





# Первое наблюдение упругого когерентного рассеяния нейтрино на ядрах аргона

Дмитрий Геннадьевич Рудик от лица коллаборации COHERENT

Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН Новосибирск 11.03.2020





https://coherent.ornl.gov

arXiv:1803.09183v2





Дмитрий Геннадьевич Рудик

#### План доклада

#### • Введение

- Упругое когерентное рассеяние нейтрино на ядрах атомов (УКРН)
- Импульсный источник нейтронов (SNS)
- COHERENT на SNS
- Детектор CENNS-10 и первое обнаружение УКРН на ядрах аргона
  - Жидкий аргон (LAr)
  - Детектор CENNS-10
  - Анализ данных и результаты первого «Физического» сеанса
- Заключение

# Упругое когерентное рассеяние нейтрино на ядрах атомов (УКРН)

- Предсказано Стандартной моделью
  - D.Z. Freedman, Phys. Rev. D 9 (1974)
  - V.B. Kopeliovich and L.L. Frankfurt, ZhETF Pis. Red. 19 (1974)



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{G^2}{4\pi^2} k^2 (1 + \cos\theta) \frac{(N - (1 - 4\sin^2\theta_W)Z)^2}{4} F^2(Q^2)$$
$$\propto N^2$$

где G — константа Ферми, Z — количество протонов, N — количество нейтронов, F(Q<sup>2</sup>) — форм фактор ядра, Q — переданный 4-импульс, k — энергия нейтрино



<sup>22.01.2020</sup> 

#### Физика УКРН

- Физика Суперновых
- Инструмент для мониторинга ядерных реакторов
- Проверка СМ и поиск физики за ее пределами
  - Фон при поиске темной материи
  - Нестандартные взаимодействия



#### Поиски УКРН



#### Импульсный источник нейтронов (SNS) Нейтрино



- Расположен в национальной лаборатории Оак Ридж (США)
- В данный момент является наиболее мощным импульсным источником протонов
- Протоны, сталкиваясь с ртутной мишенью, создают потоки нейтронов и нейтрино



#### Импульсный источник нейтронов (SNS) Нейтрино

- 1.4 МВтч; ~5000 МВтч/год; 1.5\*10<sup>23</sup> РОТ/уг
- 60 Гц сброс пучка (ширина ~350 нс ПШПМ)
- Все детекторы эксперимента COHERENT расположены в <del>подвале SNS</del> Нейтринной аллее
- ~ 20 28 м от ядра ртутной мишени





#### COHERENT на SNS

- Обнаружение УКРН (детектор Csl[Na])
- Эксперимент с различными мишенями для изучения σ ~ N<sup>2</sup> зависимости
- Другие задачи: NSI, темная материя и пр.





# COHERENT на SNS: изучение фона

- Наиболее опасный фон для регистрации УКРН это нейтроны, которые возникают при столкновениях протонов с мишенью SNS
- Сигналы аналогичны сигналам от УКРН, возникают одновременно с пучком «скоррелированный с пучком фон» (BRN)
- Скоррелированный фон измерялся различными вспомогательными детекторами:
  - MARS Sandia
  - Sandia "Neutron Scatter Camera"
  - IU "SciBath" детектор (в месте расположения CENNS-10)
  - В нейтринной аллее нейтронный фон на несколько порядков меньше, чем в экспериментальном зале SNS



Sandia "Neutron

Scatter Camera"













# Детектор CENNS-10 и первая регистрация УКРН на ядрах аргона

# LAr для изучения УКРН

- Сравнительно большой световыход ~40 фотонов/кэВээ
- Квенчинг фактор измерен в области интереса



- Разделение типов частиц по форме сигнала
  - Две компоненты сцинтилляции
    - Синглетные возбужденные состояния (время жизни ~6 нс)
    - Триплетные возбужденные состояния (время жизни ~1.5 мкс)
  - Отношение количества синглетных возбужденных состояний к количеству триплетных различается для разных типов частиц



(%)

