



# J-PARC MLF におけるステライルニュートリノ探索実験

長谷川 勝一, 丸山 和純\*

(日本原子力研究開発機構, 高エネルギー加速器研究開発機構\*)

## Sterile Neutrino Search at J-PARC MLF

Shoichi Hasegawa and Takasumi Maruyama\*

Japan Atomic Energy Agency and High Energy Accelerator Research Organization\*



### ABSTRACT

The mercury target at J-PARC MLF provides neutron beam for material and life science. However it is also good neutrino source to search for 'sterile neutrino' for basic science at the same time. This article describes JSNS<sup>2</sup> experiment (J-PARC Sterile Neutrino Search using J-PARC Spallation Neutron Source).

Keywords: *Neutrino, J-PARC*

### 1. はじめに

日本中性子科学会誌である波紋のサイエンス記事にニュートリノ探索の話が出てくることを不思議に思われる方が大勢いらっしゃるかもしれません。今回の記事では、中性子・ミュオンを用いた実験施設において発生しているニュートリノを使って、存在が明確になっていないステライルニュートリノという不思議な粒子を探索する実験について紹介します。

ステライルニュートリノは、通常のニュートリノが行う弱い相互作用を行わないニュートリノで、重力相互作用しか行わない幽霊粒子である。重力しか感じない粒子であるため、宇宙に漂う暗黒物質である可能性もあり、その存在の有無について、活発な研究がおこなわれている。Fig.1に素粒子とその感じる力について示した。もしこの粒子の存在が確定できれば、現在「標準模型」

と呼んでいる素粒子の常識が大きく覆される可能性がある。

さて、このように、検出器内で反応をおこさないような幽霊粒子をどのように捕えれば良いだろうか？ 実は、昨年10月宇宙線研究所の梶田氏がノーベル賞を受賞したことで有名になった、ニュートリノ振動現象を用いることによって、ステライルニュートリノを間接的に捕えることができる可能性がある。ニュートリノ振動とは、ニュートリノの持つエネルギーとニュートリノの飛行距離によって、電子型、ミュー型、タウ型の種類(フレーバーと専門用語で呼ぶ)が変化する現象である。幸いなことに、このステライルニュートリノは、通常の弱い相互作用を行うニュートリノと、ニュートリノ振動を短い飛行距離で起こすことができると考えられている。Fig.2にあるように、ステライルニュートリノが存在すると、今までに考えられていなかったような振動が多数現れる

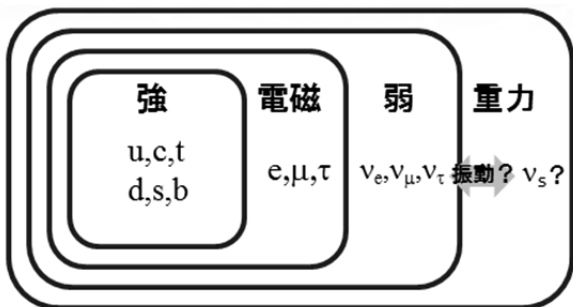


Fig.1 Elementary particles and their sensitive forces (interactions). Quarks (u,c,t,d,s,b) are sensitive to all forces (strong, electro-magnetic, weak, gravity). Charged leptons (e,μ,τ) are sensitive to electro-magnetic, weak and gravity forces. Normal neutrinos ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) are sensitive to weak and gravity forces. Sterile neutrino ( $\nu_s$ ) is only sensitive to the gravity.

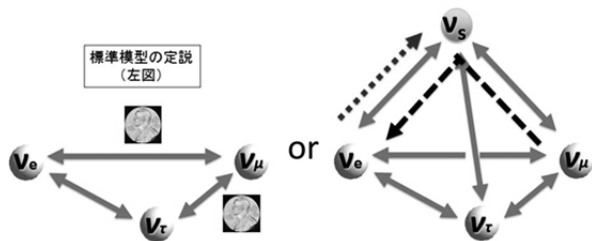


Fig.2 Neutrino oscillations (left: usual case, and right: including sterile neutrinos). If sterile neutrino is included in the oscillation, there are different oscillation paths from usual configuration. Dotted and dashed lines correspond to the paths which are indicated from previous experiments [1-5]. The JSNS<sup>2</sup> experiment also aims to confirm or refute the oscillation corresponding to the dashed line.

