において $S_{\rm exp}(45°) = 3.47 \pm 1.80_{stat} \pm 0.43_{sys}$ の値が得られた。実験値と不等式の上限値 $= 2$ との差は統計誤差の 0.8σ に相当する。スピン相関関数を導出するのに用いた事象数は 2.9×10^3 である。

$\Phi = 45°$ において局所実在論と量子力学のスピン相関関数 $C(45°)$ の差 $| C_{\rm LRT}(45°) - C_{\rm QM}(45°) | = 0.21$ を 1σ で破れを検証するための統計量 $N_{\rm tot}$ は $A_p^{\rm eff}$、$A_n^{\rm eff}$、α に依存する。文献 [7] によれば $E_p = 200$ MeV のとき $A_p^{\rm eff} \sim 0.5$ という値を取るので、系のエネルギーを $200A$ MeV に上げることによる $A_p^{\rm eff}$ の値の向上が最も有効であるという結論が得られた。これにより、1σ で破れを検証するのに必要な統計量が、本システムでは $N_{\rm tot} = 2.3 \times 10^4$ であるのに対し、$200A$ MeV の系では $N_{\rm tot} = 3.0 \times 10^3$ となる (α が本測定と同程度だとする)。また、系のエネルギーを上げることで偏極度計のエネルギー分解能、立体角の条件が悪化する。本実験では中性子偏極度計が分解能、立体角を制限していたため、主に中性子偏極度計のジオメトリの再構成が必要になる。

次段階として $A_n^{\rm eff}$ の 12%もの系統誤差を減少させることが課題となる。本測定で用いている $A_n^{\rm eff}$ の値は、$(\vec{d}, \vec{n})$ 反応を用いて偏極度が既知の中性子ビームを生成して較正された。出射中性子のベクトル偏極 P_n は重陽子のベクトル偏極 P_y、テンソル偏極 P_{yy} を用いて以下のように書ける。

$$P_n = \frac{\frac{3}{2} P_y K_y^{y'}}{1 + \frac{1}{2} P_{yy} A_{yy}} \tag{2}$$

ここで $K_y^{y'}$、A_{yy} はそれぞれ偏極移行係数、テンソル偏極分解能である。$E_d = 270$ MeV、$0°$ の測定では $K_y^{y'} \to \frac{2}{3}$、$A_{yy} \to 0$ となることを用いている。$A_n^{\rm eff}$ の系統誤差 0.03 は主に $K_y^{y'}$ の 5%の誤差によるものである。偏極移行量が 2%以下で測定されている ${}^2{\rm H}(\vec{p}, \vec{n})pp$ 反応 [8] を用いて中性子偏極度計を較正することで $A_n^{\rm eff}$ の系統誤差を 2%に減少させることができる。

統計誤差、系統誤差を小さくしていくと ${}^1S_0$ の純度の誤差が無視できなくなる。現在の手法は、純度が負になる、もしくは 100%を越えるような非物理的状態も許容して純度を見積もっている。誤差分布を正しく評価することで純度の誤差を小さくできる。

参考文献

[1] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Phys. Rev. **47**, 777 (1935).

[2] D. Bohm, *Quantum Theory*, Prentice-Hall, New York, p.614 (1951).

[3] J.F. Clauser and A. Shimony, Rep. Prog. Phys. 41, 1881 (1978).

[4] T. Saito, Doctoral dissertation (2004).

[5] S. Noji, K. Miki, H. Sakai, K. Yako, T. Kawabata, H. Kuboki, K. Sekiguchi, and K. Suda, Nucl. Instr. and Meth. **A578**, 267 (2006).

[6] K. Miki, H. Sakai, K. Itoh, T. Kawabata, H. Kuboki, Y. Maeda, S. Noji, S. Sakaguchi, N. Sakamoto, Y. Sasamoto, M. Sasano, Y. Satou, K. Sekiguchi, K. Suda, Y. Takahashi, T. Uesaka, and K. Yako, Nucl. Phys. **A790**, 442c (2007).

[7] M.W. McNaughton, B.E. Bonner, H. Ohnuma, O.B. van Dijk, Sun TsuHsun, C.L. Hollas, D.J. Cremans, K.H. McNaughton, P.J. Riley, R.F. Rodebaugh, Shen-Wu Xu, S.E. Turpin, B. Aas, and G.S. Weston, Nucl. Instr. and Meth. A **241**, 435 (1985).

[8] M.W. McNaughton, K. Koch, I. Supek, N. Tanaka, D.A. Ambrose, P. Coffey, K. Johnston, K.H. McNaughton, P.J. Riley, G. Glass, J.C. Hiebert, L.C. Northcliffe, A.J. Simon, D.J. Mercer, D.L. Adams, H. Spinka, R.H. Jeppesen, G.E. Tripard, and H. Woolverton, Phys. Rev. C **45**, 2564 (1992).