

暗黒物質候補：Sterile Neutrino

2016/11/22

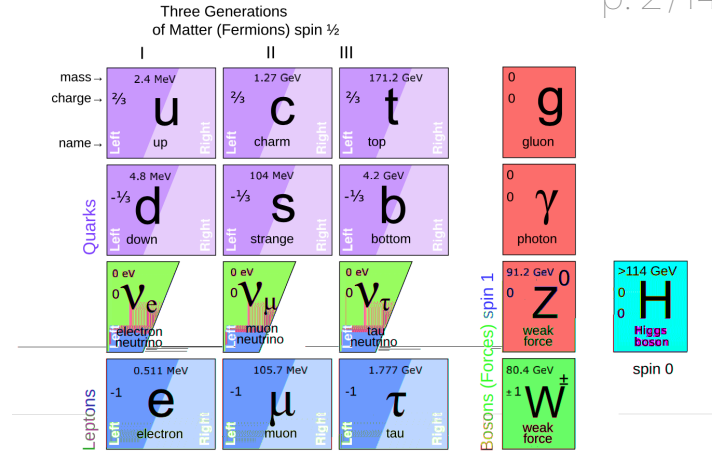
第1回 B,E班合同若手研究会 @ 神戸大学

早稲田大学寄田研究室

修士2年 木村 真人

Neutrino Property

- 素粒子, Fermion, lepton, 中性 (電荷 = 0)
- Standard Modelでは,
 - : 3世代 (ν_e, ν_μ, ν_τ)
 - : 質量 = 0
 - : 左巻きのみ存在
 - と仮定されている。



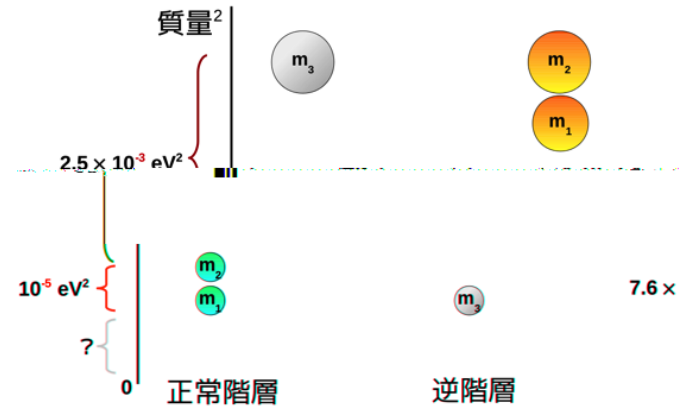
J.Phys.Conf.Ser. 408 012015

太陽ニュートリノや大気ニュートリノの観測結果より, **ニュートリノ振動**が発見。
 = **ニュートリノが質量を持つ。**

$$\Delta m^2_{12} = 7.6 \times 10^{-5} \text{eV}^2, \quad \Delta m^2_{23} = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

超新星観測やβ崩壊観測実験より, その質量は (1eV)以下と非常に小さいことが分かっている。

→ **Seesaw機構による説明**が導入される。



Seesaw機構

- ニュートリノが質量を持つように、いくつかのSterile Neutrino () を導入。
“Seesaw Lagrangian”を作る。

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + i\bar{N}_a \gamma^\mu \partial_\mu N_a - \underbrace{y_{\alpha a} H^\dagger \bar{L}_\alpha N_a}_{\substack{\text{ふつうのニュートリノの関与} \\ (\alpha=e, \mu, \tau)}} - \underbrace{\frac{M_a}{2} \bar{N}_a^c N_a}_{M_a \text{ という値が出てくる}} + h.c.$$

- Mass Matrixからニュートリノの質量固有値を算出出来る。

$$\tilde{M} = \begin{pmatrix} 0 & y_{\alpha a} \langle H \rangle \\ y_{\alpha a} \langle H \rangle & M \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \sim \frac{y^2 \langle H \rangle^2}{M}, \sim M \text{ のどちらかになる。}$$

(0.1eV)のmass

このとき、 の値は不明 (1 or 1)
 → “ can be anything.”

c.f.

