

論文審査の結果の要旨

氏名 豊田晃久

本論文は7章からなり、第1章は導入、第2章は研究の動機と目的、第3章は実験の方法、第4章は本研究で製作した実験装置の説明、第5章は実験データの解析、第6章は結果とそれに対する考察が述べられ、第7章に結論がまとめられている。さらに付録の形で、ミュオンの性質、ミュオン生成、オルソパラ状態、方程式の導出、数式の記号の意味、および、略号の説明が与えられている。

ミュオン核融合は、核融合を実現する可能性のひとつとして、研究が続けられている。重水素、あるいは重水素と三重水素の混合系にミュオンを入射すると、重水素ミュオン分子、あるいは重水素三重水素ミュオン分子が生成する。ミュオンノ質量が電子の約 200 倍であることから、これらのミュオン分子中の重水素同士、あるいは重水素と三重水素は普通の水素分子に比べて 200 倍近づいているため、核融合が誘起される。

ただしこの過程においてミュオンが増殖されることはなく、触媒的に作用するだけなので、ミュオンの固有の寿命 $2.2 \mu\text{s}$ で崩壊するか、 ${}^3\text{He}$ に捕獲されるかの間に誘起する核融合の回数（これをミュオンサイクル率という）の向上が重要である。ミュオンサイクル率は重水素三重水素混合系の方が高いことが知られている。一方、重水素系のミュオン触媒核融合は、過程がより単純であり、基礎的な過程を研究する対象として適している。論文提出者は、後者を対象として選び、核融合サイクル率の値に重要な影響を与える共鳴的なミュオン分子形成を研究した。

重水素中に負ミュオンを入射すると、非常に早いレート（液体水素密度 $4.25 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ で $\sim 10^{10} \text{sec}^{-1}$ ）でミュオン重水素 $d\mu$ を生成する。生成された $d\mu$ は、 $F = 3/2$ もしくは $1/2$ の超微細構造をもち、それぞれが他の重水素と衝突して、異なるレートで共鳴的にミュオン分子 $dd\mu$ を形成する。

この、共鳴的にミュオン分子 $dd\mu$ を形成する過程を促進することが、核融合サイクル率の向上にとって重要である。 $dd - \mu\text{CF}$ の共鳴分子生成率については、気体、液体領域を非常によく説明する理論が作られている。その理論によれば、固体領域では生成率が急速に減少するはずである。ところが、従来の 66.7% オルソ重水素を用いた実験では、固体領域でも液体状態とあまり変わらない生成率が観測されている。これは固体に特有な効果によって説明されるものとされ、3つの原因が考えられているが、そのどれが正しいのかは明確でない。

共鳴過程は分子内の回転状態を励起することによってエネルギーのバランスをとることにより実現されるので、回転状態を変化させることで、その生成過程に対する知見を得るとともに、これらの理論の優劣の評価が可能になる。

そこで論文提出者らは、重水素のオルソ状態とパラ状態の比を調節する方法を用いて回転状態を変化させて実験を行った。これは初めての試みである。重水素は核スピンの組み合わせにより、オルソ状態とパラ状態をもっている。オルソ状態はスピン $I = 0, 2$ で 6 重に縮退している。パラ状態はスピン $I = 1$ で 3 重に縮退している。また、ボース粒子である重水素の粒子交換に対する対称性により、分子振動が励起されない低温では、オルソ重水素は回転量子数 J が偶数に限られ、パラ重水素は奇数に限られる。このため、重水素を低温でオルソ-パラ転換反応が起こりやすい状況に置くことで、オルソ重水素の割合を 66.7% から、100% 近くに上昇させることができる。

論文提出者らは、 Al_2O_3 70% + Cr_2O_3 30% を触媒として用いて、これを低温に保ってその間を重水素をゆっくり通すことにより、パラ重水素をオルソ重水素に転換させた。オルソ、パラの濃度比は、ピラニゲージを用いた熱伝導率の測定から定めた。その測定値の較正には、触媒の温度を変化させて測定し、各温度で反応時間を長くしたときの飽和値が熱平衡分布から予想される濃度比であるとすると、確かにブリッジ回路の非平衡電流に比例することを用いた。

測定は、英国の RIKEN-RAL とカナダの TRIUMF で、同じ装置を輸送して行った。試料室内に 3.3 K の 100 μm の銀薄膜を用意し、それにオルソの濃度を増した重水素を吹き付けて厚さ 280 μm だけ凝縮させ、銀薄膜の側から 32MeV/c のミュオンビーム (RIKEN-RAL では幅 62ns のパルスビーム、TRIUMF では DC ビーム) を入射させた。RIKEN-RAL ではオルソ重水素の割合が 99.9%、TRIUMF では 99.7% の重水素を使用し、66.7% の場合のデータとの比較を行った。

