

論文内容の要旨

論文題目 Laser spectroscopy of the antiprotonic helium atom
-its energy levels and state lifetimes
[反陽子ヘリウム原子のレーザー分光
～エネルギー準位と準位寿命]

氏名

山口英斉

反陽子ヘリウム原子は、反陽子、電子、ヘリウム原子核の三粒子から成るエキゾティック原子である。KEKにおける1991年の発見以来、主に欧州合同原子核研究機構(CERN)のLEAR施設におけるレーザー分光を用いた研究により、その性質は次第に明らかにされてきた。

本論文に記述された実験は、反陽子ヘリウム原子状態の最も基本的な二つの性質、すなわち準位のエネルギーと寿命を、レーザー分光の手法を用いて高精度かつ系統的に測定したものである。Korobov [1] や Kino [2] らによる近年の理論計算における進歩のため、得られた実験結果を用いて、相対論補正・QED補正の加わったクーロン三体系の計算を、過去には考えられなかった程の高精度で検証する事が可能である。また、理論は計算の際、反陽子質量の代わりとして精度良く知られている陽子の質量を使用している為、実験値と理論値の良好一致は、陽子と反陽子質量に差が無い事を意味している。CPT定理によれば、反陽子と陽子の質量・電荷の大きさは厳密に等しいはずであるが、すでに精度良く(0.1 ppb [3])知られている反陽子の比電荷と本実験結果を考慮すると、陽子-反陽子の質量・電荷がどこまで良く一致しているか、一つの上限を与える事ができる。

実験は、1996年に運用を停止したLEARに代わる、新しいCERNの反陽子減速器施設、ADにて行われた。低温に保たれたヘリウム気体(5-6 K, 20-200 kPa) 標的中に、ADからの運動エネルギー5.8 MeV反陽子ビームを静止させると、ごく一部の反陽子はヘリウム中の電子を一つ追い出し、準安定(寿命数マイクロ秒)な原子軌道(量子数 n, l が38程度)に捕らえられる。特定の準安定準位にある反陽子を、Auger崩壊率の高い短寿命な準位へ、レーザーによって遷移させる。すると、Auger遷移により原子が電子を失った後、反陽子はStark効果によって極めて短時間内に原子核と接触し、消滅する。反陽子消滅に伴い発生する荷電パイ粒子は、チェレンコフ検出器によって測定される。図1(左)は記録された反陽子消滅の時間スペクトルであり、レーザーを照射した瞬間に多数の消滅が起こっている事を示すピークが見られる。レーザー波長を目的の遷移波長付近で変化させ、反陽子消滅(消滅ピークの面積)を測定する事により、図1(右)のような共鳴曲線が得られ、遷移波長が精密に決定できる。レーザーには、線幅600MHz、パワー密度1~数10 MW/cm²、紫外から赤外まで広範な波長の実験が可能な、色素レーザーシステムが使われた。波長は3 μ m~40mmの長さを持つ、四つのFizeau干渉計によって測定され、さらにヨウ素分子の振動・回転による吸収線等を利用し、20~50 MHzという高い精度での絶対較正が行われた。

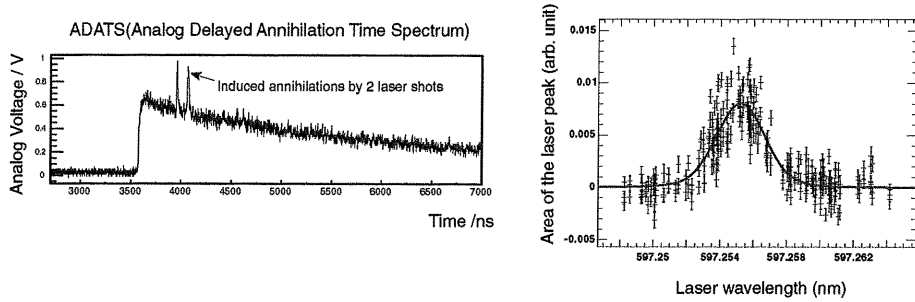


図 1: (左) 反陽子消滅の時間スペクトル。レーザーが 2 回照射されている。(右) $\bar{p}^4\text{He}^+$, $(39, 35) \rightarrow (38, 34)$ 遷移の共鳴曲線。消滅ピークの面積をレーザー波長に対してプロットしたもの。

