

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

УДК 539.123

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ПОИСК ТЁМНЫХ БОЗОНОВ
ДЕТЕКТОРОМ IDREAM НА
КАЛИНИНСКОЙ АТОМНОЙ СТАНЦИИ

Студент

_____ К. К. Киселев

Научный руководитель,

к.ф.-м.н.

_____ Е. А. Литвинович

Научный консультант,

старший научный сотрудник

_____ Р. Р. Нугманов

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Скрытая масса	3
Тёмные бозоны	4
Детектор iDREAM	6
1 Расчёт ожидаемого числа событий	7
1.1 Спектр рождённых тёмных бозонов	7
1.2 Ожидаемый в детекторе iDREAM энергетический спектр . .	8
2 Отбор событий	10
2.1 Критерии отбора	10
2.2 Методика отбора	10
2.3 Оценка фона	10
2.4 Оценка погрешностей	11
3 Получение ограничений	13
4 Заключение	15
Список использованных источников	16

ВВЕДЕНИЕ

СКРЫТАЯ МАССА

В астрофизике и космологии существует достаточное количество свидетельств существования материи, заметно взаимодействующей с обычным веществом только гравитационно, – скрытой массы [1]. К таким свидетельствам относятся:

- анизотропия реликтового излучения;
- гравитационное линзирование;
- кривые вращения галактик.

Хотя исходные предположения о свойствах скрытой массы были различными, по результатам моделирования эволюции Вселенной с учётом скрытой массы было выявлено, что преобладает холодная скрытая масса: её доля от критической плотности Вселенной составляет $\Omega_{CDM} = 26.4\%$ [1]. Такой тип скрытой массы характеризуется тем, что в момент выхода из температурного равновесия с барионным веществом, её частицы были нерелятивистскими.

Кандидаты на роль скрытой массы [1] (рисунок 1):

- МАСНО (massive astrophysical compact halo object);
- WIMP (weakly interacting massive particle)
- аксионы;
- тёмные фотоны;
- нейтрино;
- кандидаты из теорий суперсимметрии;
- экзотические кандидаты.