測定は、ミュオンが重水素に捕獲されるときに放出される 2.0keV の特性 X 線と、核融合反応に際して放出される陽子 (核融合陽子) と、ミュオン崩壊電子を検出した。X 線の強度を用いてミュオンビーム量を規格化し、核融合陽子の強度から核融合の量を求めた。陽子は他の過程からも生成するので、核融合陽子のみを識別するために、2 重の Silicon Surface Barrier (SSB) 検出器を用いた。1 枚目の検出器 (25 μm および 40 μm) で失われる粒子のエネルギー ΔE 、2 枚目の検出器 (150 μm) で残りのエネルギー $E - \Delta E$ を測定した。この情報の (ΔE , $E - \Delta E$) から、核融合陽子を選別して、その時間スペクトルを測定した。

得られた時間スペクトルを、 $F = 3/2$ の $d\mu$ からの共鳴分子生成率 $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}}$ 、 $F = 3/2$ の $d\mu$ から $F = 1/2$ の $d\mu$ への超微細遷移率 $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}\frac{1}{2}}$ 、ミュオン崩壊以外のミュオン喪失率 λ_{loss} 、および全体にかかる規格因子を自由なパラメタとして、最小二乗フィットを行った。

その結果、 $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}}$ は 66.7% オルソ重水素に対して $3.276 \pm 0.080 \mu\text{s}^{-1}$ 、99.7% オルソ重水素に対して $2.432 \pm 0.057 \mu\text{s}^{-1}$ であり、25.8 \pm 2.5% の減少が見られた。また、 $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}\frac{1}{2}}$ に対しては、66.7% オルソ重水素に対して $41.77 \pm 1.22 \mu\text{s}^{-1}$ 、99.7% オルソ重水素に対して $34.49 \pm 0.90 \mu\text{s}^{-1}$ であり、17.4 \pm 3.1%

の減少が見られた。

またこれらの値から、散乱による超微細遷移確率 $\tilde{\lambda}_{\frac{1}{2}\frac{1}{2}}^{scat}$ と、スピン 1/2 の $dd\mu$ からスピン 1/2 の $d\mu$ への back decay 率 $\Gamma_{\frac{1}{2}\frac{1}{2}}$ と $d\mu$ からの核融合率 $\tilde{\lambda}_f$ の比 $\Gamma_{\frac{1}{2}\frac{1}{2}}/\tilde{\lambda}_f$ を求めた。その結果、 $\tilde{\lambda}_{\frac{1}{2}\frac{1}{2}}^{scat} = 13.9 \pm 6.5 \mu\text{sec}^{-1}$, $\Gamma_{\frac{1}{2}\frac{1}{2}}/\tilde{\lambda}_f = 8.6 \pm 2.0 \mu\text{sec}^{-1}$ であった。この値と、他の実験から求められている $\tilde{\lambda}_f = 3.2 \pm 0.3 \times 10^{-4} \mu\text{s}^{-1}$ を用いて、 $\Gamma_{\frac{1}{2}\frac{1}{2}} = 2.76 \pm 0.68 \times 10^{-3} \mu\text{s}^{-1}$ を、初めて求めた。この値は、理論値 $1.5 \times 10^{-3} \mu\text{s}^{-1}$ と約 1.9σ 離れている。

$F = 3/2$ の $d\mu$ からの共鳴分子生成率 $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}}$ の値は、従来の 66.7% オルソ重水素を用いた実験の値とも、気体、液体領域を非常によく説明する理論の固体領域に対する予言の値とも異なった。66.7% オルソ重水素を用いた実験を説明するために提案されている固体に特有な効果は以下の 3 つである。(1) $d\mu$ 原子が固体領域では熱化が遅くなり熱化する前に $dd\mu$ を形成する。(2) $d\mu$ 原子にパラ重水素の回転エネルギーが供給されて加熱され $dd\mu$ 分子を形成する。(3) 熱化した $d\mu$ 原子がパラ重水素の回転エネルギーとフォノン放出によるエネルギーバランスで共鳴的に $dd\mu$ を形成する。

本実験の結果はどの理論によっても、単独では説明できない。説明の可能性をこれまでのモデルの枠の中で考えると、(2) の効果が理論予測より大きい、わずか 0.3% のパラ重水素の効果が観測されたか、あるいは、(2) の効果は理論予測より小さくて (1) の効果と共存している、ということになる。

このように、論文提出者は、重水素のオルソ状態とパラ状態の組成比を調整することで $dd\mu$ 分子の回転状態を制御し、ミュオン核融合にとって重要な過程である $dd\mu$ 分子の生成率の変化を調べた。これによって、従来得られていなかったパラメタの値を求めることができ、また、固体状態での $dd\mu$ 分子の共鳴的生成率の理論の有効性を区別する情報を得たものであり、その成果は高く評価できる。

なお、本論文は、指導教官等との共同研究であるが、論文提出者が主体となって装置の製作、測定、及びデータ解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって本論文は博士（理学）の学位請求論文として合格と認められる。