

日本原子力学会「2016年春の年会」

核データ部会企画セッション

「ミュオンの物質内輸送とその学際的応用」

2016年3月28日(月) 13:00~14:30 東北大学 川内キャンパス

原子力分野へのミュオン応用：ミュオン変換とミュオン触媒 d-t 核融合

理化学研究所 仁科加速器研究センター

核変換データ研究グループ

松崎 禎市郎

matsuzak@riken.jp

1. はじめに

負ミュオンが引き起こす原子核反応を2つ紹介する。ミュオンが原子核に捕獲されて陽子数が変わり原子核変換する方法はミュオン原子核捕獲反応であり、長寿命核分裂片(LLFP)の核変換への応用が期待されている¹⁾。そして、ミュオンは二重水素と三重水素の混合系に静止するとd-t核融合を自発的に繰り返すミュオン触媒核融合を起こし、核融合エネルギー源や核融合中性子(14.4 MeV)源の実現に向けた検討がなされている。

2. ミュオン

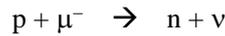
ミュオンはパイオンの崩壊で生まれる。日本では、湯川秀樹博士が1935年に核力の源として中間子(パイオン)の存在を予言し、仁科芳雄博士が1937年に霧箱で宇宙線のなかにミュオンを発見した。現在では、パイオンもミュオンも高エネルギー陽子加速器によって人工的に作ることができる。陽子ビームを炭素原子核等に入射させるとパイオンが生成され、パイオンが崩壊してミュオンができる。ミュオンは電子の仲間属する素粒子で、正ミュオン(μ^+)と負ミュオン(μ^-)があり、真空中の寿命は2.2マイクロ秒である。ミュオンの質量は電子の207倍、または陽子の1/9であり、物質中では負ミュオンは「重い電子」、

正ミュオンは「軽い陽子」のように振る舞う。

3. ミュオン原子核捕獲反応

負ミュオンは物質中に静止すると原子核のクーロン場に捕われてミュオン原子を形成し、 $n=14$ 程度のミュオン軌道から $1s$ 軌道までオーグジュ電子やミュオン原子 X 線を放出してカスケードをする。 $1s$ 軌道にある負ミュオンは、自然崩壊と原子核捕獲の 2 つの競争過程をもっていて、その崩壊確率は、自然崩壊の平均寿命の逆数と原子核捕獲確率の和で記述できる。 $1s$ 軌道にある負ミュオンの寿命は、原子番号 $Z = 6$ から $Z = 40$ の範囲では Z^4 に反比例して減少し、より大きい Z の原子核では、 $80 \sim 100$ nsec の値をとる。原子番号が $Z = 40$ より大きい原子核では、ミュオン $1s$ 軌道半径が原子核半径より小さくなるので、大きい Z の原子核ではミュオン原子核捕獲確率は 100% に近い値となる。

負ミュオン原子核捕獲が起ると、原子核内の素過程として、ミュオン (μ^-) が陽子 (p) と結びつき中性子 (n) とニュートリノ (ν) が形成される。



ミュオン静止質量エネルギー (106 MeV) の殆どはニュートリノが運動エネルギーとして持ち去り、原子核励起エネルギーとして $10 \sim 20 \text{ MeV}$ 程度が残されると考えられている。陽子が中性子に変換するので、生成する原子核の質量数は不変だが、原子番号は 1 つ小さい ($Z - 1$) 原子核の励起状態 (複合核状態) が形成される。



図 1 に示すように、 Z 原子核のミュオン原子核捕獲反応では、 $Z - 1$ 原子核の複合核励起状態から複数個の中性子放出が起こり、 $Z - 1$ 原子核の同位体が生成する。ミュオン原子核捕獲反応は、原子番号 Z の原子核を原子番号 $Z - 1$ の原子核同位体に核変換する反応である。