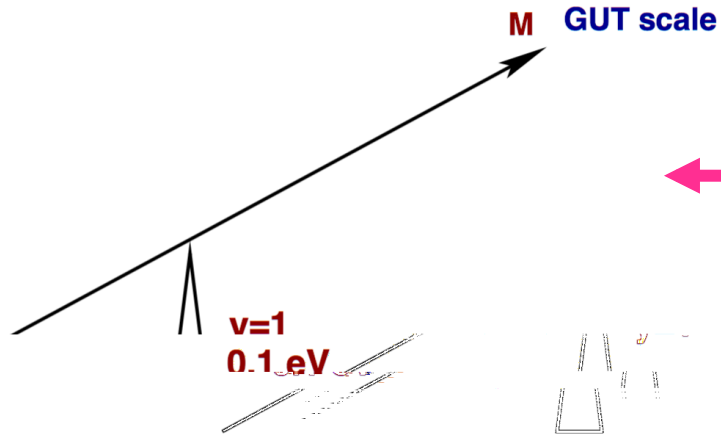
$$m \ll M \text{ のとき, } 2 \times 2 \text{ 行列: } A = \begin{pmatrix} 0 & m \\ m & M \end{pmatrix}$$

の固有値を求めると,

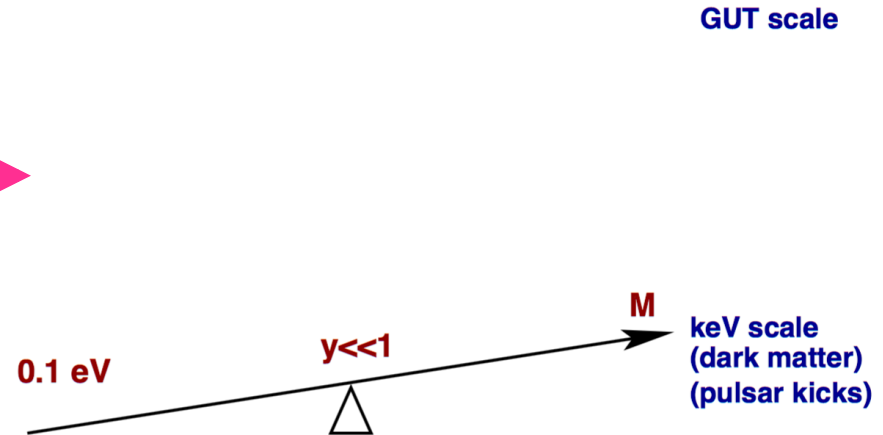
$$\lambda_{\pm} = \frac{M \pm \sqrt{M^2 + 4m^2}}{2}$$

$$\lambda_+ \sim M, \lambda_- \sim -\frac{m^2}{M}$$

Seesaw mechanism



Seesaw mechanism

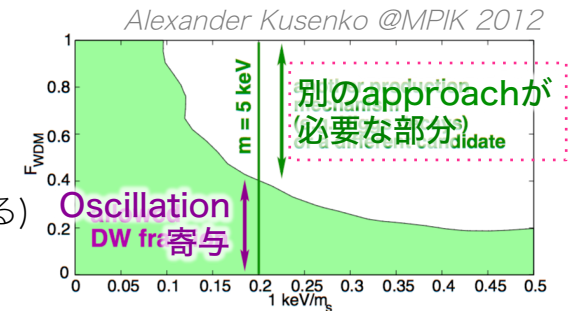


の値によって, はどのような値も取りうる。

-> Sterile NeutrinoがDark Matterになれる。

NeutrinoがDark Matterであるために

- (Majorana)質量 \sim (keV)
 - ： $<$ (keV) の場合, 銀河halo内に留まっていられない。
 - ： $>$ (keV) の場合, DMとなるには寿命が短くなってしまう。
 - ： $+$ (keV)であれば, "pulsar kick"などの天文観測結果の説明も可能。
- Sterile Neutrinoの数 (n) は, $n = 3$ 以上。
 - 大気ニュートリノや太陽ニュートリノの振動実験結果の説明には, $n = 2$ で足りる。
 - しかし, Dark Matterやその他天文観測結果をLagrangianで説明するためには, $n = 3$ 以上が必要となる。
- 宇宙的論な要請から, (keV)のSterile NeutrinoがDark Matterになり得るためには, なにかしらの新しいapproachが必要となる。
 - 宇宙初期 (Inflation)の高温下では平衡状態となれず, その後の温度低下後には生成されない。
 - ν MSM (Minimal Standard Model with neutrino mass : $n = 3$ となる) とOscillationでは説明しきれない。d



