

超伝導マイクロカロリメータによる ミュオン原子の高分解能 X 線分光

奥村 拓馬 〈東京都立大学大学院理学研究科 tokumura@tmu.ac.jp〉

岡田 信二 〈中部大学理工学部 sokada@fsc.chubu.ac.jp〉

東 俊行 〈理化学研究所 toshiyuki-azuma@riken.jp〉

原子は原子核と電子から構成されるが、構成粒子の一部を別の粒子で置き換えることで、通常の原子とは異なる風変わりな（エキゾチックな）原子を作ることができる。原子中の束縛電子を第二世代のレプトンである負ミュオンで置き換えた原子は**ミュオン原子**と呼ばれ、1940年代末に発見されて以降、長い研究の歴史が存在する。

ミュオン原子は1つの原子核に負ミュオンと電子という2種類の異なる粒子が束縛されたユニークな量子少数多体系であり、その構造および形成過程は原子物理学的にも興味深い。しかし、これらを詳しく研究するために不可欠な高精度分光実験の実現には、長い間大きな障壁が立ちだかっていた。加速器で利用可能なミュオンビームの強度は十分ではなく、高精度分光の実現に足るだけのミュオン原子数を確保できなかった。加えて、ミュオン原子の観測には X 線検出が必要であるが、伝統的な半導体検出器ではエネルギー分解能が足りず、ミュオン原子のエネルギー準位を詳細に議論することができなかった。

最近、2つの新たな道具の登場によってこの状況が一変した。ひとつは J-PARC において世界最高強度の低速負ミュオンビームが実現し、たとえ希薄気体中であってもミュオン原子を高効率で生成できるようになったこと、もうひとつは超伝導 X 線マイクロカロリメータという高量子収率かつ高分解能の X 線検出器の登場である。これらの道具立てにより、我々は真空中の孤立ミュオン原子を対象とした数 keV 領域の高精度分光を実現した。

ミュオン原子の応用例として、負ミュオン軌道が原子核近傍にあることを利用した、超強電場下での量子電気力学 (QED) 効果の検証が挙げられる。これは基礎物理学の

大きなテーマのひとつであり、最先端の技術を駆使した高精度実験により理論検証することの意義は大きい。我々は、希薄ネオン気体中で生成されたミュオンネオン原子からの $5g_{9/2} \rightarrow 4f_{7/2}$ 遷移に伴う**ミュオン特性 X 線**の絶対エネルギーを、6,297.08 eV (統計誤差 ± 0.04 eV, 系統誤差 ± 0.13 eV) という高精度で測定することに成功した。これはミュオン原子の精密分光による QED 検証精度が、同じ目標を掲げて長年取り組まれてきた多価重イオンの精密分光と同等のレベルにまで到達したことを意味する。

加えて我々は、ミュオン原子から放出される**電子特性 X 線**の精密分光に大きな意義があることを見出した。ミュオン原子は、脱励起過程を経て自ずと多価イオンとなる特性を持つ。ミュオンアルゴン原子からの電子特性 X 線の分光では、原子核および負ミュオン、そして1から3個の束縛電子で構成された「多価ミュオンイオン」の状態選択的な観測に成功した。束縛電子が1から3個の系はそれぞれ、原子核近傍に位置する負ミュオンにより原子核電荷が遮蔽された H, He, Li 様のエキゾチック多価イオンと見なせる。一方、固体である鉄を標的とした測定では、アルゴンの場合とは異なり、ピーク構造を持たないブロードな電子特性 X 線スペクトルが観測された。この結果は多数個の電子を含むミュオン鉄原子が形成されたことを意味しており、固体中で形成されたミュオン原子には周囲の原子からフェムト秒の時間スケールで電子が補填されることを突き止めた。

大強度ミュオンビームと超伝導 X 線検出器という新たな実験技術の登場により、これまで見えてこなかったミュオン原子の物理が解明されつつある。

用語解説

ミュオン原子：

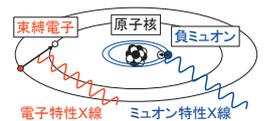
負ミュオンが原子中の電子に置き換わり、原子核と束縛された負ミュオンおよび電子により構成される原子。負ミュオンは電子よりも207倍重く電子と同じ負の電荷を持つため、原子中で「重い電子」として振る舞う。その質量比から負ミュオンは電子よりも約200倍原子核に近い軌道を取り、遷移エネルギーは同じ準位間の電子の遷移エネルギーの約200倍になる。

ミュオン特性 X 線：

原子核に束縛された負ミュオンがエネルギーの高い軌道から低い軌道に遷移する際、余分なエネルギーは X 線として放出される。この X 線は原子により固有のエネルギーを持ち、ミュオン特性 X 線と呼ばれる。

電子特性 X 線：

ミュオン原子においても、電子内殻空孔が生じると外殻電子が空孔を埋めることで、余剰エネルギーが X 線として放出される。通常の原子の場合と同様、この X 線をミュオン原子が放出する電子特性 X 線と呼ぶ。電子特性 X 線のエネルギーは、周囲の束縛電子や負ミュオンによる原子核電荷の遮蔽効果に大きく影響を受けるため、ミュオン原子の電子状態やその形成過程に対して敏感である。



ミュオン原子と放出される電子特性 X 線の概略図。