

# 論文内容の要旨

## 論文題目

### Muon Catalyzed Fusion in Gas/Liquid/Solid Deuterium under the Controlled Ortho-Para Ratio

[オルソパラ比コントロール下における気体・液体・固体

重水素でのミュオン触媒核融合]

氏名 今尾 浩 士

TRIUMF 研究所(カナダ)の負ミュオンビームを用いて、重水素系ミュオン触媒核融合( $\mu$ CF)に重水素分子のオルソパラ状態が与える効果の研究を行い、固体、液体、気体の全ての相においてその効果を明確に観測する事に成功した。結果は、「共鳴分子生成過程の理解」と重水素系ミュオン触媒核融合における長年の問題、「凝集系の効果」の理解に大変有用である。

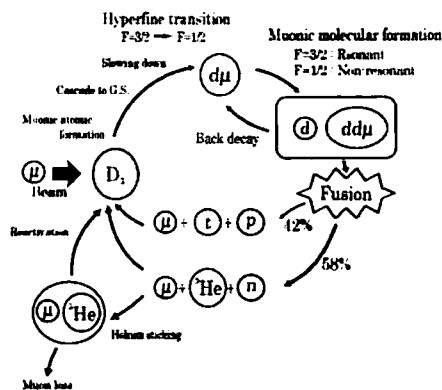


図 1: 重水素系  $\mu$  CF サイクル

重水素中に打ち込まれた負ミュオンはただちにミュオン原子  $d\mu$  を形成する。生成された  $d\mu$  原子は超微細構造  $F$  をもち、その各々の状態から ( $F=3/2$  もしくは  $1/2$ )  $dd\mu$  分子生成を起こす。ミュオン分子は直ちに核融合反応を誘起する。核融合後ミュオンは放出され、その寿命  $2.2\mu s$  が尽きるか、核融合生成物の 1 つヘリウム核に捕獲されるまで上記の仮定を繰り返す。これがミュオン触媒核融合サイクルである (図 1)。

このサイクル率を上げ、 $\mu$ CF で如何に効率良くエネルギーを得るか? という事を考えるとき、核融合反応をおこす前段階のミュオン水素分子をできるだけ早く作ることが重要である。ミュオン分子生成過程の速さは共鳴ミュオン分子生成過程というフェッシュバッハ型の共鳴機構が担っており、非共鳴的なオーグ電子を飛ばす分子生成過程よりも約 100 倍早い<sup>(a)</sup>。この共鳴ミュ

オン分子生成機構こそが $\mu\text{CF}$  で最も重要な過程であり我々は特にこの機構の研究を行った。共鳴分子生成に影響を与える状態には、温度、密度、相、そして、標的水素分子の回転状態があるが、我々は重水素中での $\mu\text{CF}$  において、初めてその全ての状態を同時に変化させながら実験を行った。特に標的  $\text{D}_2$  分子の分子回転状態については、分子の全原子核スピン状態、オルソ(全原子核スピン量子数  $I=0,2$ )、パラ( $I=1$ )状態によって制御する事が出来て、共鳴ミュオン分子生成の条件を制御できる。これは共鳴分子生成に必要な共鳴エネルギー( $\sim\text{meV}$ )と  $\text{D}_2$  分子の回転エネルギーの差が同程度( $7.4\text{ meV}$ )であるために可能となる(オルソパラ効果)。オルソパラ効果の研究は重水素・三重水素系に応用し、そのエネルギー生産効率を上げ「エネルギーブレークイーブン」を達成するために欠かせないものであるばかりでなく、水素中でのミュオン原子、ミュオン分子の振る舞いを解明する上でも重要である。