-actor

35

30

25

20

# Детектор CENNS-10

- Создан 2012-15 гг. в Fermilab (J. Yoo etal), разобран, перевезен в IU
- В конце 2016 перевезен в ORNL
- В начале 2017 года первый инженерный запуск, 1.8 ГВт\*ч (~ 0.4\*10<sup>23</sup> протонов на мишени) Phys. Rev. D100 (2019) no.11, 115020
- Середина 2017 модернизация:
  - Однофазный LAr-детектор 24 кг во «внутреннем» объеме
  - 2×8"ФЭУ Hamamatsu R5912-02МОD покрытые TPB, QE=18%@400 нм
  - Стенки: Тефлон, покрытый ТРВ
  - Порог ≈ 20 кэВяэ
  - CAEN 1720 (250MHz, 12-bit)
  - Криокуллер 90 Вт
  - SAES MonoTorr очиститель газа до ~1 ppb
  - Многослойная защита: Pb/Cu/H2O
  - Ожидаем ≈140 УКРН событий/SNS-год
- Физический сеанс №1 Июль 2017 декабрь 2018, 6.1 ГВт\*ч (~ 1.4\*10<sup>23</sup> протонов на мишени) Анализ данных завершен!



#### Параллельный «слепой» анализ данных

Для уменьшения вероятности возникновения ошибок, анализ данных Физического сеанса №1 проводился двумя независимыми группами: американской и российской (ИТЭФ, НИЯУ МИФИ)

- 1. Общая Монте Карло модель детектора;
- 2. Данные с пучка не вскрывались до момента фиксации параметров отбора событий;
- 3. Отсутствие обмена информацией между группами до момента вскрытия данных с пучка.

В данном докладе представлены результаты российской группы

# Калибровка детектора

- Световыход (LY) ~4.6 ± 0.4 ФЭ/кэВээ
- Калибровка гамма-источниками (<sup>57</sup>Co, <sup>83m</sup>Kr, <sup>241</sup>Am)
- Калибровка нейтронным источником (AmBe)
- PSD, разрешение детектора, порог регистрации достаточны для обнаружения УКРН





# Триггер

- Поток нейтрино от SNS имеет характерный временной профиль:
  - «Мгновенные» (prompt), 0-1.5 мкс после сброса протонов на мишень (POT)
  - «Задержанные» (delayed), 1.5-8 мкс после РОТ
- Время прилета нейтронов соответствует «мгновенному» временному интервалу. Задержанные нейтроны практически отсутствуют
- Для изучения постоянного фона через 14 мс после каждого сброса протонов на мишень записывался strobe сигнал



#### Фон

- Основной постоянный фон от изотопа <sup>39</sup>Ar
- Может быть измерен напрямую по strobe данным

- Основной скоррелированный с пучком фон нейтроны (BRN)
- Нормализация по данным, набранным без водяной защиты
- Монте Карло моделирование
- Данные других детекторов и инженерного сеанса CENNS-10



22.01.2020

#### Предсказанные функции распределений

- Бинированный 3D статистический анализ с параметрами: энергия, время и F90
- Метод максимального правдоподобия ٠
- Применены отборы событий: •
  - Качество события
  - Время регистрации (-1 8 мкс)
  - По энергии (4.1 30.6 кэВээ = 16 92 кэВяэ)
  - По FV (0.2 0.8)
  - F90 (0.5 0.8)
- Формы распределений для УКРН и BRN смоделированы
- Формы распределений для постоянного • фона получены из данных strobe

#### Предсказание на количество событий

УКРН	101 ± 12
BRN	226 ± 33
Постоянный фон	1155 ± 45



100

120

140

energy (PE)

#### Затем данные с пучка были открыты!



#### Результаты статистического анализа

- Проведен 3D анализ (энергия, время и F90)
- Метод максимального правдоподобия (RooFit)
- Обнаружено УКРН:

#### 121 ± 36 (стат.) ± 15 (сист.)

- Значимость (отклонение от нулевой гипотезы):
  - **3.4 о** (только стат.)
  - **3.1 о** (стат. + сист.)
- Отклонение от предсказания СМ не превышает 1  $\sigma$



УКРН	121 ± 36 (стат.) ± 15 (сист.)
BRN	222 ± 23
Постоянный фон	1112 ± 41
-2∆(lnL)	12.1
Значимость	3.1 (стат. + сист.)

