



Применение
детектора
Борексина
для поиска
частиц
темной
материи,
ускоренной
космически-
ми
лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик

Применение детектора Борексина для поиска частиц темной материи, ускоренной космическими лучами

Выполнил: ст. гр. М19-115: Нугманов Радик

НИЯУ "МИФИ", НИЦ "Курчатовский Институт"
Научный руководитель: к. ф.-м. н., нач. лаб. НИЦ "КИ":
Литвинович Евгений Александрович

30 июня 2021 г.



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Введение

Применение детектора Борексина для поиска частиц темной материи, ускоренной космическими лучами

ст. гр. М19-115
Нугманов Радик

Предложено большое число возможных объяснений ТМ:

- Аксион и аксионоподобные частицы
- Первичные черные дыры
- Модифицированные теории гравитации
- Массивные слабо взаимодействующие частицы (WIMP)



Рис.: Варианты объяснения темной материи

Частицы тёмной материи, ускоренные в космических лучах

Применение детектора Борексино для поиска частиц темной материи, ускоренной космическими лучами

ст. гр. М19-115 Нугманов Радик

T. Bringmann and M. Pospelov. Novel direct detection constraints on light dark matter. *Phys. Rev. Lett.* 122, 171801 (2019)

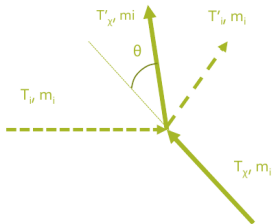


Рис.: Рассеяние частиц тёмной материи (сплошная линия) космическими лучами (пунктирная линия)

ТМКЛ - это вторичная компонента общего потока частиц ТМ с релятивистским импульсом, полученная путём рассеяния высокоэнергетических космических лучей на частицах холодной ТМ в гало Млечного пути

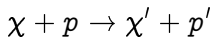
$$T'_x{}^{max} = \frac{T_i^2 + 2m_i T_i}{T_i + (m_i + m_\chi)^2 / (2m_\chi)}$$

$$T'_x = T_x^{max} \frac{1 - \cos\theta}{2},$$

Метод поиска ТМКЛ

Применение детектора Борексина для поиска частиц темной материи, ускоренной космическими лучами

Метод поиска ТМКЛ: рассеяние на протонах сцинтиллятора



Массы сверху вниз:

- 1 МэВ
- 10 МэВ
- 100 МэВ
- 1 ГэВ
- 10 ГэВ

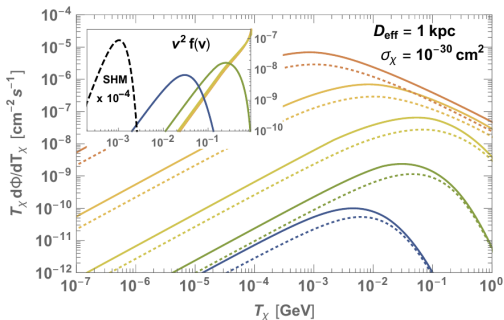


Рис.: Ожидаемый поток ТМКЛ для различных масс частиц ТМ.

Ожидаемый поток ТМКЛ очень мал. Даже для частиц χ с массой 1 МэВ, поток $10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Детектор Борексино

Применение детектора Борексино для поиска частиц темной материи, ускоренной космическими лучами

ст. гр. М19-115 Нугманов Радик

Детектор предназначен для изучения Солнца по потоку нейтрино. Обладает беспрецедентной степенью радиохимической чистоты сцинтиллятора и конструкционных материалов.

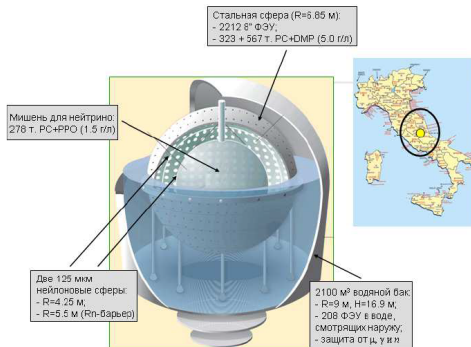


Рис.: Схема детектора Борексино

В составе Борексино работает Курчатовский Электронно Измерительный Комплекс (КЭИК)

Квенчинг эффект

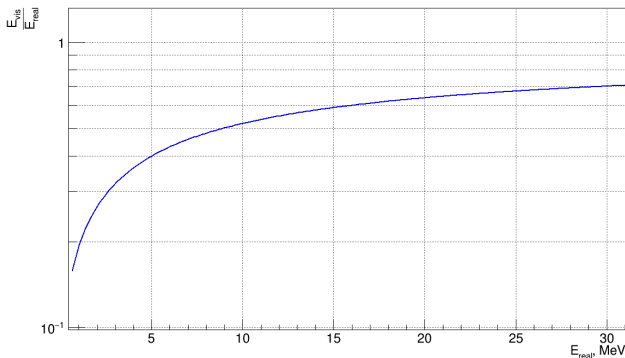
Применение
детектора
Борексина
для поиска
частиц
темной
материи,
ускоренной
космически-
ми
лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик

Жидкий сцинтиллятор выделяет разное количество света в зависимости от типа попавшей в него частицы.