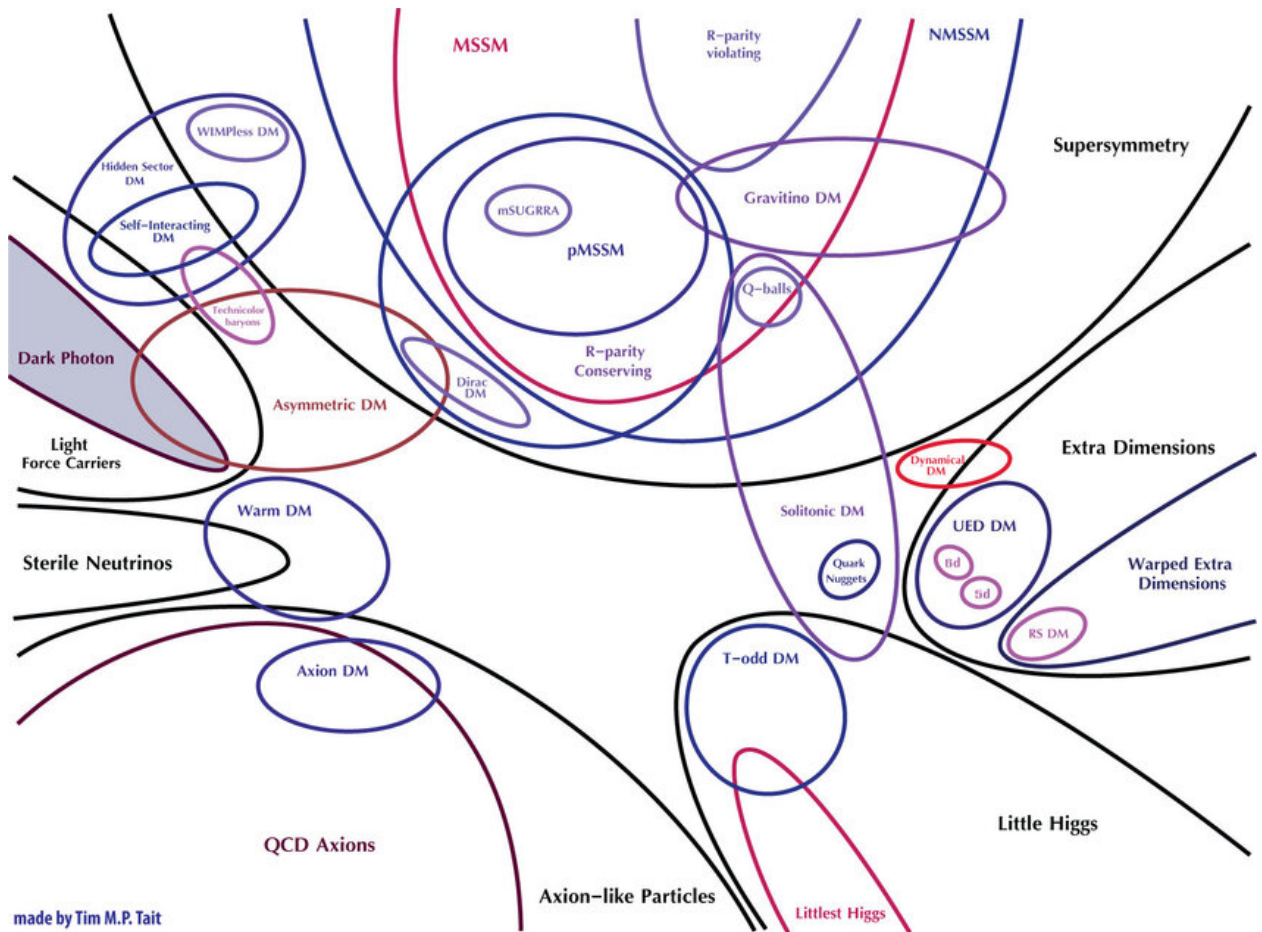


Рисунок 1 — Типы скрытой массы [2]

Основная проблема проверки гипотез, относящихся к физике частиц: наблюдение частиц скрытой массы затруднено в связи с малостью сечения их взаимодействия с барионной материей. Новые результаты эксперимента XENONnT исключают существование частиц типа WIMP на уровне сечения их взаимодействия с нуклонами $\sigma \sim 2,58 \cdot 10^{-47} \text{ см}^2$ (для частиц массой $M = 30 \text{ ГэВ}$) [3].

ТЁМНЫЕ БОЗОНЫ

Некоторые гипотезы предполагают существование не одного вида частиц скрытой массы, а многих. В простейшем случае рассматриваются частицы типа WIMP, взаимодействующие между собой посредством тёмного бозона – лёгкой массивной частицы [4]. Предполагается, что тёмные векторные бозоны кинетически связаны с фотонами Стандартной Модели и потому могут участвовать в процессах типа комптоновского рассеяния, наряду с взаимодействиями частиц скрытой массы (рисунок 2).

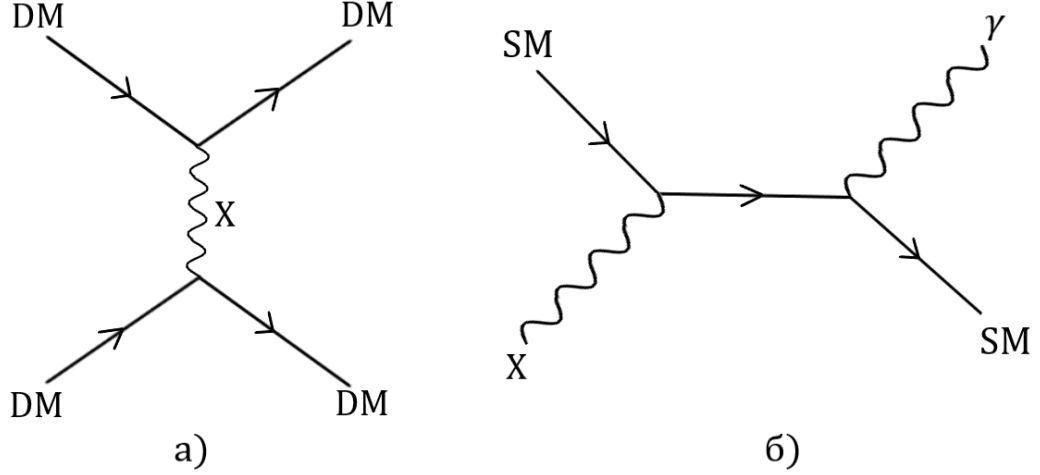


Рисунок 2 — Возможные каналы взаимодействия тёмных бозонов X : взаимодействия частиц скрытой массы посредством тёмного бозона (а), процесс типа комптон-эффекта на частице Стандартной Модели с поглощением тёмного бозона и излучением фотона

