



Title	加速器を用いて量子力学的な対称性の効果を検証する。
Author(s)	
Citation	令和6（2024）年度学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書. 2025
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/101265">https://hdl.handle.net/11094/101265</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 令和6年度大阪大学未来基金「学部学生による自主研究奨励事業」研究成果報告書

ふりがな 氏名	やぶもとまさゆき 薮本雅行	学部 学科	理 物理	学年	3年				
ふりがな 共同 研究者氏 名	まなべはるか 真鍋遙	学部 学科	理 物理	学年	3年				
	ますだひなた 舛田陽那太		理 物理		2年				
アドバイザー教員 氏名	川畠貴裕	所属	理学研究科物理学専攻						
研究課題名	加速器を用いて量子力学的な対称性の効果を検証する。								
研究成果の概要	研究目的、研究計画、研究方法、研究経過、研究成果等について記述すること。必要に応じて用紙を追加してもよい。(先行する研究を引用する場合は、「阪大生のためのアカデミックライティング入門」に従い、盗作剽窃にならないように引用部分を明示し文末に参考文献リストをつけること。)								

### 1. 研究目的

理学部で学ぶ量子力学は理論が中心であり、多くの点で日常の直感に反する量子力学の正当性を実験的に検証する機会は少ない。そのような量子力学の分野の中で、特に検証が困難であるが重要な要素の1つとしてスピンの概念がある。

スピンとは粒子が持つ固有の角運動量であり、古典力学的なコマの自転との類似性を用いて説明されることが多い。しかし、量子力学においてもスピンは角運動量ではあるが、粒子に固有の物理量として記述されることや、大きさのない素粒子もスpinを持つなど、回転では説明しきれない特徴を持っている。このように、量子力学におけるスピンは直感に反するものであるが、医療、化学、物理学、工学などにおいて横断的に重要な概念である。このスピンの概念を量子力学的な対称性と合わせて検証し、量子力学が実際に現実の現象を再現しているという確信を得ることで、より高度な理論へと主体的に展開して学び、研究していくことへの動機づけを高めることを目的とした。

### 2. 研究計画

量子力学の特異性のうち、波動関数の振幅の二乗が粒子の存在確率を与えるとする観点から古典的な現象との違いを考えた。同種粒子の散乱を古典力学で考えると、初期条件から軌道を一意に定めることができあり、2つの粒子を区別することができる。しかし、量子力学においては粒子の位置は確率で表されるため、粒子の軌道を確定的に決定することはできない。このため、ある散乱角への散乱されやすさを表す微分散乱断面積を測定するとき、2つの粒子を区別できないため、2粒子の相対運動を記述する波動関数は、2粒子の置換に対して符号の変化を除いて不变、すなわち、2粒子の置換に対し対称もしくは反対称でなければならない。量子力学では、整数のスピンをもつ粒子をボーズ粒子、半整数のスピンをもつ粒子をフェルミ粒子と呼び、ボーズ粒子同士とフェルミ粒子同士の相対運動の波動関数は、2粒子の置換に対して、ぞれぞれ、対称または反対称となる。

古典的な散乱と量子力学的な散乱を比較すると、量子力学的な散乱においては、微分散乱断面積の表式に直接項と交換項の干渉が現れ、角度分布に振動パターンが生じる。その振動の様相は、ボーズ粒子とフェルミ粒子で異なることが期待され、重心系の微分散乱断面積の角度分布において、散乱角  $90^\circ$  における極大、極小によって区別できる。一方で、異なる粒子の散乱の場合には、波動関数を対称化（反対称化）する必要がないため干渉項が存在せず、古典的な散乱の場合と同様に、粒子の微分散乱断面積の角度分布に振動パターンは生じない。

そこで、本研究では、量子力学的な干渉の効果を考慮した微分散乱断面積の理論計算結果と、今回の実験で得られた結果との比較を行い、散乱粒子がボーズ粒子かフェルミ粒子であるかを特定し、スピンが整数であるか半整数であるかを特定する。さらに、微分散乱断面積はスピンの大きさに依存してグラフの振幅が変化することを利用して、振幅の比較から、スピンの大きさを推定する。

質量数 12 の炭素の同種粒子衝突では、測定された微分散乱断面積の角度分布がボーズ粒子の場合の理論計算結果と一致し、質量数 11 のホウ素の同種粒子衝突では、フェルミ粒子の場合の理論計算結果と一致することが予想される。これにより、同種粒子の置換に対するボーズ粒子の対称性とフェルミ粒子の反対称性を確認する。加えて、質量数 12 の炭素と質量数 11 のホウ素のスピンの大きさを推定する。