Так как в анализе регистрировались протоны отдачи, то видимая энергия в детекторе будет заметно меньше их реальной энергии.

Quenching effect of protons in Borexino



Анализ чувствительности к ТМКЛ

Применение детектора Борексина для поиска частиц темной материи, ускоренной космическими лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик

Полученная область чувствительности рекордная в диапазоне масс χ [0.01; 0.1] GeV

$$\sigma_{\chi}^{SDlim} = \Gamma_p^{DM} \left(\frac{m_{\chi} + m_N}{m_{\chi} + m_p} \right)^2 \times \left(\int_{T_1}^{T_2} dT_p \int_{T_{\chi}}^{\infty} \frac{dT_{\chi}}{T_{max}} \frac{d\Phi_{chi}(m_{\chi})}{dT_{\chi}} \right)^{-1}$$

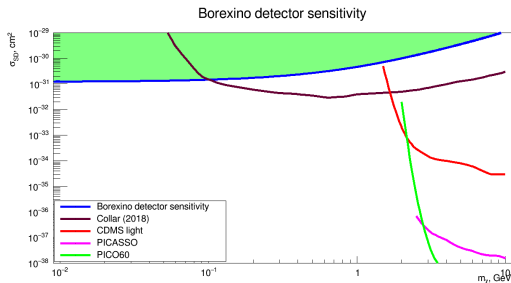


Рис.: Чувствительность к спин-зависимой части сечения ТМКЛ детектора Борексина



Источники фона

Применение
детектора
Борексино
для поиска
частиц
темной
материи,
ускоренной
космически-
ми
лучами

- Космические мюоны
- Быстрые нейтроны
- Собственный фон детектора
- Атмосферные нейтрино

ст. гр.
M19-115
Нугманов
Радик



Источники фона

Применение детектора Борексина для поиска частиц темной материи, ускоренной космическими лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик

<p>Космические мюоны и космогенные радионуклиды</p> <hr/> $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ <p>Борексино регистрирует $4300 \frac{\mu}{\text{сут.}}$</p>	<p>Собственный фон детектора</p> <hr/> <p>Присутствие в конструкционных материалах и сцинтилляторе таких элементов, как ^{14}C, ^{232}Th, ^{238}U и др.</p>	<p>Атмосферные нейтрино</p> <hr/> <p>Рассеяние атмосферных нейтрино на протонах сцинтиллятора. Они вносят неустраняемый вклад в регистрируемые события.</p>
---	---	---

Быстрые нейтроны

Применение детектора Борексина для поиска частиц темной материи, ускоренной космическими лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик

Это космогенные нейтроны, проникшие в центр детектора. Данные получены методом Монте-Карло моделирования.

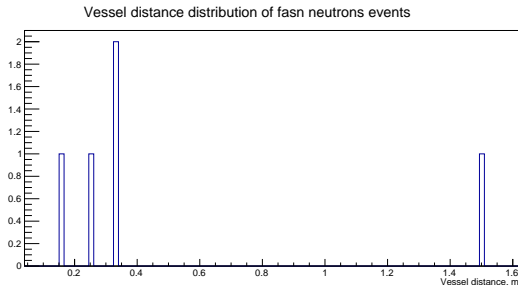


Рис.: Распределение событий по расстоянию от стенки внутренней нейлоновой сферы

Данное распределение позволяет уточнить границы чувствительного объема детектора

Метод разделения событий по форме импульса (метод Гатти)

Применение детектора Борексина для поиска частиц темной материи, ускоренной космическими лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик

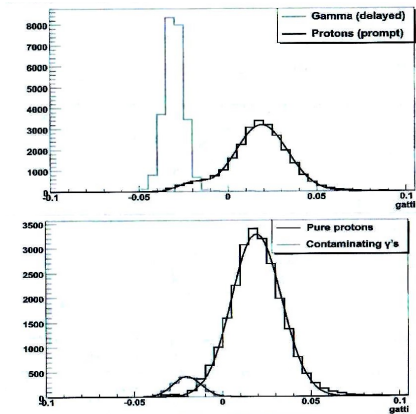
Борексина регистрирует разные типы событий:

- электроны отдачи
- протоны отдачи
- α -частицы

Эти события имеют разную форму импульса. Идентификация их основана на знании средней формы импульсов разделяемых сигналов (метод Гатти).

