

Поиск тёмных бозонов детектором iDREAM на Калининской атомной станции

ВЫПОЛНИЛ: СТУДЕНТ ГРУППЫ Б19-102 КИСЕЛЕВ КИРИЛЛ
КЛАУДИОВИЧ

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: К.Ф.-М.Н. ЛИТВИНОВИЧ ЕВГЕНИЙ
АЛЕКСАНДРОВИЧ

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ: М.Н.С. НУГМАНОВ РАДИК РАФАЭЛЬЕВИЧ

Цель и задачи

Цель работы: исследовать чувствительность детектора iDREAM к тёмным бозонам.

Задачи:

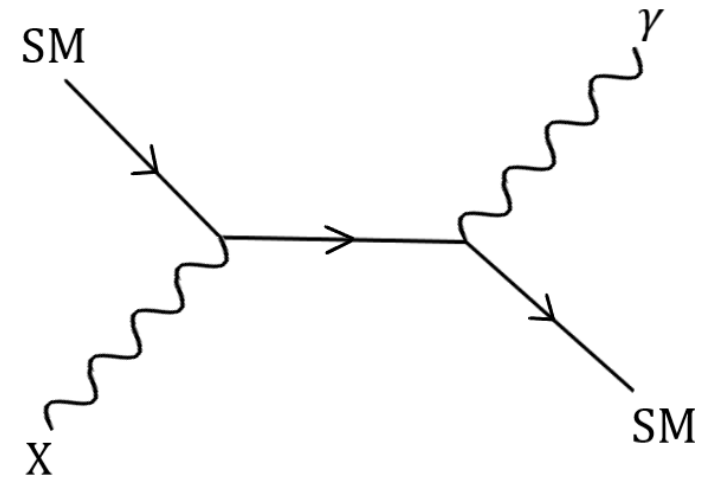
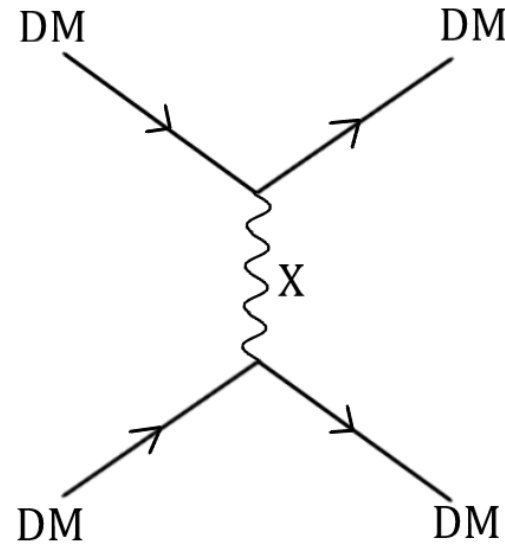
- Рассмотреть модель тёмных бозонов и рассчитать ожидаемый энергетический спектр событий для детектора iDREAM, предсказываемый этой моделью;
- Разработать критерии отбора и произвести отбор событий-кандидатов в данных iDREAM;
- Оценить вклад фона в измеряемую скорость счёта;
- Получить ограничения на физические параметры модели тёмных бозонов: масса тёмного бозона m_X , константа связи со Стандартной Моделью g_X .

Тёмные бозоны

Тёмные бозоны вводятся как переносчики взаимодействия между частицами скрытой массы в теориях, расширяющих Стандартную модель[1,2].

Рассматриваемые виды тёмных бозонов:

- векторные бозоны (тёмные фотоны, кинематически связанные с фотонами SM);
- псевдоскалярные бозоны (аксионоподобные частицы);
- скалярные бозоны (лёгкие бозоны Хиггса).



$$\mathcal{L} \supset -\frac{1}{4}X_{\mu\nu}X^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_X^2X^\mu X_\mu - g_X\bar{e}\gamma^\mu eX_\mu;$$

