

## 論文内容の要旨

論文題目 **Search for Three Nucleon Force Effect  
via  $d$ - $p$  Elastic Scattering**

[重陽子-陽子弾性散乱による三体力効果の探索]

氏名 関口 仁子

## 1 序

原子核における三体力の存在については原子核の研究のごく初期から議論されてきた。中間子論によれば三体力の存在そのものについては疑いの余地はない。しかし、二核子間力に比べ三体力はその効果が非常に小さい事から実測する事は難しく、現在に至るまでその性質は良く知られていない。原子核内で最も大きく寄与すると考えられている三体力は藤田-宮沢型と呼ばれるものである。これは、三核子間を二つのパイ中間子が交換する間に、一つの核子が  $\Delta$  励起を引き起こす形をしている。

三体力の存在を議論するには、三核子系を厳密に取り扱うファデーフ理論計算と精度良く得られた実験値を比較する事が必須である。ファデーフ理論計算は二核子間力を入力して解が得られるので、もし実験値とファデーフ理論計算とに差があれば、三体力の存在を示唆する事が出来る。

今までに知られている三体力の存在を明確に示す結果としては、トリトン ( $^3\text{H}$ ) やヘリウム3 ( $^3\text{He}$ ) の束縛エネルギーが三体力を導入する事で説明された事が挙げられるが、束縛状態に限られている事から三体力の大きさを議論するだけに留まっていた。三体力のダイナミカルな性質を調べるには三体系の散乱実験が有効である。しかしながら過去低エネルギー領域 (核子エネルギーあたりが 60 MeV 以下) において数多くなされた三体系の散乱実験の結果とファデーフ理論計算との比較では、殆んどの観測量がファデーフ計算でほぼ説明され、三体力の効果が顕著に現れる現象は見つからなかった。

近年の計算技術の発展により、中間エネルギー領域 (核子エネルギーあたりが 60 MeV 以上) において、陽子-重陽子弾性散乱の微分断面積の値が最小となる角度付近で、三体力の効果が明確に現れる事が理論的に予測された。しかし、今までこのエネルギー領域においてファデーフ理論計算との比較に耐えうる精度良い実験値は存在しなかった。

我々は、理化学研究所で行っている偏極重陽子ビームの開発の一環として重陽子-陽子弾性散乱の測定を行っていたが、このファデーフ計算の存在を知り、更に三体力の詳細を系統的に調べる

事にした。

## 2 実験

実験は理研加速器施設にて行なった。サイクロトロンによって加速された偏極重陽子ビームを水素標的 (ポリエチレン或は液体水素) に照射し、重陽子-陽子弾性散乱を測定した。測定には、高分解能磁気分析器 SMART 及びビームライン偏極度計を用いた。測定量は

- (a) 重陽子エネルギー 140, 270 MeV の微分断面積,
- (b) 140, 200, 270 MeV の重陽子の偏極分解能  $A_y^d, A_{yy}, A_{xx}, A_{zz}$ ,
- (c) 270 MeV の重陽子から陽子へのスピン偏極移行量  $K_y^{y'}, K_{xx}^{y'} - K_{yy}^{y'}, K_{zz}^{y'}$

である。測定量 (a),(b) は、重心系で  $\theta_{c.m.} = 10^\circ - 180^\circ$  と広範囲の角度に渡って測定を行った。(c) は特に三体力の寄与が大きいと理論的に予測されている角度  $\theta_{c.m.} = 90^\circ - 180^\circ$  の測定を行なった。重陽子-陽子弾性散乱のスピン観測量は

$$\sigma = \sigma_0 \left[ 1 + \frac{3}{2} p_y A_y^d + \frac{2}{3} p_{xz} A_{xz} + \frac{1}{3} (p_{xx} A_{xx} + p_{yy} A_{yy} + p_{zz} A_{zz}) \right], \quad (1)$$

$$p_{y'} \sigma = \sigma_0 \left[ P^{y'} + \frac{3}{2} p_y K_y^{y'} + \frac{2}{3} p_{xz} K_{xz}^{y'} + \frac{1}{3} (p_{xx} K_{xx}^{y'} + p_{yy} K_{yy}^{y'} + p_{zz} K_{zz}^{y'}) \right], \quad (2)$$

