

論文の内容の要旨

論文題目：Studies of muon-catalyzed fusion in ortho-para controlled solid D_2

(オルソパラ状態をコントロールした固体重水素におけるミュオン触媒核融合の研究)

氏名 豊田 晃久

ミュオン触媒核融合 (μCF) は、負ミュオン (以下ミュオン) を水素同位体中に入射することによって核融合を促進する手法である。そのなかでも重水素中でのミュオン触媒核融合 ($dd\text{-}\mu\text{CF}$) は重水素と三重水素の混合系 (D-T 系) での μCF ($dt\text{-}\mu\text{CF}$) と並んで盛んに研究が行われている系である。そのダイアグラムを図 1 に示す。

物質中に打ち込まれたミュオンは、非常に早いレート (液体水素密度 $4.25 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ で $\sim 10^{10} \text{ sec}^{-1}$ 、以下同様に規格化) でミュオン重水素 $d\mu$ を形成する。生成された $d\mu$

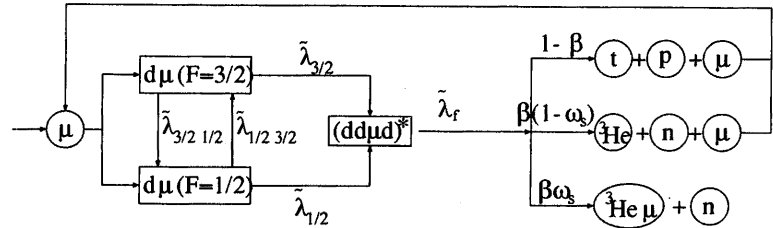


図 1: ミュオン触媒核融合のダイアグラム

は超微細構造 F をもち、その各々の状態 F ($3/2$ もしくは $1/2$) にある $d\mu$ が、他の重水素と衝突して共鳴的にミュオン分子 $dd\mu$ を形成する。ミュオン分子は普通の分子より約 200 倍小さいので、数ナノ秒で核融合を誘起する。核融合後にミュオンは再び放出され、上記の過程をミュオンが電子に $0.455 \mu\text{s}^{-1}$ で崩壊するか、ヘリウムに捕獲されるまで繰り返す。これをミュオンサイクルと呼ぶ。このサイクル率を上げることが μCF における最重要課題である。

本実験では、重水素の状態を変えることによって、サイクル率において最も重要な過程の一つである $d\mu$ の $F=3/2$ からの共鳴的分子生成の様子に影響を与えることを目指す。共鳴的分子生成に影響を与え得る重水素の状態には、温度、密度、相、回転状態、振動状態などがある。重水素のオルソパラ状態は原子核のスピンでできる分子のスピン状態であり、オルソ重水素はスピン $I=0, 2$ の状態、パラ重水素はスピン $I=1$ の状態に対応する。また粒子交換に対する対称性より、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 J が奇数に限られる。よっ

て、オルソパラ変換により回転状態に影響を与えられる。本実験は重水素の回転状態を変化させてその影響を観測した初めての実験である。

従来の $dd-\mu CF$ の理論は、固体領域ではほとんど核融合が起きないと予測していた。その理由は、共鳴を起こすには、固体温度の熱エネルギーまで減速された $d\mu$ 原子の運動エネルギーが足りなくなるからである。ところが、最近固体領域でも液体領域と同じぐらい核融合が起きていることが実験によって発見された [1, 2]。 $dd-\mu CF$ の理論は、液体気体の領域では非常に良く実験を再現するため、これは非常に驚くべき結果である。この実験結果を説明するために新たに幾つかの固体特有の効果を考慮した理論 [3, 4, 5] が提示されている。これらの理論はそれぞれ実験を再現することが分かっており、どの理論が主要であるかは全く分かっていない。本実験は重水素のオルソパラ比を変えることにより新たな実験的情報を与え、固体領域における $dd-\mu CF$ の現象を説明することを目的とする。

図 1 内に示す μCF のパラメーターを決定するために我々は 3.02 MeV 核融合陽子を観測した。その他にビーム量の規格化の目的で、重水素にミュオンが捕獲される際に放出される特性 X 線 (2.0 keV) を測定した。

本実験では RIKEN-RAL ミュオン施設のポート 3 および TRIUMF M9B において実験を行った。標的は固体重水素、温度 3.5(1) K を採用した。放出される核融合陽子を全て観測するために、厚さ 280 μm のフォイル状標的を用意した。触媒 (Al_2O_3 70%, Cr_2O_3 30%) の温度をコントロールすることにより、RIKEN-RAL ミュオン施設では $99.9 \pm 0.4\%$ オルソ、

