



Поиск  
ТМКЛ в  
Борексино

Нугманов  
Радик

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

ст. гр. М19-115: Нугманов Радик

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

1 июня 2021 г.

# Частицы тёмной материи, ускоренные в космических лучах

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

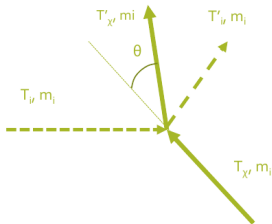


Рис.: Рассеяние частиц тёмной материи (сплошная линия) космическими лучами (пунктирная линия)

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

$$T_\chi^{max} = \frac{T_i^2 + 2m_i T_i}{T_i + (m_i + m_\chi)^2 / (2m_\chi)}$$

$$T'_\chi = T_\chi^{max} \frac{1 - \cos\theta}{2},$$

# Метод поиска ТМКЛ

Поиск  
ТМКЛ в  
Борексине

Нугманов  
Радик

Метод поиска  
ТМКЛ: рассеяния на протонах  
сцинтиллятора

Массы сверху  
вниз:

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

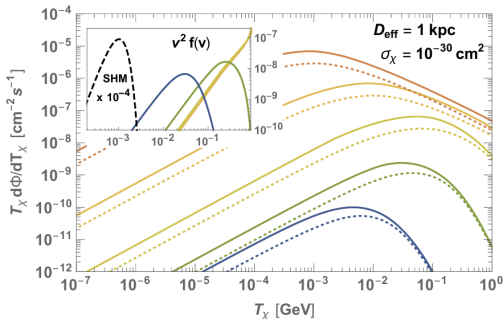


Рис.: Ожидаемый поток ТМКЛ для различных масс частиц ТМ.

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

# Детектор Борексино

Поиск  
ТМКЛ в  
Борексино

Нугманов  
Радик

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

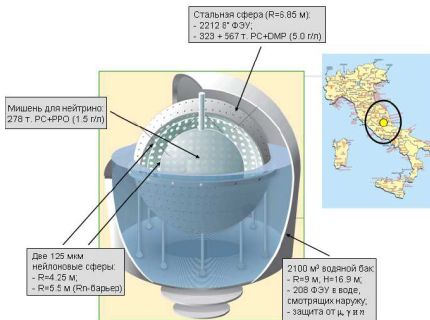


Рис.: Схема детектора Борексино

В составе Борексино работает Курчатовский Электронно Измерительный Комплекс (КЭИК)

# Анализ чувствительности к ТМКЛ

Поиск  
ТМКЛ в  
Борексине

Нугманов  
Радик

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

Полученная  
область чув-  
ствительности  
рекордная  
в диапа-  
зоне масс  $\chi$   
[0.01; 0.1] GeV

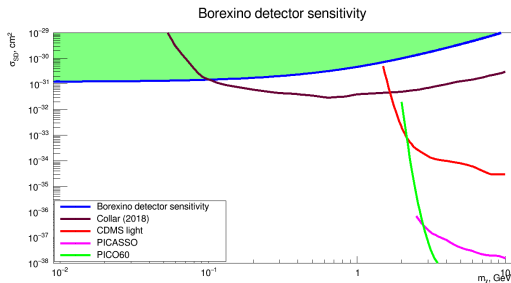


Рис.: Чувствительность к спин-зависимой части сечения ТМКЛ детектора Борексина



# Источники фона

Поиск  
ТМКЛ в  
Борексино

Нугманов  
Радик

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

# Быстрые нейтроны

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

Vessel distance distribution of fast neutrons events

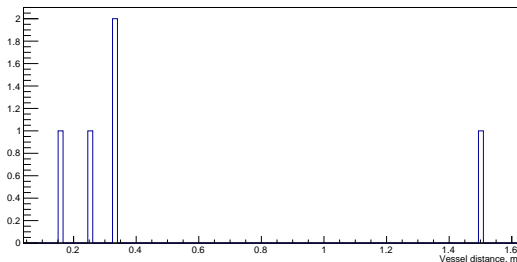


Рис.: Распределение событий по расстоянию от стенки внутренней нейлоновой сферы

Данное распределение позволяет уточнить границы чувствительного объёма детектора

## Критерии отбора событий

Поиск  
ТМКЛ в  
Борексино

Нугманов  
Радик

- Рассматриваются только такие события, которые зарегистрированы обеими системами сбора данных Борексино (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;