また、測定される遷移エネルギーは、標的の気体密度に比例したシフトを受ける事が知られている。理論で精度良く計算されている真空中での値と比較するために、二つの実験手法が取られた。一つは過去の実験でも用いられた手法であり、様々な気体密度に対し遷移エネルギーを決定し、それを密度 0 に外挿するというものである。もう一つは、RF 四重極減速器 (RFQD) を利用した手法である。RFQD により 100 keV にまで減速された反陽子ビームは、遙かに低圧 (10 K, 10–300Pa) の気体中に停止させられるため、シフト効果は無視できるほど小さく抑えられる。

以上の様な工夫の結果、1 3 の遷移に対するエネルギーが 50~200 ppb の高精度で決定され (図 2)、理論値とも非常に良く一致している事が確かめられた。実験と理論との比較によって、陽子-反陽子の質量、電荷の大きさの差は、

$$\left| \frac{M_{\bar{p}} - M_p}{M_{\bar{p}}} \right| = \left| \frac{Q_{\bar{p}} + Q_p}{Q_{\bar{p}}} \right| < 10 \text{ ppb} \quad (1)$$

であると結論付けられた。これは、過去の実験における上限、0.5 ppm [4] を遙かに上回るものであり、結果の一部は既に、Particle Data Group [5] によって、陽子-反陽子の質量、電荷の違いを調べる最高精度の実験と認められている。

寿命 (=崩壊率⁻¹) に関しては、1 5 の短寿命な準位に対する測定が行われた。Auger 崩壊率 γ_A は、その準位において Auger 電子が持ち出す事のできる最小の角運動量 L によって大きく異なり、およそ次のような関係で見積もられる事が古くから知られている。

$$\gamma_A \sim 10^{17-3L} \text{ s}^{-1} \text{ for } L = 2, 3, 4. \quad (2)$$

$L = 2$ の準位に見られるような、 10^{10} s^{-1} 以上の高い Auger 崩壊率を持つ準位への遷移は、その自然幅のために非常に幅広い共鳴として観測される。一方、 $2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ より低い崩壊率を持つ準位の場合、反陽子消滅の時間スペクトル (図 1(左)) に現れるスパイク状のピーク形状が長い裾を引くようになる。いずれの場合にも、共鳴線或いはピーク形状の変化を調べる事で、崩壊率が決定される。

