

ミュオニウム原子の高精度ラビ振動分光 —エキゾチック原子で素粒子を探る新手法—

鳥居 寛之*1
Torii Hiroyuki A.

西村昇一郎*2
Nishimura Shoichiro

1. はじめに

素粒子の性質を調べる手段としては、加速器における高エネルギー衝突実験が有名であるが、高精度の測定を目指す上では、素粒子を含む原子束縛系を分光学的に研究する、いわば自然の囁きを聴くソフトな手法が優れており、近年注目されている。

一般に原子分光においては、レーザーやマイクロ波など電磁波の周波数を少しずつ変化させ(掃引し)ながら共鳴のピークを探し、共鳴曲線を描いて中心となる周波数を求めるのが標準的であるが、途中で電磁波のパワー等の条件が変動すれば、たちまち精度が悪くなってしまいます。筆者らの研究グループ(MuSEUM Collaboration)は、周波数掃引が不要の画期的な原子分光法を編み出し、不安定な原子に対しても高い精度が期待できるようになった。ラビ振動分光と名付けたこの新しい手法を用いて、ミュオニウム原子を高精度で分光することで¹⁻³⁾、これを構成するミュオン(ミュー粒子)という素粒子の磁気モーメントや質量を精密に求めることができようになり、量子電磁力学(QED)をはじめとする素粒子物理学の検証や新物理の探索が期待される⁴⁾。本稿ではラビ振動分光の原理や特徴と、その手法を用いたミュオニウム原子分光の実験的成果や意義について解説する。

2. ミュオニウム原子と実験の概要

世の中の一般的な物質はすべて原子からできていて、原子は陽子と中性子から成る原子核の周りを電

子の雲が取り巻いている。しかし、陽子・中性子・電子以外にも、放射性核種から放出される陽電子、また、加速器等で生成する反陽子やミュオンといった特異な粒子を含む原子を合成することが可能で、これらはエキゾチック原子と呼ばれる⁵⁾。図1にこれらの例を示した。その中で、ミュオニウム原子(Mu)は、正ミュオン(μ^+)と電子(e^-)とがクーロン力で束縛した原子であり、陽子と電子が束縛した水素原子の、いわば軽い同位体だとも言える。ミュオンには正・負双方の電荷の粒子があり、共に陽子に比べて質量が9分の1の、レプトンに分類される素粒子で、 $2.2\mu\text{s}$ の寿命(半減期の約1.44倍の期間のこと)をもつ。正ミュオンは陽電子と電子ニュートリノ、反ミュニュートリノの三体に崩壊するため、ミュオニウム原子も同じ寿命しか存在できない。余談だが、ミュオンは地表まで届く二次宇宙線の主成分として身近な存在で、私達の手の平を毎秒1個

