



# Эксперимент ЕХО-200 и космогенные источники фона

Белов В.А. (EXO-200 & nEXO coll.)

Семинар им. В.М.Лобашева ИЯИ, Москва 11.10.2018

#### Двойной бета-распад

- Разрешён в Стандартной Модели (2β2ν канал)
- Теоретически впервые рассмотрен М. Гепперт-Майер в 1935 г.
- Обладает чрезвычайно большим периодом полураспада (10<sup>19</sup> и более лет).
- Впервые обнаружен по косвенным следам еще в 50-х.
- В лабораторных условиях зарегистрирован лишь в 80-х.



#### Период полураспада и масса нейтрино

- Процесс второго порядка по «классической» теории слабого взаимодействия, а потому очень медленный.
- Фазовый фактор перехода очень сильно зависит от энергии (Q<sup>11</sup>, Q<sup>5</sup>).
- Матричные элементы переходов очень тяжело рассчитываются.
- Экспериментально разделение различных каналов осуществляется по форме спектра энергии двух электронов.
- 2*v*-канал распада экспериментально обнаружен для 12 ядер
- 0v-канал до сих пор не зарегистрирован
- Было заявление о его открытии в распаде <sup>76</sup>Ge, впоследствии не подтвердившееся

$$\begin{split} (T_{\frac{1}{2}\nu})^{-1} &= G_{2\nu}(Q_{\beta\beta},Z) \,|\, M_{2\nu}\,|^{\,2}, \\ (T_{\frac{1}{2}\nu})^{-1} &= G_{0\nu}(Q_{\beta\beta},Z) \,|\, M_{0\nu}\,|^{\,2} < m_{\nu} >^{2}, \\ \text{где}\, < m_{\nu} > = \sum |\, U_{e,i}\,|^{\,2}\,m_{i}. \end{split}$$



#### Обнаруженные 2β-распады

Существует примерно 70 ядер, для которых возможен двойной бета-распад. Лишь для 12 из них он обнаружен экспериментально.

| Изотоп                   | Q,(МэВ) | Ab.,% | Т <sub>1/2</sub> <sup>2v</sup> , лет | Т <sub>1/2</sub> <sup>0v</sup> , лет | <т_>>, эВ   |
|--------------------------|---------|-------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------|
| <sup>48</sup> Ca         | 4.271   | 0.187 | 4.39 • 10 <sup>19</sup>              | > 5.8 • 10 <sup>22</sup>             | < 3.1–15.4  |
| <sup>76</sup> Ge         | 2.040   | 7.8   | 1.65 • 10 <sup>21</sup>              | > 5.2 • 10 <sup>25</sup>             | < 0.15–0.39 |
| <sup>82</sup> Se         | 2.995   | 9.2   | 9.19 • 10 <sup>19</sup>              | > 3.6 • 10 <sup>23</sup>             | < 1.0–2.4   |
| <sup>96</sup> Zr         | 3.350   | 2.8   | 2.30 • 10 <sup>19</sup>              | > 9.2 • 10 <sup>21</sup>             | < 3.6–10.4  |
| <sup>100</sup> Mo        | 3.034   | 9.6   | 7.10 • 10 <sup>18</sup>              | > 1.1 • 10 <sup>24</sup>             | < 0.33–0.62 |
| <sup>116</sup> Cd        | 2.802   | 7.5   | 2.87 • 10 <sup>19</sup>              | > 1.9 • 10 <sup>23</sup>             | < 1.0–1.8   |
| <sup>128</sup> Te        | 0.868   | 31.7  | 2.00 • 10 <sup>24</sup>              | > 1.5 • 10 <sup>24</sup>             | < 2.3–4.6   |
| <sup>130</sup> Te        | 2.533   | 34.1  | 6.90 • 10 <sup>20</sup>              | > 4.0 • 10 <sup>24</sup>             | < 0.26-0.97 |
| <sup>136</sup> Xe        | 2.458   | 8.9   | 2.19 • 10 <sup>21</sup>              | > 1.1 • 10 <sup>26</sup>             | < 0.06–0.16 |
| <sup>150</sup> Nd        | 3.367   | 5.6   | 8.37 • 10 <sup>18</sup>              | > 2.0 • 10 <sup>22</sup>             | < 1.6–5.3   |
| <sup>238</sup> U         | 1.100   | 99.3  | 2.00 • 10 <sup>21</sup>              |                                      |             |
| <sup>130</sup> Ba (ECEC) | 2.611   | 0.106 | 1.40 • 10 <sup>21</sup>              |                                      |             |

