

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА,
ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

УДК 539.129; 53.087

РАСЧЁТ СИГНАЛА ОТ МИЛЛИЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ RED-100 И ν GeN
НА КАЛИНИНСКОЙ АЭСВ. А. Белов^{1,2}, А. М. Коновалов^{2,3}, Н. А. Машин³, Р. Ф. Сиро²,
Н. А. Скробова³, А. В. Шакиров²

Некоторые расширения Стандартной модели фундаментальных взаимодействий и элементарных частиц предполагают существование миллизаряженных частиц (МЗЧ). Такие частицы могут рождаться в ядерных реакторах, в частности при рассеянии гамма-квантов на электронах. В данной работе рассчитан ожидаемый поток МЗЧ на Калининской АЭС, и получено распределение этих частиц по энергиям. Вычислена ожидаемая скорость счёта рассеяния МЗЧ на электронах твердотельного германиевого детектора, а также двухфазного детектора, заполненного ксеноном или аргоном.

Ключевые слова: миллизаряженные частицы, ядерный реактор, ксенон, аргон, германий.

Введение. Одной из целей экспериментальной физики элементарных частиц является поиск проявлений так называемой “Новой физики” – взаимодействий и частиц за пределами Стандартной модели (СМ). Одним из рассматриваемых расширений СМ является введение фермионов с дробным электрическим зарядом – “миллизаряженных” частиц (МЗЧ) [1, 2]. Соответствующие теоретические модели могут быть найдены, например, в работах [3, 4]. Поиск МЗЧ производится в ускорительных экспериментах со сбросом пучка на неподвижную мишень, при котором МЗЧ рождаются в распадах

¹ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Россия, Москва.

² НИЯУ “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

³ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: a.kononov@lebedev.ru.

псевдоскалярных и векторных мезонов [5–9], а также в протон-протонных столкновениях [10]. На реакторах ожидается конверсия части потока гамма-квантов, рожденных при делении ядерного топлива и во вторичных процессах, в МЗЧ [11–14]. Подземные эксперименты проводят поиски потока МЗЧ астрофизического и атмосферного происхождения [15, 16]. Гипотетические МЗЧ могут давать вклад в плотность энергии, приписываемую Темной материи [17–20].

В данной работе обсуждается расчёт характеристик потока МЗЧ на реакторах Калининской Атомной Электростанции (КлнАЭС). Эта АЭС является местом проведения нескольких нейтринных экспериментов [21–24]. Наиболее перспективными с точки зрения поиска МЗЧ в силу низкого энергетического порога являются эксперименты νGeN [25] и RED-100 [26]. Установка νGeN расположена на третьем энергоблоке КлнАЭС на расстоянии 11.1 м от центра активной зоны реактора. Её основной элемент – низкофоновый германиевый детектор с точечным контактом, масса детектора составляет 1.41 кг. Экспозиция детектора продолжается на КлнАЭС с конца 2019 года, на начало 2026 года получено более 2400 кг·суток данных. Основной целью установки νGeN является поиск упругого когерентного рассеяния антинейтрино (УКРН) на ядрах германия [27] и электромагнитных свойств антинейтрино [28]. Целью эксперимента RED-100 является наблюдение УКРН на ядрах ксенона и аргона, при этом он также обладает чувствительностью, достаточной для поиска электромагнитных свойств антинейтрино [26]. Двухфазный эмиссионный детектор [29] RED-100 находился на экспозиции на КлнАЭС в 2021–2022 гг. с ксеноном в качестве рабочего вещества (126 кг в чувствительном объёме) на расстоянии 19 м от центра активной зоны реактора четвертого энергоблока [30]. В настоящее время проводятся лабораторные тесты RED-100 с аргоном, с массой рабочего вещества около 61 кг. Планируется проведение повторной экспозиции RED-100 на КлнАЭС именно в аргоновой конфигурации. Обе установки, RED-100 и νGeN , пользуются преимуществом конструкции КлнАЭС – наличием доступных помещений под реактором. Эти помещения и конструктив станции вокруг них обеспечивают подавление потока космических мюонов, соответствующее ~ 50 м водного эквивалента [31].

Поток миллизаряженных частиц от реактора. Проводимый расчёт потока МЗЧ на реакторах Калининской АЭС следует логике работы [12]. В качестве основы для него используется параметризация потока первичных гамма-квантов делящегося ядерного топлива из работы [32]:

$$\frac{dN_\gamma}{dE_\gamma} = (0.581 \cdot 10^{18}) \times e^{-1.1E_\gamma} \times P, \quad (1)$$

где E_γ – энергия гамма-кванта в МэВ, а P – тепловая мощность реактора в МВт. Обсуждение альтернативного расчета потока, полученного в работе [33] для реактора ВВЭР-1000, и соответствующие ему результаты можно найти в разделе “Обсуждение”.

