# Поиск тяжелых нейтрино в ближнем детекторе ND280 эксперимента T2K

Выполнил:	
студент 183 группы	Суворов С.Б.
Научный руководитель:	
д.фм.н., профессор	Куденко Ю.Г.

выпускная квалификационная работа (магистрская диссертация) МФТИ, ИЯИ РАН 5 июля 2017

### Тяжелые нейтрино

- Расширение Стандартной модели (СМ) введением правых (стерильных/тяжелых/HNL) нейтрино и их смешивания с активными.
- Возможность объяснить образование массы активного нейтрино, барионную асимметрию, кандидат на темную материю.
- vMSM (Shaposhnikov, Asaka Phys.Lett.B631,2005) одна из теорий, описывающая природу HNL.
- Широкий спектр допустимых масс:
  - ~10<sup>9</sup> ÷ 10<sup>14</sup> GeV: масштабы GUT, объяснение барионной асимметрии через распады HNL. <u>Нет возможности экспериментальной проверки.</u>
  - $\sim 10^2 \div 10^3$  GeV: возможность проверки на энергетических масштабах LHC
  - ~10<sup>-3</sup> ÷ 10<sup>2</sup> GeV: наиболее интересный диапазон массы известных лептонов и кварков. Возможность решить многие проблемы SM. Изучается в данной работе
  - ~ eV: аномалии нейтринных осцилляций. Не имеет отношения к темной материи и барионной асимметрии.
- «Минимальность» теории: 18 новых параметров: 6 масс, 6 элементов смешивания и 6 СР-нечетных фаз, их нахождение – актуальная задача экспериментальной физики.

### Существующие ограничения на

### элементы смешивания

- В исследуемой области 140 MeV < M<sub>hnl</sub> < 500 MeV наиболее строгие ограничения (<u>arXiv:1502.00477</u>) получены экспериментом PS191 (CERN) и E949 (BNL).
- В теоретических работах предсказывается возможность улучшения в эксперименте T2K (Asaka et al <u>arXiv:1212.1062v2</u>).



### Как искать тяжелые нейтрино



• Реакции, не рассматриваемые в данной работе:

 $N \rightarrow \gamma \nu$   $N \rightarrow \nu \pi^0$   $N \rightarrow 3\nu$ 

Мы исследуем возможность детектирования частиц от распадов HNL, в свою очередь рожденных в каонных распадах:
Количество событий ~|U|<sup>4</sup>

### Эксперимент Т2К



- Эксперимент T2K (Tokai to Kamioka) с длинной базой для исследования (анти-)нейтринных осцилляций ν<sub>μ</sub> → ν<sub>e</sub>, ν<sub>μ</sub> → ν<sub>μ</sub>.
- Первые измерения  $\theta_{13}$ , уточнение  $\theta_{23}$ ,  $\delta m^2_{23}$  и сечений нейтринных взаимодействий.
- Квазимоноэнергетический пучок мюонных нейтрино  $E_{\nu} \sim 0.6 \text{ GeV}$ .

### Ближний детектор ND280



- Off-axis магнитный трековый детектор на расстоянии 280 метров от мишени.
- Нас интересует активный объем время-проекционных камер, заполненных газом (Ar) малая плотность → малый фон от активных нейтрино.
- Есть возможность восстановить вершины взаимодействий, разделение заряженных частиц в магнитном поле.

## Поток тяжелых нейтрино

- Используем результаты моделирования моды Кµ2 (К  $\to \mu^+ \nu_\mu)$  , где имеется информация о родительских частицах.
- Пересчитываем вероятность попадания в детектор для массивного нейтрино. MC estimation Asaka et al (<u>arXiv:1212.1062v2</u>)



### Распад тяжелых нейтрино

- Количество событий мы оцениваем исходя из:
  - потока HNL φ
  - чувствительной площади детектора  $S_{det}$
  - вероятности распада HNL в TPC  $P_{decay}^{TPC}$
  - вероятности распада по данной моде *Br<sub>mode</sub>*

 $N_{\text{events}} = \varphi(\text{HNL}/10^{21}\text{p.o.t/cm}^2) \cdot S_{det} \cdot P_{decay}^{TPC} \cdot Br_{mode}$ 



au - время жизни HNL

### Распады HNL

- Используя пакет для Монте-Карло моделирования в ND280, было изучено поведение частиц в детекторе, получены примеры сигнальных событий, подтверждена однородность потока HNL.
- Были получены энергетические и угловые спектры вторичных частиц.
- Значительная часть частиц обладает E < 2 GeV, что позволяет их эффективно восстанавливать в ТРС. Ожидается рост эффективности восстановления в области высоких масс.