ようになる。例えば、生成した電子型ニュートリノがステライルニュートリノへ振動したり、今までの通常のニュートリノ同士の振動では説明できないような短距離でのミュー型から電子型のニュートリノ振動が現れたりする。我々の J-PARC MLF での実験は、数 10 m の短距離でミュー型から電子型への新たなニュートリノ振動があるかどうかを探し、結論を出すことを目的とする。

ステライルニュートリノは、今までいくつかの実験でその存在が示唆されているが[1-5]、未だ結果が確定しておらず、その存在の有無を確定しようと、世界でいくつかの実験が予定されている[6-10]。我々の実験は、その実験戦略の良さを活かして、世界に先駆けて結果を出すことを目指している。特に、今年度から科学研究補助金基盤 (S) が採択されたことから、2018 年度の終わり頃からの実験開始を目指す。

## 2. ニュートリノ実験施設としての MLF

J-PARC MLF は大強度の中性子とミュオンを用いる物質・生命科学実験を行う施設である。MLF 内には水銀標的が設置されており、中性子を生成させるために大強度の陽子ビーム (1 MW (デザイン値), エネルギー 3 GeV, 25 Hz, 100 ns 幅, 2 バンチ) を衝突させている。水銀標的における核破砕反応によって生成した中性子を、水素モデレータで減速し中性子実験用に提供している。一方で、水銀標的では、大量の  $\pi$  中間子および K 中間子が生成しており、これらの中間子崩壊によりニュートリノも大量に発生する。Fig.3 は、ビーム衝突により発生するニュートリノ発生時間分布を示している。 $\mu$  粒子の寿命は 2.2  $\mu$  秒である。一方で、 $\pi$  中間子や K 中間子の寿命は 0.03  $\mu$  秒より短いため、ビーム入射タイミングから約 1  $\mu$  秒後には、 $\pi$  中間子崩壊後に発生した  $\mu$  粒子の静止崩壊からのニュートリノのみとなることが分かる。パルス加速器の特色を生かして、この時間のみを選択的に利用することで、ビームに関連した中性

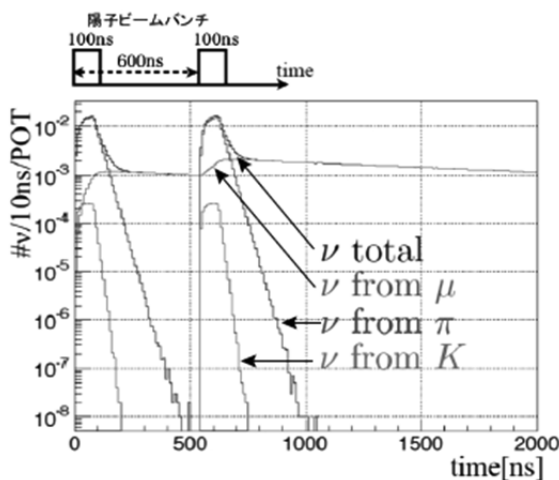


Fig.3 Calculation result of neutrino production at mercury target.

子背景事象、 $\pi$  中間子や K 中間子から発生するニュートリノ、宇宙線関連の背景事象を非常に小さく抑えることができるため、MLF はバックグラウンドの少ない質の高いニュートリノ源として利用出来る。

## 3. JSNS<sup>2</sup> (J-PARC E56 実験)

前章で述べたように、MLF は素粒子の静止崩壊からのニュートリノを用いた実験施設として高いポテンシャルを秘めている。

LSND[1]は、1993~1999 年に米国ロスアラモス国立研究所で行われた実験であり、ステライルニュートリノの存在を実験的に示唆したきっかけとなり、現在でもその結果は最も有力とみなされている。しかしながら、背景事象が多く、その除去解析が複雑となり、未知の不定性が混入している可能性があることから、確定的な結果とは受け入れられていない。

JSNS<sup>2</sup> (J-PARC E56 実験) [6]は、J-PARC MLF で、LSND と同じ  $\mu^+$  の静止崩壊からのニュートリノを用いて、同じ  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  の振動を、同じニュートリノ検出原理 (陽子との逆  $\beta$  崩壊反応) で探索する実験である。

JSNS<sup>2</sup> 実験は MLF の強力なパルスビームと、ガドリニウム (Gd) 入り液体シンチレータを用いることで、信号対ノイズ比を格段に向上し、未だに明確な決着がなされていない LSND 実験結果の完全な確認か否定を行うことを目的としている。Table 1 に本実験と LSND 実験の違いをまとめる。

Table 1 JSNS<sup>2</sup> and LSND experiments.