Конвертация гамма-квантов в пару МЗЧ может происходить в процессе, эквивалентном комптоновскому рассеянию: $\gamma e \rightarrow \chi \bar{\chi} e$ [11]. Сечение рождения МЗЧ как функция их массы, энергии и миллизаряда задаётся выражением [12]

$$\frac{d\sigma_{\text{prod}}}{dE_\chi} \approx \frac{4\delta_\chi^2 \alpha^3}{3m_e^2 E_\gamma^3} [3(E_\chi^2 + E_{\bar{\chi}}^2) + 2E_\chi E_{\bar{\chi}}] \times \ln \frac{2E_\chi E_{\bar{\chi}}}{E_\gamma m_\chi}, \quad (2)$$

где m_χ и E_χ – масса и полная энергия МЗЧ, α – электромагнитная постоянная тонкой структуры, m_e – масса электрона, а δ_χ – доля зарада МЗЧ относительно элементарного заряда e_0 . Свёртка распределения потока гамма-квантов по энергии с этим сечением, нормированная на полное сечение взаимодействия гамма-квантов с веществом $\sigma_{\text{tot}}(E_\gamma)$, даёт поток МЗЧ для заданной массы этих частиц [12]:

$$\frac{d\Phi_\chi}{dE_\chi} = \frac{2}{4\pi R^2} \int \frac{1}{\sigma_{\text{tot}}(E_\gamma)} \frac{d\sigma_{\text{prod}}}{dE_\chi} \frac{dN_\gamma}{dE_\gamma} dE_\gamma, \quad (3)$$

где R – расстояние до центра активной зоны реактора. При свёртке, аналогично работе [12], используется диапазон энергии гамма-квантов от 1 до 5 МэВ. Ожидается, что гамма-кванты именно из этого диапазона дают наибольший вклад в поток МЗЧ за счёт того, что в нём сечение комптоновского рассеяния доминирует над фотоэффектом и рождением пар. Сечение $\sigma_{\text{tot}}(E_\gamma)$ в выражении (3), соответственно, приближается сечением эффекта Комптона для энергии E_γ . Примеры рассчитанного таким образом потока приведены на рис. 1 для номинального $\delta_\chi = 1$ и без учёта энергетических потерь МЗЧ в веществе по пути из активной зоны к детектору. Вопрос потерь энергии рассматривается в разделе “Обсуждение”.

Расчёт сечения рассеяния МЗЧ на электронах. МЗЧ могут взаимодействовать с чувствительным веществом детектора посредством ионизации атома, приводящей к появлению свободного “электрона отдачи”. Сечения такого процесса может быть рассчитано несколькими способами. Наиболее простой из них называется “приближением свободных электронов” (FEA – free electron approximation). В этом подходе используется сечения рассеяния МЗЧ на свободном электроне [12]:

$$\frac{d\sigma_{\text{FEA}}}{dT_e} = \frac{\delta_\chi^2 \pi \alpha^2}{m_e^2 T_e^2 (E_\chi^2 - m_\chi^2)} \times [m_e (E_\chi^2 + (E_\chi - T_e)^2) - T_e (m_e^2 + m_\chi^2)], \quad (4)$$

где T_e – кинетическая энергия электрона (энергия отдачи). Чтобы получить сечение FEA на атом рабочего вещества, нужно умножить выражение (4) на количество

