

## 論文の内容の要旨

### Study of muonic X-ray spectroscopy and nuclear muon capture reaction (ミュオン原子 X 線分光と原子核ミュオン捕獲反応の研究)

氏名 齋藤 岳志

本論文は、「負ミュオンをプローブとした原子核物理学」を共通の主題として、第一部と第二部から構成される。

第一部ではミュオン原子 X 線分光について取り扱う。

負ミュオン(以下単にミュオン)は原子核と原子状束縛状態を作る。これをミュオン原子と呼ぶ。ミュオンは電子より 200 倍ほど重いため、ミュオンは電子よりも原子核の近傍に束縛される。このためミュオン原子はミュオンと原子核の 2 体系とする近似がよく成り立つ。ミュオン原子は形成の際に脱励起 X 線を放出し、これはミュオン原子 X 線と呼ばれる。ミュオン原子 X 線は原子核の荷電密度分布に高い感度を持つため、ミュオン原子 X 線の測定は電子散乱および同位体シフトの測定に並んで、原子核の荷電半径という基礎物理量の測定に用いられる。

ミュオン原子 X 線による荷電半径の測定においては、測定自身の不確かさに加えて得

られたエネルギーから荷電半径を求める解釈部分における不確かさが存在する。荷電分布を何らかの形でモデル化しないと束縛エネルギーの計算が行えないためである。通常は 2 パラメータ Fermi 分布を仮定して計算を行うが、広く用いられている解析手法では原子核の diffuseness に関わるパラメータを 1 つ固定し、最低次の X 線のみを用いて 1 パラメータでフィッティングを行う。この解析は簡便な一方でモデル依存性の評価が困難である。

また、原子核の荷電半径のみならず、荷電密度分布に関する理論的、実験的注目が高まっている。電子散乱実験では荷電密度分布の測定が可能であるが、ミュオン原子 X 線においては荷電密度分布の議論はほとんど行われていない。ミュオン原子 X 線を用いて荷電密度分布を求めることができれば、電子散乱と相補的な手法としてより信頼性の高い荷電密度分布の議論が可能である。

本論文では、実験によって測定されたミュオン原子 X 線のエネルギーから、原子核荷電半径を決定する方法および荷電密度分布を議論する方法について、実験データを用いて述べる。実験の標的核として、安定パラジウム同位体( $Z=46$ )を用いた。実験は大阪大学核物理研究センター MuSIC で行なった。同位体濃縮された 5 種類のパラジウム標的( $A = 104, 105, 106, 108, 110$ ) にミュオンビームを照射し、ミュオン原子 X 線のエネルギーをゲルマニウム検出器で測定した。またプラスチックシンチレータを用いたビームライン検出器を用い、ミュオンビームの時間測定および混入する電子ビームとの弁別を行なった。解析においては  $\gamma$  線や環境によるバックグラウンドを低減するため、ミュオンビームとゲルマニウム検出器で測定された光子の時間関係を利用した。

パラジウム同位体のミュオン原子 X 線の遷移エネルギーを、 $2p-1s$ ,  $3d-2p$ ,  $4f-3d$  遷移について決定した。測定された  $2p-1s$  遷移のエネルギーは先行研究と誤差の範囲内で一致した。高次の遷移についても、 $^{104}\text{Pd}$  に対する測定と矛盾しない結果が得られた。高次遷移では実験分解能に対して同位体依存性が小さいため、 $^{104}\text{Pd}$  での測定では決定できない遷移エネルギーを同位体濃縮標的の利用により決定することができた。

荷電半径の解析においては、2 パラメータ Fermi 分布を仮定して行う。先述の通り、従来の近似的手法では 2 パラメータ Fermi 分布の 1 つのパラメータを固定し、最低次の  $2p-1s$  遷移のみを用いて荷電半径を決定していた。本研究では高次の X 線を解析に取り入れることにより 2 つのパラメータを同時に決定できることを示し、解析のモデル依存性の低減を実現した。またそれぞれの X 線がパラメータ空間においてどのようにパラメータ決定に寄与するのかについて議論し、 $3d-2p$  遷移の実験的不確かさが最も荷電半径の不確かさに寄与すると結論づけた。