### Распад тяжелых нейтрино



### Стратегия анализа

- Возможно два метода анализа:
  - 1. Поиск пика в распределении инвариантной массы
    - необходимо хорошее разрешение по инвариантной массе 🚫
    - необходима хорошая модель фона 🚫
  - 2. Сильное подавление фона и поиск редких событий
    - необходимы критерии отбора, сильно подавляющие фон 💊
  - После подавления фона почти до 0, все наблюдаемые события интерпретируются как фон.
  - Верхняя граница на элемент смешивания:

 $|U_i|_{limit}^2 = \sqrt{\frac{U_n}{N_{events}}}$   $U_n$  статистическое значение для 90% С.L.

$$U_n = U_{n0} \left\{ 1 + (U_{n0} - n) \frac{\sigma_{Acc}^2}{2} \left( 1 + \left( \frac{(U_{n0} - n) \sigma_{Acc}}{2} \right)^2 \right) \right\}$$

Учет систематических ошибок  $\sigma_{Acc}$ 

### Анализ событий

- Были разработаны следующие критерии отбора:
- 1. Вершина в объеме ТРС с двумя разноименными треками
- 2. Нет активности в предыдущем детекторе
- 3. Нет дополнительной активности во время-проекционной камере
- 4. Идентификация как  $e\pi$  или  $\mu\pi$
- 5. Ограничение на инвариантную массу
- 6. Ограничение на полярный угол HNL

#### Эффективность восстановления сигнальных событий



### Фоновые процессы

 Для оценки фона были использованы данные разных нейтринных генераторов

10 <sup>21</sup> <i>POT</i>	NEUT	GENIE	NuWro	NEUT $\overline{\nu}$
$N  o \mu \pi$	0.70	0.69	1.07	1.07
$N \to e\pi$	0.48	0.95	0.35	0.35
$N  o \mu\mu\nu$	2.18	1.63	1.22	1.22

 Нормируя фон на доступную для анализа статистику данных (6.2v + 3.9 v)10<sup>20</sup> POT (2010-2015)

BG		
$N  o \mu \pi$	0.94	
$N \to e\pi$	0.73	
$N  o \mu\mu\nu$	1.83	

### Систематические ошибки

Систематические ошибки возможны только при предсказании числа событий:

$$N_{\text{events}} = \varphi(\text{HNL}) \cdot \frac{V_{TPC}}{c\beta\gamma} \cdot \Gamma_{decay} \cdot Eff_{det}$$

• φ(HNL) - поток тяжелых нейтрино. Наследует ошибки моделирования пучка каонов

- по данным NA61 ошибка сечений рождения каонов около 20%
- это доминирующая ошибка в оценке пучка
- *V*<sub>*TPC*</sub> чувствительный объем время-проекционных камер
- βγ кинематические параметры
- *Eff<sub>det</sub>* эффективность детектора. Здесь должна быть учтена систематика детектора.
  - систематика для всех мод составляет около 4-5%

### Чувствительность



### Заключение

- Промоделированы рождения и распады тяжелых нейтрино в ближнем детекторе ND280, проведен анализ сигнальных событий.
- Сформулированы критерии отбора сигнальных и подавления фоновых событий, найдена эффективность реконструкции распадов HNL.
- Оценены систематические ошибки анализа
- При статистике 10<sup>21</sup> РОТ в эксперименте Т2К возможно улучшить ограничения на элементы смешивания |U|<sup>2</sup>
- Ожидаемая статистика в эксперименте 8×10<sup>21</sup> РОТ
- Планируется продлить набор статистики до 20×10<sup>21</sup> *РОТ*

В данным момент работа проходит рецензию в коллаборации для одобрения анализа реальных данных



### Благодарности

Автор выражает благодарности
Измайлову А.О, Шайхиеву А.Т., Marco ZITO, Mathieu
LAMOUREUX за консультации по теме.

### BackUP

### Распад тяжелых нейтрино

• Двухчастичный распад. Рассматриваемые реакции:



$$N \to e^{-}\pi^{+}$$
$$N \to \mu^{-}\pi^{+}$$

• Трехчастичный распад. Рассматриваемые реакции:



$$N \to \mu^{\pm} e^{\pm} \nu_{e,\mu}$$
$$N \to l^{-} l^{+} \nu_{l}$$

NC взаимодействие интересно тем, что можем рассматривать элемент смешивания  $|U_{\tau}|$  $N \rightarrow l^{-}l^{+}v_{e,\mu,\tau}$ 

### Элементы смешивания

- Ограничения при рассмотрении 3-х частичных мод распада HNL.
- Ограничение PS191, предсказание Asaka, МК моделирование

Взаимодействие через NC в приближении малого  $|U_{\mu}|$ 



### Элементы смешивания

• Таким образом мы можем оценить чувствительность эксперимента к элементам смешивания при отсутствии фона и статистике 10<sup>21</sup> p.o.t.

• 
$$|U_{lim}|^2 = \sqrt{\frac{2.44}{N_{events}}}$$
 - 90% CL

• Ограничение PS191, феноменологическое предсказание Asaka et al, МК моделирование  $|U_e|^2$   $|U_\mu|^2$   $|U_e||U_\mu|$ 



### • Систематика детектора

	μπ	еπ			
Variation-Like					
Distortions of magnetic field	0.17%	0.13%			
TPC momentum scale	0.1%	0.1%			
TPC momentum resolution	0.99%	0.74%			
TPC dE/dx particle ID	0.43%	1.67%			
Efficiency-like					
TPC cluster efficiency	<<1%	<<1%			
TPC tracking efficiency	0.3%	3%			
TPC charge ID efficiency	5.95%	6.22%			
TPC-FGD matching efficiency	0.69%	0.82%			
Pion secondary interactions	2.67%	2.43%			
Global Vertexing	0.87%	0.79%			
Total	7.48%	8.11%			



23