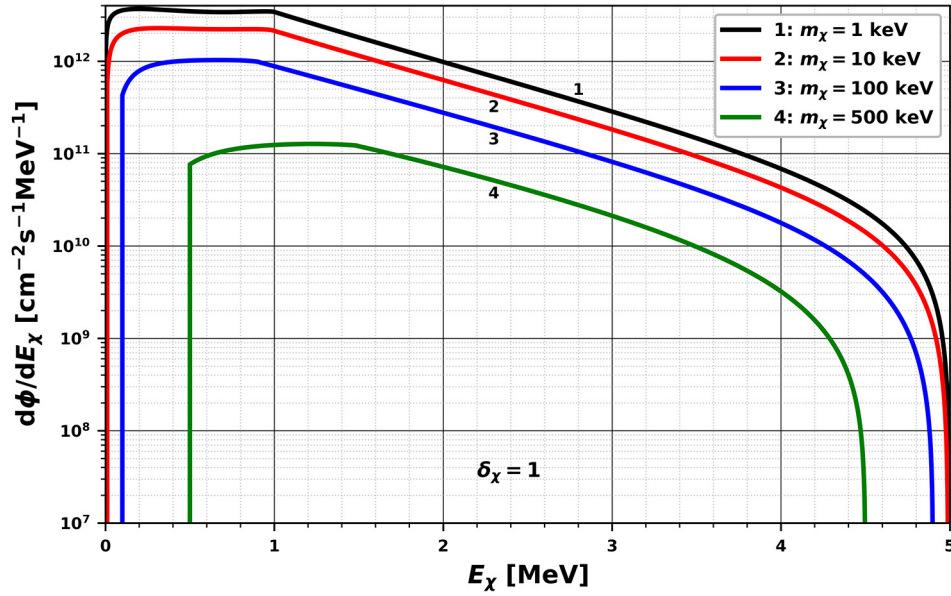


Рис. 1: Поток МЗЧ на расстоянии 10 м от центра активной зоны реактора тепловой мощностью 3.1 ГВт для различных масс МЗЧ.

электронов атома с энергией связи меньшей, чем энергия отдачи электрона T_e . Другой способ расчёта – “приближение эквивалентного фотона” (ЕРА – equivalent photon approximation). В этом подходе сечение рассеяния МЗЧ на атоме связывается с эмпирическим сечением фотоэффекта на этом атоме [34]:

$$\frac{d\sigma_{EPA}}{dT_e} = \frac{2\alpha^2\delta_\chi^2}{\pi} \times \frac{\sigma_\gamma(T_e)}{T_e} \ln \frac{E_\chi}{m_\chi}, \quad (5)$$

где $\sigma_\gamma(T_e)$ – сечение фотопоглощения фотона с энергией T_e . Как показано в работе [12], подход ЕРА лучше аппроксимирует сечение рассеяния релятивистских МЗЧ на атомах германия, полученное из первых принципов. Оно, как показано на рис. 2, также в несколько раз превышает сечение, полученное при помощи ФЕА для релятивистских МЗЧ в области малых T_e . Данные о сечении фотоэффекта, необходимые для расчёта ЕРА, взяты из работы [35] (ниже 1 кэВ) и базы данных [36] (выше 1 кэВ). Зависимость сечений ЕРА и ФЕА от массы МЗЧ проиллюстрирована на рис. 3.

Как видно, ФЕА доминирует над ЕРА в двух случаях: для больших T_e и при увеличении массы МЗЧ (см. также рис. 2 в работе [14]). Далее в этой работе используется комбинация сечений

$$\frac{d\sigma}{dT_e} = \max \left[\frac{d\sigma_{EPA}}{dT_e}, \frac{d\sigma_{FEA}}{dT_e} \right] \quad (6)$$

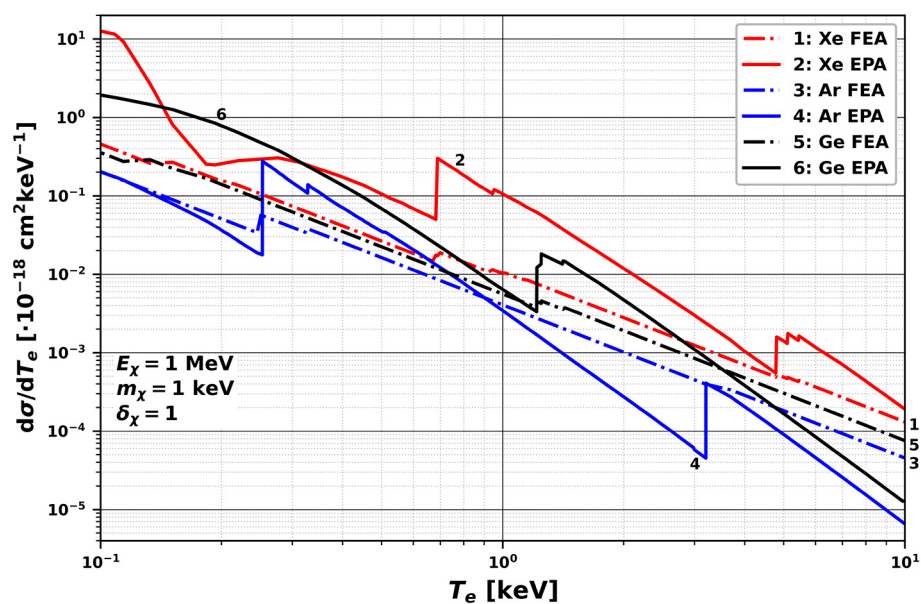


Рис. 2: Сечение рассеяния МЗЧ на электронах ксенона, аргона и германия в подходах FEA и EPA.