TRIU MF では $99.7 \pm 0.4\%$ オルソの重水素を作成した。またオルソパラ比の熱伝導度依存性を利用することで、生成された重水素ガスのオルソパラ比を測定した。オルソパラ状態による影響の確認のためにオルソ 66.7% 重水素のデータを取り、バックグラウンドの除去のために標的無しのデータを取った。

図 2 に標的近辺の装置配置図を示す。核融合陽子を測定するための Silicon Surface Barrier 検出器、特性 X 線を測定するための Si(Li) 検出器、ミュオン崩壊電子を測定するためのシンチレーション検出器を設置した。

図 3 に典型的な X 線エネルギースペクトルを示す。標的が存在する場合において、2.0 keV に目的のピークがあることが分かる。図 4 に陽子検出器で観測されたエネルギーの分布を示す。本実験では粒子識別の目的で ΔE 検出器 (厚さ 25 μm および 40 μm) と $E - \Delta E$ 検出器 (厚さ 150 μm) を用いた。ここで ΔE は一枚目の検出器で失われる粒子のエネルギー、 E は 1 組の検出器で失われる粒子のエネルギーである。標的がある場合に、 $(\Delta E, E - \Delta E) = (1.0 \text{ MeV}, 0.6 \text{ MeV})$

から (0.5 MeV, 2.5 MeV) にかけて核融合陽子が存在することが分かる。ただし、ミュオンが原子核に捕獲される際に放出される陽子も若干混在するので ($S/N \sim 2.5$)、空の標的のデータを用いてその影響を除いた。図 4 右に実際のフィットの様子を示す。4つの自由パラメーターとして $F=3/2$ か

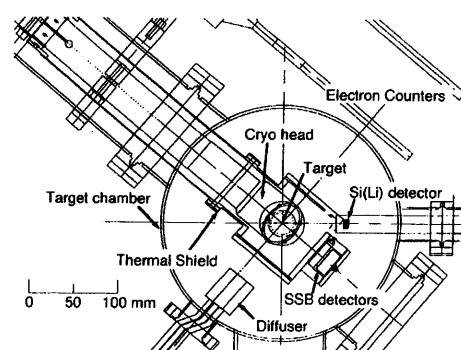


図 2: ビーム後方からみた標的チェンバー内。

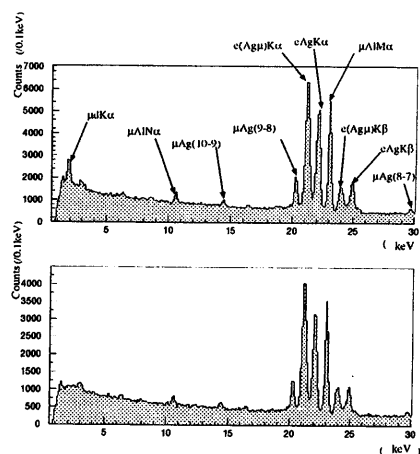


図 3: X 線のエネルギースペクトル。オルソ 66.7%(上図)。空標的 (下図)。

らの共鳴的分子生成率 $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}}$ 、 $F=3/2$ から $1/2$ 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選んだ。フィット関数は二つの指数関数で示され、