Рассматриваемые типы тёмных бозонов:

- векторный бозон (тёмные фотоны);
- псевдоскалярный бозон (аксионоподобные частицы);
- скалярный бозон (лёгкие бозоны Хиггса);

Соответствующие вклады тёмных бозонов в лагранжиан теории[5]:

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

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

$$\mathcal{L} \supset \frac{1}{2}m_X^2X^2 - g_X\bar{e}eX, \quad (3)$$

где X_μ, X – поля тёмных бозонов, $X_{\mu\nu} \equiv \partial_\mu X_\nu - \partial_\nu X_\mu$, m_X – масса тёмного бозона, g_X – константа связи тёмного бозона с фермионными токами Стандартной Модели.

Так как тёмные бозоны образуются при взаимодействии гамма-квантов с веществом, а ядерные реакторы являются сильным источником гамма-квантов, то предлагается искать события, вызванные тёмными бозонами с помощью экспериментов расположенных в непосредственной близости от активной зоны ядерного реактора (например эксперименты NEOS, TEXONO[6] и планируемый TAO[5]).

ДЕТЕКТОР IDREAM

Детектор iDREAM (industrial Detector of REactor Antineutinos for Monitoring) – экспериментальный образец промышленного детектора реакторных антинейтрино для мониторинга работы реакторов ядерных станций, разработанный и реализованный в НИЦ «Курчатовский Институт» совместно с НИИЯФ МГУ имени Д. В. Скобелевича [7].

Детектор представляет собой два концентрических бака из нержавеющей стали, накрытые общей герметичной крышкой (рисунок 3). Мембрана из оргстекла разделяет внутренний бак на две части. Верхняя часть заполнена линейным алкилбензолом (ЛАБ), а нижняя - гадолинизированным жидким органическим сцинтиллятором (ЖОС). Внутренний бак просматривается 16 фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) и является мишенью детектора. Внешний кольцевой бак заполнен ЖОС, просматривается 12 ФЭУ и выполняет роль активной защиты мишени детектора.

Сбор данных начался в 2021 году. В настоящее время детектор расположен на Калининской АЭС.