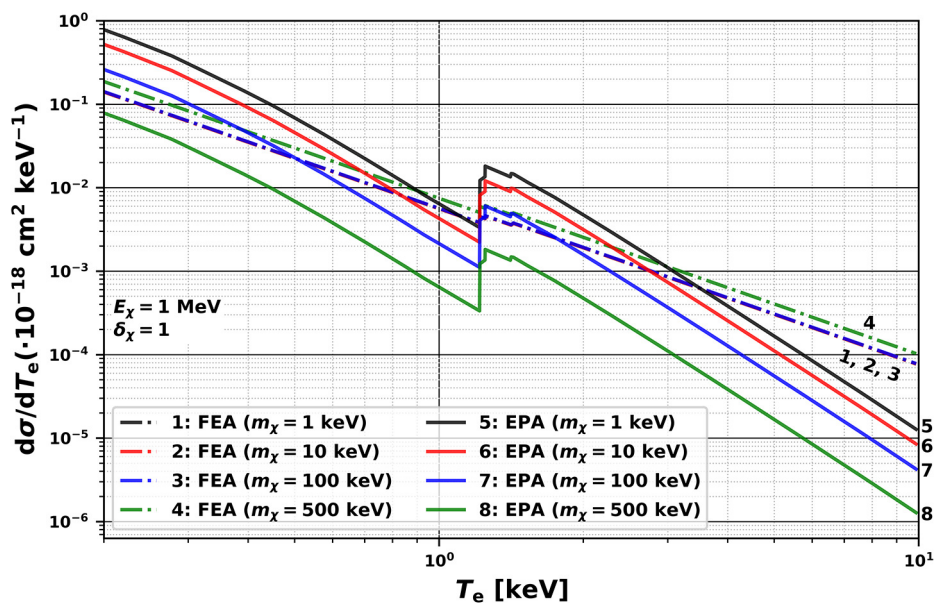


Рис. 3: Сечение рассеяния МЗЧ на электронах германия в зависимости от массы МЗЧ в подходах FEA и EPA.

аналогично работе [12]. Такой подход иногда используется и при поиске электрического миллизаряда нейтрино [37].

Ожидаемые скорости счёта событий от рассеяния МЗЧ. Ожидаемый сигнал от рассеяния МЗЧ, рожденных в реакторе, на электронах чувствительного вещества детекторов был рассчитан путем свёртки энергетического распределения МЗЧ с сечением (6). Результаты расчёта, нормированные на кг·сутки экспозиции, представлены на рис. 4 для Ag, Ge, и Xe. Кривые рассчитаны для условного расстояния 10 м до центра активной зоны, обеспечивающего удобство сравнения рабочих веществ детекторов между собой, и используют значение $\delta_\chi = 3 \cdot 10^{-6}$. Как видно, ожидаемые скорости счёта имеют особенности на энергиях атомных электронных оболочек. В диапазоне 100–150 эВ наибольшей является ожидаемая скорость счёта на Xe. При энергии электрона отдачи около 200 эВ скорость счёта на германии превосходит рассмотренные альтернативы. Близкие скорости счёта германия и аргона достигаются уже при $T_e \approx 250$ эВ. При энергии электрона отдачи около 500 эВ ожидаемая скорость счёта на ксеноне достигает соответствующих значений на аргоне и германии. Особенностью ксенона является наличие пика на энергии около 700 эВ, связанного с электронами $M_4 3d_{3/2}$ и $M_5 3d_{5/2}$ оболочек. Соответствующая этому пику особенность, находящаяся значительно выше порога (около 250 эВ для RED-100 с Xe), может выступить ярким свидетельством наблюдения МЗЧ. Реальная величина ожидаемого в RED-100 и vGeN сигнала от МЗЧ будет зависеть от достигнутого порога, энергетического разрешения и уровня фона в каждом из экспериментов.

Чувствительность vGeN и RED-100 к параметрам МЗЧ. Вычисленные скорости счёта в комбинации с фоновыми спектрами энерговыделений, полученными в экспериментах vGeN и RED-100 во время останова соответствующих реакторов на КАЭС, могут быть использованы для оценки чувствительности установок к параметрам МЗЧ. Оценка проведена на основе данных Азимова [38], отражающих ожидаемый разностный спектр энерговыделений ON (реактор работает) – OFF (реактор остановлен) при отсутствии сигнала от МЗЧ. Статистические ошибки разностных спектров экстраполированы на времена экспозиций 198 (98) кг·суток ON (OFF) для vGeN и 192 (61) кг·суток ON (OFF) в доверительном объёме детектора для RED-100 и отражают объём данных, вошедший в работы [25, 26]. Из этих работ получена и информация о достигнутых энергетических порогах и используемых отборах событий. Для RED-100 при переходе от энергетической шкалы в кэВ к единицам ионизационных электронов, а затем и фотоэлектронов электролюминесценции, зарегистрированных ФЭУ, была использована процедура, описанная в работе [26]. Аппроксимация данных Азимова ожидаемым сигналом проводилась с двумя свободными параметрами – массой и зарядом МЗЧ. Соот-

