

強電場下の量子電磁力学を エキゾチック原子で検証

東 俊行

Azuma Toshiyuki

1. はじめに

物理法則を支配する4つの力は、電磁気力、弱い力、強い力、重力。この中で飛び抜けて良く理解されているのが電磁気力である。大学の理系教養課程で履修する電磁気学の授業に登場したマックスウェル方程式は、19世紀後半に考案され古典的な電磁気学が完成した。電磁場を量子化した場の理論による量子電磁力学（quantum electrodynamics：QED）は20世紀なかばに完成した。読者の方々も、古典的なクーロンの法則が、量子力学の登場によって修正を受ける様子を記述する量子電磁力学理論構築への貢献によって、朝永、ファインマン、シュウイングーにノーベル物理学賞が与えられたことはよくご存知と思う。これにより、相対論的量子力学によるディラック方程式から外れる水素原子のラムシフトが見事に説明された。このラムシフトの観測は、第二次大戦を経てマイクロ波技術の進歩によって可能になった。実験物理学者の夢は、認知された物理法則では説明できない既存の常識を突き破る現象を、新しい手法や技術によって発見することである。量子電磁力学に対しても、この理論が一体どこまで正しいのか、理論計算値と実験観測値との間に僅かなズレがないかを検証するため、80年以上にわたって不断的な努力が積み重ねられてきた。量子力学の恩恵を享受して科学・技術は劇的に進化した。しかし、コンピュータの進歩によってAIや量子コンピュータを利用する時代に突入しつつある21世紀の現在でも、量子電磁力学の正しさは微動だにしない。この理論は現存するどの物理法則よりも正確に検証され、極めて高精度で観測と一致する物理学理論の金

字塔であることが確かめられている。最近の例を示せば、陽子1個と電子1個で形成される水素原子における1s基底準位と2s励起準位の間のエネルギー差に現れる量子電磁力学補正は全エネルギー差の僅か3.3 ppmに相当し、理論計算では周波数で表すと8 172 770.4 (2.1) kHzである¹⁾。これが実験でおよそ10 Hzもの精度で測定されている^{2,3)}。理論計算は0.1 (2.1) kHzの差で実験値と一致している。要するに、理論と実験は「とてつもない」精度でまっているというのが現状である。

では、QED理論は万能で綻びる可能性は皆無かというそうではない。原子中の電子準位間遷移エネルギーに対するQED効果の寄与は原子核の電荷(Z)が大きくなるにつれ増大する。ところが、対応する理論アプローチでは aZ ($a \approx 1/137$, 微細構造定数)によって摂動展開する手法が多くの場合取られるが、 Z が大きくなると収束しなくなり計算が困難となる。したがって、このような強電場中の束縛状態に対するQEDの理論と実験結果の比較は極めて重要である。実は、このような視点から、多価重イオンを対象として研究が長年行われてきた。多価イオンとは、中性原子から多くの束縛電子を取り去ったイオンであり、例えば、原子番号92のウラン(U)原子から91個の束縛電子を取り去ると、92+の正電荷を持つ原子核と-1の負電荷を持つ電子の2体系である U^{91+} が生成される。ここで束縛電子が感じる電場は、水素原子の場合に比べておよそ $Z^2 \sim 10,000$ 倍という強度になる。このラムシフトは200 eVを超える巨大なものであるにも関わらず、現時点ではたかだか1%の精度でしか測定がなされていない⁴⁾。しかも、原子核の有限の大きさが

正確に決まっていないための理論的な不確定性が大きな問題となってきた。

2. ミュオン特性 X 線精密分光による QED 検証

ここで筆者らはミュオン原子に注目した。これは図 1 に示したように、電子のかわりに負ミュオンが原子核のまわりに束縛されたエキゾチックな原子である。なお、ミュオニウム原子は正ミュオンと電子によって構成される、水素の軽い同位体とみなされるエキゾチック原子であり、ここで取り上げるミュオン原子と異なることに注意されたい。負ミュオンは電子に比べて約 207 倍も重く、束縛軌道も 207 倍原子核に近づくため、多価イオン中の束縛電子と同様に強電場を感じる。QED によると、束縛負ミュオンは仮想光子の放出・吸収を繰り返しながら周囲運動を続ける（自己エネルギー）。また、原子核と負ミュオンの間には静電的な引力が働くが、相互作用を伝搬する光子は、仮想電子・陽電子対 ($e^{\pm}$) の生成・消滅を絶えず繰り返す（真空分極）。ミュオン原子の生成は、負ミュオンが原子の高励起ミュオン軌道に捕まることで始まり、その後、束縛電子を次々とはじき飛ばしながら下のミュオン準位へと脱励起する（ミュオン誘起オージェ過程）。今回の実験で筆者らが採用したネオン (Ne) ガス標的では、この過程で 10 個すべての束縛電子が剥ぎ取られた、