$$P(0)_\gamma = 0.19\%$$

$$P(0)_{\text{protons}} = 88.81\%$$



Графики калибровок Am-Be



Критерии отбора событий

Применение детектора Борексина для поиска частиц темной материи, ускоренной космическими лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик

- Рассматриваются только такие события, которые зарегистрированы обеими системами сбора данных Борексина (LABEN и FADC)
- $t_{internal} > 2$ с, где $t_{internal}$ – время, прошедшее после попадания мюона в чувствительную часть детектора;
- $t_{external} > 2$ мс, где $t_{external}$ – время, прошедшее после попадания мюона в буферную часть детектора;
- $E_{event} > 2.0$ МэВ, где E_{event} – это видимая энергия события;
- $G > 0.02$, где G – значение параметра Гатти, рассчитанного для данного события;
- Событие имеет один кластер;
- Событие произошло в чувствительном объеме детектора.
- Оно не является шумом электроники;
- Тип триггера данного события равен 1;
- Условие одиночности события, т.е. до и после события в течение 2 мс не должно быть ни одного другого события;

Применение
детектора
Борексина
для поиска
частиц
темной
материи,
ускоренной
космически-
ми
лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик

- Время набора данных: с января 2010 по сентябрь 2019
- Живое время: **2070** дней

Energy distribution of selected events

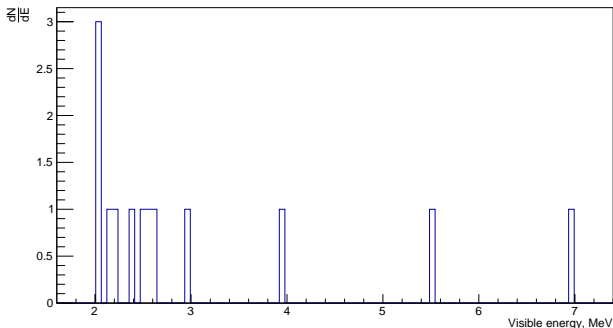


Рис.: Спектр отобранных событий

Всего отобрано 13 событий кандидатов

Применение
детектора
Борексина
для поиска
частиц
темной
материи,
ускоренной
космически-
ми
лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик

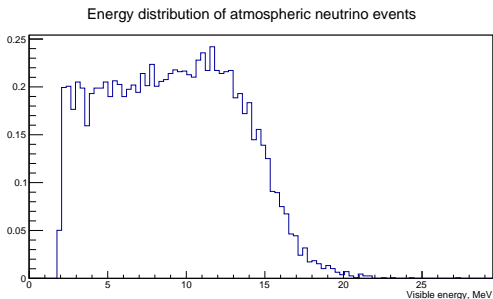


Рис.: Энергетическое распределение протонов одачи от атмосферных нейтрино. Получен методом Монте-Карло

На основе анализа смоделированных данных (статистика соответствует 5.7 лет сбора данных детектором) для скорости счёта событий от атмосферных нейтрино получено: $(10 \pm 5) \frac{\text{событий}}{5.7 \text{ лет}}$

Расчёт верхнего ограничения на поток

Применение
детектора
Борексина
для поиска
частиц
темной
материи,
ускоренной
космически-
ми
лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик

Верхние ограничения получены исходя из формулы:

$$\Phi(T_p) = \frac{N_{90}(\Delta E_p, n_{obs}, n_{bkg})}{\epsilon N_p \sigma(m_\chi) \Delta T}$$

Где:

- N_{90} - 90% У.Д. верхний предел количества событий рассеяния ТМКЛ на протоне в диапазоне энергий ΔE_p , полученный методом Фельдмана-Каузинса
- $\epsilon = 1$ эффективность регистрации
- $N_p = 1.6 \cdot 10^{32}$ количество протонов мишеней
- ΔT - живое время сбора данных
- $\sigma(m_\chi)$ было взято из анализа чувствительности

Применение
детектора
Борексино
для поиска
частиц
темной
материи,
ускоренной
космически-
ми
лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик

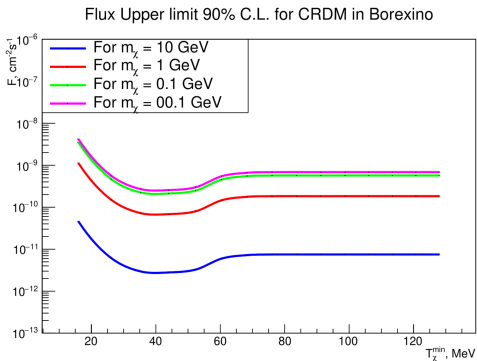


Рис.: Верхнее ограничение на поток ТМКЛ в зависимости от минимальной кинетической энергии ТМКЛ для различных масс χ .