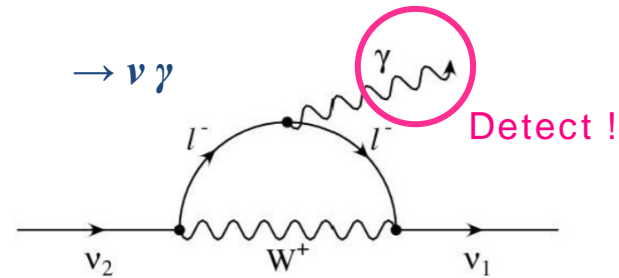
➔ Singlet Higgs, Split Seesaw, ...のなどの機構の提唱。

Singlet Higgs (少しだけ)

- Fermionはhiggs機構によって質量を獲得する。
- Sterile Neutrino () も同様に質量を獲得するように、Seesaw Lagrangianを書き換える：

Sterile Neutrino DM探索方法

- 一般的な探索方法
 - : Sterile Neutrinoの崩壊で放出される γ (X-ray)を検出。
 - Indirect Search
 - (我々のような) 実験室で出来る実験で検出することは不可能。



——— なにか実験室で出来る, Sterile Neutrinoに対するapproachはないか...?

宇宙内に存在するSterile Neutrino Dark Matterを直接観測することは難しいが、期待される質量のSterile Neutrinoが存在することを示すことは可能性がある。

ここから紹介する内容

1. β 崩壊を用いたSterile Neutrino Dark Matter探索
 - : targetは, \sim (keV)のSterile Neutrino。
2. Dark Matter (WIMP) Detectorを用いたSterile Neutrino探索
 - : targetは, $\Delta^2 \sim 1$ eV²のSterile NeutrinoとActive NeutrinoのOscillation。

この2つの"AND"を取れるようなことがあれば素晴らしい。

崩壊を用いた, Sterile Neutrino Dark Matter Search

Searching for dark matter sterile neutrinos in the laboratory

Fedor Bezrukov^{1,2} and Mikhail Shaposhnikov¹

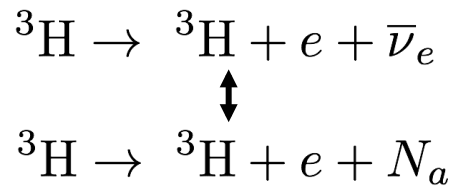
¹Institut de Théorie des Phénomènes Physiques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland

²Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Prospect 60-letiya Oktyabrya 7a, Moscow 117312, Russia

(Received 28 November 2006; published 8 March 2007)

If the dark matter in the Universe is made of sterile neutrinos with mass in the keV region, it can be searched for with the help of x-ray satellites. We discuss the prospects of laboratory experiments that can be competitive and complementary to space missions. We argue that the detailed study of β decays of tritium and other nuclei with the help of cold target recoil ion momentum spectroscopy can potentially enter into an interesting parameter range and even supersede the current astronomical bounds on the properties of the dark matter sterile neutrinos.

- : β 崩壊核, 反跳原子核 (イオン), 電子の運動量を観測。
- : が存在すれば,
- 崩壊前後の運動量保存則に異常が見られるはず。



- Neutrinoを生成 -> 検出する方法は, 非現実的。
(ふつうのNeutrinoと比較して, $\sim 10^{-19}$ にsuppressされる)
- 太陽等から来るSterile NeutrinoとふつうのNeutrinoを
区別して検出するapproachは, SN比的に非現実的。
- ν を利用して, Singlet boson (π^0 , K^0 , ...) -> invisible
崩壊モードの探索は, 期待されるBranching Ratio的に非現実的。



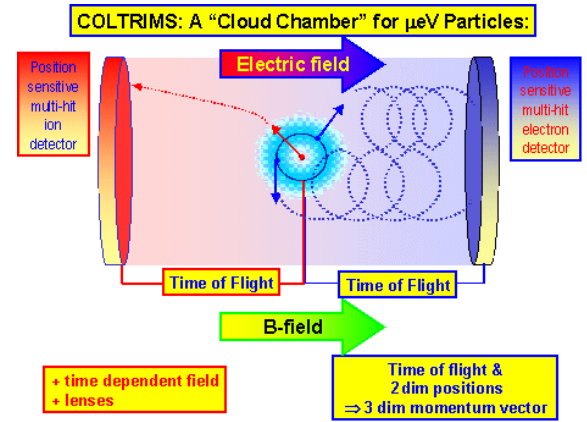
- > $\nu\bar{\nu}$ はchirality保存から,
- > $\nu\nu$ はlepton数保存から
禁止され, 原理的には可能だが...