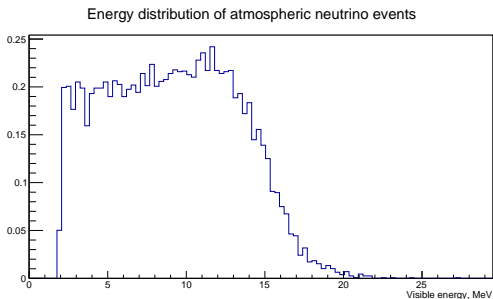


Рис.: Энергетическое распределение протонов одачи от атмосферных нейтрино. Получен методом Монте-Карло

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

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

Energy distribution of selected events

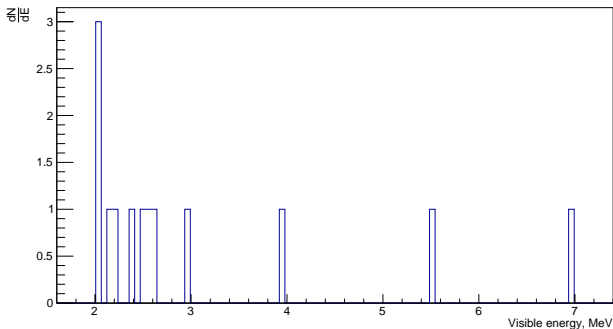


Рис.: Спектр отобранных событий

Всего отобрано 13 событий кандидатов

## Расчёт верхнего предела

Поиск  
ТМКЛ в  
Борексино

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  $\Delta E_p$ , полученный методом Фельдмана-Каузинса
- $\epsilon = 1$  эффективность регистрации
- $N_p = 1.6 \cdot 10^{32}$  количество протонов мишеней
- $\Delta T$  - живое время сбора данных
- $\sigma(m_\chi)$  было взято из анализа чувствительности

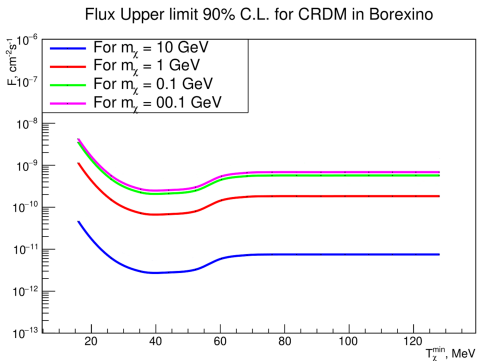


Рис.: Верхнее ограничение на поток ТМКЛ в зависимости от минимальной кинетической энергии ТМКЛ для различных масс  $\chi$ .

Интегральное значение верхнего предела для различных масс  $\chi$

Результат, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	$m_\chi$ , 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 Борексине.



## Заключение

Поиск  
ТМКЛ в  
Борексино

Нугманов  
Радик

- Проведена оценка чувствительности детектора Борексино к регистрации ТМКЛ. Результатом её стало указание к поиску ТМКЛ в области параметров, указанной на рисунке 4
- 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 Борексино. Статистически значимого превышения над фоновым значением не обнаружено.
- Получен верхний предел на поток ТМКЛ в детекторе Борексино