Предсказание на количество событий

УКРН	101 ± 12
BRN	226 ± 33
Постоянный фон	1155 ± 45

Дмитрий Геннадьевич Рудик

# Аппроксимация данных (ММП)

- Аппроксимация в предположении о присутствии УКРН хорошо описывает данные
- Систематическая погрешность результатов аппроксимации ~13%



CEvNS (red), BRN (green), Strobe (blue) and Sum (dashed)

CEvNS (red), BRN (green), Strobe (blue) and Sum (dashed)



#### Сечение УКРН

- Среднее значение сечения УКРН по потоку нейтрино
- Отношение наблюдаемого количества УКРН к предсказанному СМ количеству:

$$\frac{N_{\rm H3M}}{N_{\rm CM}} = 1.2 \pm 0.4$$
$$\sigma_{\rm H3M} = \frac{N_{\rm H3M}}{N_{\rm CM}} \sigma_{\rm CM} = (2.2 \pm 0.7) \times 10^{-39} \, {\rm cm}^2$$

• Основная погрешность статистическая



# Нестандартные взаимодействия (NSI)

- Рассчитаны разрешенные области для NSI
- Ограничения:
  - Рассматриваются только взаимодействия электронного нейтрино с и и d кварками
  - Остальные параметры NSI положены равными нулю

$$Q_W^2 \to Q_{\rm NSI}^2 = 4 \left[ N \left( -\frac{1}{2} + \epsilon_{ee}^{uV} + 2\epsilon_{ee}^{dV} \right) + Z \left( \frac{1}{2} - 2\sin^2\theta_W + 2\epsilon_{ee}^{uV} + \epsilon_{ee}^{dV} \right) \right]^2$$







#### Сравнение результатов двух групп

- Анализ американской группы:
- Аналогичный 3D анализ по методу максимального правдоподобия
- Менее жесткие ограничения по энергии и F90, отсутствует отбор по FV
- Результаты обоих анализов согласуются:
  - Фиксируют значимое превышение количества наблюдаемых событий над фоном
  - Отклонение от предсказания СМ в пределах 1 σ





Результаты российской группы		
УКРН	121 ± 36 (стат.) ± 15 (сист.)	
-2∆(lnL)	12.1	
Значимость	3.1 (стат. + сист.)	

#### Результаты американской группы

УКРН	159 ± 43 (стат.) ± 14 (сист.)
-2∆(lnL)	15.0
Значимость	3.5 (стат. + сист.)

#### Заключение

- УКРН важный процесс в нейтринной физике
- С момента обнаружения УКРН в 2017 году коллаборацией СОНЕRENT развернута масштабная компания по изучению данного процесса
- Впервые, с помощью детектора CENNS-10, УКРН зарегистрировано на относительно легком ядре <sup>40</sup>Ar
- Значимость обнаружения более З σ по итогам Физического сеанса № 1
- Коллаборация СОНЕRENT планирует дальнейшее изучение УКРН при помощи различных детекторных технологий

#### Дополнительные слайды

#### УКРН: где искать?

- Реакторы
- Распад  $\pi$  в покое





# Первое обнаружение УКРН (2017г.)

- Кристалл Csl[Na] 14.6 кг
- 2D (энергия и время) анализ по методу максимального правдоподобия
- Обнаружено: 134 ± 22 УКРН
- Предсказано СМ: 173 ± 48 УКРН
- Нулевая гипотеза отклонена ~7 о
- Ограничения на NSI
- В настоящий момент обрабатывается дополнительная статистика и уточняются систематические ошибки



# LAr для изучения УКРН

- Аг легче Сѕ и І
- Меньше сечение, но больше энергия ядра отдачи



Cross section (10<sup>40</sup> cm<sup>2</sup>) 01 02

10

Cs

Ge

#### Квенчинг фактор

- Отношение регистрируемой энергии от ядра отдачи к регистрируемой энергии от электрона отдачи при одинаковой начальной энергии
- Ряд экспериментов по измерению квенчинг фактора в области энергий УКРН
- Линейная аппроксимация данных в области интереса
  - Относительная погрешность составляет в среднем 2% в диапазоне энергий УКРН



# Набор данных с SNS

- Во время инженерного сеанса интегральная мощность пучка составила 1.8 ГВт\*ч (~ 0.4\*10<sup>23</sup> протонов на мишени) за февраль – май 2017 г.
- Во время физического сеанса № 1 интегральная мощность пучка составила
  6.1 ГВт\*ч (~ 1.4\*10<sup>23</sup> протонов на мишени) с июля 2017 г. по декабрь 2018 г.