### 3. 実験方法

本実験では、 $^{12}\text{C}$ 、 $^{11}\text{B}$  の 2 種類のビームを利用し、それぞれを同種原子のターゲットと散乱をさせて、粒子の微分散乱断面積の角度依存性を調べた。実験は神戸大学研究基盤センターが保有する、タンデム・バンデグラフ型加速器を利用して行った。

本実験では、前項にて述べた加速器を用いて  $^{12}\text{C}$ 、 $^{11}\text{B}$  同士を散乱槽内で衝突させるため、散乱槽の中に測定器等を設置した。イオン源から散乱槽までの全体像を図 1 に示した。



図 1 加速器施設の全体像

また、散乱槽の中には、図 2、3 のように測定器等を設置した。

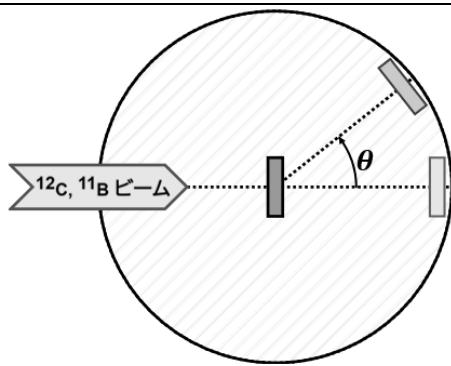


図2(左) 散乱槽内の模式図

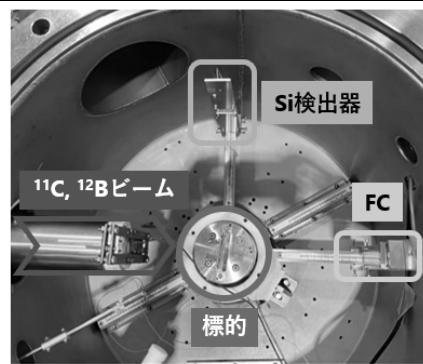


図3(右) 散乱槽内の図

散乱槽に入射したビームの直線上に標的を設置し、さらにその先にファラデーカップ（FC）を設置した。図8のように、ビームの軌道に対するSi検出器の設置角度を散乱角度 $\theta$ とした。 $^{12}\text{C}$  標的と $^{11}\text{B}$  標的は同一のフレームに固定し、これを散乱槽の外部から上下動させることによって、ビームを照射する標的の種類を変更した。

FCは、電荷をもった入射イオンの総電気量を測定し、ビーム粒子数を決定するための装置である。本実験では、ビーム粒子によって電子がたたき出されることにより、測定したいビームの総電気量が変化してしまう問題を解決するため、図4のように、ビームが入射する領域に磁石を対になるように設置し、磁場を用いて反跳電子がFCから逃れないような装置を製作した。

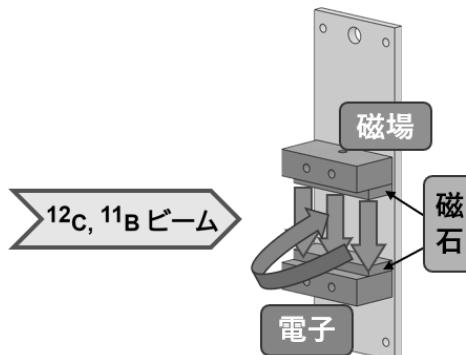


図4 磁場を用いて反跳電子を捕獲するファラデーカップ

#### 4. 実験結果

上記の実験からそれぞれの同種粒子散乱の微分散乱断面積の角度分布を測定する。微分散乱断面積は以下の式で与えられる。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{N_{scattered}}{N_{beam} N_{target} \Delta\Omega}$$

$N_{scattered}$  : 散乱粒子数、

$N_{beam}$  : ビーム粒子数

$N_{target}$  : 単位面積 (mb)あたりの標的  
粒子数/[mb]

$\Delta\Omega$  : 検出器のなす立体角[sr]

