

## 論文の内容の要旨

### 論文題目

# Observation of hyperfine and superhyperfine structure of antiprotonic helium atom by laser-microwave spectroscopy

## レーザー・マイクロ波分光による反陽子ヘリウム原子の超微細構造と極超微細構造の観測

氏名 坂口 淳

反陽子ヘリウム原子 ( $\bar{p}$ -e-He<sup>2+</sup>) は通常のヘリウム原子の軌道電子の一つを反陽子で置換して造られるエキゾティック原子である。一般的に原子の軌道に捕らえられた反陽子はピコ秒以下の短い時間しか生き延びることが出来ず、核子と反応してたちどころに消滅してしまうが、反陽子ヘリウムは例外的に約3%の割合でマイクロ秒程度の極めて長い寿命を持つということが判明している。この長い寿命をもってすればレーザー等で分光することも可能であり、我々は反陽子ヘリウムを分光することによってそのエネルギー構造を調べてきた。特に2001年に我々は、従来レーザーのみでは精度よく測定することの難しかった反陽子ヘリウムの準安定準位の超微細構造を、レーザーとマイクロ波を組み合わせた分光を行うことで観測することに成功した。

反陽子ヘリウム原子の超微細構造は反陽子を持つ磁気モーメントと1s軌道に残っている電子の持つ磁気モーメントとが相互作用することによって生まれる。準安定準位の反陽子は  $l \sim 37$  という高い軌道角運動量を持っており、これが電子のスピン  $s_e$  と結合することで合成角運動量  $\mathbf{F} = \mathbf{l} + \mathbf{s}_e$  に依存した超微細構造が現れる。さらに反陽子固有のスピン  $s_{\bar{p}}$  による磁気モーメントが  $l$  及び  $s_e$  と結合することで、準位は全角運動量  $\mathbf{J} = \mathbf{F} + \mathbf{s}_{\bar{p}}$  に応じより細かく分裂する (※図1参照)。我々が極超微

細構造と呼んでいるこの分裂は超微細構造の分裂よりさらに2桁小さく、我々のレーザーの性能では全く見ることの出来なかったものである。この超微細構造を観測す

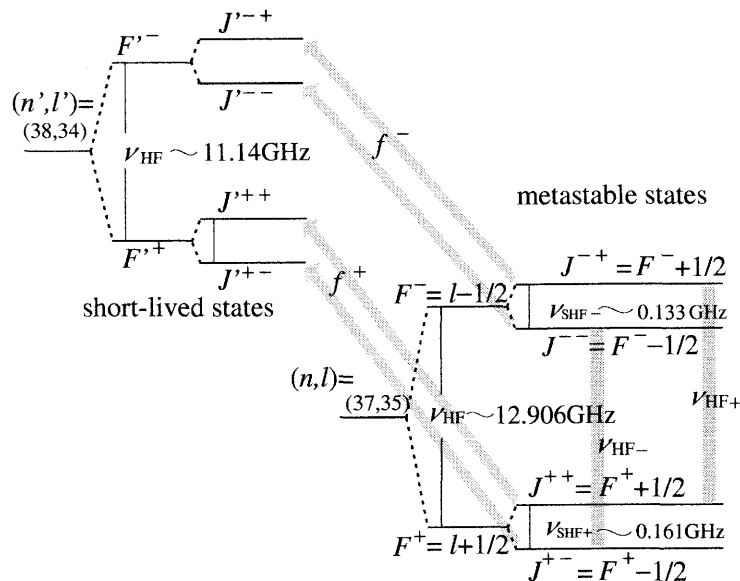


図 1: 反陽子ヘリウムの準安定準位  $(n, l) = (37, 35)$  と短寿命準位  $(38, 34)$  の超微細構造を表すエネルギー準位図。合成角運動量  $F \equiv l + s_e$  と  $J \equiv F + s_{\bar{p}}$  の値に応じて超微細分裂  $\nu_{\text{HF}}$  及び極超微細分裂  $\nu_{\text{SHF}}$  が生じている。