University of Alabama, Tuscaloosa AL, USA — M Hughes, I Ostrovskiy, A Piepke, AK Soma, V Veeraraghavan University of Bern, Switzerland — J-L Vuilleumier University of California, Irvine, Irvine CA, USA — M Moe California Institute of Technology, Pasadena CA, USA — P Vogel Carleton University, Ottawa ON, Canada — I Badhrees, W Cree, R Gomea, K Graham, T Koffas, C Licciardi, D Sinclair Colorado State University, Fort Collins CO, USA — C Chambers, A Craycraft, W Fairbank Jr, D Harris, A Iverson, J Todd, T Walton Drexel University, Philadelphia PA, USA — MJ Dolinski, EV Hansen, YH Lin, Y-R Yen Duke University, Bloomington IN, USA — JB Albert, S Daugherty Laurentian University, Sudbury ON, Canada — B Cleveland, A Der Mesrobian-Kabakian, J Farine, A Robinson, U Wichoski University of Maryland, College Park MD, USA — C Hall University of Massachusetts, Amherst MA, USA — S Feyzbakhsh, S Johnston, A Pocar McGill University, Montreal QC, Canada — T Brunner, Y Ito, K Murray

## The EXO-200 Collaboration

SLAC National Accelerator Laboratory, Menlo Park CA, USA — M Breidenbach, R Conley, T Daniels, J Davis,
S Delaquis, A Johnson, LJ Kaufman, B Mong, A Odian, CY Prescott, PC Rowson, JJ Russell, K Skarpaas, A Waite, M Wittgen
University of South Dakota, Vermillion SD, USA — J Daughhetee, R MacLellan
Friedrich-Alexander-University Erlangen, Nuremberg, Germany
G Anton, R Bayerlein, J Hoessl, P Hufschmidt, A Jamil, T Michel, M Wagenpfeil, G Wrede, T Ziegler
IBS Center for Underground Physics, Daejeon, South Korea — DS Leonard
IHEP Beijing, People's Republic of China — G Cao, W Cen, T Tolba, L Wen, J Zhao
ITEP Moscow, Russia — V Belov, A Burenkov, M Danilov, A Dolgolenko, A Karelin, A Kuchenkov, V Stekhanov, O Zeldovich
University of Illinois, Urbana-Champaign IL, USA — D Beck, M Coon, S Li, L Yang
Stanford University, Stanford CA, USA — R DeVoe, D Fudenberg, G Gratta, M Jewell, S Kravitz, G Li, A Schubert, M Weber, S Wu
Stony Brook University of Munich, Garching, Germany — W Feldmeier, P Fierlinger, M Marino
TRIUMF, Vancouver BC, Canada — J Dilling, R Krücken, Y Lan, F Retière, V Strickland
Yale University, New Haven CT, USA — Z Li, D Moore, Q Xia

Vladimir Belov (ITEP) Эксперимент EXO-200 и космогенные источники фона 11.10.2018 5 / 58

#### Почему ксенон

Несмотря на не самое лучшее энергетическое разрешение, ксенон обладает весомыми преимуществами:

- Возможность использовать <u>мишень как детектор</u>, очень хорошо для достижения больших масс детектора, также самоэкранировка
- Достаточно <u>большое значение Q</u>, расположенное в области, сравнительно свободной от естественной радиоактивности
- <u>Легкость изотопного обогащения</u>, т. к. благородный газ, плюс <sup>136</sup>Хе самый тяжёлый изотоп
- <u>Легко очищать и перегружать</u> из детектора в детектор, без необходимости растить кристаллы
- Слабая активация космическими лучами, отсутствие долгоживущих изотопов
- Возможность <u>улучшения энергетического разрешения</u> за счёт антикорреляции ионизации/сцинтилляции
- Ограниченная возможность идентификации частиц
- → Уникальная способность подавление фона за счёт тагирования распада по дочернему ядру Ва [м.мое рвс 44, к931, 1991]

#### Детектор ЕХО-200

- Цилиндрическая сдвоенная ТРС заполненная жидким ксеноном
- Считывание ионизационного и сцинтилляционного сигналов
- В активном объёме 110 кг ксенона, обогащённого до 80.6% по <sup>136</sup>Хе
- Тонкостенный корпус детектора (1.37 мм, менее 30 кг).
- Мощная пассивная защита от внешней радиоактивности
  - более 50 см хладагента
  - 5.4 см высокочистой меди
  - 25 см низкоактивного свинца
- Активная система вето