原子核と負ミュオンの 2 体からなるミュオンネオン (μNe) 原子が形成される。その後は負ミュオンは更に下のミュオン準位へ光を放出しながら脱励起していく。この光のエネルギーは数 keV の X 線領域であり、一般にミュオン特性 X 線と呼ばれている。更に筆者らは、角運動量の高い circular Rydberg state と呼ばれる準位のエネルギーは、軌道が原子核から離れているため原子核の大きさにほぼ影響されないことに気づいた。筆者らは、このような準位間の遷移エネルギーを精密に測定することで新しい QED 検証測定が可能になることを提案した⁵⁾。

ここで、2 つの克服すべき問題が存在した。まず、前述の束縛電子を持たないミュオン原子を用意することである。電子が剥がれた後に周囲の原子から再び電子が充填されてしまうと、その電子による遮蔽効果の影響が回避できない。そのためには、実質上ミュオン原子を真空中に孤立させる必要がある。更に X 線領域で僅かな QED 効果を明瞭に観測できる高分解能 X 線検出装置がなければならない。前者を可能にしたのが茨城県東海村の J-PARC MLF 施設において供給される負ミュオンビームである。高エネルギーのビームは薄い標的をそのまま素通りしてしまう。ここでは世界最高強度のパルス運転モードによる低速負ミュオンビームが利用できるため、ガス標的中にミュオンを停めることが可能になった。これにより孤立ミュオン原子が用意できる。後

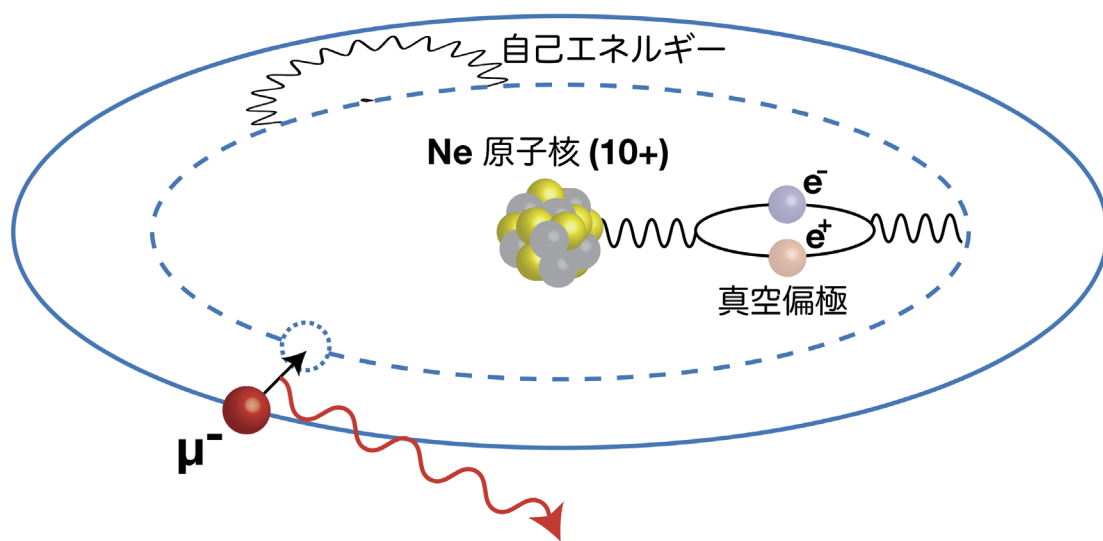


図 1 ミュオン原子と量子電磁力学 (QED) 効果を示す概念図

ミュオン原子において、負ミュオン (μ^-) は原子核に束縛され、その周りを周回する。本研究では、負ミュオンがエネルギー的に安定な軌道に遷移するときに放出されるミュオン特性 X 線のエネルギーを精密計測した

者の問題を解決したのが超伝導 X 線カロリメータである。X 線計測や γ 線計測において最も普遍的に用いられているのは、半導体検出器であろう。特定の放射線を識別するのに十分な分解能を持ち、利用が比較的簡便であるためである。数十 keV 以下の X 線の場合は、ブラッグ反射を利用した結晶分光器がある。これは圧倒的に優れた分解能を有するが、検出効率が極めて悪いと共に、同じ条件下では特定のエネルギー領域しか対応できないという難点がある。このような状況で、優れたエネルギー分解能と検出効率をあわせ持つ超伝導 X 線カロリメータは、「いいとこ取り」の検出器であり、多くの研究者が長年渴望していた game changer であった。筆者らの採用した超伝導 X 線カロリメータは米国 NIST との共同研究で開発した遷移端型センサー (Transition-Edge-type Sensor : TES) であり、超伝導転移点において急激に抵抗が変化することを電流の変化として SQUID で測定する原理を採用している。図 2 に示すように、およそ 0.1 mm^2 という面積の小さなカロリメータが 240 個ほど並んだピクセル検出器である⁶⁾。これにより実質的に半導体と同程度の大きさを有する高効率な検出が可能となった。エネルギー分解能は今回の測定では半値幅で $5.2 \sim 5.5 \text{ eV}$ を達成した。半導体検出器ではなかなか 100 eV 以下にならないことを考えると、20 倍以上の高分解能である。もちろん良いこと尽くめではない。当然ながら転移点