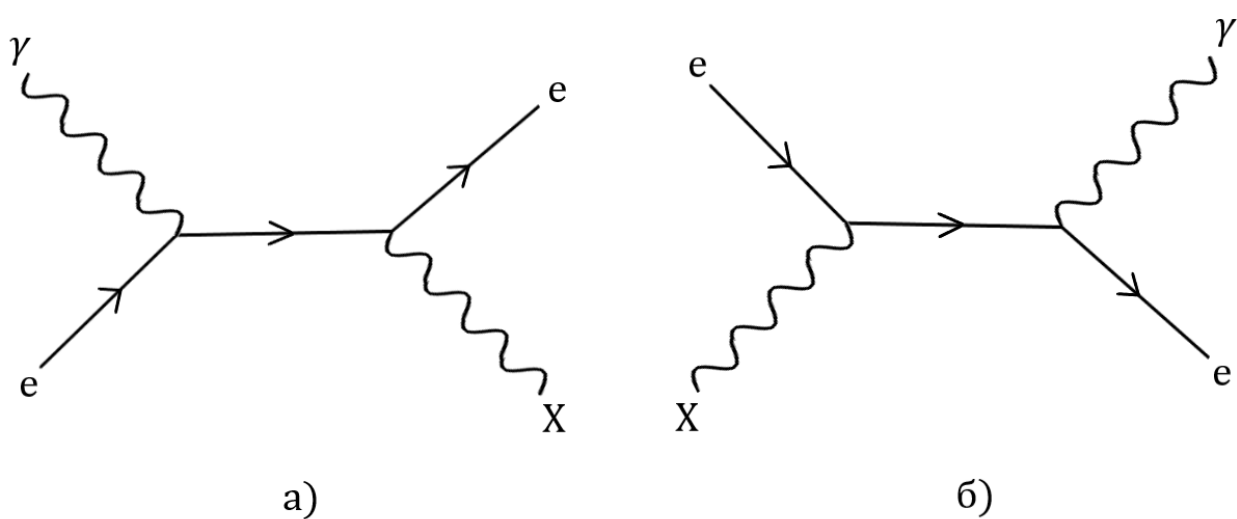
$$\mathcal{L} \supset \frac{1}{2}m_X^2X^2 - g_X\bar{e}\gamma^5 eX;$$