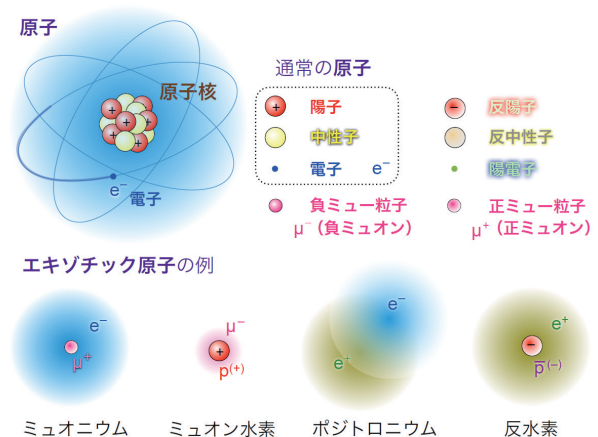


図1 通常のアトムとエキゾチック原子の例

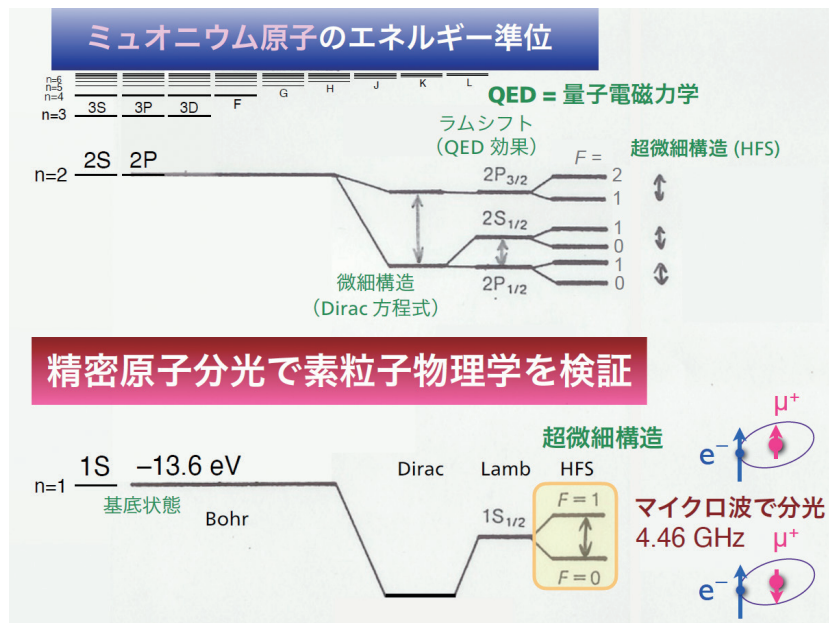


図2 ミュオニウム原子の準位ダイアグラム

程度貫く自然放射線として年間 0.2 mSv 程度の被ばく線量に寄与している。

一般に原子は、準位と呼ばれる飛び飛びのエネルギー状態だけが許され、電磁波を原子に当てると、準位間のエネルギーの差にちょうど対応する周波数の時にだけ、共鳴的に遷移が起きる。ミュオニウム原子の準位構造を図2に示すが、これは水素原子と同様であり、電子遷移のエネルギーは換算質量の補正を除いてほぼ同じである。しかし、ミュオンと電子のスピン・スピン相互作用に起因する超微細構造分裂は、陽子より軽いミュオンの大きな磁気モーメントのため、1S 基底状態において、水素原子の 1.42 GHz に比べて約 3 倍の 4.46 GHz になる。この分裂した準位間をマイクロ波で分光する。

実験は大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 物質・生命科学実験施設 (MLF) で実施した。進行方向に対して反対方向に偏極したミュオンビームをクリプトン (Kr) ガス標的に入射して静止させる。図3に示すように、ガスクエンバーの中にマイクロ波キャビティ (空洞共振器) を備え、その中で阻止能のために十数 eV にまで減速したミュオンは、Kr 原子から電子を捕獲してミュオニウム原子を生成する。マイクロ波の光子エネルギーが超微細構造準位間の遷移エネルギーに一致した場合には、共鳴遷移によってミュオンスピンの向きが反転する。正ミュオンの崩壊ではそのスピン方向に陽電子を放出しやすいため、

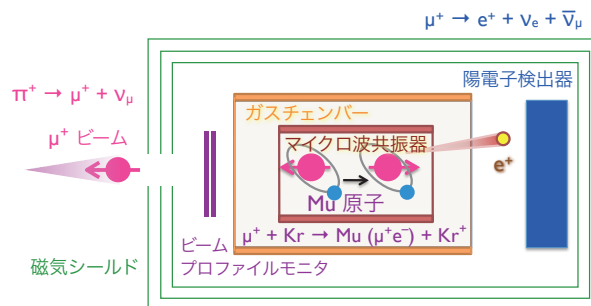


図3 ミュオニウム原子分光実験装置の概念図

下流に配置した陽電子検出器での検出数の増加として、共鳴遷移を観測することができる^{6,7)}。

3. ラビ振動分光

標準的な分光では、電磁波によって原子や分子が遷移する信号が最大になるところを共鳴中心とみなす。具体的には、電磁波の周波数を変化させて、それぞれの信号強度をグラフにすると左右対称の山型の共鳴曲線が得られるが、これを Lorentz 関数や、それを Gauss 関数で畳み込んだ Voigt 関数でフィッティングして中心を決定する (図4左)。精密な測定のためには、一定不変の弱い電磁波パワーで共鳴幅を狭くして観測することが肝要となる。

