

氏名・(本籍)	しば た ひろ き 柴 田 裕 樹
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2103号
学位授与年月日	平成16年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)化学専攻
学位論文題目	A Theoretical Study on Muon Catalyzed Nuclear Fusion in Bound and Resonant States of Muonic Molecule $t\mu$ (ミュオン分子 $t\mu$ の束縛状態及び共鳴状態におけるミュオン触媒核融合反応の理論計算)
論文審査委員	(主査) 教授 工藤博司 教授 寺前紀夫, 藤村勇一 助教授 関根勉

論文目次

Chapter 1	Introduction
Chapter 2	Theoretical
Chapter 3	Bound and Resonant States
Chapter 4	Nuclear Fusion Rates
Chapter 5	Conclusion

論文内容要旨

第1章 序論

二つの中性子と一つの陽子からなる三重陽子(t)同士の核反応のうち, 低エネルギー核反応は初期宇宙の元素合成及び恒星内の核融合に関係する重要な反応である。この反応に関連する低エネルギー核反応実験では t を三重水素 (T_2) に衝突させる実験のため, 電子遮蔽の影響を大きく受ける。負電荷ミュオン (μ^-) は寿命が $2.2 \mu\text{s}$ であり, 質量が電子の約207倍の素粒子である。質量が大きいため, ミュオンが電子と入れ替わったミュオン分子の核間距離は通常の分子に比べ短くなる。三重水素中に μ^- を入射するとミュオン原子が生成し, ミュオン分子が形成される。ミュオン分子内の二つの t は, 電子遮蔽のない核融合反応 ($t + t \rightarrow \alpha + n + n + 11.33 \text{ MeV}$) を起こすので, ミュオン触媒核融合は $t + t$ 反応の研究に適している。この時 μ^- は核融合反応には直接関与せず触媒として働き, 反応後自由となり再びミュオン原子を生成する。この一連の過程をミュオン触媒核融合(μCF)サイクルという。 $(t\mu)_{m=1} + t$ のしきい値エネルギーの下に形成されるミュオン分子の束縛状態の生成過程は非共鳴過程 $t\mu + T_2 \rightarrow t\mu + T + e^-$ でありサイクル率 $(3.3 \pm 0.7 \mu\text{s}^{-1})$ は μ^- の寿命に比べて小さい。束縛状態に加え, $(t\mu)_{m=2} + t$ のしきい値エネルギーの下に形成される共鳴状

態がある。共鳴状態が形成されるポテンシャルの幅は広いため、束縛の浅い状態の存在が考えられ、Vesman機構[2]によるミュオン分子の形成が期待される。Vesman機構とは、 $t\mu$ と T_2 の衝突の際、ミュオン分子の結合エネルギーと $(t\mu) + t$ の運動エネルギー($\sim meV$)の和が、複合分子 $[(t\mu)_{n-1}tee]_k$ の振動回転励起 (v, K) のエネルギーと一致したとき共鳴的に複合分子が生成する過程を指す。この機構はミュオン分子の結合エネルギー E_b が小さいときに起こる。Vesman機構では複合分子が共鳴的に生成するため、その生成率は非共鳴過程に比べ数百倍高い。また、共鳴状態のエネルギーは $(t\mu)_{n-1} + t$ のしきい値よりかなり高く、高振動量子数状態であるため、その状態からの核融合率は高くなると考えられる。本研究では、Vesman機構を経て生成する $t\mu$ の共鳴状態のエネルギーの精密計算を行い、核融合率を求めた。

第2章 理論

核融合反応時の二つの t は近距離に存在し、 μ は二つの t の周りを回り T_2 分子的な構造をとる。また、しきい値に近い束縛の浅い状態ではミュオンが片方の t に局在して $T + t$ の様な原子的構造をとる。これらの分子的描像と原子的描像を取り入れるため、今回の計算には非断熱組み替チャンネル結合法[3]を用いた。全波動関数 Ψ_{JM} は、三つのヤコビ座標($c=1, 2, 3$)の波動関数 $\phi_{JM}^{(c)}$ の和で表現される。

$$\Psi_{JM} = \phi_{JM}^{(1)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{R}_1) + \phi_{JM}^{(2)}(\mathbf{r}_2, \mathbf{R}_2) + \phi_{JM}^{(3)}(\mathbf{r}_3, \mathbf{R}_3)$$

座標の組み替えを容易にするため、各座標の波動関数はガウス基底関数を用いて表される。

$$\phi_{JM}^{(c)}(\mathbf{r}_c, \mathbf{R}_c) = \sum_{i_c \ell_c L_c} A r_c^{\ell_c} R_c^{L_c} \exp(-\nu_{i_c} r_c^2 - \lambda_{i_c} R_c^2) \left[Y_{\ell_c}(\hat{\mathbf{r}}_c) \otimes Y_{L_c}(\hat{\mathbf{R}}_c) \right]_{JM}$$