$$\mathcal{L} \supset \frac{1}{2}m_X^2X^2 - g_X\bar{e}eX$$

[1] H. K. Park, Detecting Dark Photons with Reactor Neutrino Experiments, 2017

[2] M. Smirnov et al., Light dark bosons in the JUNO-TAO neutrino detector, 2021

Образование тёмных бозонов и их детектирование

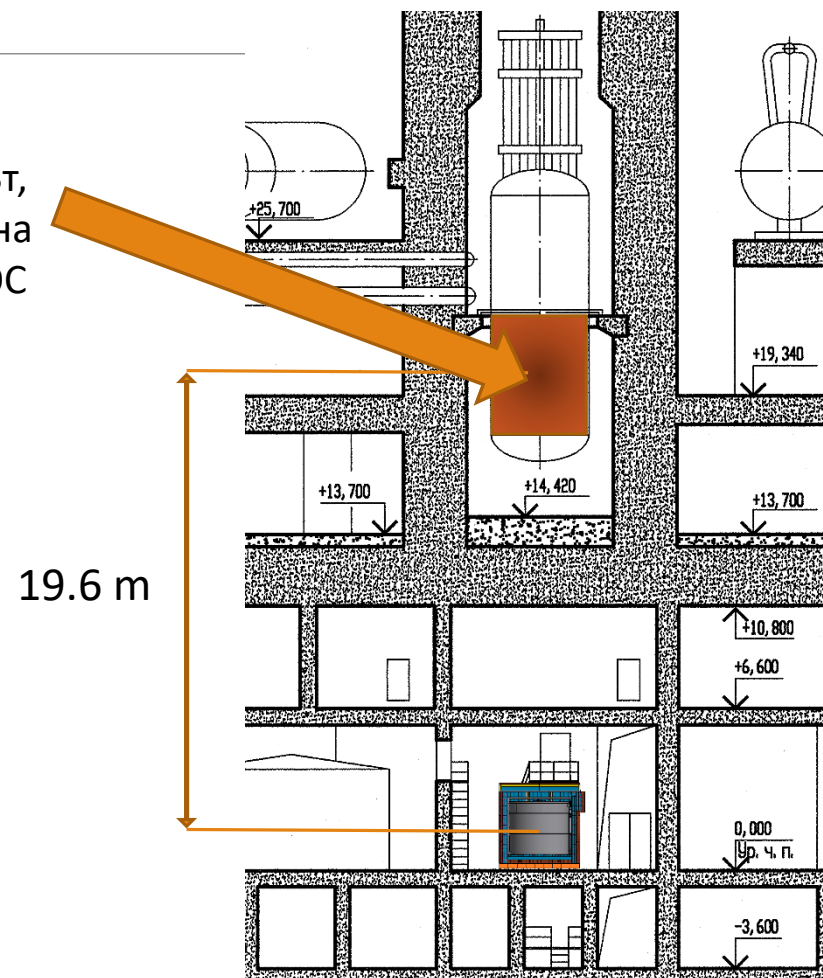


- Рождение гамма-квантов в ядерном реакторе (порядка 10^{20} фотонов/с): распад и деление ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , захват и неупругие рассеяния нейтронов, снятие возбуждения и распад дочерних ядер;
- Образование тёмного бозона в реакторе при рассеянии гамма-кванта на электроне вещества;