Интегральное значение верхнего предела для различных масс χ

Результат, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	m_χ , ГэВ
$\Phi_{\text{ТМКЛ}} < 7.5 \cdot 10^{-12}$	10
$\Phi_{\text{ТМКЛ}} < 1.8 \cdot 10^{-10}$	1
$\Phi_{\text{ТМКЛ}} < 5.7 \cdot 10^{-10}$	0.1
$\Phi_{\text{ТМКЛ}} < 7.5 \cdot 10^{-10}$	0.01

Это первое экспериментальное ограничение на поток ТМКЛ в Борексина.

Заключение

Применение детектора Борексина для поиска частиц темной материи, ускоренной космическими лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик

- Проведена оценка чувствительности детектора Борексина к регистрации ТМКЛ. Результатом её стало указание к поиску ТМКЛ в области параметров, указанной на рисунке 5
- Проведен анализ фонового вклада. Были подробно рассмотрен вклад от атмосферных нейтрино и быстрых космогенных нейтронов. Результатом стали уточненные условия отбора событий рассеяния на протоне.
- На основании полученной ранее оценки чувствительности был произведён поиск таких событий в детекторе Борексина. Статистически значимого превышения над фоновым значением не обнаружено.
- Получен верхний предел на поток ТМКЛ в детекторе Борексина



Спасибо за внимание

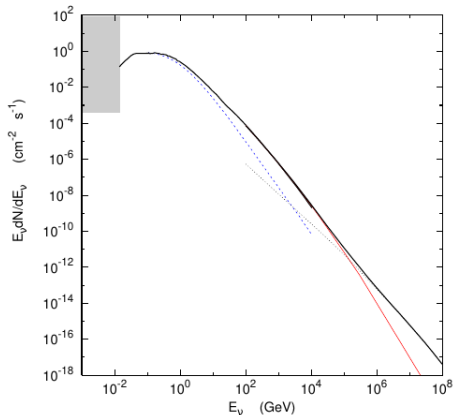
Применение
детектора
Борексина
для поиска
частиц
темной
материи,
ускоренной
космически-
ми
лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик



Применение
детектора
Борексина
для поиска
частиц
темной
материи,
ускоренной
космически-
ми
лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик

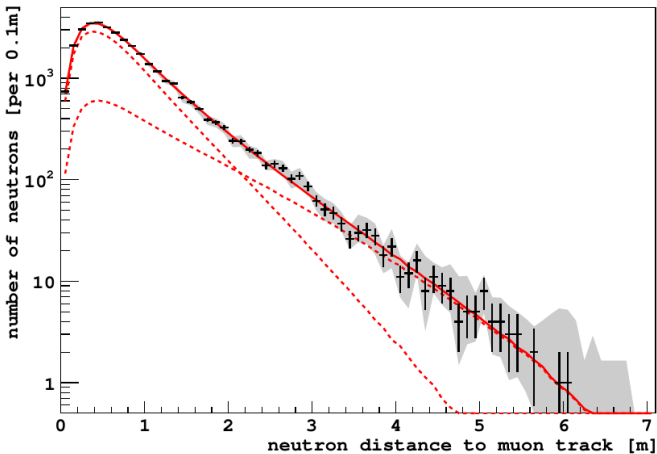


Поток атмосферных нейтрино, измеренный
экспериментально

Запасные слайды

Применение
 детектора
 Борексино
 для поиска
 частиц
 темной
 материи,
 ускоренной
 космически-
 ми
 лучами

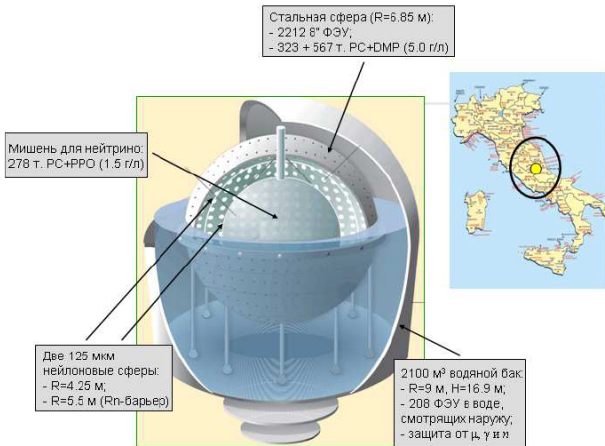
ст. гр.
 М19-115
 Нугманов
 Радик



Запасные слайды

Применение
детектора
Борексина
для поиска
частиц
темной
материи,
ускоренной
космически-
ми
лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик





Запасные слайды

Применение
детектора
Борексина
для поиска
частиц
темной
материи,
ускоренной
космически-
ми
лучами

ст. гр.
М19-115
Нугманов
Радик

$$N_{ph} = Y_{scint} \times E \times Q(E)$$

$$Q(E) = \frac{1}{E} \int_0^E \frac{dE'}{1 + kB \frac{dE}{dx}(E')}$$

$$N_{pe} = Y_{det} \times E \times Q(E)$$