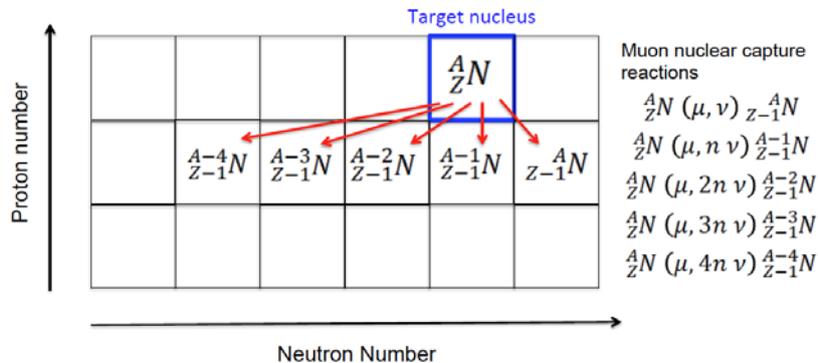


図 1：ミュオン原子核捕獲反応

Z-1 原子核の複合核励起状態からは、低い確率であるが、陽子や α 粒子の放出があることも知られているが、この場合でも、それぞれ Z-2 原子核や Z-3 原子核へ核変換することになる。このように、一個の負ミュオンは一個の原子核を必ず核変換するので、この手法を「ミュオン核変換」を呼ぶ事にする。

ミュオン原子核捕獲反応による核変換の具体例として、同位体濃縮した ^{108}Pd 標的のミュオン原子核捕獲反応を考えてみる。以下の原子核反応が、それぞれの反応に固有の反応確率（反応分岐比）をもって同時に進行する。

- $^{108}\text{Pd}(\mu^-, \nu) ^{108}\text{Rh}$ (半減期 16.8 秒で ^{108}Pd \rightarrow β^- 崩壊)
- $^{108}\text{Pd}(\mu^-, n \nu) ^{107}\text{Rh}$ (半減期 21.7 分で ^{107}Pd \rightarrow β^- 崩壊)
- $^{108}\text{Pd}(\mu^-, 2n \nu) ^{106}\text{Rh}$ (半減期 30 秒/2.2 時間で ^{106}Pd \rightarrow β^- 崩壊)
- $^{108}\text{Pd}(\mu^-, 3n \nu) ^{105}\text{Rh}$ (半減期 35.5 時間/45 秒で ^{105}Pd \rightarrow β^- 崩壊)
- $^{108}\text{Pd}(\mu^-, 4n \nu) ^{104}\text{Rh}$ (半減期 42 秒/4.4 分で ^{104}Pd \rightarrow β^- 崩壊)
- $^{108}\text{Pd}(\mu^-, 5n \nu) ^{103}\text{Rh}$ (安定核)

過去の実験論文を調べると、中性子 5 個を放出する反応も観測されているので、ここでは $(\mu^-, 5n \nu)$ 反応までを記述してみた。中性子を 1 個放出できるエネルギー（中性子分離エネルギー）が 6~8 MeV 程度であるにもかかわらず、10~20 MeV の複合核励起状態から 5 個もの中性子が放出される確率があることは大変興味深い²⁾。同位体濃縮 ^{108}Pd を標的とするミュオン原子核捕獲反応の生成核種は Rh の放射性同位体核種であり、大部分は β^- 崩壊して安定核の Pd の同位体となる (^{107}Rh の場合を除く)。ここでの $(\mu^-, 5n \nu)$ 反応の生成核は ^{103}Rh (安定核) となる。

