



展 TENBO 望

ポジトロニウム超微細構造の直接測定



宮崎 彬
Miyazaki Akira



山崎 高幸
Yamazaki Takayuki
(東京大学)



出原 敏孝
Idehara Toshitaka



立松 芳典
Tatematsu Yoshinori
(福井大学)

1 はじめに

中学・高校の化学の教科書の説明によると、一番軽い原子は水素であり、その質量はおよそ 1.7×10^{-27} kg である。水素はプラスの電荷を持つ陽子から成る原子核と、その周りをグルグル回るマイナス電荷の電子から構成されている——これは今の世界を構成している物質という観点から見ると正しい記述である。しかし、“不安定”ですぐに壊れてしまう物質を視野に入れるともっと軽い“エキゾチック原子”が存在することが知られている。

水素の原子核（陽子）を、同じプラスの電荷を持つが電子と同じ質量を持つ粒子（反粒子）に置換すると、図1のような“原子”ができる。この電子の反粒子を“陽電子”と呼び、こうしてできた原子をポジトロニウムと呼ぶ（質量約 1.8×10^{-30} kg）。これがエキゾチック原子を含めて真に最も軽い原子である。電子と陽電子は対消滅するため有限の寿命でポジトロニウムは γ 線に崩壊する。

電子をはじめとした粒子は固有の磁氣的性質“スピン”を持っている。特に水素やポジトロニウムを構成する電子や陽子、陽電子はスピン $1/2$ を持ち古典的には棒磁石とみなせる。それぞれのN極とS極の向きが揃っているか反対かによって、これらの原子には2パターンある。これを量子論的に解釈すると“エネルギー準位”に差があることに対応する。磁石の引き合う状態はエネルギーが低く、反発する状態はエネルギーが高い。ポジトロニウムの場合、前者はパラポジトロニウム (*p*-Ps) と呼ばれ、短い寿命 125 ps で2つの γ 線に崩壊する。一方、後者はオルソポジトロニウム (*o*-Ps) と呼ばれ、比較的長い寿命 142 ns で3つの γ 線に崩壊する。このように同じポジトロニウムでも磁氣的性質が異なると、全く違う特徴を持つ。

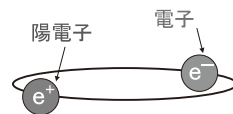


図1 ポジトロニウム

この2つの状態のエネルギー差を超微細構造と呼ぶ¹⁾。これは原子の磁氣的性質を表す重要な物理量であり、その値の測定には原子物理や量子力学にとって大きな意義がある。

超微細構造に限らず、一般に“2つの状態のエネルギー差”を測定する1つの手法として、そのエネルギーと一致するエネルギーを持つ電磁波を当てる、ということが行われる。図2に示したようにポジトロニウム超微細構造の場合、対応する電磁波（周波数 203 GHz）の磁場が電子・陽電子の磁石の向きを反転させ、*o*-Ps を *p*-Ps に遷移させる。電磁波のエネルギーを徐々に変えつつ反応確率を測定すればその準位差が決定できる。ここで電磁波の磁場が寄与しているのが超微細構造間遷移の特徴で、このような遷移を M1 遷移（磁気双極子遷移）と呼ぶ。これはスピン禁制遷移であり、電場が寄与しない高次の遷移であるため、その誘導遷移には高い電磁波のパワーが必要となる。

さて水素原子の超微細構造は量子力学の検証に用いらただけでなく、1960年代から既に水素レーザーなどに広く応用されてきている²⁾。このエネルギーに対応する電磁波の周波数は 1.4 GHz であり、実験的に直接遷移測定されてきた。技術的にはレーダーや電子レンジの周波数帯である。一方、ポジトロニウム超微細構造はこれまで直接測定されてこなかった。なぜなら、必要な電磁波（203 GHz）がいわゆるミリ波（サブテラヘルツ波）に属しているためである。この周波数帯の電磁波の発生及び制御は技術的に大きな困難を伴う。