さて、純粋な重水素中での $\mu\text{CF}$  現象は、共鳴ミュオン分子生成機構が初めて発見された系であり、 $\mu\text{CF}$  過程の基礎研究に最も適していると言える。気体領域で実験的に観測された共鳴分子生成率は孤立系の $\mu\text{CF}$  理論<sup>④</sup>(水素分子間の相関がないものとした理論)で非常に良く再現できている。しかし固体領域で観測された高い共鳴分子生成率を、そのような孤立系の理論で全く記述する事が出来ないという大問題があった<sup>④</sup>。これを受け、フォノンの寄与や中性ミュオン原子の非熱化過程等のモデルを含む固体中の $\mu\text{CF}$  理論が考えられ<sup>④</sup>、さらに固体特有の効果の性質を明らかにするため固体薄膜を用い核融合陽子を検出する事で、オルソパラ効果が観測された<sup>④</sup>。孤立系の理論予測によると、オルソ標的の中では共鳴分子生成率は数パーセント増加するが、実験結果は予想と逆に約 20%減少し、さらに固体特有の効果を組み込んだ最新の $\mu\text{CF}$  理論<sup>④</sup>とも矛盾した結果であった。我々はこの重水素系 $\mu\text{CF}$  における共鳴分子生成機構の全貌解明のために、固体・液体・気体全ての相でオルソパラ効果を観測する実験を行った。固体で過去の実験の再現性をチェックし、液体では固体特有の効果を含まない現象を観測できる上、そもそも共鳴分子生成率が孤立系の $\mu\text{CF}$  理論で説明出来ているため、固体とは違ったオルソパラ効果が期待出来ると考えた。更に、気体では凝集系の効果から完全に切り離してオルソパラ効果を観測できる上、孤立系 $\mu\text{CF}$  理論の検証が出来ると考えた。

実験手法はオルソパラ状態を制御した固体・液体・気体重水素標的を用意し、そこに負ミュオンを打ち込んで、 $\mu\text{CF}$  反応によって放出される  $2.5\text{MeV}$  単色の d-d 核融合中性子を検出するというものである。核融合中性子の時間情報を詳細に解析する事で共鳴ミュオン分子生成率 $\lambda_{3/2}$  や  $d\mu$  原子の  $F=3/2$  から  $F=1/2$  への超微細構造遷移率 $\lambda_{3/2\ 1/2}$  等の情報を引き出し、そのオルソパラ依存性を見た。この実験を成し遂げるためには、(1)d-d 核融合中性子の検出器系の開発、(2)大容量オルソ重水素生成系の開発、(3)オルソパラ比の観測のため回転ラマンレーザー系の開発、が必要不可欠であり、これらの研究・開発を行った。

(1) 蒸気圧の高い液体や気体標的を使用するため、飛程の長い核融合中性子を観測する手法を確立する必要があった。しかし、 $2.5\text{MeV}$  の d-d 核融合中性子検出は難しく、 $\gamma$ 線やミュオンが標的以外の物質に止まって放出されるミュオン原子核捕獲中性子( $\sim 1.5\text{MeV}$  を平均とするマクスウェル分布)の大きなバックグラウンドがあった。まず $\gamma$ 線のバックグラウンドについて、液体

シンチレータ内での発光過程の違いから中性子と分離する事に成功した。続いて、原子核捕獲中性子についてはミュオンが原子核に捕獲された場合は崩壊電子を放出しないという性質を利用して、中性子のイベント毎にミュオン崩壊電子とのコインシデンス条件を課し、原子核捕獲中性子のバックグラウンドを大幅に減らす事に成功した (図 2)。

(2) 限られたビームタイムの中で、多くの温度、密度、オルソパラ比の実験データを取得するため、大容量のオルソリッチな重水素標的を繰り返し作成するための手法を確立する必要がある。D2 ガスは標準状態ではオルソ:パラ=2:1 のスピン統計比で構成され、たとえ低温にしても、オルソ・パラ間の変換には数ヶ月かかる。我々は低温重水素中に常磁性体触媒を混ぜる事で変換を促進する手法を用いた。次に述べる回転ラマン分光法と組み合わせる事で詳細な研究を行い、標準状態で 40 リットルものオルソパラ比をコントロールした重水素を、1 日以内で作成する手法を確立した。

(3) D2 ガスの絶対的なオルソパラ比を短時間のうちに実験現場で測定する事は、今回の実験で最重要課題であった。そこで、我々は DPSS ブルーレーザー(20mW-CW 出力)を使用した、コンパクトなラマンレーザーシステムを開発し、 $\mu$ CF 実験で初めて回転ラマン分光法を応用した。弾性散乱から来るレイリー光の膨大なバックグラウンドの中、その  $10^{-6}$  程度の強度しかない微弱なラマン光を観測する事に成功し、重水素分子の回転状態を明確に知る事ができた。このシステムは日本からカナダ TRIUMF 研究所に輸送され、実験を行いながらオルソパラ比を測定する事に成功した。それぞれの実験 RUN の前後でラマン分光を行い、放射線等の影響で重水素標的のオルソパラ比が変化していない事を確認できた(図 3)。