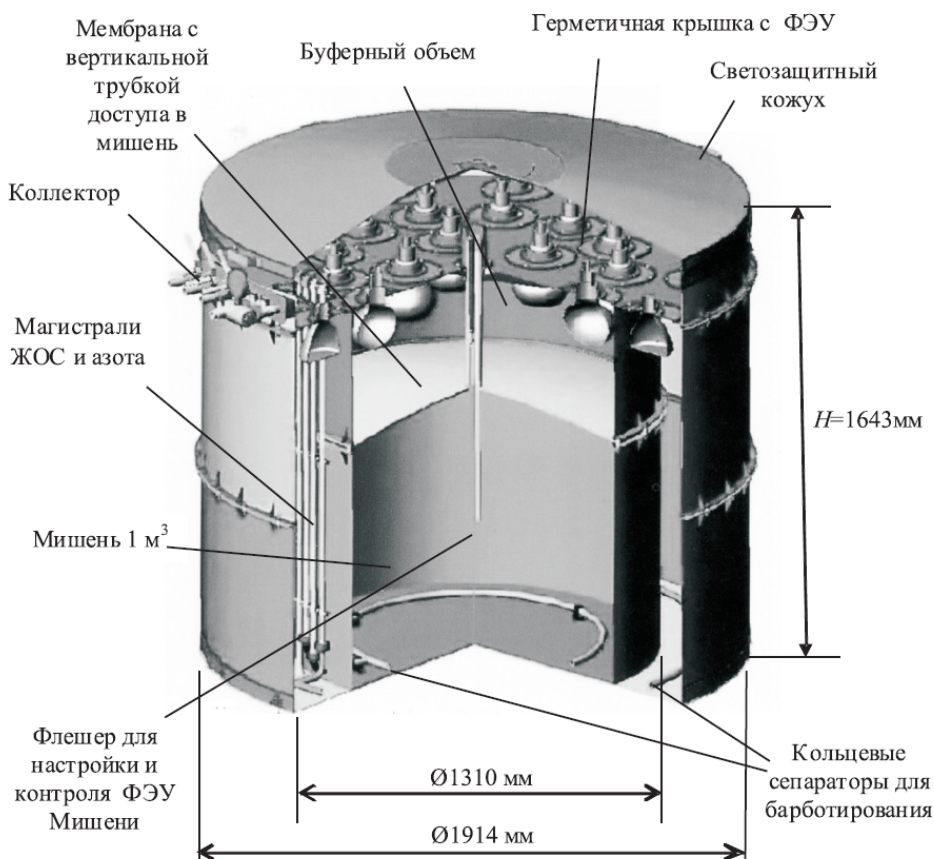


Рисунок 3 – Схема детектора iDREAM [7]

1 РАСЧЁТ ОЖИДАЕМОГО ЧИСЛА СОБЫТИЙ

1.1 СПЕКТР РОЖДЁННЫХ ТЁМНЫХ БОЗОНОВ

Предполагается, что тёмный бозон X рождается в реакции типа комптоновского рассеяния реакторного гамма-кванта γ на покоящемся электро-троне вещества реактора (рисунок 1.1)

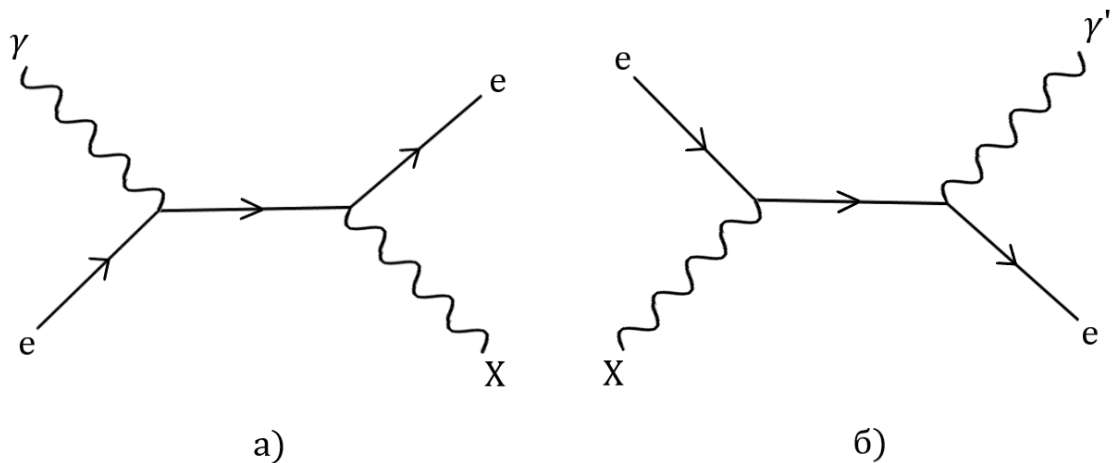


Рисунок 1.1 — Реакции образования тёмного бозона в веществе реактора (а) и его поглощения в детекторе (б)

Энергетический спектр тёмных бозонов, вылетающих из активной зоны реактора:

$$\frac{dN}{dE_X} = \int \frac{1}{\sigma_{\text{tot}} + \sigma_{\gamma e \rightarrow Xe}} \frac{d\sigma_{\gamma e \rightarrow Xe}}{dE_X} \frac{dN}{dE_\gamma} dE_\gamma, \quad (1.1)$$

где E_X — энергия образованного тёмного бозона, σ_{tot} — полное сечение взаимодействия гамма-квантов с материалами детектора, $\sigma_{\gamma e \rightarrow Xe}$ — полное