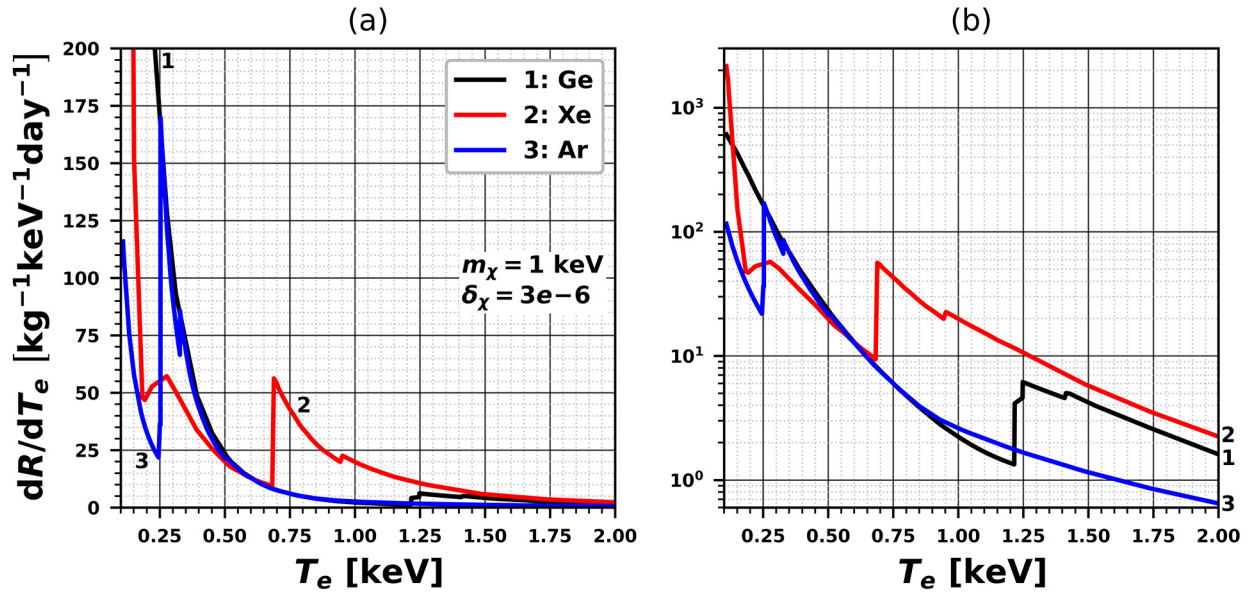


Рис. 4: Скорости счёта электронов отдачи от рассеяния МЗЧ для Ar, Ge и Xe в расчёте на кг·сутки экспозиции для расстояния 10 м от центра активной зоны реактора: (a) линейный масштаб, (b) логарифмический.

ветствующие ожидаемые пределы в параметрическом пространстве МЗЧ (90% уровень достоверности) были получены при помощи теоремы Уилкса. Результаты оценки чувствительности представлены на рис. 5. Как видно, параметры установок и имеющийся в распоряжении коллабораций ν GeN и RED-100 объём данных позволяют ожидать ограничения, близкие к лучшим в мире реакторным пределам из работы [13]. Ожидаемый для аргоновой конфигурации RED-100 предел на параметрическое пространство МЗЧ не приводится в данной работе в силу отсутствия данных о достигнутом энергетическом пороге и уровне фона в области малых энерговыделений.

Обсуждение. Этот раздел посвящён обсуждению потенциальных ограничений и направлений уточнения результатов: проверке расчёта, справедливости закладываемых характеристик потока реакторных гамма-квантов, альтернативным каналам рождения МЗЧ и потенциальным энергетическим потерям этих частиц по пути от места рождения до детектора.