るために我々が考案したのがレーザー・マイクロ波3重共鳴実験である。この実験では周波数  $\nu_M \sim 12.9\text{GHz}$  のマイクロ波電磁場を使って準安定準位  $(n, l) = (37, 35)$  ( $n$  は反陽子の主量子数) の超微細準位間に M1 遷移を起こしそれを観測する。通常図1の二つの準安定分裂準位  $F^+$  ( $F = l + 1/2$ ) と  $F^-$  ( $F = l - 1/2$ ) にはほぼ同数の反陽子原子が存在すると考えられるが、まず線幅の細いレーザーパルスを用いることによってそのうちの一方  $F^+$  側の原子のみを隣接して存在する短寿命準位  $F'^+$  ( $(n, l, F) = (38, 34, 34 + 1/2)$ ) に遷移させ消去する。すると  $F^+$  側と  $F^-$  側の原子数に差が生じるので、マイクロ波の周波数が共鳴周波数 (図1の  $\nu_{\text{HF}+}$  または  $\nu_{\text{HF}-}$ ) に一致すれば  $F^-$  側から  $F^+$  側への占有数の移行が起こるはずである (※図2参照)。  $F^+$  側にいる原子の数は再度レーザーで  $F'^+$  への遷移を起こし、消滅する原子の数を測定することで調べることができる。2回目のレーザー遷移によって誘引される反陽子ヘリウムの消滅の量を、マイクロ波の周波数を変えながら計測することにより我々はマイクロ波共鳴の有無そして共鳴の起こる周波数を知ることができる。