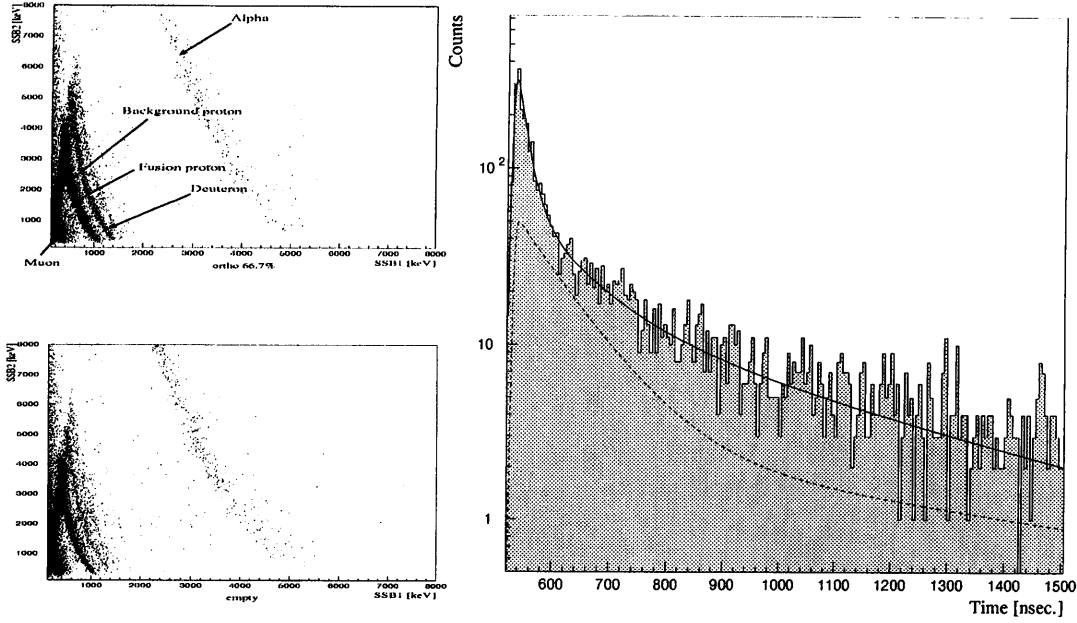


図4: 陽子検出器に関するエネルギー分布図(左図)。横軸が ΔE 、縦軸が $E - \Delta E$ を示す。単位は keV。オルソ 66.7%(左上図)。空標的(左下図)。核融合陽子の時間スペクトル(右図)。点線はバックグラウンド。

以下のような式になる。

$$\frac{dp}{dt} = \frac{2}{3}\phi \left\{ (1 - \beta_{\frac{3}{2}})\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}} - (1 - \beta_{\frac{1}{2}})\tilde{\lambda}_{\frac{1}{2}} \right\} \exp \left[- \left\{ \lambda_{\mu} + \lambda_{loss} + \phi \left(\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}\frac{1}{2}} + \frac{1}{3}\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}} + \frac{2}{3}\tilde{\lambda}_{\frac{1}{2}} \right) \right\} t \right] + \phi(1 - \beta_{\frac{1}{2}})\tilde{\lambda}_{\frac{1}{2}} \exp \left[- \left\{ \lambda_{\mu} + \lambda_{loss} + \phi\omega_d\beta_{\frac{1}{2}}\tilde{\lambda}_{\frac{1}{2}} \right\} t \right].$$

自由パラメータ以外のパラメータに関しては、他の実験値、理論値を用いた。

表1に、この実験で得られた $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}}$ および $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}\frac{1}{2}}$ のオルソパラ比依存性を示す。オルソ 99.7%重水素にした場合で、 $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}}$ に関して $25.8 \pm 2.5\%$ の減少、 $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}\frac{1}{2}}$ に関して $17.4 \pm 3.1\%$ の減少を観測した。また、パラメータ $R_p' = Y_p^{ortho}/Y_p^{normal}$ を導入すると、TRIUMF 実験では $R_p' = -0.097 \pm 0.044$ 、

RIKEN-RAL ミュオン 施設実験では $R_p' = -0.100 \pm 0.117$ となる。ここで、 Y_p^{ortho} および Y_p^{normal} は、コンバートされた重水素と、されていない重水素(オルソ 66.7%)の $F=3/2$ からの核

融合で放出された陽子の検出数をビーム量で規格化したものである。各々の実験結果が良く一致することが分かる。

続いて表1の結果から散乱による超微細遷移率 $\lambda_{\frac{3}{2}\frac{1}{2}}^{scat}$ とパラメータ $\Gamma_{\frac{1}{2}\frac{1}{2}}/\tilde{\lambda}_f$ を求めた。ここで、 $\Gamma_{\frac{1}{2}\frac{1}{2}}$ は $dd\mu$ のスピン $1/2$ から $d\mu$ のスピン $1/2$ への back decay 率、 $\tilde{\lambda}_f$ は $dd\mu$ からの核融合率である。 $\lambda_{\frac{3}{2}\frac{1}{2}}^{scat}$ と $\Gamma_{\frac{1}{2}\frac{1}{2}}/\tilde{\lambda}_f$ にはオルソパラ依存性が無いので、以下の関係式を用いるとそれぞれ

| | 66.7% オルソ | 99.7% オルソ |
|---|-------------------|-------------------|
| $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}} (\mu s^{-1})$ | 3.276 ± 0.080 | 2.432 ± 0.057 |
| $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}\frac{1}{2}} (\mu s^{-1})$ | 41.77 ± 1.12 | 34.49 ± 0.90 |