	JSNS <sup>2</sup>	LSND
検出器サイズ	50 トン	167 トン
イベント数	~500 イベント/5 年	88 イベント/6 年
標準からの距離	~24m	~30m
ビーム Duty Factor	$5 \times 10^6$	$7.2 \times 10^2$
Decay In Flight $\nu$ 除去	可能	不可
宇宙線背景事象除去率	1/4000	1/14
後発 $\gamma$ 線	8MeV, $\Delta T=30\mu s$ (Gd 吸収)	2.2MeV, $\Delta T=200\mu s$ (陽子吸収)

Table 1 でわかるように、ビームのパルス幅 (100 ns) は、 $\bar{\nu}_\mu$  を生成する  $\mu$  粒子の寿命 (2.2  $\mu s$ ) より十分短いため、このビーム時間をマスクすることで  $\pi$  中間子、K 中間子からのニュートリノなどのバックグラウンドを取り除くことができる。ビームの繰り返しは 40 ms 毎であるため、ビームが ON の時間の割合 (duty factor) は小さく、ゲート幅を 10  $\mu s$  とすると、ビーム起源以外のバックグラウンドは 1/4,000 (宇宙線頻度に換算して地下 500 m 相当) になる。また静止  $\mu^+$  は Z の大きい水銀中で発生するが、静止  $\pi^-$  と  $\mu^-$  は崩壊前に原子核反応を起こし失われるため、 $\mu^-$  の崩壊により生成する  $\bar{\nu}_e$  のバックグラウンドも強く ( $\sim 10^{-3}$ ) 抑制される。

#### 4. 検出器 - 反電子ニュートリノ検出

$\bar{\nu}_e$  の検出には、原子炉ニュートリノ振動実験 DoubleChooz, DayaBay, RENO [11-13] でも使われている Gd 入り液体シンチレータを用いる。 $\bar{\nu}_e$  は、液体シンチレータ内の陽子との逆 $\beta$ 崩壊反応により、陽電子と中性子を発生する ( $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ )。陽電子は電離および対消滅 $\gamma$ 線による先発信号を作る。中性子は、熱化後平均約 30  $\mu$ s 後に Gd に捕獲され、総計 8 MeV の $\gamma$ 線を出し、後発信号を作る。この先発信号と後発信号の双方を捕らえることにより $\bar{\nu}_e$ 事象の同定をする(遅延同時計測法)。

Gd は熱中性子捕獲断面積が元素中最大であり、捕獲までの時間が陽子による捕獲(約 200  $\mu$ 秒)に比べて短い。また Gd による熱中性子捕獲後の $\gamma$ 線のエネルギーは、陽子による捕獲後の $\gamma$ 線(2.2 MeV)に比べて高い(8 MeV)ため、環境 $\gamma$ 線(最大 2.6 MeV)の影響を受けにくい。そのため、偶発的な背景事象を大幅に軽減することができる。LSND 実験では陽子による熱中性子捕獲を利用してため、この背景事象量が多かった。本実験では、Gd を採用することで、環境 $\gamma$ 線の影響を排除し、且つ陽子捕獲に比べて捕獲時間を短くすることによって他の要因による背景事象も軽減することができる。

先発信号の陽電子はほぼ $\bar{\nu}_e$ のエネルギー分布を保存しているため、先発信号のエネルギー分布から $\bar{\nu}_e$ のエネルギー分布を再構成できる。静止した $\mu^+$ の崩壊からの $\bar{\nu}_\mu$ エネルギー分布および逆 $\beta$ 崩壊反応の反応断面積も良く理解されているため、振動パラメータに対応した $\bar{\nu}_e$ のエネルギー分布を精度良く算出できる。

#### 5. 実験予定地と検出器

JSNS<sup>2</sup> 実験は発生したニュートリノからの距離が重要なパラメータとなる実験である。ニュートリノ源である水銀標的からの距離が 24m 程度の場所は MLF の室内、もしくは屋上となる。屋上は耐荷重の観点から候補として不可能である。MLF 室内の中で最も適した場所を探すために、実

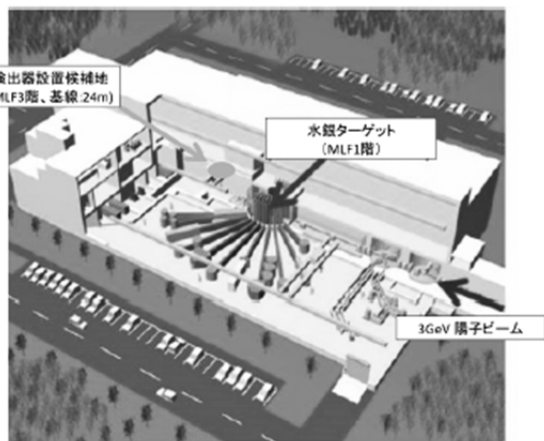


Fig.4 MLF and JSNS<sup>2</sup> candidate area.