- Поглощение тёмного бозона в детекторе при рассеянии на электроне;
- Детектирование электрона отдачи и вторичного гамма-кванта

Детектор iDREAM

- Экспериментальный образец промышленного сцинтилляционного детектора для мониторинга реакторных антинейтрино
- Разработан и реализован в НИЦ «Курчатовский Институт» совместно с НИИЯФ МГУ имени Д. В. Скобельцына
- Сбор данных начался в 2021 году

ВВЭР-1000
мощностью 3 ГВт,
установленный на
Калининской АЭС



Расчёт энергетического спектра событий

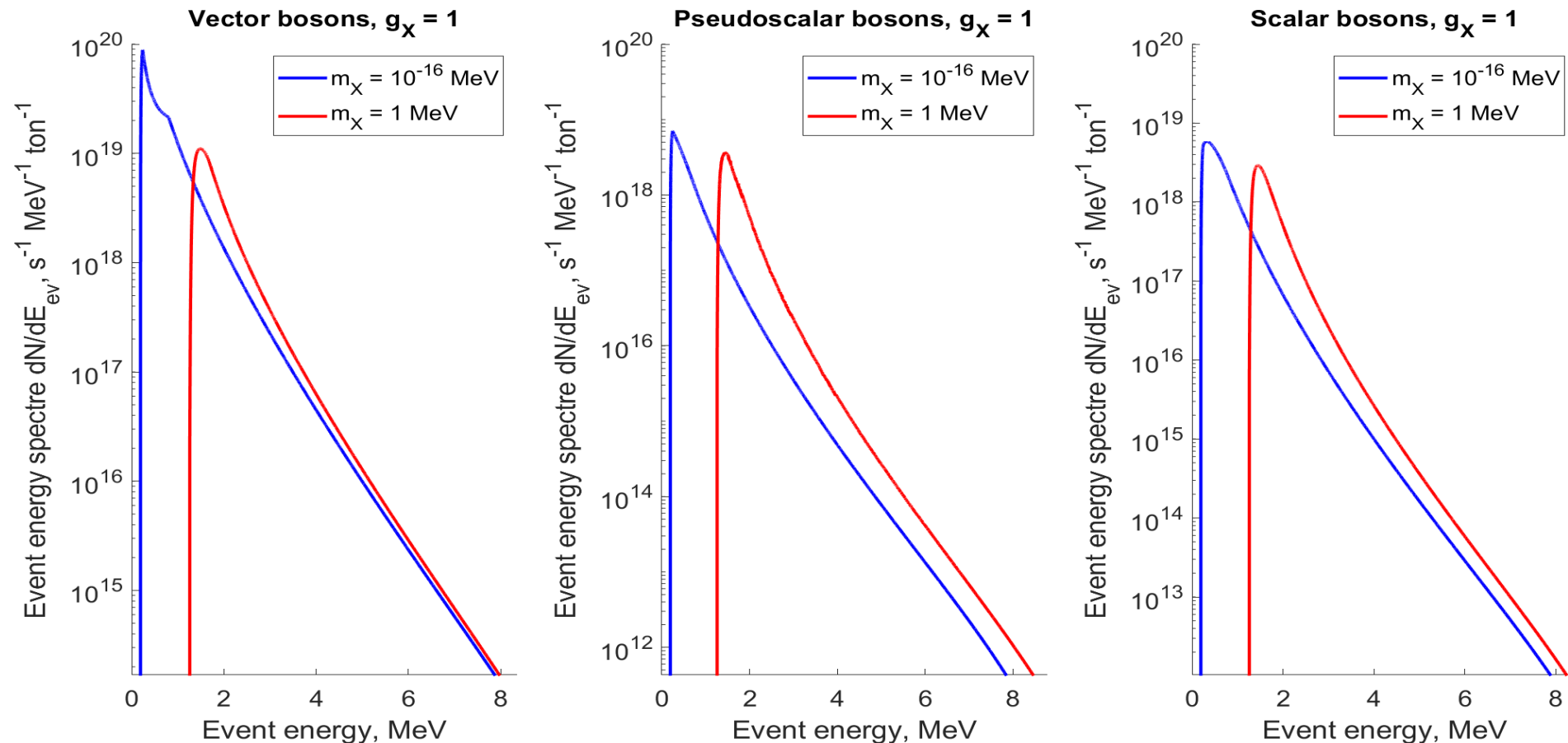
Энергетический спектр
тёмных бозонов,
образованных в активной
зоне реактора