ところが、ミュオニウム原子等のエキゾチック原子は、マイクロ秒という短い寿命の間に遷移を起

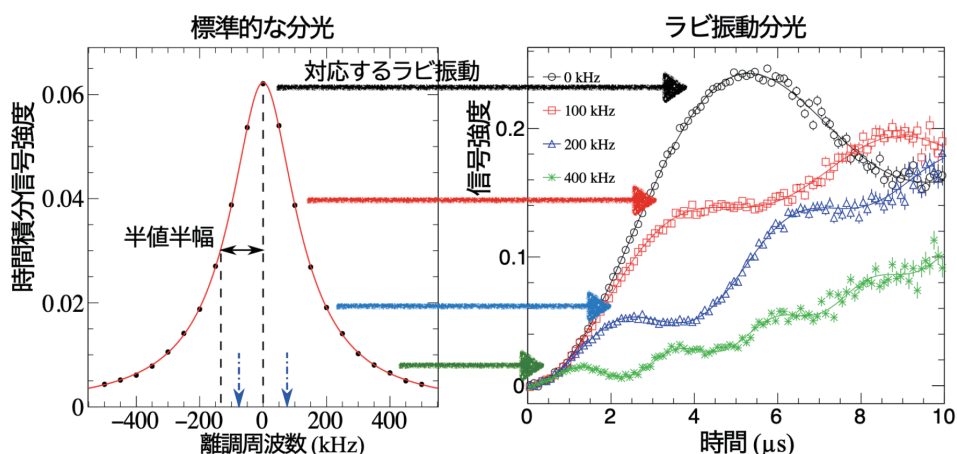


図4 標準的な分光とラビ振動分光の比較

左図：標準的な分光では周波数の関数として信号強度をプロットし、山型の共鳴曲線をフィッティングして共鳴中心周波数を求める。右図：ラビ振動分光を理論的に計算したシミュレーション。周波数の離調によって振動の速さと振幅が異なる様子が見られる

させるために強い電磁場強度で観測する必要があり、自然幅や衝突広がり、パワー広がりのために共鳴幅が広がるだけでなく、例えばマイクロ波強度増幅のための共振器のQ値が周波数に依存して変化すれば、パワーの変動に伴う共鳴曲線の左右非対称によって中心決定精度が格段に落ちてしまう。

筆者らは、原子と電磁波との相互作用による遷移が、上下の準位間で行ったり来たり時間と共に振動する、ラビ（Rabi）振動として知られる現象に着目した¹⁾。ラビ振動は準位間の遷移に関する Bloch 方程式の解として得られ、これと実験で得られる信号の時間発展とを対応づけることを考えた。図4右に理論的シミュレーションの例を示す。電磁波の周波数が共鳴周波数に一致するか近ければ、信号は大きくゆっくりと振動するが、2つの周波数のずれ（離調）が大きければ、小さく速く小刻みに振動を繰り返す。電磁波のパワーにも依存するが、パワーが強ければ信号は大きく速く、弱ければ小さくゆっくりになり、離調が変化した場合と組み合わせが異なる。この特徴を利用すれば、信号強度と振動の速さの組み合わせから、離調とパワーとを両方同時に求めることができる。パワーによらずに離調が分かるため、既知である電磁波の周波数との差引きで共鳴周波数が決定できることになる。電磁波の周波数を様々に変化させながら信号強度の時間積分値あるいは平衡値を観測する標準的な分光法とは異なり、たった1つの周波数に固定する代わりに、応答信号の時間発

展情報を利用することがポイントである。

原理の正しさを示すために、異なる電磁波の周波数においてシミュレーション及び実験データによる解析を行い、どの周波数に固定して実験しても、正しく同じ共鳴周波数が得られることを確かめた。また、この手法では共鳴曲線を描画しないため、山の裾野に相当する、信号強度が弱い周波数でのデータも不要で、効率的なデータ取得が可能となる。共鳴中心近傍の周波数（図4左の青色一点鎖線縦矢印）に固定することで、標準的な分光法に比べて同じ統計量で精度を2倍に向上できることも分かった。

周波数領域で探査せず、Fourier変換を用いることもなく、時間領域の情報をそのまま生かしたこの新しい分光法をラビ振動分光（Rabi-oscillation spectroscopy）と名付けた。ラビ振動そのものは何十年前から教科書に載っている現象だが、ラビ振動の速さから逆に共鳴周波数を求めるという、いわば逆転の発想が生み出した成果である。

実験データの解析を図5に示す。簡略化した理論的考察とは異なり、実際の解析では、共振器で約1万倍に増幅されるマイクロ波パワーの相対的分布⁸⁾と原子の位置分布を織り込み、様々なラビ振動を積み込んで計算した上で、データを再現できるように離調を求めるという複雑なプロセスを経ている。その結果、ゼロ磁場条件下における従来のミュオニウム分光実験精度の記録⁹⁾を更新することができた。