Верификация ожидаемой скорости счёта взаимодействий, полученной в данной работе, проводилась сравнением с опубликованными в работе [12] результатами. Сечения рассеяния МЗЧ на электронах атома германия в рамках FEA и EPA совпали с приведенными на рис. 2 работы [12]. Сравнение расчёта, проведенного в данной ра-

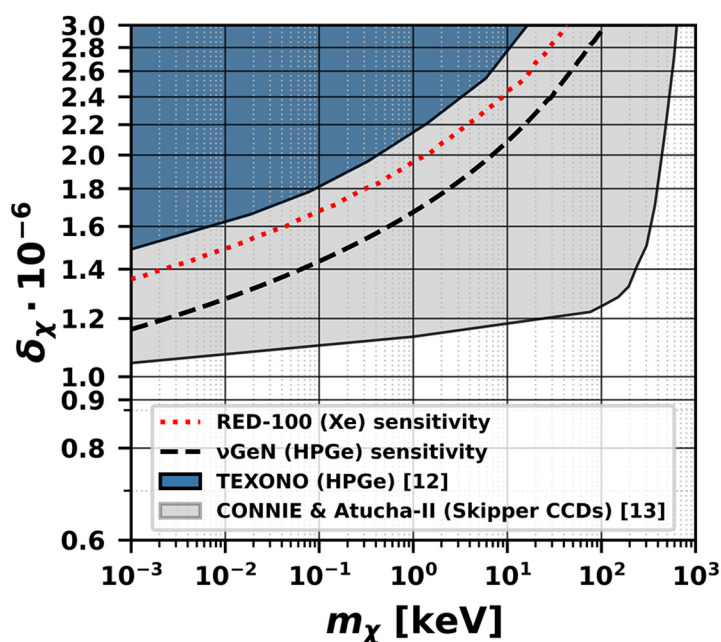


Рис. 5: Чувствительности экспериментов *RED-100* с ксеноном и *νGeN* к параметрическому пространству МЗЧ для экспозиций из работ [25, 26] (см. текст), их сравнение с результатами из работ [12, 13].

боте, с ожидаемой скоростью счёта с рис. 3(а) из работы [12] показало, что первый в 5 раз меньше второй при одинаковой закладываемой тепловой мощности реактора 2.9 ГВт и расстоянии 28 м от центра реактора. Такое расхождение соответствует недооценке чувствительности к $\delta\chi$ в данной работе в 1.5 раза, так как величина сигнала пропорциональна $\delta\chi^4$ ($\delta\chi^2$ из рождения и $\delta\chi^2$ из регистрации МЗЧ). После обнаружения расхождения расчёт, представленный в данной работе, был подтверждён альтернативной технической реализацией процедуры, осуществленной другим членом авторского коллектива. Обращение к авторам работы [12] не позволило обнаружить причину расхождения результатов за время подготовки манускрипта и его рассмотрения в редакции журнала.

Расчёт потока МЗЧ, приведенный в данной работе, основан на выражении (1), полученном на исследовательском реакторе FRJ-1 (Merlin) в Юлихском исследовательском центре. Степень обогащения ядерного топлива по ^{235}U в этом реакторе составляла 80% [32]. Поток (1), далее – “поток Merlin”, соответствует гамма-квантам, возникающим при захвате нейтрона на ^{235}U , и учитывает процессы деления, радиационного захвата и бета-распада продуктов деления. Естественно предположить, что для энергетического

реактора ВВЭР-1000 КЛНАЭС с обогащением топлива по ^{235}U в 3–5% гамма-поток может отличаться, по крайней мере за счёт ^{239}Pu , второго из доминирующих в делении топлива изотопа. Тем не менее, выражение (1) используется в современных работах по поиску МЗЧ [12, 13], аксионоподобных частиц [39, 40] и тёмных фотонов [41] на энергетических реакторах. В недавней работе эксперимента iDREAM [33] вычислен поток гамма-квантов в активной зоне реактора ВВЭР-1000 Калининской АЭС (далее – “поток iDREAM”). Этот поток учитывает в том числе (n, γ) -реакции на материалах активной зоны. Сравнение потоков показывает, что рассчитанный для ВВЭР-1000 поток iDREAM в 2–3 раз ниже, чем Merlin, в диапазоне энергий гамма-квантов от 1 до 5 МэВ при нормировке на тепловую мощность реактора 3.1 ГВт. По-видимому, эта разница связана с вкладом гамма-квантов, образующихся при распаде продуктов деления. Этот вклад учтен в расчете Merlin (через результат измерения [42]), но считается пренебрежимо малым в расчете iDREAM со ссылкой на работу [43]. Альтернативные ожидаемые скорости счёта событий от МЗЧ, основанные на потоке iDREAM, приведены на рис. 6. В этом случае сигнал уменьшается в ~ 2.7 раз. Это приводит к уменьшению чувствительности к δ_χ в 1.28 раз по сравнению с использованием потока Merlin. Уточнение потока гамма-квантов от энергетического реактора крайне желательно для верификации или исправления потоков гамма-квантов из работ [32] и [33].