我々は2001年の夏にCERNの反陽子減速器ADを用いて反陽子ヘリウムを生成し、8日間にわたってこのマイクロ波分光実験を行った。図3は実験の結果得られた

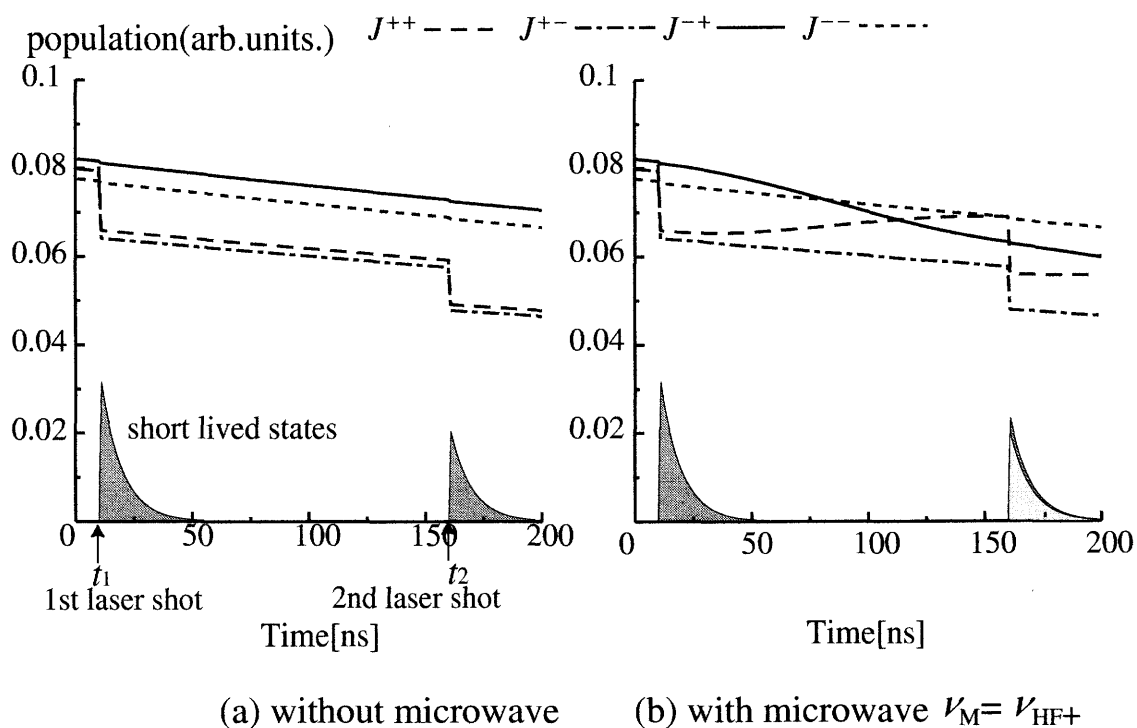


図 2: 3重共鳴実験において、各超微細準位 (及び短寿命準位) に属する反陽子ヘリウム原子の数の時間変化を表すダイアグラム。(a) はマイクロ波遷移がない場合に、(b) は準位  $J^{-+}$  から準位  $J^{++}$  へのマイクロ波遷移があった場合に相当する。

マイクロ波遷移を示すスペクトルで、周波数 12.896GHz と 12.924GHz において超微細構造間の遷移が起こっていることを示している。2つの共鳴周波数は極超微細構造を反映し、それぞれが  $\nu_{\text{HF}+}$  と  $\nu_{\text{HF}-}$  に相当している。これが反陽子ヘリウムについて初の極超微細構造の観測例である。

一方で反陽子ヘリウム原子については量子 3 体系計算に基づく理論的な研究もなされており、2つのグループが共鳴周波数  $\nu_{\text{HF}+}$  と  $\nu_{\text{HF}-}$  を計算している (表 1 参照)。実験により求められた値と理論計算値の間、及び両計算値の間のずれは 30ppm 程度であり、測定誤差の範囲内で一致している。現在超微細構造に関する 3 体系計算の限界はおおよそ 50ppm と見積もられており、今回の実験ではこのオーダーまでの両計算の妥当性を検証することができたといえる。

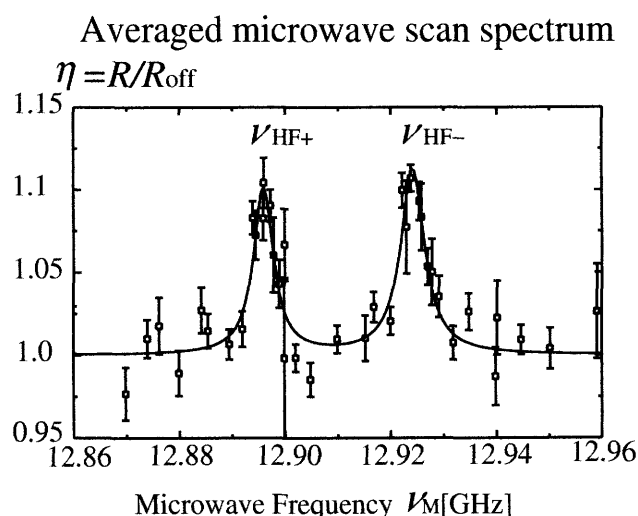


図 3: マイクロ波共鳴遷移のスペクトル。遷移の強さを表す指数  $\eta$  は  $R$  (第 2 レーザーによる反陽子ヘリウム消滅数と第 1 レーザーによる消滅数の比) を、マイクロ波をかけなかった場合の値で規格化したものである。

	理論値 (木野、山中)	理論値 (Bakalov, Korobov)	実験値
$\nu_{\text{HF}+}$ (GHz)	12.896 07391	12.896 3462	12.89595(38)
$\nu_{\text{HF}-}$ (GHz)	12.923 96379	12.924 2428	12.92425(24)

図 4: 理論計算によって求められた共鳴周波数の値と今回マイクロ波分光実験の結果を解析して求めた値。現時点での計算精度の限界は  $5 \times 10^{-5}$  とされている。