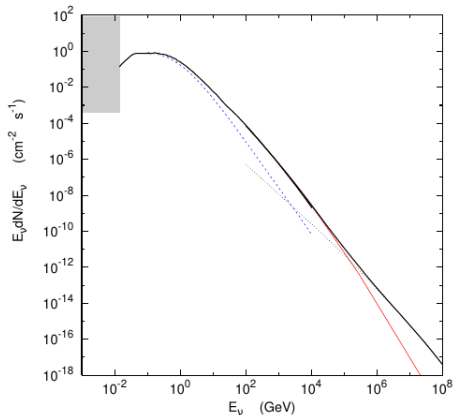


# Спасибо за внимание

Поиск  
ТМКЛ в  
Борексине

Нугманов  
Радик



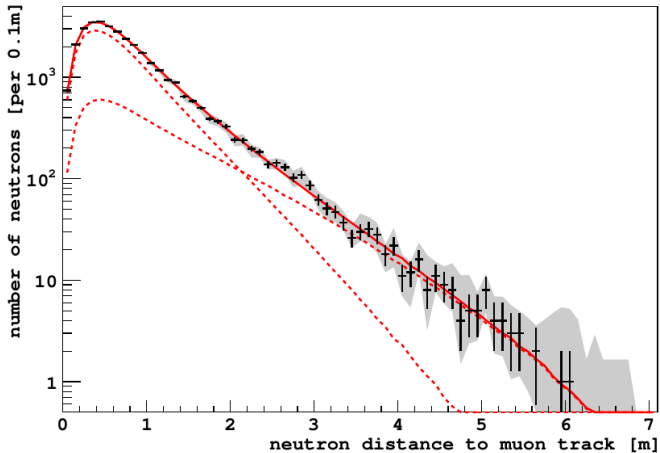


Поток атмосферных нейтрино, измеренный экспериментально



Поиск  
ТМКЛ в  
Борексине

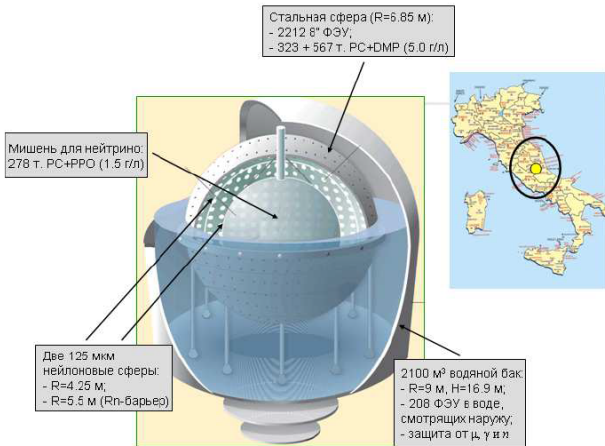
Нугманов  
Радик



# Запасные слайды

Поиск  
ТМКЛ в  
Борексико

Нугманов  
Радик



# Запасные слайды

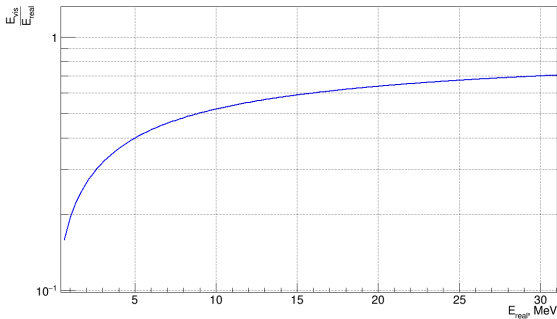
Поиск  
ТМКЛ в  
Борексино

Нугманов  
Радик

Жидкий сцинтиллятор обладает свойством выделять 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





## Запасные слайды

Поиск  
ТМКЛ в  
Борексино

Нугманов  
Радик

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

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

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

# Метод разделения событий по форме импульса (метод Гатти)

Борексина регистрирует разные типы событий:

- электроны отдачи
- протоны отдачи
- $\alpha$ -частицы

Эти события имеют разную форму импульса. Идентификация их основана на знании средней формы импульсов разделяемых сигналов (метод Гатти). Для настройки метода были проведены калибровки детектора источником быстрых нейтронов Am-Be.

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

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