$$\frac{dN}{dE_X} = \int \frac{1}{\sigma_{\text{tot}} + \sigma_{\gamma e \rightarrow Xe}} \frac{d\sigma_{\gamma e \rightarrow Xe}}{dE_X} \frac{dN}{dE_\gamma} dE_\gamma$$

Энергетический спектр
сигнальных событий

$$\frac{dN}{dE_{ev}} = \frac{N_e T}{4\pi R^2} \int \frac{d\sigma_{Xe \rightarrow \gamma' e}}{dE_{\gamma'}} \frac{dN}{dE_X} dE_{\gamma'}$$

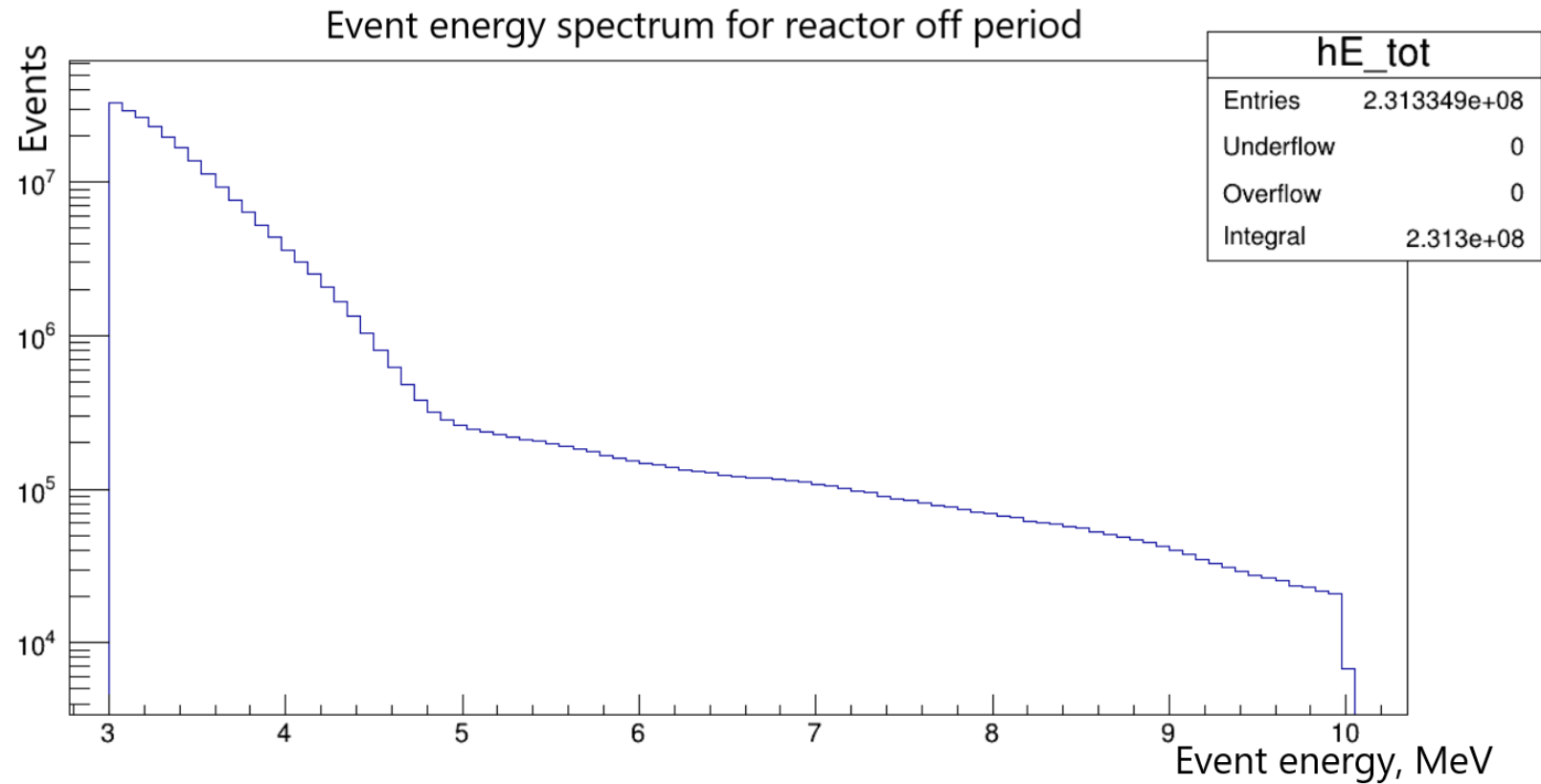
Ожидаемые энергетические спектры событий