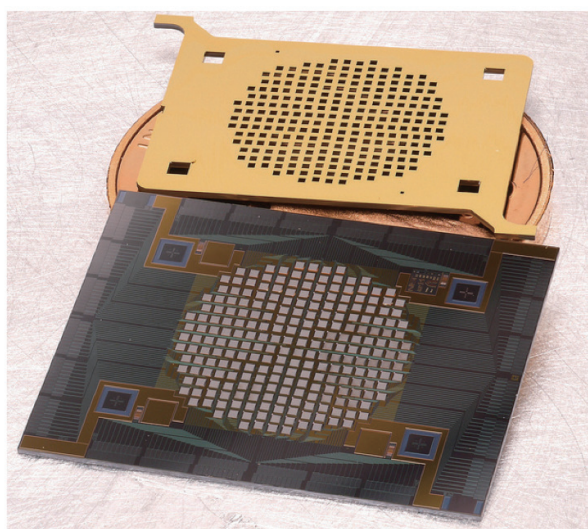


図 2 NIST 製作の超伝導 TES カロリメータ (240 ピクセル) 及びカロリメータの写真

ピクセルアレイ全体の径はおよそ 10 mm 。これを希釈冷凍機によって達成する 100 mK 程度の極低温環境下で動作させる

の 100 mK 付近の極低温において動作させる必要があるため、高価な断熱消磁冷凍機が必要である。また、数本の特性 X 線を 240 ピクセルそれぞれに照射してエネルギー校正を常に行う必要がある。つまり、サイズは小さくとも 240 個の個別の検出器を常時調整しながら測定しなければならない。

3. 実験結果及び理論との比較

実験は、J-PARC MLF 施設 D2 ラインを利用して行われた。0.1~0.9 気圧の Ne ガスチェンバー中に 20 MeV/c の負ミュオンビームを停めて、孤立ミュオン原子を用意し、ここから放出される $5g-4f$ 及び $5f-4d$ 遷移のおよそ 6.3 keV のミュオン特性 X 線を TES 型超伝導カロリメータで検出することにより、高分解能エネルギー分光を行った。その結果得られたエネルギースペクトルを図 3 に示す。 $5g-4f$ 及び $5f-4d$ 遷移は、強度として後者が前者の 6% 程度であり、エネルギー差がおよそ 4 eV であるため、全体として 1 本のピークとして観測されている。更に、対象とする遷移はスピン軌道相互作用に起因する微細構造を持ち $5g_{7/2}-4f_{7/2}$, $5g_{9/2}-4f_{7/2}$, $5g_{7/2}-4f_{5/2}$, $5f_{5/2}-4d_{5/2}$, $5f_{7/2}-4d_{5/2}$, $5f_{5/2}-4d_{3/2}$ という 6 本に分裂している。また、実験で用いられた Ne ガスは天然同位体として ^{20}Ne と ^{22}Ne をそれぞれ 90.48% と 9.25% 含み、これに起因するアイソトープシフトも存在する。そこで、そ

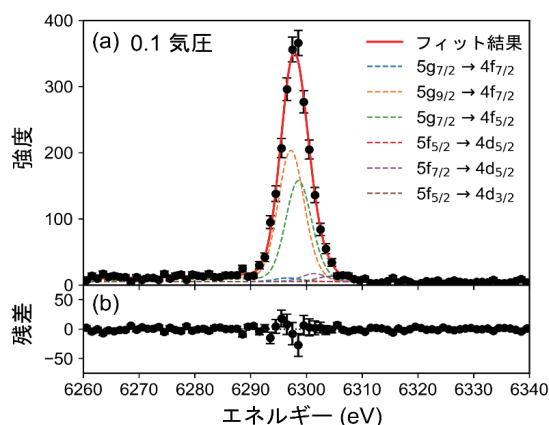


図 3 ミュオン Ne 原子から放出されるミュオン特性 X 線のエネルギースペクトル

(a) ネオンガス標的圧力 0.1 気圧において、 6.3 keV 付近に現れる μNe 原子から放出されるミュオン特性 X 線を測定した。このピークは、6 種類の遷移の寄与の重ね合わせにより形成される。各々の寄与を考慮したフィッティングを行い、ピークエネルギーを 0.002% の精度で決定した。(b) フィッティングによる残差 (予測値と実測値の差) を表す。残差が十分に小さいことから、高い精度でフィッティングできたことが分かる