験グループは、1) 2013 年春 中性子ビームライン BL13 番における 1 トンシンチレータによる測定 [6], 2) 2014 年春 MLF 3 階大型機器取扱室における 3 箇所の 500 kg シンチレータによる測定[14-15], という 2 度の背景事象測定を行った。これらの結果から、Fig.4 にある MLF 3 階の大型機器取扱室の水銀標的後方エリアが最も実験に適しているとの結論を得た。

このエリアは、中性子・ミュオンビームの実験装置エリアではなく、MLF の運転に必要な機器を取扱うためのスペースであるが、これらの機器と干渉しないように JSNS<sup>2</sup> のステライルニュートリノ探索用検出器を設置したいと考えている。Fig.5 に現在の検出器デザインを示す。

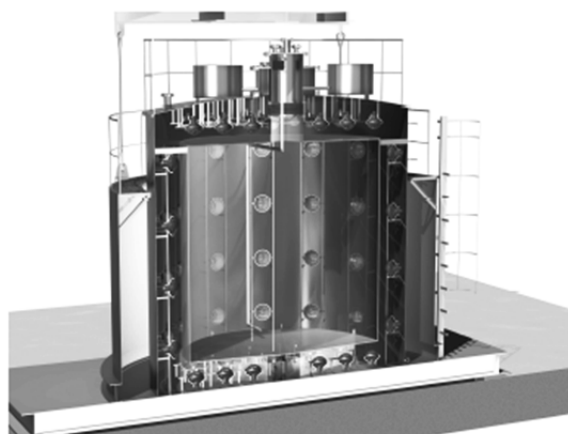


Fig.5 Cut model: JSNS<sup>2</sup> detector design. Liquid scintillator, tank, photomultiplier, base plate and lift-up parts. Size is  $\phi$  4.4m X h 4.4m.

検出器は約 54 トン (60,000 L) の液体シンチレータを内包するタンクの内壁に、光電子増倍管を設置した構造となっている。検出器のタンク部分と液体シンチレータだけで約 70 トンの重量となる。この重量に関しては、MLF 建屋の耐荷重も含めて現在安全を検討している最中である。

大型機器取扱室において、MLF の実験ユーザーに中性子・ミュオンビームを供給中は、Fig.5 の検出器を設置するためのスペースを確保できると思われる。しかしながら、ビームの停止期間、例えば夏季の 3 ヶ月間は、MLF のメンテナンスのために、大型の機器を移動する作業が発生する。

このため、実験グループではビーム入射中は MLF 3 階の大型機器取扱室に検出器を設置し、夏季はメンテナンス作業前に、大型機器取扱室から MLF の外部に検出器を搬出することを提案、現在検討を進めている。Fig.5 の上部に存在する部分が、搬出時にクレーンで釣り上げるための部品となっている。このような機能を備えた液体シンチレータ検出装置は世界的にも珍しい。

大型機器取扱室でのメンテナンスは毎年行われることが予想されるが、一方で突発的なアクシデントで大型機器取扱室を用いる事態への対応も必要となる。このような場合は、JSNS<sup>2</sup> 検出器を迅

速に搬出する必要があり、MLF の中性子施設スタッフと議論を重ねながら対応を検討している。

Fig.5 の検出器内には、液体シンチレータ母材として LAB (リニアアルキルベンゼン) を内含する予定である。LAB は消防法上、危険物第 4 類に類するものであることから、指定量を超える 60,000 L の取扱には法令対応が必須となる。このためには MLF もしくは大型機器取扱室を危険物一般取扱所として許認可を得る必要があり、関連省庁・部署と議論を重ねながら解を探している状況である。

このように、建設目的とは少々異なる実験を行う為には、大小さまざまな壁が存在している状態ではあるが、実験グループは施設関係者の助けを得ながら実験実現に向けて進んでいる。

## 6. まとめ

JSNS<sup>2</sup> (J-PARC E56) 実験は、J-PARC MLF の特徴的な強力なパルスビームと Gd を溶かした液体シンチレータを使用することで、信号・背景事象の比を先行実験と比較して大幅に改善し、ステライルニュートリノを示唆する結果の完全なる肯定または否定を目指すものである。Fig.6 に MLF が 1MW ビームによって 5 年間実験を行った時に期待出来る実験感度の見積を示す。このように LSND 実験の示唆する領域より低い  $\sin^2 2\theta$  をカバーしており精度よく測定できることがわかる。