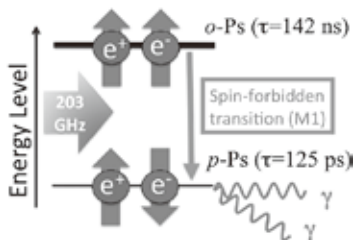


図2 電磁波による超微細構造間遷移

果たして現在の最先端技術を用いてポジトロニウム超微細構造を直接的に測定することは可能であろうか？ 筆者らは、この疑問に答えるべくミリ波技術の開発に挑戦した。以下ではその新しい技術とその結果を紹介する³⁾。

2 ジャイロトロンとミリ波光学

現代文明は多かれ少なかれ電磁気学の恩恵に預かっている。前述のレーダー技術、電子レンジ、ラジオやテレビ、はたまたWiFi通信といった、電波（周波数が数GHz以下）は我々の生活に欠かせない。一方でレーザーに代表される可視光、X線やγ線のようなより高い周波数の電磁波も一般に様々な分野で使用されている。しかしそのちょうど中間の電磁波、周波数にしてテラヘルツ、波長にしてミリメートルの光（遠赤外光）は、いまだにごく専門的な領域での限定的利用にとどまっている。この技術的空白をテラヘルツギャップと呼び、現代に残された技術的フロンティアの1つとして近年注目を集めている。

一般に大強度で周波数の安定したミリ波を生成するのは困難であるが、それを可能とするのがジャイロトロンと呼ばれる真空発振管である⁴⁾。ジャイロトロンは主に核融合のプラズマ加熱用光源として開発されてきた。その動作原理はサイクロトロン・レーザー共鳴と呼ばれ、強磁場中でローレンツ力に従い回転運動をする（サイクロトロン運動）電子ビームから放射される放射光を、その周りに構成した共振器で共鳴的に取り出す、というものである。最大で30~40%もの高い発振効率が得られることが知られており、電源の電力によっては、前述の核融合用ジャイロトロンのようにメガワットを超えるものが実際に運用されている⁵⁾。筆者らの開発した精密科学に应用できる安定度の高いジャイロトロンを図3に示す⁶⁾。直径約5mmに対し1μmという高い精度の共振器、安定して電子ビームを出力できる電子銃、そして10%



図3 ジャイロトロン FUCWGI

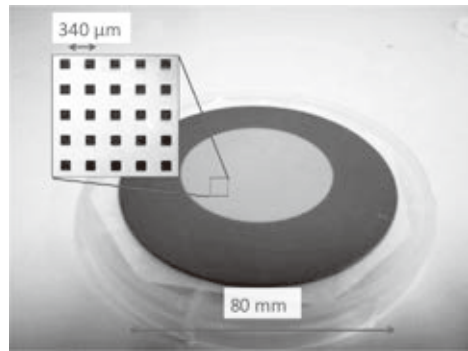


図4 ミリ波ハーフミラー

以下の相対安定性で24時間連続運転するためのフィードバックシステムを開発した。その結果として、周波数線幅 100 ppm 以下で約 500 W の大強度ミリ波を安定に1週間以上出力することに成功した。

o-Ps の短い寿命 (142 ns) 以内で遷移を起こすためには実効パワーにして 10 kW 程度のミリ波が必要である。そこで、2枚の合わせ鏡の中で電磁波を反射させ実効パワーを高めるファブリーペロー共振器⁷⁾をハイパワーミリ波向けに新たに開発した。合わせ鏡の片方は銅(ミリ波反射率 99.85%)を用いた。一方、もう片方の鏡は高い反射率を保ちつつ効率良くミリ波を共振器内部に導入させる必要があり、そのためにミリ波領域のハーフミラーを新たに開発した⁸⁾。図4に示すように、このハーフミラーは幅 200 μm、間隔 140 μm、厚み 1 μm のメッシュ状金薄膜でできている。無数の細かい穴はミリ波が入射した際の擾乱(回折損失)を減らし、1 μm の薄さはオーム損失を減らしている。これを熱伝導率が高くミリ波には透明な高抵抗シリコン基板の上に蒸着した。このハーフミラーと銅のミラーで構成されたファブリーペロー共振器は共振の鋭さを表すフィネスが 500 程度と、ミリ波領域では高い値を持つ。ジャイロトロンからの 500 W 入力に対してゲイン 40、対応する実効パワーにして 20 kW を達成した。