それぞれの分裂幅やシフトは QED 効果が現れないため理論値を用いて固定し、全体をフィッティングした。その結果は、 $5g_{9/2}-4f_{7/2}$ 遷移に対して、6297.08 eV という遷移エネルギーが最終結果として得られた。ここでは 0.04 eV が統計誤差、0.13 eV が系統的誤差として評価され、0.002% という極めて高い精度を達成したことを意味する^{7,8)}。

一方で、最新の理論に基づいた QED 効果の厳密計算が、共同研究者の P. Indelicato (Kastler Brossel 研究所, フランス) 氏によって行われた。Multi Configuration Dirac-Fock 計算において、ミュオン原子の場合に大きな寄与がある Uehling 効果による真空分極、自己エネルギーに加えて、高次の寄与、有限原子核の大きさや反跳効果を取り入れている。これらをすべて考慮して、 $5g_{9/2}-4f_{7/2}$ 遷移エネルギーとして 6297.26 eV が予想された。実験誤差の範囲内で、この理論値は筆者らの実験値と極めて良い一致を見せたと結論できる。この遷移にはおよそ 2.4 eV の QED 効果が予想されるが、これを 5.8% の確かさで実験的に確かめたことになる。

4. 今後の展望

今回の測定は、ミュオン原子による QED 検証の重要なマイルストーンである。筆者らは最近それぞれ 50 keV 更に 100 keV まで測定可能な超伝導 TES カロリメータを新たに導入した。よって更に重い元素からのミュオン特性 X 線の測定が可能になった。具体的には、次のステップとして Ar 原子を標的として 4-3 遷移による 44 keV のミュオン特性 X 線を精密分光し、およそ 100 eV もの QED 効果を検証する実験を計画している。これにより、更に一桁以上の感度で QED 検証が可能になると期待される。このような高エネルギー X 線の測定では、もはや結晶分光器の利用が困難なので、超伝導カロリメータが圧倒的に有利になると考えられる。更に、ミュオン原子は非破壊元素分析のツールとしても近年注目されている。本研究によって確立したミュオン特性 X 線エネルギーの精密計測定法を元素分析法に応用することで、これまで困難であった同位体分析に加え、元素の化学状態分析等、新たな研究分野の開拓につながることを期待したい。

謝辞

本稿は奥村拓馬氏(東京都立大学), 岡田信二氏(中部大学)を始めとする多くの方々との共同研究の成果である。すべての共同研究者の方々の協力に深く感謝する。実験は、J-PARC MLF (the Materials and Life Science Experimental Facility)において 2019MS01 プログラムのもとに行われた。本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費助成事業新学術領域研究 (研究領域提案型)「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。(領域代表者: 高橋忠幸)」「負ミュオンビームによる原子分子物理の精密検証と宇宙物理観測への展開 (研究代表者: 東俊行)」, 同基盤研究 (A)「トリウム-229 核異性体構造の解明: 高精度時計科学の新展開 (研究代表者: 磯部忠昭)」「超伝導分子検出器を用いた原子分子ダイナミクス研究の革新 (研究代表者: 岡田信二)」, 同挑戦的研究 (開拓)「精密 X 線分光偏光観測に向けた極低温コンプトンカメラの開発 (研究代表者: 山田真也)」, 同若手研究「先端中性分子検出器で探る宇宙環境中での負イオンの化学反応 (研究代表者: 奥村拓馬)」, 同学術変革領域 (A)「星間化学反応の全貌解明に向けた次世代中性分子検出システムの開発 (研究代表者: 奥村拓馬)」, 及び RIKEN Pioneering Project による助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) V. A. Yerokhin, *et al.*, *Ann. Phys.*, **531**, 1800324 (2019)
- 2) C. G. Parthey, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **107**, 203001 (2011)
- 3) A. Matveev, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 230801 (2013)
- 4) A. Gumberidze, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 223001 (2005)
- 5) N. Paul, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **126**, 173001 (2021)
- 6) W. B. Doriese, *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **88**, 053108 (2017)
- 7) T. Okumura, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **130**, 173001 (2023)
- 8) RIKEN News “Quantum electrodynamics passes high-field test: A quantum theory of electrodynamics is shown to be accurate even at the very high electric fields of exotic atoms” (2023) https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20231002_1/

(理化学研究所 東原子分子物理研究室)