実験手法案

<https://www.atom.uni-frankfurt.de/research/coltrims/>

検出器

- : 崩壊後のイオン，電子の精密な運動量測定が必要。
- : 既存の“COLTRIMS”検出器のようなものを用いることで，検出可能かもしれない。
 - t=0は，崩壊核から放出される光子 (Lyman photon)で決定するため，統計量が減る。
 - β 崩壊で放出されるような“高エネルギー”電子の検出には，工夫が必要。



求められる実験環境

- : Initial stateの不定性を避けるため，非常に低温であることが望まれる ($T < 1$ K)。
- : SN比の観点（ふつうの β 崩壊で $m_\nu^{eff} > 0$ となる割合）から，原子核の質量と放出電子エネルギーはともに小さいほうが良い。
 - ^3H : 最小の β 崩壊核，Q-Value = 18.6 keV。
- : 最低でも1 eventのSterile Neutrino事象が発生するだけの観測時間。
 - $>$ (year) の観測は必要そう。

$$m_\nu^{eff} \simeq m_\nu^2 + M^2 v^2 - \frac{2M\tilde{q}v}{\text{dominant error}}$$

$$(\tilde{q} \equiv \tilde{p} + \tilde{k} = (p + Mv) + (k + m_e v))$$

$$P(m_s) \propto \exp\left(-\frac{m_s^2}{2MT} f^2\left(\frac{q}{m_s}\right)\right),$$

$$f(x) \equiv \frac{1}{1 + \dots}$$

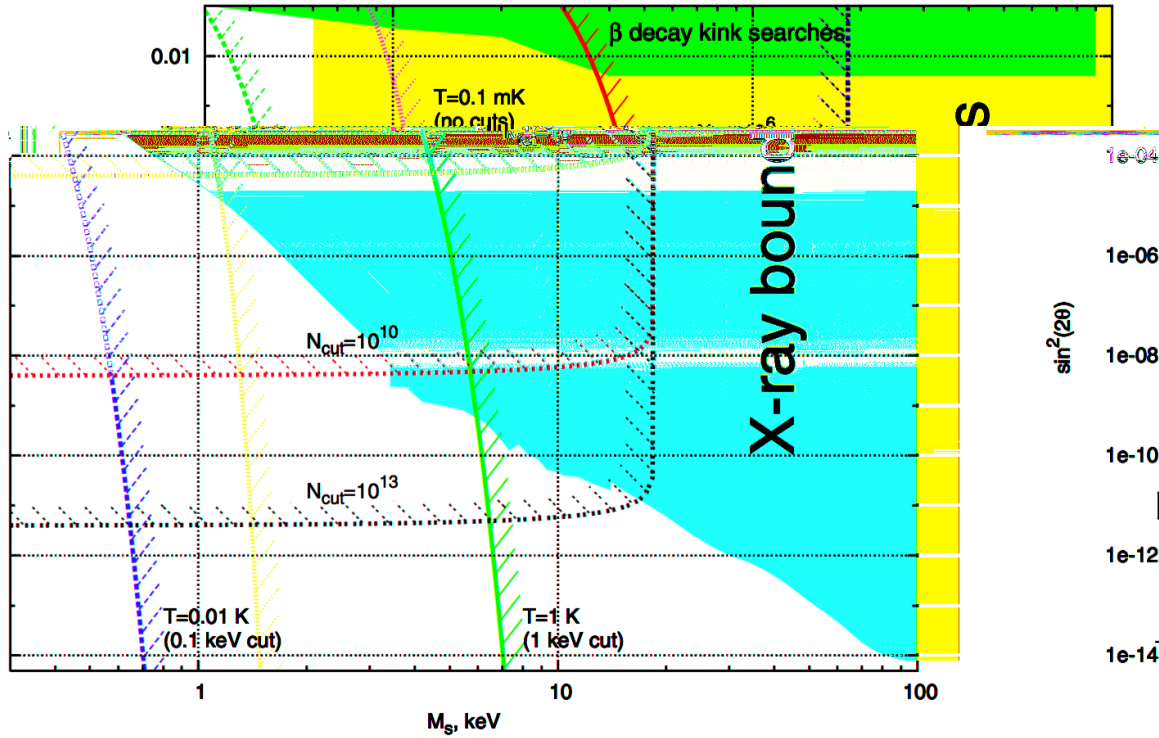
$q < Q\text{-value}$

$$N_{eve} \simeq \theta^2 \sqrt{1 - \frac{m_s}{Q}} \times N_{BG}$$

Sterile Neutrinoと(active) Neutrinoのmixing angle

Estimation...