## Конструкция ТРС



- две идентичные половины
- дрейфовое поле 567 В/см
- две плоскости 38/38 проволочек, скрещенных под углом 60°
- шаг проволочек 3 мм (9 мм на канал)
- 234 APD большой площади, собранные в группы по 7 штук
- всего 226 каналов
- сигналы оцифровываются 1 Мвыб/с
  - Полезадающие кольца из меди
  - Изолирующие вставки из акрила
  - Отражатель света из тефлона
  - рама APD: медь покрытая Au и Al
  - Катод и проволочки: фототравленая фосфористая бронза
  - Гибкие кабели для соединений: медь на каптоне, без клея
  - Всеобъемлющая программа проверки активности материалов

EXO-200 detector:JINST 7 (2012) P05010Characterization of APDs:NIM A608 68-75 (2009)Materials screening:NIM A591, 490-509 (2008)

#### Подземная лаборатория

Располагается в соляной шахте WIPP в Нью-Мехико (США) Малая активность окружающих пород U ~ 0.048 ppm Th ~ 0.25 ppm K ~ 480 ppm Глубина залегания 650 м (1621 м.в.э.) Измеренный поток мюонов  $I_{\rm v} = 2.97 \times 10^{-7} \,{\rm cm}^{-2} \,{\rm c}^{-1} \,{\rm cp}^{-1}$ HV FILTER AND FEEDTHROUGH VETO PANELS DOUBLE-WALLED CRYOSTAT FRONT END ELECTRONICS LXe VESSEL VACUUM PUMPS

JACK AND FOOT



LEAD SHIELDING

#### Система калибровки источниками

#### Миниатюрные источники

Используем источники <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co, <sup>228</sup>Th и <sup>226</sup>Ra.



Vladimir Belov (ITEP) Эксперимент EXO-200 и космогенные источники фона 11.10.2018 10 / 58

#### Восстановление событий

- Поиск импульсов согласованные фильтры применяются к формам сигналов
- Параметры импульсов (t, E) оцениваются для заряда и света
- Импульсы объединяются в кластеры, производя положение и энергию, а также разделяя события на Single Site (SS) и Multiple Site (MS)
- Размер кластера оценивается из времени нарастания и числа проволочек
- Положение используется в виде Standof Distance (SD) наименьшего расстояния от любого из зарядовых кластеров до конструкции TPC



События с высокой множественностью (MS) не отбрасываются, а используются для более точного фитирования фона.

#### Определение энергии



В ксеноне сцинтилляционный и ионизационный сигналы связаны и изменяются в противофазе. Это позволяет, используя их комбинацию, улучшить энергетическое разрешение.

E. Conti *et al.* Phys. Rev. **B**68 (2003) 054201



#### Энергетическая калибровка



#### Получение результата



#### Низкофоновые данные



Vladimir Belov (ITEP) Эксперимент ЕХО-200 и космогенные источники фона 11.10.2018

#### 18 15/58

#### Измерение 2β2ν

Самое точное измерение периода полураспада среди всех ядер

 $T_{_{1/2}}(2\nu\beta\beta) = 2.165 \pm 0.016(стат) \pm 0.059(сист) \times 10^{_{21}}$  л

[PRC 89, 015502 (2014)]



Эффективность к 2β событиям 58 % (87 %) Мертвое время 5.6 % Полная экспозиция 127.6 сут 23.14 кг·л 2β событий 18984 шт. Соотношение сигнал/фон 11 : 1

Эксперимент ЕХО-200 и космогенные источники фона 11.10.2018 16 / 58

#### Подавление шума

- Наибольший вклад в разрешение вносит шум в канале APD
- Был разработан специальный алгоритм для подавления этого шума
- Алгоритм использует пространственную информацию о событии из положения зарядовых кластеров и профиль шума в каждом канале для вычисления оптимальной энергии сцинтилляционного кластера



#### Модернизация детектора

- Новая усилительная часть для электроники, с уменьшенным шумом
- Дрейфовое напряжение увеличено в 1.5 раза
- В результате энергетическое разрешение улучшилось до σ/E(Q) = 1.23%
- Специальный аппарат (дерадонатор) для удаления радона из воздуха
- Измерения показали, что уровень радона внутри защиты снизился более чем в 10 раз



#### Оптимальный дискриминатор

Можно усилить β/γ разделение используя дополнительную информацию



#### Космогенные источники фона

- Основной источник фона в ЕХО-200 гамма-фон
- Он уже хорошо оценён по анализу радиоактивности материалов [Phys.Rev. C92 (2015) no.1, 015503]
- Нейтроны являются вторым по значимости источником фона
- <sup>137</sup>Хе важный источник фона производится нейтронами
- Моделирование показало, что внешние нейтроны не проходят через свинец и хладагент
- Известным источником нейтронов являются мюоны
- Мюоны обладают большой энергией и высокой проникающей способностью
- Ядерные взаимодействия, вызываемые мюонами, редки, зато легко приводят к значительному выделению энергии
- Грубая оценка для свинца:  $Y_n \cdot J = 0.2 \ n/\kappa \Gamma \cdot cyT \Rightarrow 10^4 \ n/cyT. !$
- Прямые эффекты подавлены системой активного вето, поэтому наша цель – активация ядер вещества

#### Распределения мюонов

• Для распределения по углу к вертикали (надиру) мы используем приближение Мияке:

 $I(h, \theta) = I(h, 0) \cdot (\cos \theta)^{1.53} e^{\alpha(\sec \theta - 1)h}$ , где  $\alpha = -8.0 \times 10^{-4}$  м.в.э.-1, h = 1050 м.в.э.