と記述される。ここで  $\sigma_0$  はビームが偏極していない時の微分断面積、 $\sigma$  はビームが偏極している時の微分断面積である。 $\{p_{ij}\}$  は重陽子の偏極度を、 $p_{y'}$  は散乱陽子の偏極度を指す。式 (1),(2) から明らかなように、スピン観測量 (b), (c) を測定するために重陽子ビームの偏極軸の制御を行なう必要がある。例えば、 $A_y^d, A_{yy}$  の測定では  $p_y, p_{yy}$  ビームを  $A_{xx}$  の測定では  $p_{xx}$  ビームを、 $A_{zz}$  の測定では  $p_{zz}$  ビームを用意し、各物理量を測定した。更に偏極移行量 ( $K_{ij}^{y'}$ ) の測定の場合、散乱陽子の偏極度  $p_{y'}$  を測定する必要がある。この測定には SMART 第二焦点面偏極度計 DPOL を用いた。また、式 (2) より偏極移行量の測定では偏極能  $P^{y'}$  が誘起される事がわかる。実験では、この物理量も同時に測定された。

得られた結果の一部を図 1 に示す。図中、微分断面積及び偏極分解能  $A_y^d$  については SMART を用いて測定した値とビームライン偏極度計を用いて測定した値を各々白丸 (○) と白い四角 (□) で示した。また、今回の測定で得られた偏極移行量及び偏極能については白い四角 (□) で示している。微分断面積については、統計誤差 1.3% であった。また微分断面積の絶対値については、その系統誤差を微分断面積が良く知られている陽子-陽子弾性散乱を測定する事で見積もった。測定方法は以下の通りである。まず 270 (140) MeV の重陽子-陽子弾性散乱の測定直後に重陽子ビームから陽子ビームに切り替えた。実験パラメータをなるべく変えないために、270 (140) MeV  $H_2^+$  ビームを陽子ビームの代用として用いた。同ビームを重陽子-陽子弾性散乱で用いた水素標的に照射し、 $^1H(p, p)^1H$  散乱の微分断面積の測定を行なった。得られた実験値と SAID プログラム (豊富な核子-核子散乱のデータを部分波解析して作られた計算コード) を用いて得られた計算値との比較を行なったところ、系統誤差は 2% 以下という値を得た。偏極分解能については統計誤差が 0.03 以下

であった。図 1 が示すように全く独立の測定器を用いて得た実験値がほぼ同じ値である事から、測定器系による系統誤差は少なく、我々のデータは非常に信頼度の高いものであると言える。

偏極移行量については統計誤差が 0.03 以下、系統誤差が  $\pm 3\%$  である。偏極能  $P_{y'}$  は統計誤差が 0.01 以下であった。偏極能  $P_{y'}$  は、時間反転対称性により陽子-重陽子弾性散乱の陽子の偏極分解能  $A_y^p$  と  $P_{y'} = -A_y^p$  の関係が成り立つ。重陽子エネルギー 270 MeV (核子当りのエネルギーが 135 MeV/u) における陽子の偏極分解能はオランダの KVI 研究所で測定されており (図 1 中の黒い四角 (■))、今回得られた実験値と比較したところ良く一致する事がわかった。

### 3 理論計算との比較と考察

得られた実験結果を近年計算可能となった三体力を考慮した Faddeev 理論計算との比較を行なった。以下にあげる計算は全てポホム・クラクフグループによって行なわれたものである。

[計算 1]: 二核子間相互作用のみを考慮したファデーフ理論計算。現在最も信頼されている 5 つの現実的な二核子間相互作用を用いている。図 1 中、薄い線束で示されている。

[計算 2]: [計算 1] に テューソン・メルボルン 型 (TM) の三体力を考慮した計算。図中、濃い線束で示されている。

[計算 3]: ウルバナ (UR) 型の三体力を考慮した計算。図中では、実線で示されている。

[計算 4]: TM' 型の三体力を考慮した計算。

カイラル摂動理論によれば TM 型の三体力内の  $c$  項については、その存在が否定されている。TM' 型の三体力は TM 型の三体力をカイラル摂動理論に準拠するように変更したモデルである。図中点線で示されている。