ガウスレンジパラメータを等比級数とすることで、変化の大きい粒子間距離が短い波動関数はレンジの短いガウス基底関数の重ね合わせで、漸近領域の波動関数は少ないレンジの長いガウス基底関数で効率よく表すことが出来る。ガウス型基底関数は行列要素の計算が解析的に可能であり、大規模計算を行うことが出来た。 $t\mu$ の波動関数とエネルギーは、レイリー・リッツの変分法を用い計算した。束縛状態近似の下安定化法を用い、共鳴状態と連続状態を区別し共鳴エネルギーを求めた。

$t\mu$ 分子内核融合率は、 $t - t$ 間の核融合反応を光学模型により表現し、複素ポテンシャルによる波動関数の減衰として取り扱う。

第3章 束縛状態と共鳴状態

束縛状態のエネルギーは、他の理論計算値[4,5]とよく一致した。 $(t\mu)_{n=2} + t$ のしきい値より下の共鳴エネルギーを12個高い精度で求め、そのうち6つの束縛の浅いVesman機構を経てミュオン分子を形成することが可能な状態を見出した。 T_2 分子の解離エネルギー(~ 4.7 eV)より大きな共鳴エネルギーをもつ状態からは、ミュオン分子を形成する際放出される余剰エネルギーが T_2 分子を解離させてしまうため、Vesman機構で複合分子を形成することが出来ないためである。また、Vesman機構を経る複合分子は約 10^{10} s⁻¹[6]の速度で形成される。ミュオン原子の $2p \rightarrow 1s$ への脱励起による遷移率は 1.3×10^{11} s⁻¹[6]で、シュタルク混合によって $2s \rightarrow 2p$ への遷移は許容遷移になり、ミュオン原子とターゲット分子との衝突によって誘起される $2s \rightarrow 2p \rightarrow 1s$ への遷移は 9.8×10^{10} s⁻¹[7]の速度で進行する。したがって、ミュオン原子 $(t\mu)_{n=2}$ は脱励起するよりも早くVesman機構を経て複合分子を形成することが可能である。

$t\mu$ 三体波動関数中のミュオン原子の $1s, 2s, 2p$ 状態の寄与 $(|\langle \Phi_\chi | \Psi_{JM} \rangle|^2, \chi = 1s, 2s, 2p)$ は束縛状態では $1s$ が主であり、共鳴状態では $2s, 2p$ が主であった。エネルギーの低い共鳴状態は核間距離が短くミュオン原子同士軌道の重なりが存在するため、寄与の割合の和が1を越えた。よって μ は両方の t に共有されて

おり、 T_2 分子の構造をもつことがわかった。一方、エネルギーの高い共鳴状態は核間距離が長いことためミュオン原子同士の軌道の重なりは存在せず、寄与の割合の和はほぼ1であった。よって μ^- は片方の t に局在する原子的描像の構造をもつことがわかった。

第4章 核融合率

束縛状態からの核融合率をそれぞれの核力パラメータを用い計算した。生成する確率が一番高い $(J,v)=(1,1)$ 状態からの核融合率とサイクル率($3.3 \pm 0.7 \mu\text{s}^{-1}$ [1])との比較より、Bogdanova[8]によって提唱された $t+t$ の核融合反応が ${}^6\text{He}$ の複合核状態を経て起きるといモデルを否定した。

共鳴状態からの核融合率は、束縛状態からの核融合率の計算値($15 \mu\text{s}^{-1}$)より大きいことが判明した。

第5章 結論

束縛状態からの核融合率をサイクル率と比較することで、 $t+t$ の核融合反応では ${}^6\text{He}$ の複合核を形成しないことを明らかにした。高い精度で求めた共鳴エネルギーから、Vesman機構を経てミュオン分子を形成することが可能な6つの束縛の浅い状態を発見した。これらの束縛の浅い状態は μ^- が片方の t に局在する原子的な構造を持つことがわかった。

ミュオン原子 $(t\mu)_{n=2}$ から高い生成率と核融合率をもつ $(tt\mu)_{Jv}$ の共鳴状態を経由する新しい $tt\mu$ ミュオン触媒核融合サイクルが存在することが示唆された。(図1の太線の部分)

