

論文内容の要旨

論文題目

Precision spectroscopy of deeply bound states in the pionic ^{121}Sn atom

(パイ中間子錫121原子の深い束縛状態の精密分光)

氏名 伊藤 聖

π 中間子原子の深い束縛状態は1996年に、T. Yamazaki らによって初めて発見された。彼らはドイツの GSI 研究所において (d, ^3He) 反応を用いて精密分光実験を行い、 π 中間子鉛 207 原子の 2p 状態を観測した。その後、彼らによって同様の実験が鉛 206 標的に対しても行われ、 π 中間子鉛 205 原子の 1s および 2p 状態の同時観測成功した。

2001年には、K. Suzuki らによって同様の実験が錫の同位体に対して行われ、 π 中間子錫123、119、115 原子の深く束縛された 1s 状態の束縛エネルギーと幅が精密に測定された。彼らはこの測定値から原子核密度中での光学ポテンシャルのパラメーターである、アイソベクトル散乱長 b_1 を導出し、理論計算に基づく関係式を用いて、原子核密度中でのカイラル凝縮量の変化を定量的に求めることに成功した。

このように、 π 中間子原子の深い束縛状態を精密に測定する事によって、我々は自発的に破れたカイラル対称性の秩序変数であるカイラル凝縮量を知る事ができる。このため、深く束縛された π 中間子原子は非常に興味深い実験系である。ただ、原子核密度中でのカイラル凝縮量の変化は、有限密度中での b_1 パラメーターと真空中での b_1 パラメーターの比率で表される。現時点では、原子核密度中の値に対する誤差が真空中の値に対する誤差に比べ非常に大きく、原子核密度中でのより精度の高い結果が待ち望まれている。

そこで、我々は理化学研究所の RIBF 施設における系統的な π 中間子原子の精密分光実験を計画している。RIBF 施設において実験を行う利点は、ビームの強度が GSI に比べ10倍高いことである。ただ、GSI に劣る点もあり、それはビームの運動量広がり約3倍悪いことである。そこで我々は分散整合という手法を用いて、この運動量広がりが最終結果に影響しないようにする。

この分散整合のために新しいイオン光学の設計を行い、実際に π 中間子原子の深い束縛状態を測定する実験を通して、RIBF 施設での精密分光実験の可能性を検証した。実験は2010年10月に約1週間という比較的短い期間で行った。実験で得られたデータを詳細に解析することによって、我々は π 中間子錫121原子の深い束縛状態である $1s$ 、 $2p$ 、 $2s$ 状態を同時に測定することに成功した (図1を参照)。 π 中間子錫121原子の深い束縛状態を測定したのは、我々の実験が初である。

また、我々は束縛状態の角度依存性の測定にも成功した (図2を参照)。これまで深い束縛状態の角度依存性が観測された例はなく、我々の実験によって初めて指摘された重要な結果である。実験で得られた結果を理論計算と照らし合わせた場合、 $1s$ 状態の角度依存性は誤差の範囲内で理論と一致するが、 $2p$ 状態の角度依存性は明らかに理論計算と異なっている。

得られた束縛状態のエネルギーと幅は以下の通りである。

$$B_{1s} = 3.853 \pm 0.013 \text{ (statistical)} + 0.035/- 0.046 \text{ (systematic)}$$

$$\Gamma_{1s} = 0.363 \pm 0.033 \text{ (statistical)} + 0.109/- 0.111 \text{ (systematic)}$$

$$B_{2p} = 2.345 \pm 0.023 \text{ (statistical)} + 0.046/- 0.051 \text{ (systematic)}$$

$$B_{2s} = 1.368 \pm 0.024 \text{ (statistical)} + 0.046/- 0.062 \text{ (systematic)}$$

以上のように、我々は系統誤差を求め、RIBF 施設における実験では何が系統誤差の原因になるかを調査した。束縛エネルギーの決定精度を向上させるためには、スペクトロメーターの分散を精度よく測定することが鍵となる。また、幅に関しては実験分解能とスペクトロメーターのアクセプタンスを直に測定することが重要であることが示された。また、得られた実験分解能は 0.50 ± 0.05 と見積もられ、分散整合の完全な達成も次期実験の課題である。しかしながら、上で述べた事柄はすべて実現可能なものなので、今後の RIBF での実験では分解の向上が予想され、自発的に破れたカイラル対称性の部分的回復に関する精度の高い情報が得られると期待される。

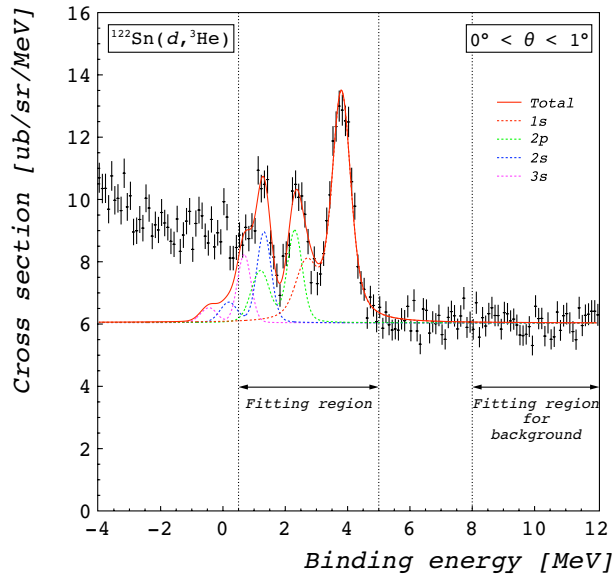


図 1 : π 中間子錫121原子の束縛状態。

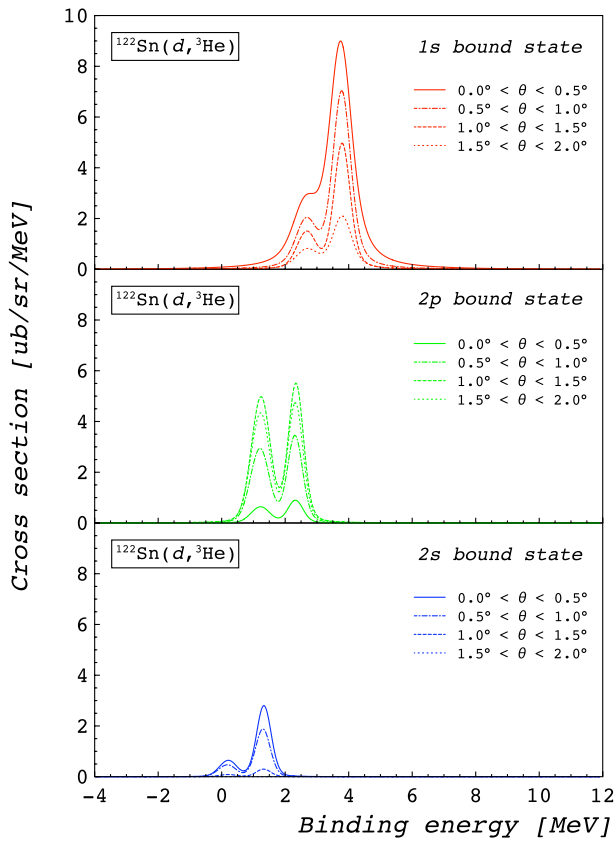


図 2 : 束縛状態の角度依存性