ミュオン原子 X 線のエネルギーと 1 対 1 に対応する物理量として Barrett モーメントが導入できる。この Barrett モーメントを遷移ごとにプロットすることにより、他の実験や理論計算によって求められた原子核荷電密度分布と、分光実験によって測定されるミュオン原子 X 線のエネルギーとを直接的に比較することができることを示した。例として、 $^{108}\text{Pd}$  の電子散乱実験と平均場計算によって得られた荷電密度分布と本実験によって測定

されたミュオン原子 X 線のエネルギーの比較を行う。また将来のミュオン原子 X 線による荷電半径および荷電密度分布測定実験における展望や、有効な議論のために達成すべき X 線エネルギーの測定精度について述べる。

第二部では原子核ミュオン捕獲反応について、中性子放出に着目して述べる。

軽い核を除くミュオン原子の基底状態は主に原子核ミュオン捕獲反応 (以下単にミュオン捕獲) によって崩壊する。ミュオン捕獲は核内の陽子が原子軌道上のミュオンを捕獲し、中性子に変わる反応を素過程とする。ミュオン捕獲によって、質量数  $A$ 、電荷  $Z$  の原子核  $(Z, A)$  は  $(Z-1, A)$  核の励起状態に遷移する。

ミュオン捕獲によって生成される原子核の励起状態はおおよそ数から数十 MeV の励起エネルギーを持ち、主に中性子を放出して脱励起する。ミュオン捕獲後の脱励起過程の性質を調べるためにはこの放出中性子の測定が重要である。放出中性子のエネルギースペクトルは 5 MeV 程度を境に高エネルギー成分と低エネルギー成分に分けられる。このうち高エネルギー成分はミュオン捕獲のエネルギーが一つもしくは少数の核子に集中することから生じ、逆に低エネルギー成分は複数の核内核子にエネルギーが共有された状態からの蒸発過程が原因であると考えられている。高エネルギー成分については比較的多くの核について測定されている一方で、低エネルギー成分の測定は少ない。特に低エネルギー中性子の測定は  $A = 40$  以下の軽い核と、 $A = 200$  近傍の重い核で行われており、中重核のデータが欠けている。

第一部で用いたものと同じパラジウム同位体濃縮標的 ( $A = 104, 105, 106, 108, 100$ ) について、ミュオン捕獲に伴う放出中性子の測定実験を行った。実験は同じく核物理研究センター MuSIC で行なった。放出中性子のエネルギーを飛行時間法によって測定するためには中性子の他に  $\gamma$  線の測定が必要である。中性子の飛行時間を求めるために必要な中性子放出時刻の決定のため、ミュオン捕獲時に放出される  $\gamma$  線を利用するからである。本研究では、中性子の測定のために波形解析により中性子と  $\gamma$  線の弁別が可能な液体シンチレータを用い、 $\gamma$  線の測定のために時間応答と検出効率を両立した  $\text{BaF}_2$  シンチレータを用いた。また、ミュオンビームの測定のためプラスチックシンチレータを用いたビームライン検出器と、 $\gamma$  線のエネルギー測定のためのゲルマニウム検出器を用いた。これらの検出器を組み合わせた検出器アレイ SEAMINE を新規に設計し、中性子エネルギーの測定を行なった。また液体シンチレータの波形を記録するために digitizer を中心としたデータ収集システムを新規に開発した。ミュオンビーム照射による測定に加え、 $^{252}\text{Cf}$  の自発核分裂による放出中性子の測定を行い、検出器の校正を行なった。

パラジウム同位体のミュオン捕獲に伴う中性子のエネルギー分布が 1 から 20 MeV の範囲で測定された。得られたエネルギー分布はミュオン捕獲に特徴的な低エネルギーと高エネルギーの 2 成分を持つことがわかった。タリウム、鉛、ビスマスについて同様のエネルギー測定を行なった先行研究と比較し、パラジウムとそれらの原子核ではエネルギー

分布の形状が異なることを示した。またパラジウムの同位体間でエネルギー分布を比較することで、同位体間ではエネルギー分布の形状の差異は大きくないことを示した。また理論計算で得られたエネルギー分布と比較し、理論計算がエネルギー分布をやや低エネルギー寄りに見積もっていることを示す。

本研究では中性子検出器を多数配置することにより、中性子の同時測定が可能である。中性子-中性子間の角度相関の測定により、低エネルギー中性子が小角度方向に相関を持つことが観測された。これは現状の理論計算においては再現できず、また同様の測定の少なさから詳細については未解明である。この現象の理解のためにはより高統計、高分解能の測定が必要である。