Muon Nuclear Capture Reactions on Isotope-enriched ^{108}Pd Target

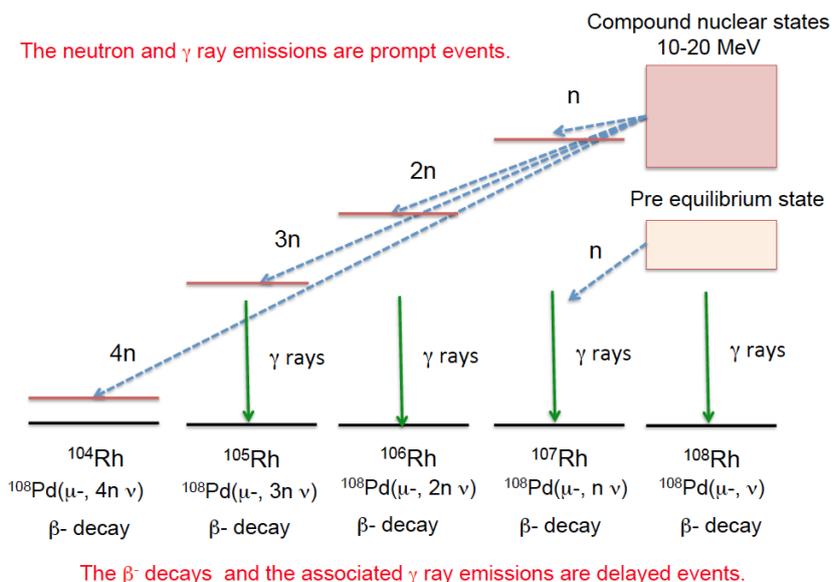


図 2 : ^{108}Pd 標的のミュオン原子核捕獲反応過程イメージ図

図2は、 ^{108}Pd 標的の $4n$ 反応までを想定したミュオン原子核捕獲反応過程のイメージ図である。負ミュオンを原子核捕獲した ^{108}Pd は ^{108}Rh の複合核励起状態を形成し、さらに複数個の中性子を放出し、 Rh の放射性同位体の励起準位を作り、それらの励起準位からは γ 線崩壊により Rh 同位体の基底準位が生成される。 Rh 同位体の生成確率は反応分岐比に支配されるので、この反応分岐比を精密に決定することは重要である。また、放出中性子個数分布や中性子エネルギー分布を実験で求めると、中性子の放出機構を複合核蒸発模型や原子核内部カスケード模型を用いた理論との比較ができる。ミュオン原子核捕獲反応機構を実験的に解明し、その反応機構の理論の構築を目指し、さらに、ミュオン核変換を応用する研究を進めたいと考えている。

4. ミュオン触媒 d-t 核融合

水素に負ミュオンが止まるとミュオン水素原子が形成され、その大きさは水素原子の $1/207$ とある。この特徴を生かした典型例がミュオン触媒核融合 (μCF) である。図3に示すように、負ミュオン (μ^-) が二重水素 (D) と三重水素 (T) の混合系に静止すると、主に $t\mu$ 原子が形成される。

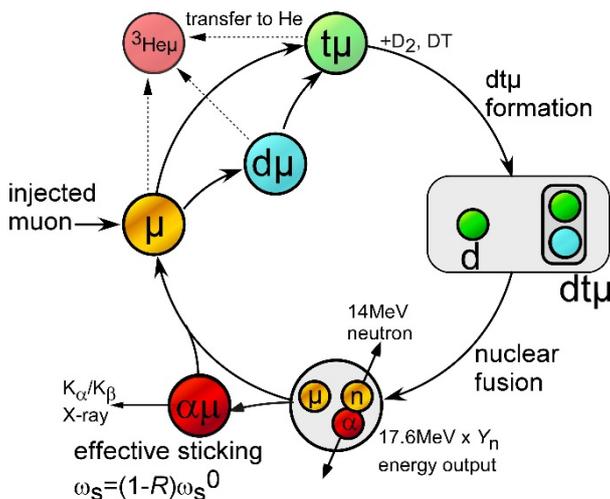


図3 ミュオン触媒 d-t 核融合過程の原理図

電気的中性の $t\mu$ 原子は、クーロン力を感じないで D_2 分子と衝突し、3体の束縛状態である $dt\mu$ 分子を共鳴的に生成する。この $dt\mu$ 分子の大きさは小さいので、分子内で $d+t \rightarrow \alpha+n$ 核融合反応が自発的に起こる。反応後、大部分の μ^- は解放され、次の核融合サイクルを引き起こす。一方、核融合生成された α 粒子にミュオンが付着して $\alpha\mu$ 原子となる確率があり、さらに $\alpha\mu$ 原子の減速過程で付着しているミュオンがはぎ取られて核融合サイクルにもどる確率もある。この μCF 現象は、入射 μ^- ビームを制御することにより $d-t$ 核融合反応を制御することができ、低炭素社会に向けた有望なクリーンエネルギー源となりうる可

能性を秘めている。

理化学研究所では英国に建設した理研-RAL ミュオン施設において、大強度パルス状ミュオンビームと、先端的トリチウム取り扱いシステムを生かして、主に D_2-T_2 標的中で起きるミュオン触媒 $d-t$ 核融合過程を研究してきた³⁾。実験では、 $d-t$ 核融合に伴う中性子、ミュオン原子 X 線、 $\mu-e$ 崩壊電子を計測した。その実験結果のまとめを図 4 に示す。(1) 上段左：ミュオンが α 粒子に付着して発生する 8.2 keV のミュオン原子 X 線スペクトル、(2) 上段中央：NE213 液体シンチレーション検出器による中性子—ガンマ線分離スペクトル、(3) 上段右：上段は核融合中性子エネルギースペクトル (14.4 MeV)、下段は中性子の時間スペクトル、である。そして、(4) 下段左側： D_2-T_2 比を変化させた核融合サイクル、下段右側： D_2-T_2 液体標的または固体標的で D_2-T_2 比を変化させたミュオン損失率の測定結果、である。実験では、ミュオン強度や標的の量に依存するが、通常では毎秒約 100 万回程度の $d-t$ 核融合イベントを計測している。