- Угол по горизонтали (азимут) равномерно
- Распределение по энергии на поверхности ( $E_0$ )  $\frac{dN}{dE_0 d \Omega} \approx 0.14 \left(\frac{E_0}{\Gamma \ni B}\right)^{-2.7} \left(\frac{1}{1 + \frac{1.1E_0 \cos \theta}{115 \Gamma \ni B}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1E_0 \cos \theta}{850 \Gamma \ni B}}\right) \frac{1}{cM^2 c cp \Gamma \ni B}$
- Энергия мюонов под землёй (E)
   E<sub>0</sub>=(E+ε)e<sup>bHsecθ</sup>-ε, где ε = 693 ГэВ, b = 3.5 × 10<sup>-4</sup> м.в.э.<sup>-1</sup>, H = 1620 м.в.э.
- Зарядовое соотношение фиксированное 1.3
- Поток вертикальных мюонов  $I_{\nu} = I(\theta = 0) = (2.97^{+0.14}_{-0.13}(cucm) \pm 0.02(cmam)) \times 10^{-7} \frac{1}{cm^2 c cp}$
- Множественностью мюонов можно пренебречь

#### Распределения мюонов

Угловое распределение выбирали из нескольких по минимуму  $\chi^2$  варьируя параметр глубины

Проверяли сравнивая с измерениями мюонов в детекторе

Наблюдаемые скачки на угловых распределениях – следствие применяемого отбора

0.5

Reconstructed  $\cos\theta$ 

0.6

0.7

0.8

900**⊢** 

800

700

600

500

400

300

200

100

0

0.1

0.2

0.3

0.4

Counts



t

0.9

#### Расчётные модели

- Решили использовать лучшее FLUKA и Geant4
- Включена адронная физика, особое внимание нейтронам
  - Мюон-ядерные и фотоядерные реакции
  - Захваты  $\mu^-$ ,  $\pi^-$ ,  $K^-$  и  $\overline{p}$  после остановки
  - Генерация тяжёлых фрагментов и их взаимодействий
  - Для нейтронов малых энергий (< 20 МэВ) модели высокой точности, с использованием файлов данных сечений и реакций, включая сечения для тепловых нейтронов
- Модель FLUKA использует упрощённую геометрию, модель Geant4 точную, отличие масс < 1%</li>
- Основной результат расчёт скорости активации

#### Проведение моделирования

- Проведение полного расчёта заняло 62 тыс. ядер-часов для FLUKA и 2 тыс. ядер-часов для Geant4.
- Эквивалентная экспозиция установки, рассчитанная по количеству прошедших мюонов, составила в модели FLUKA 5.5 лет, а в модели Geant4 — 57 лет.
- Для всей активации FLUKA даёт результат в 1.5 раза больше Geant4
- Но для только захватов нейтронов лишь на 9% больше



#### Автоматизированный метод отбора

- Задача: проверить ~ 2 тыс. изотопов на предмет потенциального вклада в низкофоновые данные
- Много радиоактивных, в т. ч. с распадными цепочками
- ⇒ считать руками долго и чревато ошибками
- ... но можно поручить это компьютеру
- Итого:
  - Нас волнуют события с *E* > 2300 кэВ
  - Снаружи в детектор могут попасть только ү-кванты
  - Гамма-квантов такой энергией немного
  - Не следует забывать про тормозное излучение бета-электронов
  - Эффективность регистрации сильно зависит от расстояния до детектора, но можно использовать упрощенную модель
- Сумма по всем переходам последовательно для конкретного изотопа должна дать искомый результат

#### Автоматизированный метод отбора



Vladimir Belov (ITEP) Эксперимент EXO-200 и космогенные источники фона 11.10.2018 26 / 58

#### Краткий список опасных изотопов

После автоматической проверки:

- Для оставшихся смоделирована реальная эффективность регистрации распада
- Особое внимание производным ксенона, т. к. для β-распада положение сильно влияет на эффективность
- Также проверена возможность генерации ядер в возбуждённом состоянии ⇒ без заметного эффекта
- Окончательный отбор ⇒ результирующий список:

| Область                       | Изотоп            | T <sub>1/2</sub> | Энергия,<br>кэВ | Эфф.<br>2,3 <b>—</b> 2,6 | Эфф.<br>SS ROI | Geant4,<br>шт./г | FLUKA,<br>шт./г |  |
|-------------------------------|-------------------|------------------|-----------------|--------------------------|----------------|------------------|-----------------|--|
| Хладагент НFE-7000            | <sup>16</sup> N   | 7,1 c            | 10 420          | 0,009%                   | 0,001%         | 2380 ± 90        | 2910±110        |  |
| Корпус ТРС                    | <sup>60</sup> Co  | 5,3 г            | 2 823           | 0,19%                    | 0,0002%        | $2.6 \pm 0.3$    | $2.9 \pm 0.6$   |  |
| Жидкий ксенон                 | <sup>130</sup>    | 12 ч             | 2 949           | 2,0%                     | 0,001%         | 7.3 ± 0.5        | 21.6 ± 1.8      |  |
| Жидкий ксенон                 | <sup>132</sup>    | 2,3 ч            | 3 581           | 1,6%                     | 0,013%         | 7.7 ± 0.5        | 22.2 ± 1.8      |  |
| Жидкий ксенон                 | <sup>134</sup>    | 53 мин           | 4 175           | 1,4%                     | 0,012%         | 7.3 ± 0.5        | 20.4 ± 1.7      |  |
| Жидкий ксенон                 | <sup>135</sup>    | 6,6 ч            | 2 627           | 1,2%                     | 0,035%         | 8.6 ± 0.6        | 21.6 ± 1.8      |  |
| Жидкий ксенон                 | <sup>135</sup> Xe | 9,1 ч            | 1 165           | —                        | _              | $1110 \pm 40$    | $1060 \pm 40$   |  |
| Жидкий ксенон                 | <sup>137</sup> Xe | 3,8 мин          | 4 173           | 4,1%                     | 1,5%           | 439 ± 17         | 403 ± 16        |  |
| [JCAP 1604 no.04, 029 (2016)] |                   |                  |                 |                          |                |                  |                 |  |

#### Захват нейтронов на ядрах

 Один из процессов активации – радиационный захват нейтронов на ядрах,

например  ${}^{1}$ H (*n*,  $\gamma$ )  ${}^{2}$ H,  $E_{\gamma}$  = 2.223 МэВ

- Идёт при любых энергиях, имеет резонансные пики
- Обычно случается с тепловыми нейтронами
- Характерное время до захвата достигает миллисекунд
- Захват с попаданием на метастабильное состояние достаточно редок

- Производит характерное излучение
- Может быть выделен в совпадении с мюонами



#### События в совпадении с вето-сигналом

События в ТРС после сигнала вето-панелей:

- Слева  $\gamma$ -кванты неупругого рассеяния и тормозного излучения
- Посередине события от захвата нейтронов на ядрах
- Справа обычные низкофоновые события, большей частью 2β



#### Мгновенное ү-излучение при захвате

- Схема каскада отличается от обычной
- Мы брали экспериментальные данные из ENSDF
- Очень многое было измерено в 70-х, но с ограниченной точностью
- Пришлось дорабатывать напильником
- Данные были преобразованы в специальные генераторы для МК



#### Пространственное распределение

• Сильно неоднородно, особенно в хладагенте

Vladimir Belov (ITEP)

- Нейтроны летят из свинца и термализуются в хладагенте
- Нужно правильно смоделировать эффективности регистрации
- Разыгрывали испускание ү-квантов из положения точек захвата



Эксперимент ЕХО-200 и космогенные источники фона 11.10.2018 31 / 58

#### Наложение событий

- Дополнительную сложность создаёт множественность событий
- Нейтронов бывает много, и их захватов тоже
- Более того, все они имеют разное время
- Но достаточно близкое, чтобы мешать друг другу
- FLUKA и Geant4 разошлись в оценке времён до захвата примерно в 2 раза, кажется это связано в расчётом термализации нейтронов
- Было проведено специальное моделирование для расчёта коррекции



Vladimir Belov (ITEP)

Эксперимент ЕХО-200 и космогенные источники фона 11.10.2018

32 / 58

#### Отбор реальных событий

- События от захвата нейтронов отличаются от обычных событий
- Большая энергия и высокая множественность ү-квантов ведёт к сложной топологии событий
- Поэтому нам пришлось изменить процедуру отбора:
  - Не требуется полное восстановление всех кластеров
  - Допускается несколько сцинтилляционных кластеров
  - Отменена блокировка на 1 с после события
- Также введены поправки на:
  - Неэффективность триггера и DAQ
  - Восстановления событий после прохождения мюона через ТРС
  - Наложение событий по времени
- Результирующий набор данных фитировался PDF как обычно