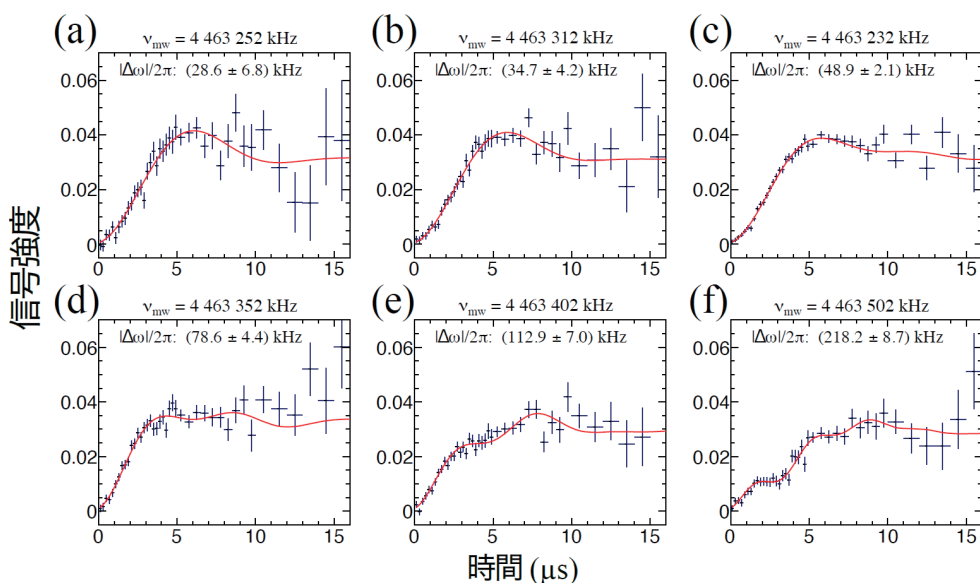


図5 ラビ振動分光による実験データの解析結果

ラビ振動分光では信号の時間発展が周波数の離調によって異なることを利用し、観測データをラビ振動の理論曲線でフィッティングすることで共鳴周波数が得られた。(a)~(f)のそれぞれの図は、異なるマイクロ波の周波数に対する時間応答を示している

4. 今後の展望

ミュオンを供給するビームラインとしては、J-PARC MLF に世界最高強度の H ラインが完成し、今後、超伝導磁石を用いた 1.7 T の強磁場中でミュオニウム原子の共鳴遷移を観測することにより、ひと月の測定で世界記録¹⁰⁾を1桁凌駕する 2 ppb の精度を達成できると意気込んでいる⁷⁾。これにより、ミュオンの磁気モーメント、ひいては質量を 15 ppb の精度で決定して、QED に加えて、電弱相互作用並びにハドロンの真空偏極の効果を含め、素粒子物理学の標準模型を検証できるようになる。ミュオンについては、異常磁気モーメント ($g-2$) を測る最近の実験で、測定結果と素粒子標準理論のずれがありそうだとされていて¹¹⁾、新粒子あるいは新物理の存在が示唆されるところであり、ミュオニウム原子分光が相補的に果たす役割は大きい。今後更なる高精度達成のためには、今回成功したラビ振動分光が重要な鍵を握ることになる。

ラビ振動分光は広く一般の原子や分子に適用できる分光法であるが、特に、加速器施設を用いて生成する短寿命の素粒子や放射性核種を含む原子、すなわちエキゾチック原子やラジオアイソトープの分光において真価を発揮すると考えられる。限られた観測時間と原子数から最大限の信号を得るために、できるだけ強いパワーで観測すべき実験条件におい

て、ラビ振動は顕著に速く数百ナノ秒程度と観測しやすくなる。手短ながら高精度かつ効率的に分光できる画期的な分光法として様々に応用されることを期待したい。

参考文献

- 1) S. Nishimura, H. A. Torii, *et al.*, *Phys. Rev. A.*, **104**, L020801 (2021)
- 2) プレスリリース「逆転の発想『ラビ振動分光』でミュオニウム原子を精密に測定」(2021) <https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2021/7502/>
- 3) ビデオ「研究室の扉『エキゾチック原子を精密に計測する』」(2022) <https://youtu.be/sCeIR8qaIRI>
- 4) 下村浩一郎, めそん (日本中間子科学会誌), **45**, 20-24 (2017)
- 5) 鳥居寛之, しょうとつ (原子衝突学会誌), **10**, 21 (2013)
- 6) S. Kanda, *et al.*, *Phys. Lett. B.*, **815**, 136154 (2021)
- 7) 鳥居寛之 他, めそん (日本中間子科学会誌), **52**, 14-19 (2020)
- 8) K. S. Tanaka, *et al.*, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2021**, 053C01 (2021)
- 9) D. Casperson, *et al.*, *Phys. Lett. B.*, **59**, 397 (1975)
- 10) W. Liu, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 711 (1999)
- 11) B. Abi, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **126**, 141801 (2021)

(*¹ 東京大学大学院理学系研究科, *² 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所)