[計算 5]: [計算 3] に現象論的に作られたスピン軌道型の三体力を考慮した計算。図中破線で示されている。

TM, TM', UR の三体力は全て藤田・宮沢型の三体力を主要成分とする三体力である。

実験値と計算値との比較の結果、測定量は 3 種類のタイプに分ける事が出来る。

タイプ I : 微分断面積, 重陽子のベクトル偏極分解能  $A_y^d$ , 偏極移行量  $K_{xx}^y - K_{yy}^{y'}$

タイプ II : 偏極能  $P_{y'} (= -A_y^p)$

タイプ III : テンソル偏極分解能  $A_{xx}, A_{yy}, A_{xz}$ , 偏極移行量  $K_{yy}^{y'}, K_{xz}^{y'}$

図 1 に各々のタイプを代表する観測量 (微分断面積、ベクトル偏極分解能  $A_y^d$ 、偏極能  $P_{y'}$ 、偏極移行量  $K_{xx}^{y'}$ ) の結果を示した。

殆んどの測定量に関して、実験値と二核子間の相互作用のみを考慮したファデーフ理論計算との差は、重陽子の入射エネルギーが高くなるほど大きくなり、特に微分断面積が最小値をとる角度範囲においてその差が顕著に見られる。この差については、タイプ I の物理量は三体力を考慮する事で説明される。従ってタイプ I は明らかに三体力の効果が現れた物理量と言える。タイプ II の物

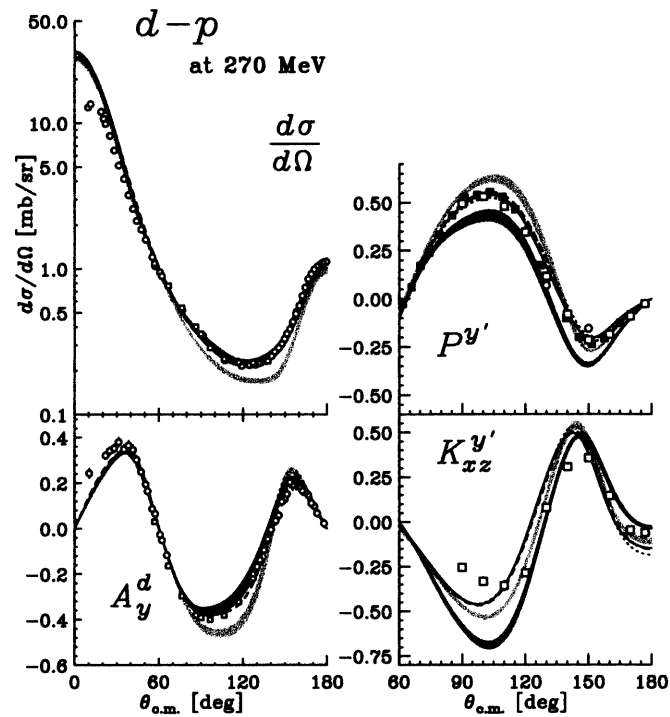


図 1: 重陽子エネルギー 270 MeV における重陽子-陽子弾性散乱の測定結果とボトム・クラクフグループによる計算値。実験値及び理論曲線の説明については文中に記載。

理量は、TM' 型、UR 型の三体力では説明されるが、TM 型の三体力は実験値を再現しない。この現象は、TM 型の三体力がカイラル対称性を満たさない事に起因していると考えられる。タイプ III の物理量に関しては、どの計算も実験値を説明出来ない。よって、タイプ III の測定量により現在の三体力モデルでは必ずしも全てのスピン観測量を説明出来ない事が明らかになった。

## 4 まとめ

我々は三体力に関する情報を得る目的で、中間エネルギー領域で初めての重陽子-陽子弾性散乱の高精度測定を行った。得られた結果を近年計算可能になった三体力モデルを考慮した Faddeev 理論計算と比較したところ、現在の三体力モデルで説明される物理量がある一方で、一部のスピン観測量に関しては現在の三体力モデルでは説明されない事もわかってきた。