この測定結果と理論計算の比較を図 5 と図 6 に示す。

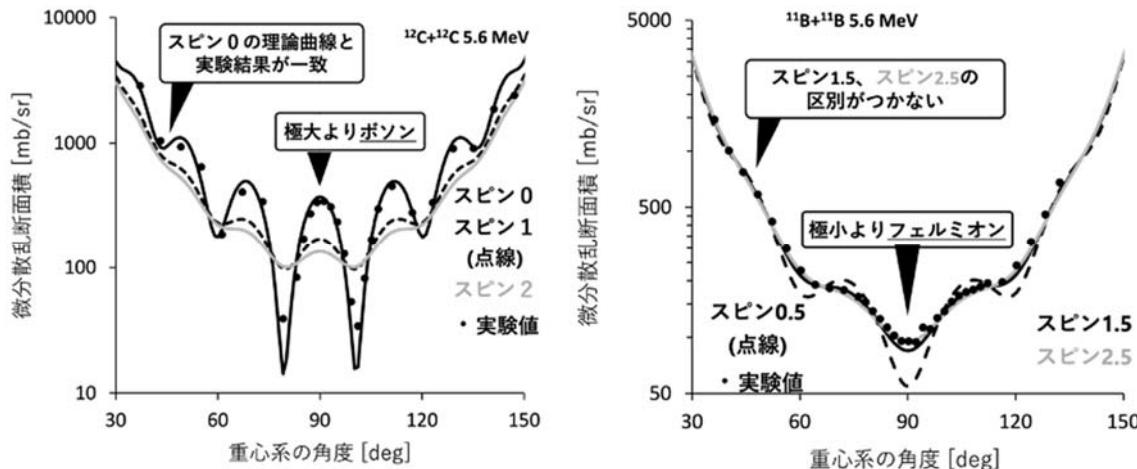


図 5 (左)  $^{12}\text{C}$  の微分散乱面積における実験値と理論値の比較

図 6 (右)  $^{11}\text{B}$  の微分散乱面積における実験値と理論値の比較

注目すべき点は 3 つある。1 つ目はグラフに微分散乱面積の角度分布において振動が見られることで、これは量子力学的対称性の効果により生じる。2 つ目は散乱角  $90^\circ$  における振る舞いの違いで、ボソンは散乱角  $90^\circ$  で微分散乱面積が極大値を示し、フェルミオンは  $90^\circ$  で極小値を示す。3 つ目はスピンによる振幅の大きさの違いで、スピンの大きさによって振動振幅が異なるため、この振幅の違いからスピンを推定できる。

図 5 のとおり、 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  散乱の微分散乱面積は散乱角  $90^\circ$  で極大値をもつため、 $^{12}\text{C}$  はボソンであると特定できる。さらに、スピンの大きさを決定するために、スピン 0, 1, 2 を仮定した理論計算と比較する。比較の際には、カイ二乗和が最小となるよう各々の理論計算結果を定数倍した。カイ二乗和は  $\sum_i \frac{(x_i - y_i)^2}{\sigma_{x_i}^2}$  という式で与えられる。 $x_i$  は実験値、 $y_i$  は理論値、 $\sigma_{x_i}$  は実験値  $x_i$  の誤差を表す。これを最小化することで実験値と最もよく合う分布を求めることができる。誤差で除するのは、誤差の大きいデータの影響を小さくするためである。この結果  $^{12}\text{C}$  はスピン 0 のグラフに最も良く一致する、つまり  $^{12}\text{C}$  のスピンは 0 だと特定できた。これは文献値と一致している。

さらに図 6 のとおり、 $90^\circ$  で極小値をもつため、 $^{11}\text{B}$  はフェルミオンであると特定できた。さらに、スpin 0.5, 1.5, 2.5 を仮定した理論計算との比較を行った。 $^{12}\text{C}$  の場合と同様に、カイ二乗和が最小となるよう理論計算の結果を定数倍した。実験値は、スpin 1.5 やスpin 2.5 の理論曲線とよく一致したが、スpin 0.5 の理論曲線とは一致しなかった。また、スpin 3.5 についても調べたが実験値には一致しなかった。スpin が大きくなるほど振動の幅が小さくなる特徴があるため、今回の実験ではスpin 1.5 とスpin 2.5 の区別は難しい。よって今回の実験では  $^{11}\text{B}$  のスpin は 1.5 か 2.5 のいずれかであると結論した。文献値によると、 $^{11}\text{B}$  のスpin は 1.5 であり、今回の結果と矛盾しない。

## 5. 研究成果

達成した目標は 2 つある。1 つ目は量子力学的な対称性の検証で、微分散乱面積のグラフから量子力学特有の振動を確認し、散乱角  $90^\circ$  での振る舞いから  $^{12}\text{C}$  はボソン、 $^{11}\text{B}$  はフェルミオンだと特定した。2 つ目はスpin の推定であり、 $^{12}\text{C}$  のスpin は 0、 $^{11}\text{B}$  のスpin は 1.5 または 2.5 であることが示された。