- β 崩壊核として ^3H を仮定。
- 検出器効果等の考慮なし。



$$N_{\text{cut}} = N_{\text{BG}}$$

$$1000 \text{ decay/sec}$$

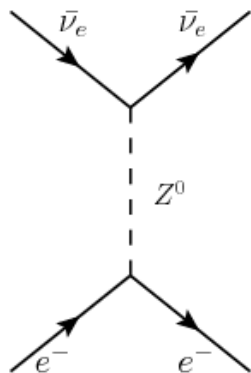
$$\Rightarrow N_{\text{BG}} = 10^{10}/\text{year}$$

DM 検出器を用いた Sterile Neutrino 探索

(確立されつつある)

Dark Matter (WIMP) 検出器を用いて
Neutral Currentを検出し,
Neutrino Oscillationを測定することで,
Sterile Neutrino ($\Delta m^2 \sim 1 \text{ eV}^2$) の探索を試みる。

Neutral Current channel



PHYSICAL REVIEW D **86**, 013004 (2012) p. 11/14
**Measuring active-to-sterile neutrino oscillations with neutral current
coherent neutrino-nucleus scattering**

J. Anderson,¹ J. M. Conrad,¹ E. Figueroa-Feliciano,¹ C. Ignarra,¹ G. Karagiorgi,² K. Scholberg,³
M. H. Shaevitz,² and J. Spitz¹

¹Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA

²Columbia University, New York, New York 10027, USA

³Duke University, Durham, North Carolina 27708, USA

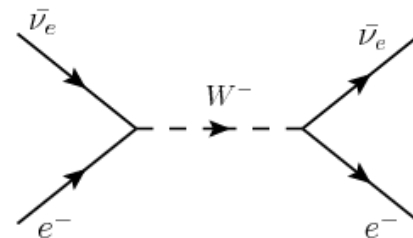
(Received 20 January 2012; published 2 July 2012)

Light sterile neutrinos have been introduced as an explanation for a number of oscillation signals with $\Delta m^2 \sim 1 \text{ eV}^2$. Neutrino oscillations at relatively short baselines provide a probe of these possible new states. This paper describes an accelerator-based experiment using neutral current coherent neutrino nucleus scattering to strictly search for active-to-sterile neutrino oscillations. This experiment could, thus definitively establish the existence of sterile neutrinos and provide constraints on their mixing parameters. A cyclotron-based proton beam can be directed to multiple targets, producing a low-energy pion and muon decay-at-rest neutrino source with variable distance to a single detector. Two types of detectors are considered: a germanium-based detector inspired by the SuperCDMS design and a liquid argon detector inspired by the proposed CLEAR experiment.

DOI: [10.1103/PhysRevD.86.013004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.013004)

PACS numbers: 14.60.Pq, 14.60.St, 14.60.

Charged Current channel
(これまでのすべての ν 検出実験)



arXiv:0911.1597

Neutral Current Detection

Neutral Current (Coherent scattering)

- : 反応断面積の予測精度が高い。
- : 反応断面積が大きい。

→ beamを用いて を打ち込むことで、
Neutrino振動の観測に優れる。

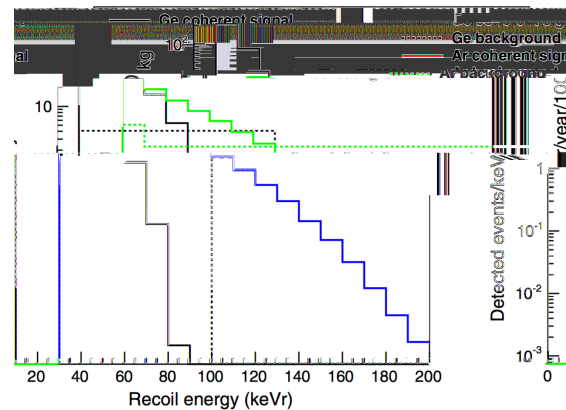
- : 反跳エネルギーは非常に小さい。
(ex. ν (20 MeV) \rightarrow $E_R < 21$ keV @ Ar)

現状のWIMP探索実験におけるEnergy Threshold

- ↔
- : ~ 40 keV @ Ar,
 - : ~ 6 keV @ Xe

暗黒物質候補としてあがっている
~ (keV)のSterile Neutrinoの探索は
出来ないのか...???