#### Общая схема анализа данных



22.01.2020

#### Результаты «Инженерного сеанса»

• Февраль-март 2017 г. 0.8 • Порог ~ 80 кэВяэ, не до ਣੂ 🚥 УКРН Effici 0.4 • Превышение скорости ( Detected Events Likelihood Cuts нейтрино соответствует 0.2 Counting Exp't Cuts BRN 100 150 200 250 300 350 400 450 500 Recoil Energy (keVnr) 50 • В области задержанных превышения скорости счета (ожидалось 0.5 УКРН) • Ограничение на кол-во нейтронов в области задержанных нейтрино Ограничение на сечение УКРН на аргоне Phys. Rev. D100 (2019) no.11, 115020 Работа IU PhD студента: Matthew Heath

M. R. Heath (IU PhD Thesis) (2019)

http://inspirehep.net/record/1744690?ln=en



# Отбор событий

- Качество событий:
  - Совпадение первых импульсов в каждом канале в пределах 20 нс окна
  - Отбор сигналов только с одним событием
- Отбор по времени:
  - Событие должно попасть в «мгновенный» или «задержанный» интервал времени
- Отбор по энергии:
  - Диапазон по энергии 4.1 30.6 кэВээ (16 92 кэВяэ)
- Отбор по оси «Z» (FV)
  - Отношение количества света, зарегистрированного в верхнем ФЭУ к общему количеству зарегистрированного света (0.2 – 0.8)
- Отбор по форме сигнала (F90)



# Оценка систематической погрешности

#### Погрешности влияющие на оценку скорости счета УКРН

#### Погрешности, возникающие при процедуре аппроксимации (RooFit)

Источник ошибки	Значение	Источник ошибки	Значение
Область энергий	4.7%	Форма PSD распределения	3.1%
Расчет параметра F90	3.3%	Время возникновения сигнала УКРН	6.3%
FV	1.2%	Время возникновения сигнала BRN	5.3%
Ядерный форм-фактор	3%	Форма временного распределения BRN	7.7%
Предсказание на поток нейтрино	10%	Форма спектра BRN	5.2%
Другие источники систематики	1%	Другие источники систематики	<1%
Итоговая ошибка	12.0%	Итоговая ошибка	12.8%

# Нестандартные взаимодействия (NSI)

• Добавление члена

 $\mathcal{L}_{\text{NSI}} = -2\sqrt{2}G_F \sum_{f,P,\alpha,\beta} \epsilon^{f,P}_{\alpha\beta} (\bar{\nu}_{\alpha}\gamma^{\mu}P_L\nu_{\beta}) (\bar{f}\gamma_{\mu}Pf)$ 

к Лагранжиану СМ

- Приводит к изменению слабого заряда
- NSI проявляется как отклонение скорости счета УКРН от предсказанного СМ значения



J. Barranco et al. , Phys. Rev. D 76 (2007) J. Billard, J. Johnston, B. Kavanagh, arXiv:1805.01798

# NSI pre-COHERENT



**Figure 4**. Dependence of the  $\Delta \chi^2_{\text{OSC+SCAT}}$  on the NSI parameters  $\epsilon^{q,V}_{\alpha\beta}$  for q = u (upper panels) and q = d (lower panels), for both LMA (solid) and LMA-D (dashed) regions from the combined analysis of global oscillation and CHARM + NuTeV scattering data. These results correspond to the current limits assuming heavy NSI mediators.

P. Coloma, P. B. Denton, M. C. Gonzalez-Garcia, M. Maltoni, and T. Schwetz. J. High Energ. Phys. 2017 116 (2017). ISSN 1029-8479.

#### Neutrino Magnetic Moment



J. Billard, J. Johnston, B. Kavanagh, arXiv:1805.01798

#### Nitrogen Contamination



arXiv:0804.1217[nucl-ex]

#### Результаты Engineering run

- Результаты likelihood анализа
  - Ограничения на сечение УКРН
  - Ограничения на нестандартные взаимодействия





# LAr Quenching Factor

- Simultaneous fit to all data sets using linear model to describe quenching factor with resulting  $\chi^2/ndf \sim 4$ 
  - Include 50% correlated errors on microCLEAN points as stated in Phys. Rev. C 85, 065811 (2012)
  - Scale error band by sqrt(χ<sup>2</sup>/ndf) ~ 2 to force χ<sup>2</sup>/ndf = linear fit as prescribed by Particle Data Group
- 2% average relative uncertainty on quenching factor value in region of interest (ROI)
  - Resulting 1% effect on CEvNS rate



#### Quenching Factor Investigations

- Examined effect of excursions on QF curve
  - Force QF result <20 keVnr through only Creus/microCLEAN data points
    - 12% increase in predicted CEvNS rate from this excursion
      - Well within statistical error on result
  - 1% decrease in predicted CEvNS rate if fit <20 keVnr forced through ARIS/SCENE data