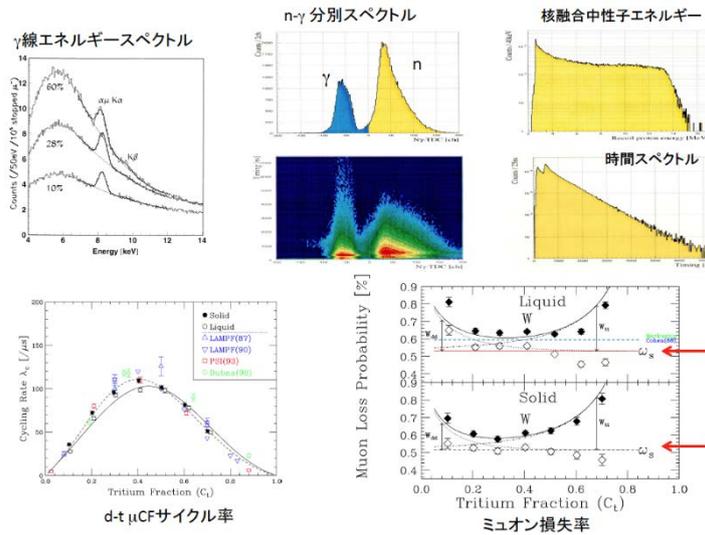


図 4：理化学研究所で得られたミュオン触媒 $d-t$ 核融合実験結果のまとめ

核融合サイクル率は、温度・密度・ D_2-T_2 混合比に依存し、固相・液相・気相などの状態によっても変化するが、最大核融合サイクル数はミュオン 1 個あたり約 120 回が観測された。核融合 1 回あたりの放出エネルギーは 17.6 MeV であるので、これは 2.1 GeV のエネルギー出力に相当する。一方、1 個のミュオン生成に必要な加速器ビームエネルギーは約 5 GeV (核融合 300 回分) とされている。現状では、出力エネルギーは入力エネルギーの約 40% 程度である。次の達成目標は、エネルギー出力が必要エネルギーを超えること (ブレイクイーブン) を実現することである。核融合サイクル率は、(1) $d-t$ 分子の生成率 (生成速度)、(2) μ が α に付着して失われる $\alpha\mu$ 損失率、(3) $\alpha\mu$ イオンがその減速過程で付着していた μ が乖離して次の μCF サイクルに参加する確率、(4) D_2-T_2 標的の密度、

等に起因している。

α 粒子に付着したミュオンを100%解離させる事が出来れば、この実験で得られた $dt\mu$ 分子生成率値で見積ると核融合サイクル数は D_2-T_2 液体で 290 回、固体で 340 回になり、ブレークイーブンを達成することになる。技術的に難しいが、 D_2-T_2 標的の密度を液体水素密度の 5 倍に増やすことができれば、核融合回数は 1200 回まで増加することが見積もられる。また、 D_2-T_2 ガス分子状態の制御（レーザー励起）、プラズマ D_2-T_2 標的の実現、 D_2-T_2 標的への外的条件（電場、磁場、高周波共鳴、衝撃波）を加えることで核融合サイクル数を増やすアイデアもある。理化学研究所では系統的に液体と固体の D_2-T_2 標的の μCF 実験を行ってきたが、 μCF サイクル数を増加するためには、高温・高圧（1000K・1000 気圧程度）状態の D_2-T_2 標的が適するという指摘もある。高温・高圧状態の D_2-T_2 標的では D_2-T_2 ガスの金属容器壁の透過や水素脆性への課題があるが、是非ともこの μCF 実験を実現したい。この μCF 研究は、将来の $d-t$ 核融合エネルギー源や核融合中性子（14.4 MeV）源へと発展できる可能性がある。

以上、2つの負ミュオンが引き起こす原子核反応について概説したが、少しでも皆様にお役に立てば幸甚である。

参考文献

- [1] ImPACT 藤田プログラム「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」<http://www.jst.go.jp/impact/program/08.html>
- [2] D.F. Measday, Physic Report 354(2001)243
- [3] K.Ishida et. al., Nuclear Physics B Proc. Suppl.149(2005)348, 松崎禎市郎、理研ニュース No.332(2009)