В недавней работе [14] отмечается, что помимо рассмотренного процесса рождения миллизаряженных частиц $\gamma e \rightarrow \chi \bar{\chi} e$, пара $\chi \bar{\chi}$ также может рождаться при излучении гамма-кванта ядром. Такое рассмотрение позволяет увеличить кинематически доступную область масс МЗЧ на реакторах с 0.7 до 2.0 МэВ. Основной вклад в такое улучшение даёт учёт реакций $p(n, \gamma)D$ и $^{238}\text{U}(n, \gamma)^{239}\text{U}$.

В данной работе при расчёте потока МЗЧ (рис. 1) и ожидаемой скорости счёта сигнальных событий (рис. 4, 5) не учитывались потери энергии МЗЧ в веществе по пути из активной зоны реактора к детектору. Проведённая в соответствии с работой [44] оценка потерь (ионизация, тормозное излучение, рождение пар) показывает, что ими можно пренебречь в области параметрического пространства МЗЧ, соответствующей чувствительности экспериментов RED-100 и vGeN: m_χ в диапазоне 1 кэВ–0.7 МэВ и δ_χ в диапазоне 10^{-5} – 10^{-6} . Заметными ($\sim 10\%$) для МЗЧ таких масс потери энергии становятся при δ_χ порядка 10^{-2} – 10^{-3} .

Наконец, использованный в данной работе подход к вычислению сечения рассеяния МЗЧ на электронах, основанный на комбинации FEA и EPA, может быть пересмотрен в пользу метода PAI (англ. photo absorption ionization) [45]. Этот метод обеспечива-

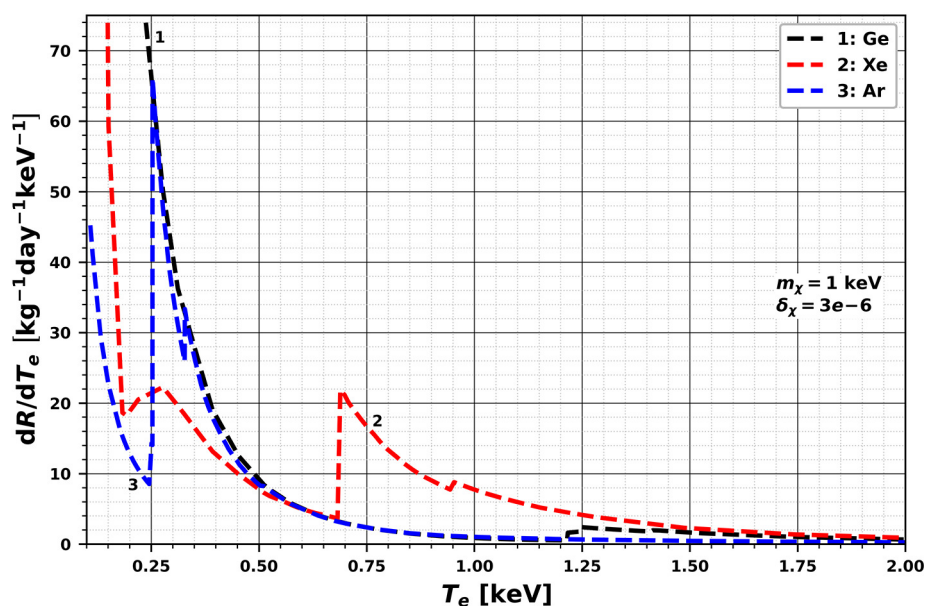


Рис. 6: Скорости счёта электронов отдачи от рассеяния МЗЧ для Ar, Ge и Xe для расстояния 10 м от центра активной зоны реактора в предположении о потоке гамма-квантов *iDREAM* [33] (для начала реакторной кампании, пересчитан на тепловую мощность 3.1 GWt).

ет естественный переход от ЕРА к FEA в области массы и энергии МЗЧ, доступных реакторным экспериментам [13, 14].

Выводы. На основании данных о потоке первичных гамма-квантов, производимых реактором, и выражений для сечений рождения миллизаряженных частиц и их взаимодействия с электронами в данной работе были рассчитаны ожидаемые скорости счёта сигнала от МЗЧ. Проведено сравнение скоростей счёта для Ge, Ar и Xe. Полученные результаты могут быть использованы для поиска МЗЧ в экспериментах vGeN и RED-100 на Калининской АЭС. Оценки чувствительности этих экспериментов к параметрическому пространству МЗЧ показывают, что ожидаемые пределы находятся на уровне лучших в мире результатов.

Вычисления ожидаемого от МЗЧ сигнала для ксенона и аргона, а также расчёт чувствительности для эксперимента RED-100 поддержаны Российским научным фондом (проект № 22-12-00082-П).