測定の結果 (図 3)、多くの準位については式 (2) や理論値から期待される値と矛盾しない値を持つ

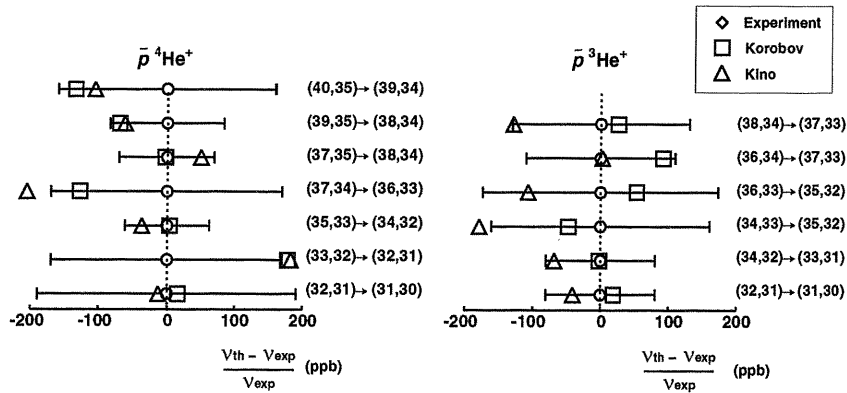


図 2: 遷移周波数の実験値と理論値との精密比較 [1, 2]。実験値は中央の点線上に揃えられ、理論値との相対的な差が示されている [6]。

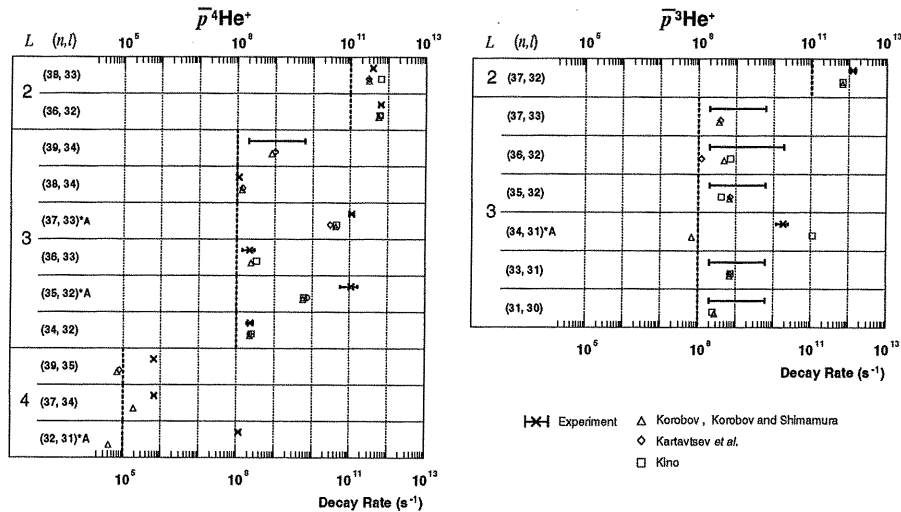


図 3: 崩壊率の実験-理論値比較。縦の太い点線は、式 (2) によって見積もられる典型的な Auger 崩壊率を示しており、「*A」という記号が付けられている準位は、異常崩壊率を持つ。直接決定出来ない範囲にある崩壊率は、「×」印が無く、その範囲のみ示されている。

が、式 (2) の予測とはかけ離れた崩壊率を持つ例も幾つか発見された。我々はこれを「異常崩壊率」と呼び、その原因を考察した [7]。四例のうち三例は、Kartavtsev ら [8] によって予見されていたように、通常は非常に短寿命なため考慮されなかった、電子が励起状態にあるような特殊な反陽子ヘリウム原子の影響と考えられる。また、残りの一例は、崩壊率が標的気体密度に依存する事が確かめられ、異常崩壊率は周囲のヘリウム原子との衝突による効果であると判明した。

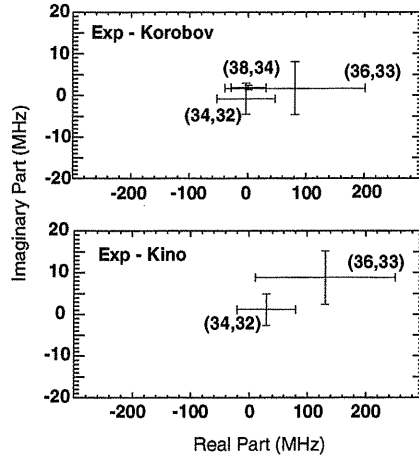


図 4: 3つの $\bar{p}^4\text{He}^+$ 準位に対する複素エネルギーの精密比較。実験と2つの理論 [1, 2] との差が MHz 単位で示されている。虚部 (imaginary part) は Auger 幅 (半幅) に負号が付けられたもの $-\frac{1}{2}(\gamma_A/2\pi)$ であり、実部は (理論的不定性が小さい) 準安定状態からの遷移周波数である。

準位の崩壊率測定により、実験と理論に対し、複素エネルギー、

$$E = E_r - i \frac{\gamma/2\pi}{2} \quad (3)$$

の実部 (準位エネルギー) と虚部 (崩壊幅) を同時に比較することができる。三つの準位に対しては、虚部も 10MHz 程度の精度で理論値と合っている事が検証された (図 4)。近年の CCR 計算では、実部と虚部の絶対精度は同程度であるとされているため、虚部に対する測定は、三体計算の検証として実部と同様に意義深く、また今後さらなる比較精度の向上に寄与すると期待される。

参考文献

- [1] V. I. Korobov, Phys. Rev. A **67**, 062501 (2003), errata **68**, 019902 (2003).
- [2] Y. Kino, M. Kamimura, and H. Kudo, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B, in press.
- [3] G. Gabrielse *et al.*, Phys. Rev. Lett. **82**, 3198 (1999).
- [4] H. A. Torii *et al.*, Phys. Rev. A **59**, 223 (1999).
- [5] K. Hagiwara *et al.*, Phys. Rev. D **66**, 010001 (2002).
- [6] M. Hori *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 123401 (2003).
- [7] H. Yamaguchi *et al.*, Phys. Rev. A **66**, 022504 (2002).
- [8] O. Kartavtsev, D. Monakhov, and S. Fedotov, Phys. Rev. A **61**, 062507 (2000), errata **63**, 019901(E) (2000).