сечение процесса типа комптон-эффекта, в котором поглощается гамма-квант и рождается тёмный бозон (зависит от типа тёмного бозона), $\frac{d\sigma_{\gamma e \rightarrow Xe}}{dE_X}$ – дифференциальное сечение образования тёмного бозона в процессе типа комптон-эффекта, $\frac{dN}{dE_\gamma}$ – энергетический спектр гамма квантов, образующихся в реакторе, взятый аналогично [5]:

$$\frac{dN}{dE_\gamma} = 0.58 \cdot 10^{18} \cdot P \cdot e^{-1.1E_\gamma} \quad (1.2)$$

Здесь P – мощность реактора в МВт (для Калининской АЭС $P \approx 3100$ МВт), E_γ – энергия гамма кванта в МэВ.

Также из кинематики реакции следует

$$E_\gamma = \frac{-\frac{1}{2}m_X^2 + E_X m_e}{m_e - E_X + \cos\theta \cdot \sqrt{E_X^2 - m_X^2}} \quad (1.3)$$

Здесь θ – угол между импульсами исходного гамма-кванта и образовавшегося тёмного бозона. Используя выражение 1.3, можно получить пределы интегрирования для формулы (1.1).

1.2 ОЖИДАЕМЫЙ В ДЕТЕКТОРЕ IDREAM ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР

Предполагается, что тёмный бозон поглощается покоящимся электроном вещества детектора с испусканием вторичного гамма-кванта γ' (рисунок 1.1). Образованные в процессе электрон отдачи и вторичный гамма-квант регистрируются детектором как одиночное событие с энергией $E_{ev} = T_e + E_{\gamma'} = E_X$.

Тогда энергетический спектр регистрируемых событий в предположении изотропного разлёта тёмных бозонов:

$$\frac{dN}{dE_{ev}} = \frac{dN}{dE_X} = \frac{N_e T}{4\pi R^2} \int \frac{d\sigma_{Xe \rightarrow \gamma' e}}{dE_{\gamma'}} \frac{dN}{dE_X} dE_{\gamma'} \quad (1.4)$$

Здесь N_e – плотность электронов в веществе детектора в тоннах⁻¹, T – время экспозиции, R – расстояние от реактора до детектора (iDREAM

установлен на расстоянии 19.6 м от реактора Калининской АЭС), $\frac{d\sigma_{Xe\rightarrow\gamma'e}}{dE_X}$ – дифференциальное сечение процесса типа комптон-эффекта, $E_{\gamma'}$ – энергия образованного гамма-кванта.

Пределы интегрирования формулы (1.4) можно получить из кинематического соотношения

$$E_{\gamma'} = \frac{-\frac{1}{2}m_X^2 - E_X m_e}{m_e + E_X - \cos\phi \cdot \sqrt{E_X^2 - m_X^2}}, \quad (1.5)$$

где ϕ – угол между импульсами тёмного фотона и вторичного гамма-кванта.