$$d\sigma \propto G_F^2 (MT)^2 (1 - 4 \sin^2 \theta_W) Z : \text{weakcharge} (Q_W \equiv N -$$



800MeV protonから生成した
 ν ($E < 52.8$ MeV) を打ち込んだときの
Recoil Energy Spectrum。

Summary

- これまでのNeutrinoに関する観測事実は、Standard Modelで説明出来ない。
- Sterile Neutrinoは、そのうち1つでも (keV)の質量を持つとき、Dark Matterとなりうる（理論Modelがある）。
- β 崩壊を観測することで、Sterile Neutrino Dark Matter（となりうるもの）を発見出来るかもしれない。
- Dark Matter (WIMP) 検出器で、Active Neutrinoをこれまでと異なるapproach（NC反応）で検出出来るかもしれない。
← Neutrino振動に関する実験に新たな視点を与えうる可能性。

WIMP Detectorを用いてSterile Neutrino Dark Matterが観測出来る方法があれば嬉しい。

Reference

- Alexander Kusenko
“Sterile neutrinos: The dark side of the light fermions”,
Phys.Rep **481** 1 (2009).
- Fedor Bezrukov and Mikhail Shaposhnikov,
“Searching for dark matter sterile neutrinos in the laboratory”,
Phys.Rev.D **75** 053005 (2007).
- A.J.Anderson et al.,
“Measuring active-to-sterile neutrino oscillations with neutral current coherent neutrino-nucleus scattering”,
Phys.Rev.D **86** 013004 (2012).

- Alexander Kusenko @ MPIK2012
(https://www.mpi-hd.mpg.de/lin/seminar_theory/talks/kusenko.pdf)
- Kalliopi Petraki (http://lss.fnal.gov/conf/C0911181/Petraki_CosPA09.pdf)
- T2K experiment (<http://t2k-experiment.org>)

BACK UP

DRAFT

DM 検出器を用いた Sterile Neutrino 探索

(確立されつつある)

Dark Matter (WIMP) 検出器を用いて
Neutral Currentを検出し、
Neutrino Oscillationを測定することで、
Sterile Neutrinoの探索を試みる。

Neutral Current (Coherent scattering)

- : 反応断面積の予測精度が高い。
- : 反応断面積が大きい。

→ beamを用いて を打ち込むことで、
Neutrino振動の観測が可能。

PHYSICAL REVIEW D **86**, 013004 (2012) p. 18/14
**Measuring active-to-sterile neutrino oscillations with neutral current
coherent neutrino-nucleus scattering**

A. J. Anderson,¹ J. M. Conrad,¹ E. Figueroa-Feliciano,¹ C. Ignarra,¹ G. Karagiorgi,² K. Scholberg,³
M. H. Shaevitz,² and J. Spitz¹

¹Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA

²Columbia University, New York, New York 10027, USA

³Duke University, Durham, North Carolina 27708, USA

(Received 20 January 2012; published 2 July 2012)

Light sterile neutrinos have been introduced as an explanation for a number of oscillation signals. $\Delta m^2 \sim 1 \text{ eV}^2$. Neutrino oscillations at relatively short baselines provide a probe of these possible new states. This paper describes an accelerator-based experiment using neutral current coherent neutrino nucleus scattering to strictly search for active-to-sterile neutrino oscillations. This experiment could, thus definitively establish the existence of sterile neutrinos and provide constraints on their mixing parameters. A cyclotron-based proton beam can be directed to multiple targets, producing a low-energy pion and muon decay-at-rest neutrino source with variable distance to a single detector. Two types of detectors are considered: a germanium-based detector inspired by the SuperCDMS design and a liquid argon detector inspired by the proposed CLEAR experiment.

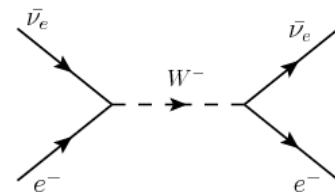
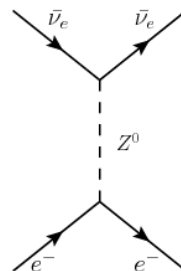
DOI: [10.1103/PhysRevD.86.013004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.013004)

PACS numbers: 14.60.Pq, 14.60.St, 14.60.

Neutrinoの反応

Neutral Current channel

Charged Current channel



Neutrinoとその質量

- 標準模型では,