- [1] T. Matsuzaki et al., *Phys. Lett. B*, **557**, 176 (2003).
- [2] E. A. Vesman, *Sov. Phys. JETP Lett.*, **5**, 91 (1967).
- [3] E. Hiyama, Y. Kino, and M. Kamimura, *Prog. Part. Nucl. Phys.*, **51**, 223 (2003).
- [4] S. A. Alexander and H. J. Monkhorst, *Phys. Rev. A*, **38**, 26 (1988).
- [5] V. I. Korobov, I. V. Puzynin, and S. I. Vinitzky, *Muon Catal. Fusion*, **7**, 63 (1992).
- [6] J. Wallenius, S. Jonsell, Y. Kino, and P. Froelich, *Hyperfine Interact.*, **138**, 285 (2001).
- [7] W. Czaplinsk, A. Gula, A. Kravtsov, A. Mikhailov, and N. Popov, *Phys. Rev. A*, **50**, (1994).
- [8] L. N. Bogdanova, *Muon Catal. Fusion*, **3**, 357 (1988).

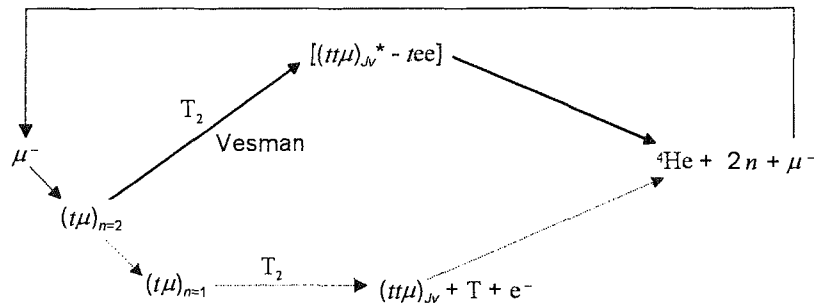


図1 $tt\mu$ ミュオン触媒核融合サイクル

論文審査の結果の要旨

この論文は、ミュオニック分子($t\mu$)の束縛状態及び共鳴状態について理論計算を行い、高い核融合率をもつ共鳴状態の存在を明らかにした著者の研究を記述したものである。本論文の主な成果を以下に列記する。

(1) $t\mu$ 分子内は、核融合反応時にはミュオン(μ^-)が二つの t の周りを回る T_2^+ 分子的な構造をとり、しきい値に近い束縛の浅い状態では μ^- が片方の t に局在して($T+t$)の様な原子的構造をとる。この分子的描像と原子的描像を同時に取り入れることが可能な非断熱組み替えチャネル結合法を用いて、 $t\mu$ 分子のエネルギーを精密に計算した。共鳴エネルギーは束縛状態を近似し、安定化法を用いて共鳴状態と連続状態とを区別することにより求めた。 $t\mu$ 分子内核融合率は、 t - t 間の核融合反応を光学模型により表現し、複素ポテンシャルによる波動関数の減衰から求めた。

(2) $(t\mu)_{n=2} + t$ のしきい値の下に、12の共鳴エネルギー準位が存在することを見出し、そのうちの6つの束縛の浅い準位はVesman機構を経てミュオン分子を形成することが可能な共鳴状態であることを明らかにした。Vesman機構を経る複合分子は約 10^{12} s^{-1} の速度で形成されるが、ミュオン原子の $2p \rightarrow 1s$ への脱励起による遷移率は $1.3 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ で、シュタルク混合によって $2s \rightarrow 2p$ への遷移が許容される。そのため、ミュオニック原子とターゲット分子との衝突によって誘起される $2s \rightarrow 2p \rightarrow 1s$ への遷移は $9.8 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ の速度で進行し、複合分子はミュオン原子($t\mu)_{n=2}$ の脱励起よりも速くVesman機構を経て形成されることをはじめて明らかにした。また、共鳴状態からの核融合率はいずれも、束縛状態からの核融合率 ($15 \mu\text{s}^{-1}$)より1桁以上大きいこと明らかにした。

(3) 束縛状態からの核融合率がもっとも高い(J,v)=(1,1)状態からの核融合率の考察から、 $t+t$ の核融合反応が複合核状態(${}^6\text{He}$)を経て起きるという従来の仮説を否定する知見を得た。

(4) 本理論研究の結果は、ミュオン原子($t\mu)_{n=2}$ から高い生成率と核融合率をもつ($t\mu)_{n=2}^*$ の共鳴状態を経由する新しい $t\mu$ ミュオン触媒核融合サイクルが存在することを強く示唆するものであり、ミュオン触媒核融合実験の具体的実験条件の設定に役立つ成果である。

本論文は著者が自立して研究活動を行なうに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、柴田裕樹提出の論文は博士(理学)の学位論文として合格と認める。