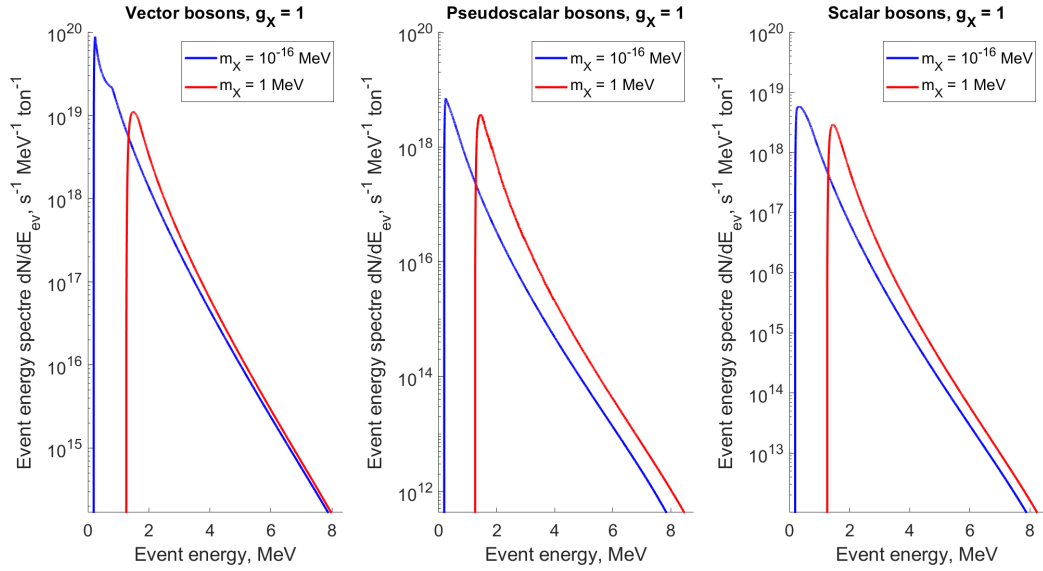


Рисунок 1.2 — Ожидаемые энергетические спектры событий для векторных бозонов (слева), псевдоскалярных бозонов (в центре) и скалярных бозонов (справа) с массами $m_X = 10^{-16}$ МэВ и $m_X = 1$ МэВ, в предположении $g_X = 1$, $P = 3090$ МВт, $T = 1$ с

Для нахождения ожидаемой скорости счёта необходимо проинтегрировать полученные энергетические спектры в исследуемом окне энергий, которое в данном исследовании выбрано так: $E_{ev} \in [3; 10]$ МэВ.

2 ОТБОР СОБЫТИЙ

2.1 КРИТЕРИИ ОТБОРА

Для отбора событий были использованы следующие критерии:

- мюонное вето: после регистрации мюона вводится мёртвое время 150 мкс;
- отбор одиночных событий: во временном окне ± 100 мкс нет других событий;
- энергия события $E_{ev} \in [3; 10]$ МэВ

2.2 МЕТОДИКА ОТБОРА

Искомые события возникают только при включенном реакторе, поэтому были исследованы два набора данных: при включенном ($3.7742 \cdot 10^8$ событий за 60 суток живого времени) и при выключенном ($3.0404 \cdot 10^8$ событий за 49 суток живого времени) реакторе.

Затем полученные энергетические спектры событий были преобразованы в энергетические спектры скоростей счёта и вычтены для получения скорости счёта событий, источником которых является реактор.

2.3 ОЦЕНКА ФОНА

Для используемых критериев отбора фоновыми событиями являются флуктуации одиночных событий, не зависящие от мощности реактора: флуктуации эффективности регистрации событий, связанные с её зависимостью от температуры сцинтиллятора, флуктуации числа одиночных событий от радиоактивных изотопов в материалах детектора и т. д.

Была исследована флуктуация скорости счёта одиночных событий,

удовлетворяющих критериям отбора и построена гистограмма скоростей счёта (рисунок 2.1). Скорость счёта фоновых событий была моделирована случайной величиной со средним значением 0 и дисперсией, равной дисперсии распределения скоростей счёта одиночных событий при выключенном реакторе.