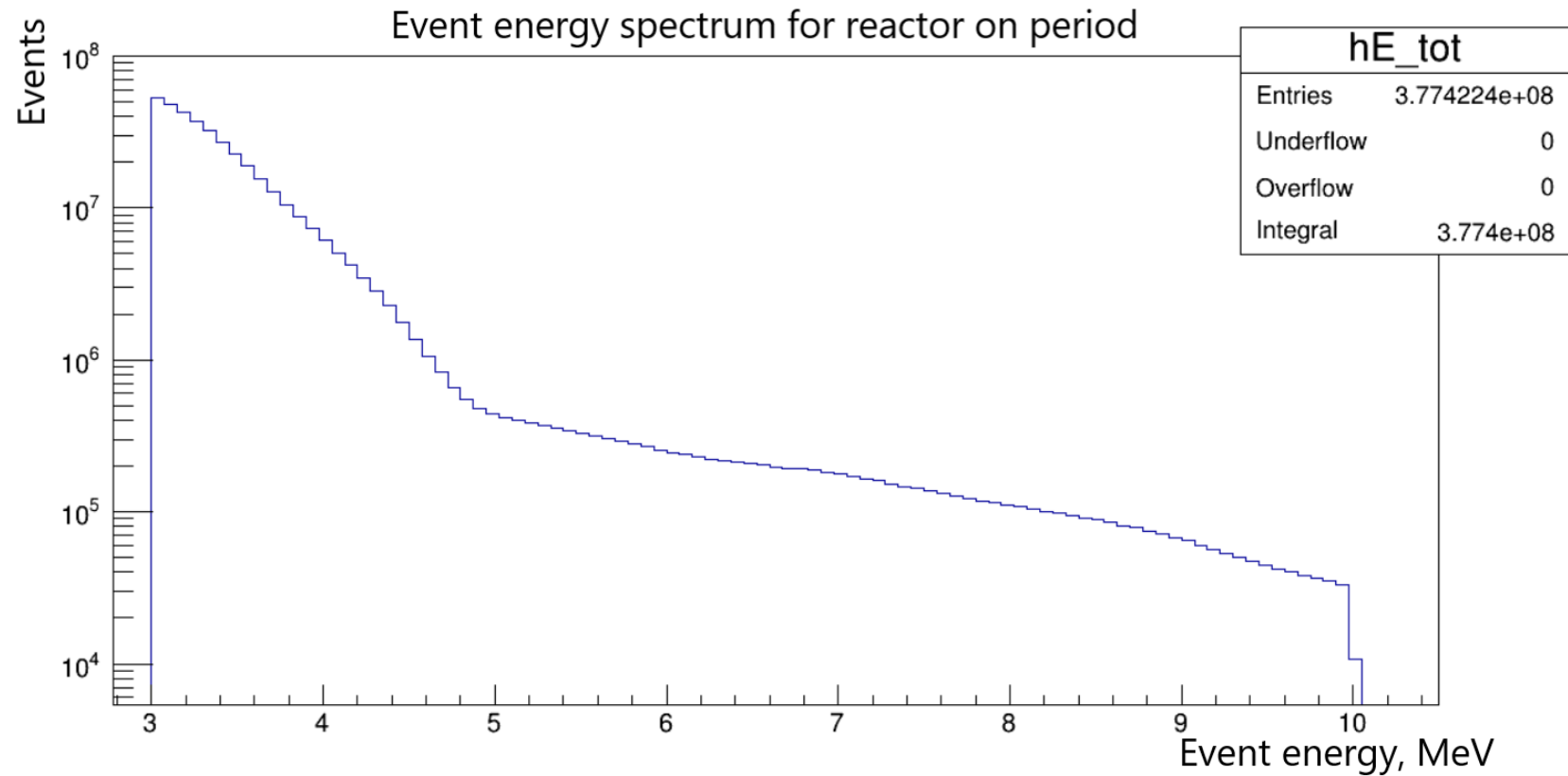
Отбор событий-кандидатов

- Мюонное вето: после регистрации мюона вводится мёртвое время 150 мкс;
- Отбор одиночных событий: во временном окне ± 100 мкс около события-кандидата нет других событий;
- Энергия событий-кандидатов: $E_{ev} \in [3; 10]$ МэВ.

Спектр одиночных событий iDREAM при выключенном реакторе



Спектр одиночных событий iDREAM при включенном реакторе



Получение ограничений

Статистическая модель: $N_{pred}(m_X, g_X, \theta_P, \theta_{bkg}) = N_s(m_X, g_X)(1 + \theta_P \sigma_P) + N_{bkg} \theta_{bkg} \sigma_{bkg}$

Функция правдоподобия: $L(m_X, g_X, \theta_P, \theta_{bkg}) = \frac{N_{pred}^{N_{obs}}}{N_{obs}} e^{-N_{pred}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta_P^2}{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta_{bkg}^2}{2}}$