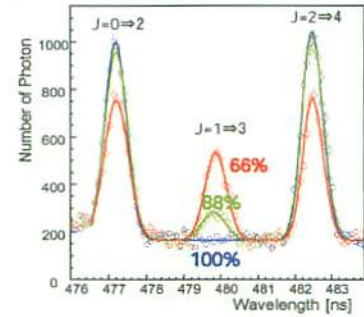


図 3: 実験で得られた典型的な重水素標的のラマン分光スペクトル

以上のような実験手法におけるブレイクスルーの積み重ねで固体、液体、気体の全ての領域においてオルソパラ効果を観測する事に成功した。それぞれの領域の結果を以下にまとめる。

	temp.	$\phi$	ortho	$\lambda_{\frac{1}{2}}$	$\lambda_{\frac{3}{2}}$	$\lambda_{\frac{5}{2}}$
	[K]	[LHD]	[%]	$[\mu s^{-1}]$	$[\mu s^{-1}]$	$[\mu s^{-1}]$
This Work Solid	5.5	1.43	67 (2) 99 (1)	2.35(5) 1.98(5)	31.6(4) 28.3(4)	0.044(fixed) 0.043(2)
	11.7	1.42	67 (2) 99 (1)	2.61(9) 2.15(8)	32.0(8) 30.1(8)	0.040(3) 0.041(3)
	18.2	1.40	67 (2) 99 (1)	2.46(5) 2.11(5)	33.2(4) 30.8(4)	0.043(2) 0.045(2)
This Work Liquid	18.8	1.23	67 (2) 99 (1)	2.70(6) 2.32(5)	32.4(4) 30.2(4)	0.044(2) 0.045(2)
	21.2	1.19	67 (2) 99 (1)	2.91(8) 2.34(7)	33.0(6) 29.1(6)	0.048(3) 0.046(3)
	23.2	1.16	67 (2) 99 (1)	2.86(6) 2.38(5)	32.6(4) 29.8(4)	0.047(2) 0.048(2)

	Temp.	$\lambda_{\frac{1}{2}}^{SC}$	$\lambda_{\frac{3}{2}}^{BD}$	$\Gamma_{\frac{1}{2}}$
	[K]	$[\mu s^{-1}]$	$[\mu s^{-1}]$	[ns $^{-1}$ ]
This Work Solid	5.5	11.2(6.8)	20.4(6.8)	2.8(0.8)
	11.7	21.2(11.4)	10.9(11.4)	1.4(0.9)
	18.2	16.2(8.3)	17.0(8.3)	2.3(0.7)
This Work Liquid	18.8	17.6(7.9)	14.8(7.9)	1.8(0.6)
	21.2	13.1(7.6)	19.9(7.6)	2.2(0.7)
	23.2	16.4(6.6)	16.2(6.6)	1.8(0.5)

表 1: 固体・液体における実験結果

まず、固体領域における結果は、オルソ標的を用いた場合の方が  $\lambda_{3/2}$ 、 $\lambda_{3/2 \ 1/2}$  共に低くなった。これは、孤立系の理論予想とは反対の効果で、以前の実験結果を支持するものである。より確実性の高いラマン分光によるオルソパラコントロール手法によって固体領域におけるオルソ

パラ効果の存在を確信できた。

次に、液体領域でのオルソパラ効果は実験前の予想に反し、孤立系の理論予想と逆で固体領域の結果と変わらない、という予期せぬ結果を得る事が出来た。上述の固体領域における様々な理論との齟齬の原因が固体特有の効果のみでない事が初めて示された (表 1)。