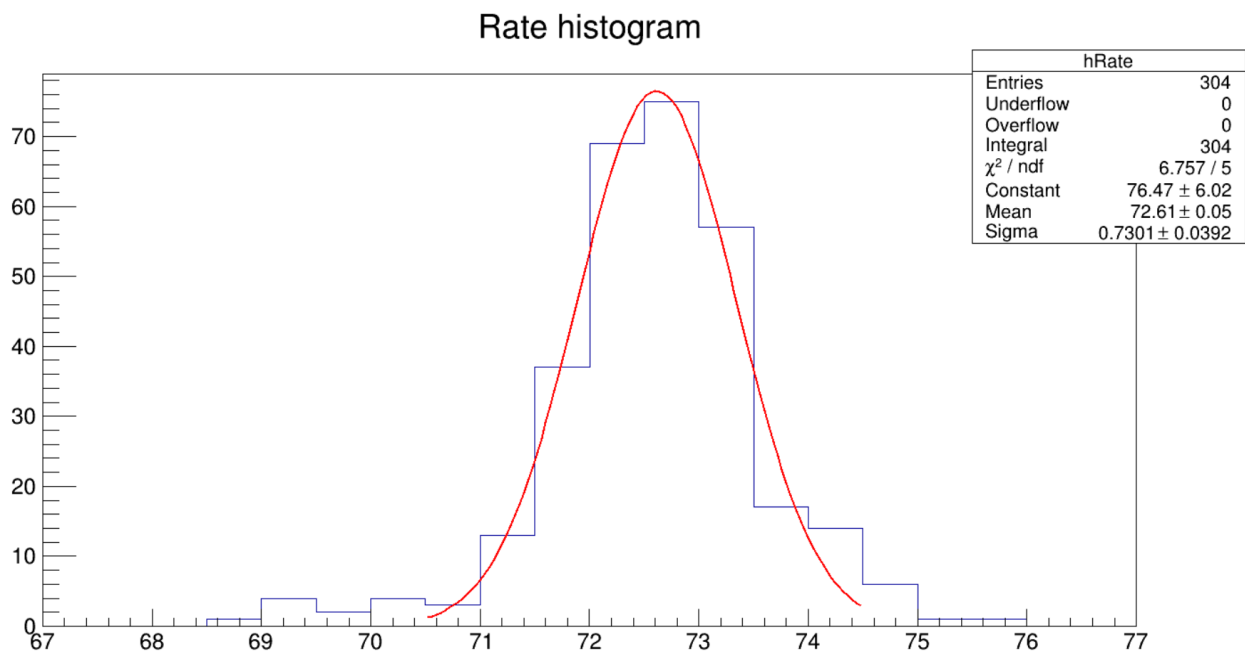


Рисунок 2.1 — Распределение скоростей счёта при выключенном реакторе

Для увеличения отношения сигнал/фон, были рассмотрены энергетические спектры скорости счёта одиночных событий при выключенном реакторе для каждого рана. Затем для уменьшения систематической погрешности были отброшены те раны, в которых скорость счёта в энергетическом бине отличалась от среднего значения более, чем на 3σ . При этом удалось уменьшить флуктуацию фоновой скорости счёта с 0.73c^{-1} до 0.36c^{-1} , то есть в два раза.

2.4 ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ

В данном анализе присутствуют систематические погрешности, связанные с флуктуациями мощности реактора и числа фоновых событий, а также статистические погрешности.

Как видно из раздела 2.3, наибольший вклад вносит относительная систематическая погрешность фона: $\sigma_{bkg} = 1$, в то время как другие отно-

сительные погрешности: флуктуация мощности реактора и статистическая погрешность – находятся на уровне $\sim 10^{-3}$ и 10^{-5} соответственно. Поэтому именно флуктуации числа фоновых событий будут оказывать наибольшее влияние на получаемые ограничения на параметры модели.

3 ПОЛУЧЕНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ

При известных систематических погрешностях (раздел ??), ожидаемых скоростях счёта и экспериментальных результатах отбора для уровня достоверности $\alpha = 95\%$ можно получить ограничения на параметры модели: m_X и g_X .

Построена статистическая модель:

$$N_{pred}(m_X, g_X, \theta_P, \theta_{bkg}) = N_s(m_X, g_X)(1 + \theta_P \sigma_P) + N_{bkg} \theta_{bkg} \sigma_{bkg} \quad (3.1)$$

Здесь N_s – теоретическое число сигнальных событий; θ_P – случайная величина $\sim N(0,1)$, отвечающая за флуктуации мощности реактора; $\sigma_P = 2 \cdot 10^{-3}$ – относительная погрешность мощности реактора; $N_{bkg} \sigma_{bkg} = 0.73 * T$ – дисперсия числа фоновых событий, T – живое время сбора данных; θ_{bkg} – случайная величина $\sim N(0,1)$, отвечающая за флуктуации числа фоновых событий.

Функция правдоподобия:

$$L(m_X, g_X, \theta_P, \theta_{bkg}) = \frac{N_{pred}^{N_{obs}}}{N_{obs}} e^{-N_{pred}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta_P^2}{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\theta_{bkg}^2}{2}} \quad (3.2)$$

Используемая тестовая статистика:

$$t_{m_X, g_X} = -2 \ln \left(\frac{L(m_X, g_X, \hat{\theta}_P, \hat{\theta}_{bkg})}{L_{max}} \right) \quad (3.3)$$

Здесь $\hat{\theta}_P, \hat{\theta}_{bkg}$ – значения соответствующих случайных величин, максимизирующие функцию правдоподобия при фиксированных m_X, g_X ; L_{max} – абсолютный максимум функции правдоподобия.