3 ポジトロニウムの生成と検出

前章で解説したような高強度ミリ波中にポジトロニウムを置けば超微細構造が測定できる。ポジトロニウムは“反粒子”である陽電子を含んでいるが、市販の放射線源である ²²Na や ⁶⁸Ge-Ga は陽電子を放出するため、その近くに電子を供給できる物質を置くだけで比較的簡単にポジトロニウムができる。放電現象などを抑制するため、今回筆者らは1気圧程度のアルカンガス(2,2-dimethylpropane)を電子供与体として採用した。線源としては放出陽電子のエネルギーが比較的小さくガス中で止まりやすい ²²Na を用いた。

図5に示したのが、筆者らがファブリーペロー共振器内部に製作したポジトロニウム生成・検出装置である。ミリ波による *o*-Ps から *p*-Ps への直接遷移を測定するためには、*o*-Ps と *p*-Ps の数を数える必要がある。遷移が起こると前者の数が減り、後者の数が増える。*o*-Ps は比較的長い寿命 142 ns の後に3つのγ線に崩壊し、*p*-Ps は即座に2つのγ線に崩壊する。203 GHz のミリ波を当てた際に *o*-Ps の寿命を持ちつつ2つのγ線に崩壊する事象が増えれば、遷移を検出したことになる。筆者らは高性能γ線検出器として最近注目を集めている LaBr₃(Ce) 結晶シンチレータを採用し、γ線の測定を行った。これにより高い分解能(半値全幅 4%)で2つ

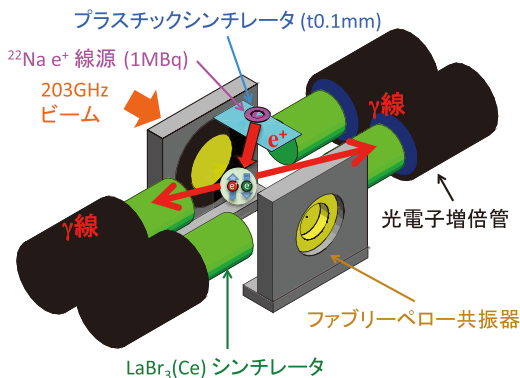


図5 ポジトロニウム生成・検出装置

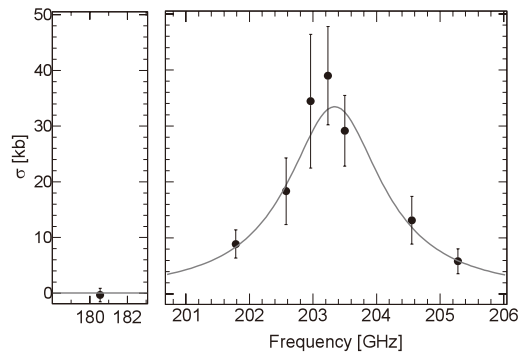


図7 超微細構造共鳴曲線

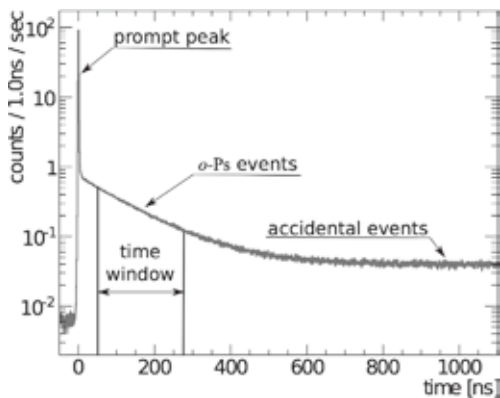


図6 ポジトロニウム寿命曲線

の γ 線事象を識別することができた。また、線源の隣にプラスチックシンチレータを設置して陽電子放出時刻を決定し、 γ 線検出時刻との差を取ることでポジトロニウムの寿命も測定した。図6に測定された時間スペクトルを示す。陽電子と電子の単なる対消滅は時刻0に 2γ 線事象のピークを作る(prompt peak)。ここから指数関数型の o -Ps由来事象を取り出し、そこに含まれる 2γ 線事象の数から p -Psへ遷移した量を測定した⁹⁾。