固体液体領域では全ての温度点で  $\lambda_{3/2}$  と  $\lambda_{3/2, 1/2}$  をオルソパラそれぞれについて決める事が出来たので、散乱による超微細構造遷移率  $\lambda_{SC_{3/2, 1/2}}$ 、分子経由の超微細構造遷移率  $\lambda_{BD_{3/2, 1/2}}$  を求め、 $d\mu$  分子のスピン  $1/2$  から  $d\mu$  の  $F=1/2$  への back decay 率  $\Gamma_{1/2, 1/2}$  を求める事が出来た。結果は理論的な  $\lambda_{SC_{3/2, 1/2}}$  が理論値  $36 \mu s^{-1}$  より低い事を示唆している (表 1)。

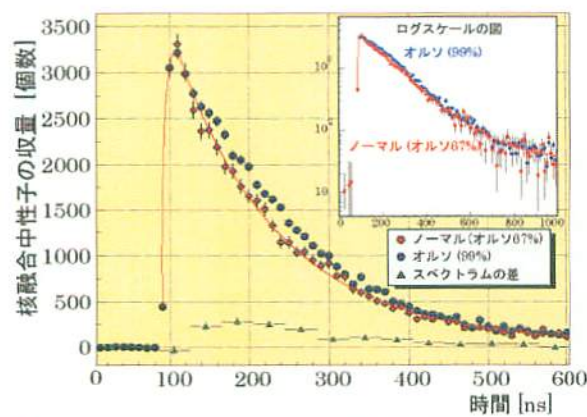


図 4: 気体での核融合中性子の時間スペクトラム。従来の  $\mu CF$  理論に従えば exponential 的に減衰するはずだが、オルソで異常な盛り上がりが見測された。

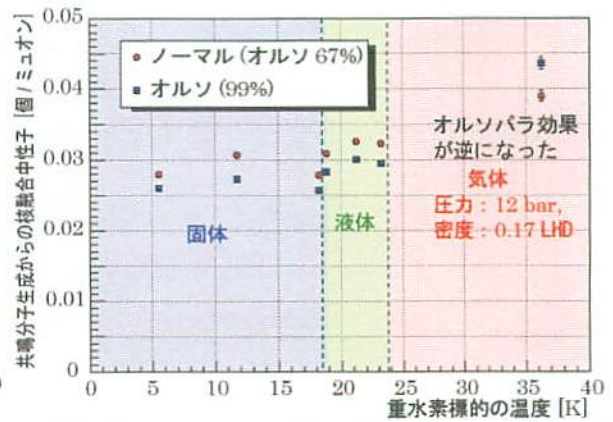


図 5: オルソ・ノーマルそれぞれの標的からの核融合中性子収量の温度依存性。固体・液体と気体の間で傾向が変わった。(図の LHD=Liquid Hydrogen Density)

気体領域では更に驚くべき結果が見測された。まず、気体領域ではオルソの核融合中性子スペクトラムに時間構造に異常が見測され再現性もチェックされた(図 4)。これは今まで気体領域の  $\mu CF$  現象をうまく説明出来てきた孤立系の  $\mu CF$  理論で説明できない新現象であると考えられる。原因としては非熱化状態の  $d\mu$  原子の共鳴分子生成が有力であると考えている。従来の気体での理論は気体重水素中で  $d\mu$  が直ちに熱化するものとしており、 $d\mu$  熱化は理論の根本的な仮定であった。我々の実験結果からその見直しが迫られ、非熱化効果を考慮した理論的解析が必要となっている。そして、気体領域ではオルソパラ効果によって初めてエネルギー生産性が向上するのを観測した。孤立系の  $\mu CF$  理論予想と同傾向でオルソ気体で収量が増加し、固体・液体とは効果が逆転した(図 5)。共鳴条件が凝縮系中で変化している事を示す有力な証拠であるといえる。

- (a) E.A.Vesman, Zh. Eks. Theo. Fiz. Pis. 5, 50(1967). (Sov. Phys. JETP Lett. 5, 91(1967)).
- (b) M.P. Faifman *et al.*, Muon Catal. Fus. 4, 1 (1988)
- (c) P.E. Knowles *et al.*, Phys. Rev. A56, 1970(1997).
- (d) A. Adamczak and M.P. Faifman, Phys. Rev. A64, 052705 (2001).
- (e) A. Toyoda *et al.*, Phys. Rev. Lett. 90, 243401 (2003).