Уравнение на ограничения физических параметров модели:

$$\Phi(\sqrt{t_{m_X, g_X}}) = \frac{1 + \alpha}{2} \quad (3.4)$$

Здесь $\Phi(x)$ – функция распределения вероятности для стандартного распределения.

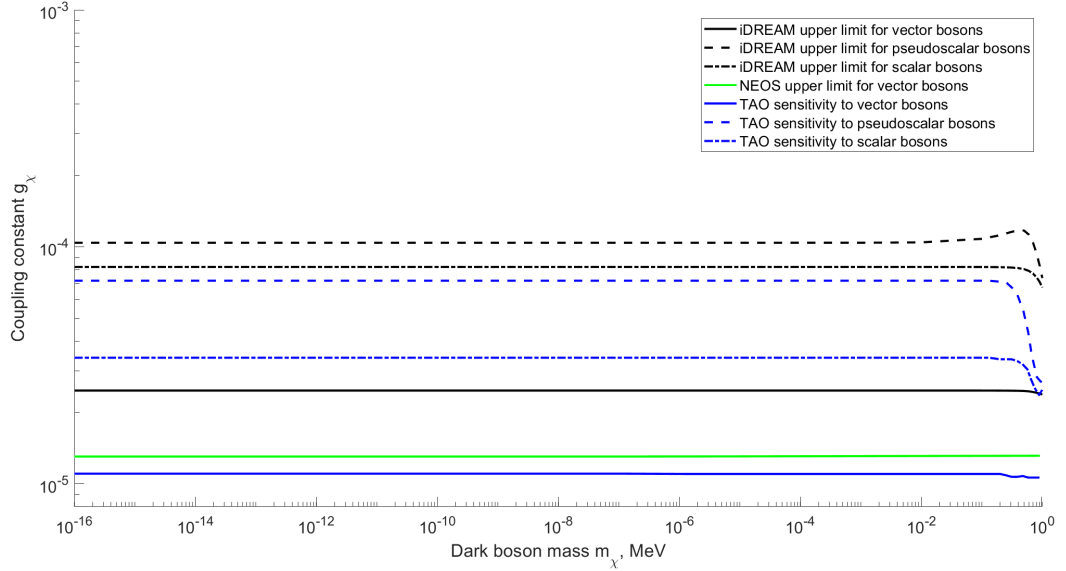


Рисунок 3.1 — Ограничения на массу тёмных бозонов m_X и константу связи со Стандартной Моделью g_X , полученные для iDREAM и NEOS[6], а также чувствительность ТАО (Тайшаньской антинейтринной обсерватории)[5] к тёмным бозонам на уровне достоверности 95%

Как видно из рисунка 3.1, полученные в этой работе ограничения являются менее строгими, чем ограничения для эксперимента NEOS.

4 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 темных бозонов. Результаты iDREAM незначительно уступают результатам, полученным по данным детектора NEOS [6], и результатам, ожидаемым в JUNO TAO [5].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Workman R. L.* [и др.]. Review of Particle Physics // РТЕР. — 2022. — Т. 2022. — С. 083С01.
2. *Deliyergiyev M.* Recent Progress in Search for Dark Sector Signatures // Open Physics. — 2016. — Т. 14.
3. First dark matter search with nuclear recoils from the XENONnT experiment / E. Aprile [и др.] // Physical Review Letters. — 2023. — Т. 131, № 4. — С. 041003.
4. *Filippi A., De Napoli M.* Searching in the dark: the hunt for the dark photon // Reviews in Physics. — 2020. — Т. 5. — С. 100042.
5. Light dark bosons in the JUNO-TAO neutrino detector / M. Smirnov [и др.] // Physical Review D. — 2021. — Т. 104, № 11. — С. 116024.
6. *Park H.* Detecting dark photons with reactor neutrino experiments // Physical Review Letters. — 2017. — Т. 119, № 8. — С. 081801.
7. Промышленный детектор iDREAM для мониторинга режимов работы атомных реакторов нейтринным методом / М. Б. Громов [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. — 2015. — № 3. — С. 26—31.