#### Итоговый фит

- В качестве фона были взяты низкофоновые данные и отмасштабированы на соответствующее время
- Всё вместе отлично описывает экспериментальные данные



#### Сравнение скоростей захвата

- В целом наблюдается хорошее соответствие расчёта эксперименту
- Результаты модели Geant4 значительно ближе к экспериментальным, чем для FLUKA

| Компонент                           | Событий<br>(>1500 кэВ) | Эксперимент,<br>захватов/г      | Geant4,<br>захватов/г | FLUKA,<br>захватов/г |
|-------------------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Фон                                 | 35.9 ± 11.7            |                                 |                       |                      |
| <sup>64</sup> Си и <sup>66</sup> Си | 306 ± 70               | $(4.23 \pm 1.30) \times 10^{5}$ | $4.69 \times 10^{5}$  | $5.78 \times 10^{5}$ |
| <sup>19</sup> F                     | 87.1 ± 38.0            | $(2.85 \pm 1.29) \times 10^4$   | $2.75 \times 10^{4}$  | $2.45 \times 10^{4}$ |
| <sup>1</sup> H                      | 309 ± 52               | $(2.41 \pm 0.50) \times 10^{5}$ | $2.48 \times 10^{5}$  | $3.50 \times 10^{5}$ |
| <sup>134</sup> Xe                   | 20.1 ± 18.2            | 72.9 ± 67.1                     | 116                   | 120                  |
| <sup>136</sup> Xe                   | 86.0 ± 29.4            | 338 ± 132                       | 439                   | 403                  |

[JCAP 1604 no.04, 029 (2016)]

#### **Сравнение** <sup>137</sup>**Хе**

- Для <sup>137</sup>Хе мы имеем данные не только о захватах...
- … но и о распадах из фита низкофоновых данных
- Активацией за пределами защиты можно пренебречь, т. к. малая масса и длинный путь
- Удалением из детектора за счёт циркуляции – тоже
- Результаты обоих измерений хорошо совпадают
- Результаты обоих расчётов хорошо совпадают друг с другом и с результатами измерений





#### Специальный отбор для <sup>137</sup>Хе

- 137Хе опасный источник фона
- β-распад с энергией перехода 4173 кэВ, только 30% сопровождаются γ-квантом 450 кэВ
- 2/3 образовавшихся <sup>137</sup>Хе не сопровождаются мюоном в ТРС



- Период полураспада 3.8 мин не позволяет просто блокировать ТРС
- Захват нейтрона на <sup>136</sup>Хе выделяет 4025 кэВ
- Скорость движения жидкости мала (~0.1 мм/с), а диффузии еще меньше

 Можно определить событие захвата и тогда блокировать ТРС надолго

#### Промежуточный итог

- Мюоны везде, но это не повод отчаиваться
- Моделирование методом МК имеет хорошую точность
- Скорости современных ЭВМ позволяют моделировать даже большие установки
- Результаты расчётов совпадают с измерениями
- Активация космическими лучами может создавать неустранимые источники фона
- Это представляет значительную опасность для экспериментов, нацеленных на поиск редких процессов
- Размер установок в данном случае работает против нас
- Часть событий активации (нейтронный захват) могут быть подавлены за счёт тагирования захвата

#### Набор данных

| Phase-I   |  |          |         |         | Phase-II   |                                 |          |      |       |      |                 |
|---|--|----------|---------|---------|--|---------------------------------|----------|------|-------|------|-----------------|
| • Сент. 2011 – Февр. 2014   |  |          |         | •       | • Доступ восстановлен в 2015 после                         |                                 |          |      |       |      |                 |
| • Полное живое время 596.7 сут.   |  |          |         |         | остановки из-за аварии в шахте                             |                                 |          |      |       |      |                 |
| • Избранные результаты  |  |          |         | •       | <ul> <li>Янв. – Май 2016</li> </ul>                        |                                 |          |      |       |      |                 |
| <ul> <li>Наиболее точное измерение 2vßß</li> </ul>  |  |          |         |         | • Модернизация установки                                   |                                 |          |      |       |      |                 |
| • Phys. Rev. C <b>89</b> , 015502 (2013)  |  |          |         | •       | • Новый набор данных с мая 2016                            |                                 |          |      |       |      |                 |
| • Жё  | <ul> <li>Жёсткий предел на 0vββ</li> </ul> |          |         |         |  | • Полное живое время 271.8 сут. |          |      |       |      |                 |
| <ul> <li>Nature 510, 229 (2014)</li> </ul>  |  |          |         | •       | <ul> <li>Новый результат показан ТАUP-2017</li> </ul>      |                                 |          |      |       |      |                 |
| <ul> <li>Чувствительность Т<sub>1/2</sub><sup>0vββ</sup> &gt; 1.9x10<sup>25</sup> yr (90%CL)</li> </ul> |  |          |         |         | <ul> <li>Phys.Rev.Lett. 120 (2018) no.7, 072701</li> </ul> |                                 |          |      |       |      |                 |
| Live time (days)<br>L   | ,200<br>900<br>600                         |          |         |         | Cumulati   | ve Live                         | time     |      |       |      | Other<br>Golden |
|   | 500  |          | F       | Phase I |  |                                 |          |      | Phase | e II |                 |
|   | 0  | Jan 2012 | Jan 201 | 3       | Jan 2014   | Jan                             | 2015 Jar | 2016 | Jan 2 | 2017 |                 |