表1: $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}}$ および $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}\frac{1}{2}}$ のオルソパラ比依存性に関する本実験における結果。

の値を求めることができる。

$$\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}\frac{1}{2}} = \lambda_{\frac{3}{2}\frac{1}{2}}^{scat} + \frac{\Gamma_{\frac{1}{2}\frac{1}{2}}}{\tilde{\lambda}_f} (\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}} - \lambda_{nr})$$

ここで、 λ_{nr} は共鳴によらない分子生成率であり、 $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}}$ に比べると無視できる程小さい。このようにして、本実験においてパラメータ $\lambda_{\frac{3}{2}\frac{1}{2}}^{scat}$ を $13.9 \pm 6.5 \mu\text{s}^{-1}$ と決定した。これは理論値 $36 \mu\text{s}^{-1}$ より低い。これにより、以前から実験的に示唆されていた $\lambda_{\frac{3}{2}\frac{1}{2}}^{scat}$ に関する理論の過大評価を直接示すことができた。現在このパラメータに関する実験値は液体における値 $26.3 \pm 3.0 \mu\text{s}^{-1}$ しかなく、今回、固体において初めて実験値を求めたことになる。

続いてパラメータ $\Gamma_{\frac{1}{2}\frac{1}{2}} / \tilde{\lambda}_f$ も我々の実験値から 8.6 ± 2.0 と求まった。この値と $\tilde{\lambda}_f$ の実験値 ($0.32(3) \times 10^{-3} \mu\text{s}^{-1}$) を組み合わせることにより、back decay 率 $\Gamma_{\frac{1}{2}\frac{1}{2}}$ を $2.76(68) \times 10^{-3} \mu\text{s}^{-1}$ と初めて実験的に求めることができた。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。

最後に本実験の目的である dd- μ CF の固体領域での現象の解明について述べる。この現象を説明するために現在主に 3 種類の固体特有の現象を採り入れた理論が挙げられている。一つは $d\mu$ 原子が固体領域特有の散乱断面積の減少により熱平衡に達する前に $dd\mu$ 分子を形成するというもの (理論 1) [3, 7]、一つは $d\mu$ 原子がパラ重水素からエネルギーを受け取る効果により熱平衡に達する前に $dd\mu$ 分子を形成するというもの (理論 2) [4]、最後は固体特有のフォノン効果により共鳴的に $dd\mu$ 分子を形成するというもの (理論 3) [5] である。それぞれの理論は、共鳴的分子生成率の重水素のオルソパラ状態に対する依存性が全く異なっている。それを本実験の結果とともに示したのが表 2 である。ここで、 $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}}^{ortho}$ 、 $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}}^{normal}$ はオルソパラ変換された場合とそうでない場合の $F=3/2$ からの共鳴的分子生成率である。どの理論も我々の実験値を再現しないことが分かる。我々の実験を説明するには、以下の 2 つのうちどちらかの現象が起きていなければならないと示唆できる。一つは理論 2 の効果が予測より大きく、わずか 0.3% のパラ重水素によっても理論 2 の効果が消えないというものである。もう一つは理論 2 の効果がより小さくて理論 1 の効果と競合しているというものである。また、理論 3 は $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}}$ がオルソパラ比に比例するはずであるため、我々の実験結果を全く説明できないことが分かった。このようにして、固体領域での重水素ミュオン触媒核融合において起きている現象を解明した。

| | $\tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}}^{ortho} / \tilde{\lambda}_{\frac{3}{2}}^{normal} - 1$ |
|------|--|
| 本実験 | -0.258 ± 0.025 |
| 理論 1 | 0.05 |
| 理論 2 | -0.926 ± 0.011 |
| 理論 3 | -0.991 |

表 2: 実験と各々の理論の比較

参考文献

- [1] P.E. Knowles *et. al.*, Hyp. Int. **101/102** 21 (1996).
- [2] D.L. Demin *et. al.*, Hyp. Int. **101/102** 13 (1996).
- [3] A. Adamczak, Hyp. Int. **119**, 23 (1999); Hyp. Int. **101/102**, 113 (1996).
- [4] C.L. Gurin *et. al.*, Hyp. Int. **118** 147 (1999).
- [5] L.I. Menshikov *et. al.*, Hyp. Int. **101/102** 207 (1996).
- [6] S.N. Nakamura and M. Iwasaki, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. **A388** 220 (1997).
- [7] V.V. Filchenkov, Hyp. Int. **101/102** 37 (1996).