#### SciBath Measurement of Prompt Beam-Related Neutrons



# Detector Response Stability

- <sup>57</sup>Co calibrations performed ~weekly
- <sup>83m</sup>Kr runs
- <sup>241</sup>Am runs
- Detector response stable for all three sources over time



# Fake Data Studies

- Validated 3D likelihood fit machinery using fake datasets
  - Generate predictions based on central value PDFs and predictions
    - Fit with central value PDFs
    - Check fit machinery
- Determine systematics and predicted null rejection significance
  - Generate fake dataset with alternate (systematic) PDFs
  - Fit with central value PDFs
- Errors on beam-related neutrons, beamunrelated background used as gaussian constraints on normalization
  - CEvNS normalization unconstrained

Fake Data fits with central value PDFs



#### pectra and Comparison with Null Hypothesis



Top Left: Prompt+delayed region, beam unrelated background subtracted projections of 3D likelihood fit

Bands are systematic errors calculated from 1 sigma excursions

Bottom Left: Same as above, null hypothesis fit (CEvNS = 0)

- Presence of CEvNS fits data well
- Recoil energy distribution results in poor fit without CEvNS

# Single-Bin Result: US

- Waveform/event cuts
- More strict cuts in energy, F90, time than US likelihood analysis
  - Delayed region (1.4-4.9  $\mu$ s after trigger)
  - 0-40 keVee energy range
    - CEvNS signal region
  - Signal/background optimized F90 cut



#### Beam excess vs time in delayed window

# Single-Bin Result: Moscow

- Moscow analysis pipeline shows consistent results
  - Waveform/event cuts
  - Delayed region
  - 4-30 keVee energy range
  - Signal/background optimized F90 cut

Strobe Subtracted Data Fotal MC Prediction 10 elaved BRN Predictio Residual Counts/0.185  $\mu$ s elayed CEvNS Predictio -10 5 3 3.5 Time to Trigger (µs) 4.5 1.5 2.5 5 2 4

Beam excess vs time in delayed window

Counting Experiment Results, Delayed Window 4-30 keVee		
Measured Excess Events	$35 \pm 19$	
Predicted Excess Events (CEvNS+BRN)	35	

#### Efficiency Curves



#### Likelihood Results, Normalized to SM Predicted Rate



# Дальнейшие планы

# Дальнейшая работа с CENNS-10

- CENNS-10 продолжает набирать данные
  - Уже набрано >3 ГВт\*ч данных с дополнительной защитой от нейтронов
  - Для анализа необходимо дополнительное моделирование нейтронов
  - Планируется набирать статистику до достижения уровня значимости > 5 σ
- Возможная модернизация CENNS-10
  - Подземный аргон
  - Дополнительная нейтронная защита
  - Установка CENNS-10 на место CsI[Na] (больше поток нейтрино, меньше нейтронный фон)
- Возможно использовать для проведения разработок для детектора CENNS-750: добавка Хе, изучение других фотодетекторов и спектросместителей



# Что дальше?

#### **CENNS-750**

- На основании нашего опыта с CENNS-10
- Однофазный LAr детектор, 750/610 кг всего/FV
- Регистрация света:
  - TPB (?)
  - Добавка Хе (?)
  - Фотодетекторы 3" ФЭУ/SiPM
- Возможное использование подземного аргона (низкий уровень содержания <sup>39</sup>Ar)
- → 3000 УКРН, 440 неупругих СС/NC в год!





# Что дальше?

- Предварительное моделирование
- ~3000 УКРН событий/год
- ~440 неупругих СС/NC событий/год





# Темная материя и CENNS-750

- CENNS-750 может установить предел на производимую ускорителем легкую темную материю
- Образуется из распадов π<sup>0</sup> в темную материю
- Взаимодействие аналогично УКРН
- В этом случае УКРН является фоном

SNS proton beam

Hg

Target

• Также необходимо дальнейшее изучение BRN фона



COHERENT detector

Nuclear Recoil

Signature/

# Дальнейшие планы COHERENT

- 16 кг HPGe детектор для регистрации УКРН
- Детектор Nal[Tl] с массой рабочего вещества порядка тонны для регистрации УКРН
- Детектор D<sub>2</sub>O с массой рабочего вещества порядка тонны для уменьшения неопределенности потока нейтрино