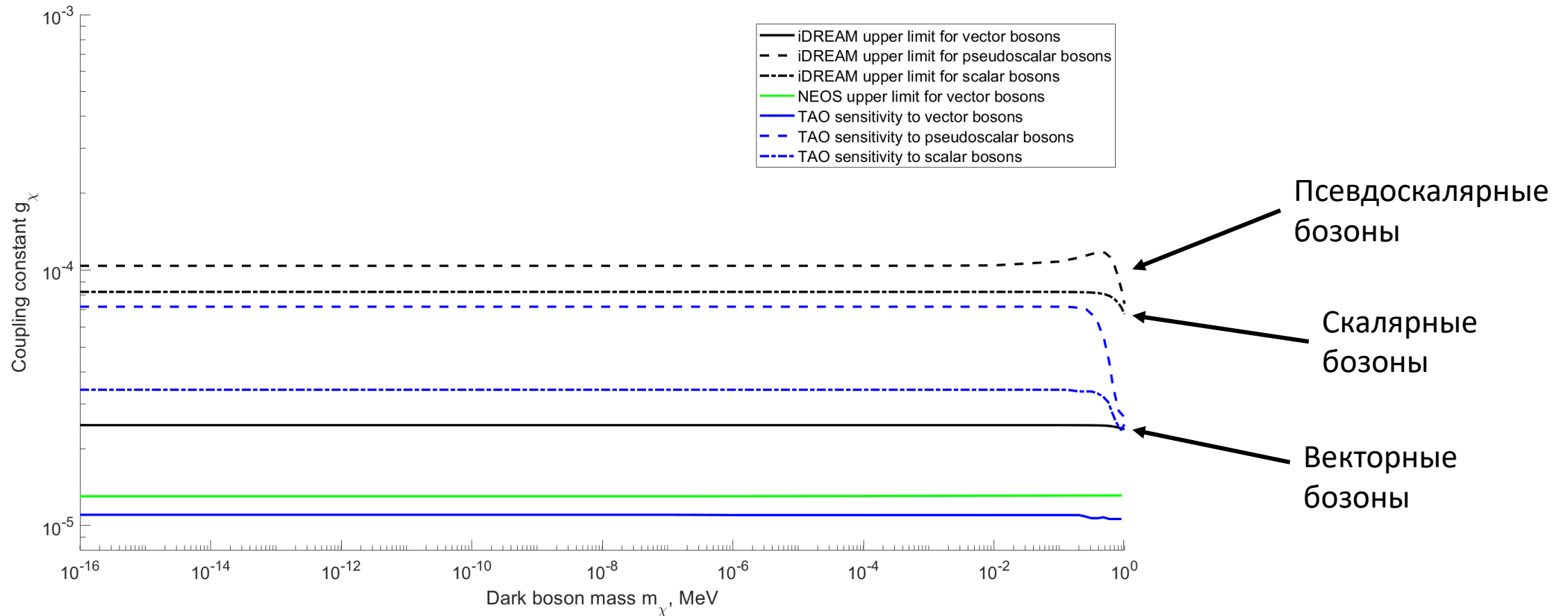
Тестовая статистика: $t_{m_X, g_X} = -2 \ln \left(\frac{L(m_X, g_X, \hat{\theta}_P, \hat{\theta}_{bkg})}{L_{max}} \right)$

Параметры модели: $\sigma_P = 2 \cdot 10^{-3}$ - относительная флуктуация мощности реактора, $\sigma_{bkg} = 1$ - относительная флуктуация числа фоновых событий, $N_{bkg} = 0.4 \cdot T$ - флуктуация числа событий при выключенном реакторе, N_s - ожидаемое среднее число сигнальных событий за живое время T , N_{obs} - разница между числом событий при включенном и при выключенном реакторе

Получение ограничений: $\Phi(\sqrt{t_{m_X, g_X}}) < \frac{1+\alpha}{2}$

Обозначения: $\Phi(x)$ - функция распределения вероятности для стандартного распределения, $\alpha = 0.95$ - доверительная вероятность

Пределы на параметры модели (С.Л. 95%)



Заключение

- Рассчитаны ожидаемые спектры событий от взаимодействия темных бозонов в детекторе iDREAM.
- Установлены ограничения на массу m_χ и константу взаимодействия g_χ со Стандартной Моделью для тёмных бозонов. Результаты iDREAM незначительно уступают результатам, полученным по данным детектора NEOS [1], и результатам, ожидаемым в JUNO TAO [2].

[1] H. K. Park, Detecting Dark Photons with Reactor Neutrino Experiments, 2017

[2] M. Smirnov et al., Light dark bosons in the JUNO-TAO neutrino detector, 2021