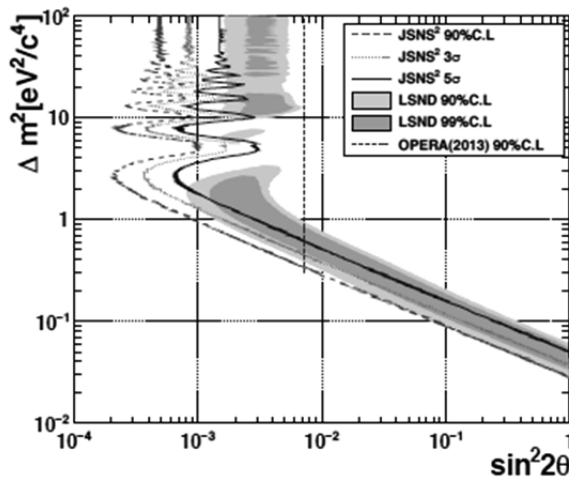


Fig.6 Estimated JSNS<sup>2</sup> sensitivity. (1 MW proton beam for 5years).

本実験は物質・生命科学実験施設である MLF において、新しいビームラインも検出器専用建屋も新設することなく、素粒子の標準理論に対するブレークスルーをもたらす結果が期待出来る実験である。

本実験は本年度より科研費基盤 S のサポートを 5 年間受けることが決定している。実験グループは、初めの 3 年間で設置場所に関する諸問題を解決し、検出器の建設を行い、2018 年度終わりから実験を開始し、2020 年度には暫定的な結果を得ることを目標として実験準備を進めている。

## 謝辞

MLF におけるテスト実験、本実験に向けた検討において、J-PARC 斎藤センター長、二川副センター長、石井副センター長、MLF 金谷ディビジョン長、中性子源グループの皆様、ミュオングループの皆さんにいろいろなサポートを受けました。この場を借りて感謝の意を表したいと思います。最後に科研費 (16H06344)、その他の援助、J-PARC、JAEA、KEK からのサポートに感謝いたします。

## 参考文献

- [1] A. Aguilar et al., Phys Rev D 64, 112007 (2001).
- [2] A.A.Aguilar-Arevalo et al, Phys Rev.Lett.110 161801 (2013).
- [3] C. Giunti and M. Laveder, Phys. Rev. C 83 065504 (2011).
- [4] Th. A. Mueller et al. Phys Rev C 83 054615(2011).
- [5] P. Huber, Phys.Rev.C 84 024617 (2011).
- [6] M.Harada et al, arXiv:1310.1437 (2013).
- [7] <http://sbn-nd.fnal.gov/>.
- [8] R.Allen et al, arXiv:1307.7097 (2013).
- [9] <http://web.ge.infn.it/sox/> 他線源実験.
- [10] J. Ashenfelter et al, arXiv:1309.7647 (2013)他.
- [11] F. Ardellier et al. (Double Chooz Collaboration), arXiv: hep-ex/0606025.
- [12] X. Guo et al. (Daya Bay Collaboration), arXiv: hep-ex/0701029.
- [13] J.K. Ahn et al. (RENO Collaboration), arXiv: hep-ex/1003.1391.
- [14] M. Harada et al, arXiv: 1502.02255 [physics.ins-det].
- [15] S. Ajimura et al, PTEP 2015 6, 063C01 (2015).

長谷川 勝一 (はせがわ しょういち)

略歴：名古屋大博士課程 (2002),  
大阪大学 (2003), 日本原子力研究  
所 [現 日本原子力研究開発機構]  
(2004-).

所属：日本原子力研究開発機構  
先端基礎研究センター

e-mail : shoichi.hasegawa@j-parc.jp

専門：素粒子・原子核実験

趣味：読書, サイクリング



丸山 和純 (まるやま たかすみ)

略歴：東北大学大学院博士取得  
(2001), 高エネルギー加速器研  
究機構 COE 研究員 (2001-2002),  
日本学術振興会海外特別研究員  
(2002-2004), シカゴ大学研究員  
(2004), 筑波大学講師  
(2004-2008), 高エネルギー加速  
器研究機構准教授 (2008-).

所属：高エネルギー加速器研究機構

e-mail : takasumi.maruyama@kek.jp

専門：ニュートリノ実験

趣味：読書, 映画鑑賞