#### Измерение 2β0ν

- Данные Phase-I и Phase-II фитировались независимо
- Результаты объединялись после
- Статистически значимого избытка не наблюдается (~1.5σ)



#### Измерение 2β0ν



- Полная экспозиция 177.6 кг·л
- Индекс фона в области поиска (1.5 ± 0.2) × 10-3 соб./(кг·л·кэВ)
- Чувствительность 3.7 · 10<sup>25</sup> лет (90% CL)
- *T*<sub>1/2</sub>(0vββ) > 1.8 · 10<sup>25</sup> лет
- $\langle m_{\beta\beta} \rangle$  < 147–398 meV (90% CL)

Phys. Rev. Lett. **120**, 072701

#### Сравнение



EXO-200: this result, arXiv: 1707.08707 GERDA: arXiv:1710.07776 KamLAND-Zen: PRL 117 (2016) 082503 KK&K Claim: Mod. Phys. Lett., A21 (2006) 1547



EXO-200: this result, arXiv: 1707.08707 CUORE: talk by O. Cremonesi @ TAUP-2017 Sensitivity in PRL 115 (2015) 102502

#### Другие результаты

- 2β-распад <sup>136</sup>Хе с испусканием майорона
  - T<sub>1/2</sub>(χ) > 1.2 × 10<sup>24</sup> л (90% CL)
  - [Phys.Rev. D90 (2014) no.9, 092004]
- 2β-распад <sup>136</sup>Хе на возбуждённое состояние 0<sub>1</sub>+ Ва
  - Т<sub>1/2</sub><sup>2</sup> (0+→0<sub>1</sub>+) > 6.9 × 10<sup>23</sup> л (90% CL)
  - [Phys.Rev. C93 (2016) no.3, 035501]
- Нарушение Лоренц-инвариантности и СРТ симметрии
  - Отклонений не обнаружено
  - [Phys.Rev. D93 (2016) no.7, 072001]
- 2β-распад <sup>134</sup>Хе
  - $T_{1/2}(2\nu\beta\beta) > 8.7 \times 10^{20}$  л и  $T_{1/2}(0\nu\beta\beta) > 1.1 \times 10^{23}$  л (90% CL)
  - [Phys.Rev. D96 (2017) no.9, 092001]
- Распад нуклонов в ядре на примере <sup>136</sup>Хе
  - T<sub>1/2</sub>(<sup>133</sup>Sb) > 3.3 × 10<sup>23</sup> л и T<sub>1/2</sub>(<sup>133</sup>Te) > 1.9 × 10<sup>23</sup> л (90% CL)
  - [Phys.Rev. D97 (2018) no.7, 072007]

#### ЕХО-200 и далее

- Детектор с 200 кг жидкого ксенона успешно работает вот уже 5 лет
- <u>Самое точное измерение</u> периода полураспада среди 2β
- Измеренный уровень фона очень низок
- Имеем время жизни электрона <u>~ 3 мс постоянно</u>
- Использовали <u>самоэкранировку</u> в монолитном детекторе
- Продемонстрировали силу <u>β/γ разделения</u> (SS/MS)
- Получили энергетическое разрешение 1.2% (в области 2.5МэВ)
- Пора подумать о тонном детекторе!
- Мы предлагаем 5000 кг детектор на жидком ксеноне nEXO
- На таком масштабе находится область «золотой эры» экспериментов по исследованию 2β-распада, т. к. размеры детектора становятся заметно больше радиационной длины
- nEXO это не просто EXO-200 ×30
- Наша цель увеличить чувствительность более чем в 100 раз

#### Борьба с гамма-фоном

- Экранировать детекторы при поиске 2β-распада сложнее, чем при поиске WIMP
- Для тонных детекторов самоэкранировка выходит на новый уровень эффективности