4 測定結果

検出された γ 線の情報からポジトロニウムがミリ波によって遷移する反応率を得ることが

できる。筆者らは、ジャイロトン内部の共振器を半径の異なるものに次々と替えることで発振周波数を変化させ、この反応率を周波数の関数として求めることに成功した¹⁰⁾。図7に示すように、この反応率を理論曲線でフィットすることにより求められた超微細構造の値は

$$203.39^{+0.15}_{-0.14}(\text{stat.}) \pm 0.11(\text{syst.}) \text{ GHz}$$

であり、理論予想や過去の間接測定と無矛盾であった。

5 今後の展望

以上で見てきたように、筆者らはポジトロニウム超微細構造を直接測定で決定することに世界で初めて成功した。ポジトロニウム超微細構造はポジトロニウムに近い質量を持つ未知粒子(現代の素粒子物理標準模型に含まれない新しい物理)に高い感度があり、今より高い精度で測定を行うことには大きなモチベーションがある。特に最近別の間接的実験¹¹⁾からポジトロニウム超微細構造の値に疑念が生じており、筆者らの直接実験精度を向上させれば新しい物理を発見できるかもしれない。

筆者らはより高精度の測定を目指し、更なるミリ波技術の開発を行っている。特に理論的に存在が予言されている、周波数連続可変・ハイパワー・単色安定な新しいジャイロトン(re-

flective gyro-BWO) の実現を目指している^{12,13)}。また、発生させたミリ波のパワーを精度良く決定する検出器開発も重要である。現在のミリ波領域の検出器は一般に精度が低く、大きな課題となっている。最終的な測定精度には生成ポジトロニウムの統計量も大きく効く。今回のようにガス中に放射線源を置く方法では陽電子がガス分子によって散乱されてしまい、遷移の起こるファブリペロー共振器内部で効率的にポジトロニウムを作ることが困難である。そこで筆者らは真空中で指向性のある陽電子ビームを用いて真空中で効率的にポジトロニウムを生成する方法を開発している。これらの技術開発は決して容易ではないが、既にそれぞれの基礎的な研究は始まっており、今後数年のタイムスパンで新たな可能性が開けると期待している。

【謝辞】

この研究は福井大学遠赤外領域研究センター、東京大学大学院総合文化研究科広域科学研究科、東京大学素粒子物理国際研究センター、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻の共同研究で行われました。福井大学遠赤外領域研究センターの共同利用設備を使用して実験が行われました。関係者の皆様にはこの場をお借りしてお礼申し上げます。本研究は JSPS 科研費 20340049, 22340051, 20840010, 21360167,

23740173, 24840011, 25800129, 11J07131 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Foot, C.J., Atomic Physics, Oxford University Press (2005)
- 2) Ramsey, N., *Rev. Mod. Phys.*, **62**, 541 (1990)
- 3) Miyazaki, A., Direct Measurement of the Hyperfine Structure Interval of Positronium Using High-Power Millimeter Wave Technology, Springer Theses, DOI:10.1007/978-4-431-55606-0, Springer Japan (2015)
- 4) Kartikeyan, M.V., Borie, E., and Thumm, M.K.A., Gyrotrons, Springer (2003)
- 5) Sakamoto, K., *et al.*, *Nucl. Fusion*, **49**, 095019 (2009)
- 6) Tatematsu, Y., *et al.*, *J. Infrared Milli. Terahz Waves*, **33**, 292 (2012)
- 7) Yariv, A. and Yeh, P., Photonics sixth edition, Oxford University Press (2005)
- 8) Miyazaki, A., *et al.*, *J. Infrared Milli. Terahz Waves*, **35**(1), 91 (2014)
- 9) Yamazaki, T., *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 253401 (2012)
- 10) Miyazaki, A., *et al.*, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 011C01 (2015)
- 11) Ishida, A., *et al.*, *Phys. Lett. B*, **734**, 338 (2014)
- 12) Chang, T.H., Idehara, T., Ogawa, I., Agusu, L., and Kobayashi, S., *J. Appl. Phys.*, **105**, 063304 (2009)
- 13) Dumbrajs, O. and Idehara, T., *J. Infrared, Milli. Terahz Waves*, **31**, 1115 (2010)