#### Общий вид



- Цилиндрическая ТРС 1.3 × 1.3 м
- Масса активного ксенона ~ ×30
- Уровень обогащения 90%
- Тонкостенный медный корпус
- Единая зона дрейфа, катод внизу
- НFE для охлаждения и защиты
- Более глубокая шахта

- Платы вместо проволочек
- ... для считывания 2D положения
- SiPM`ы на боковой поверхности
- ... чувствительные к VUV
- Хорошее отражение везде
- Холодная электроника
- Энергетическое разрешение < 1%

#### nEXO @ SNOLab



Vladimir Belov (ITEP) Эксперимент EXO-200 и космогенные источники фона 11.10.2018 47 / 58

#### Доверительный объём

- У детекторов такого размера индекс фона начинает зависеть от размера доверительного объёма
- Общий фит данных из всего объёма более полно использует информацию и позволяет достичь лучших результатов
- 95% чувствительности достигается с 2000 кг



Моделирование проводилось с измеренной активностью материалов, без экстраполяции, заложены все материалы по проекту.

#### Сигнал и фон



Текущая оценка на уровень фона: 3 × 10<sup>-4</sup> соб./FWHM/кг/л, предполагая доверительный объём 2000 кг.

#### Перспективы nEXO

- nEXO это эксперимент следующего поколения по поиску 2β0v-распада
- Ведётся активная разработка конструкции
- Имеет потенциал для открытия в области обратной иерархии
- Ожидаемая чувствительность к 2β0v-распаду <sup>136</sup>Хе составляет 9.1 × 10<sup>27</sup> л при 90% С.L. за 10 набора данных



Rodriguez, Martinez-Pinedo, Phys.Rev.Lett. 105 (2010) 252503

#### Заключение

- Поиск 280v-распада направлен на открытие «новой» физики и связан со многими областями современной физики
- Мы построили превосходный детектор и набираем данные
- Наблюдаемый уровень фона соответствует ожиданиям и расчётам
- Результаты измерений 100 кг представлены и не содержат сигнала
- ЕХО-200 успешно продемонстрировал преимущества избранного подхода
- Ведутся значительные работы по доводке конструкции nEXO
- Этот 5000 кг детектор позволит решительно шагнуть вперёд
- Область массы нейтрино 10 мэВ в пределах нашей доступности!



### Спасибо



Vladimir Belov (ITEP) Эксперимент EXO-200 и космогенные источники фона 11.10.2018 52 / 58

#### Внутренности детектора



 Vladimir Belov (ITEP)
 Эксперимент EXO-200 и космогенные источники фона
 11.10.2018
 53 / 58

#### Общий вид детектора



Vladimir Belov (ITEP) Эксперимент EXO-200 и космогенные источники фона 11.10.2018 54 / 58

#### Чистота ксенона и уровень радона

Непрерывная циркуляция ксенона через высокотемпературные очистители SAES с использованием специально сконструированного насоса.

[Neilson et al. (2011) arXiv:1104.5041v1]

Среднее время жизни электрона

~3 мс обеспечивает на максимальном времени дрейфа 110 мкс уменьшение сигнала <3%.

Восстановление после остановок занимает несколько дней



### nEXO Ba tagging

Goal of barium tagging:

- Recover and identify xenon decay daughter barium if present
- Suppress background to almost background free

Several concepts are being investigated:



Probe removed to vacuum; Ba<sup>+</sup> identified by (1) laser ablation/resonance ionization or (2) thermal desorption/ionization



Probe removed to vacuum; Ba/Ba<sup>+</sup> identified laser fluorescence single atom imaging in SXe Capillary extraction <sup>4</sup>



Ba<sup>+</sup> "sucked" out of LXe through capillary into ion trap and identified laser fluorescence and MRTOF spectroscopy

<sup>3</sup>B. Mong et al., "Spectroscopy of Ba and Ba<sup>+</sup> deposits in solid xenon for barium tagging in nEXO", Phys. Rev. A 91, (2015) 022505

<sup>4</sup>T. Brunner et al., "An RF-only ion-funnel for extraction from high-pressure gases", Int J. Mass Spec., 379, 110-120 (2015)

#### **nEXO фотодетекторы**



Vladimir Belov (ITEP) Эксперимент EXO-200 и космогенные источники фона 11.10.2018 57 / 58

#### nEXO регистрация заряда

- Orthogonal, noble-metal strips of 10 cm length on a quartz substrate
- Each strip consists of small metal pads linked diagonally, lying parallel to either the X- or the Y-axis.





- Improving fabrication process.
- Investigating different readout schemes.
- Integrating with cold electronics.