Авторы выражают благодарность коллаборациям vGeN и RED-100 за предоставленные фоновые спектры энерговыделений для оценки чувствительности этих экспериментов к МЗЧ. Авторы благодарны Д. Попову (НИЦ КИ, МИФИ) и Е. Литвиновичу

(НИЦ КИ) за обсуждение спектров гамма-квантов реактора ВВЭР-1000 из работы [33]. Авторы также признательны Д. Свириде (НИЦ КИ, ФИАН) за обсуждение величины и состава слоя вещества между активной зоной реактора и местом проведения экспериментов ν GeN и RED-100. Авторы выражают благодарность О. Разуваевой (Weizmann Institute of Science) и Е. Козловой (Westlake University) за обсуждение учёта детекторного отклика RED-100.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. I. Dobroliubov, A. Yu. Ignatiev, Phys. Rev. Lett. **65**(6), 679 (1990). DOI: 10.1103/PhysRevLett.65p.679.
- [2] S. Davidson, S. Hannestad, G. Raffelt, J. High Energy Phys. **05**, 003 (2000). DOI: 10.1088/1126-6708/2000/05/003.
- [3] B. Holdom, Phys. Lett. B **166**(2), 196 (1986). DOI: 10.1016/0370-2693(86)91377-8.
- [4] E. Izaguirre, I. Yavin, Phys. Rev. D **92**(3), 035014 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevD.92.035014.
- [5] G. Magill, R. Plestid, M. Pospelov, Yu-Dai Tsai, Phys. Rev. Lett. **122**(7), 071801 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.071801.
- [6] R. Harnik, Zh. Liu, O. Palamara, J. High Energy Phys. **07**, 170 (2019). DOI: 10.1007/JHEP07(2019)170.
- [7] D. Gorbunov, I. Krasnov, Yu. Kudenko, S. Suvorov, Phys. Lett. B **822**, 136641 (2021). DOI: 10.1016/j.physletb.2021.136641.
- [8] S. Demidov, A. Feschenko, D. Gorbunov, et al., *Searches for new light particles at the Troitsk Meson Factory (TiMoFey)*. e-Print: 2508.01968 [hep-ph] (2025). DOI: 10.48550/arXiv.2508.01968.
- [9] S. N. Gninenko, N. V. Krasnikov, S. Kuleshov, et al., Eur. Phys. J. C **86**, 140 (2026). DOI: 10.1140/epjc/s10052-026-15307-w.
- [10] S. Alcott et al., Phys. Rev. Lett. **135**(12), 121802 (2025). DOI: 10.1103/rtp1-679h.
- [11] S. N. Gninenko, N. V. Krasnikov, A. Rubbia, Phys. Rev. D **75**(7), 075014 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevD.75.075014.
- [12] L. Singh et al. (TEXONO Collaboration), Phys. Rev. D **99**(3), 032009 (2019). DOI: 10.1103/PhysRevD.99.032009.

- [13] A. A. Aguilar-Arevalo et al., Phys. Rev. Lett. **134**(7), 071801 (2025). DOI: 10.1103/PhysRevLett.134.071801.
- [14] T. Gao, M. Pospelov, *Constraints on millicharged particles from nuclear gamma-decays*. arXiv:2507.17955 [hep-ph] (2025). DOI: 10.48550/arXiv.2507.17955.
- [15] C. A. Argüelles, K. J. Kelly, V. M. Muñoz, JHEP **11**, 099 (2021). DOI: 10.1007/JHEP11(2021)099.
- [16] J. Aalbers et al., Phys. Rev. Lett. **134**(24), 241802 (2025). DOI: 10.1103/zhs9-65ds.
- [17] J. M. Cline, Z. Liu, W. Xue, Phys. Rev. D **85**, 101302 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevD.85.101302.
- [18] Q. Li, Z. Liu, Chin. Phys. C **46**(4), 045102 (2022). DOI: 10.1088/1674-1137/ac3d2b.
- [19] J. B. Muñoz, A. Loeb, Nature **557**(7707), 684 (2018). DOI: 10.1038/s41586-018-0151-x.
- [20] X. Ning et al., Nature **618**(7963), 47 (2023). DOI: 10.1038/s41586-023-05982-0.
- [21] I. Alekseev et al., Phys. Lett. B **866**, 139575 (2025). DOI: 10.1016/j.physletb.2025.139575.
- [22] A. Abramov et al., JINST **17**(09), P09001 (2022). DOI: 10.1088/1748-0221/17/09/P09001.
- [23] D. Yu. Akimov et al., JINST **17**(11), T11011 (2022). DOI: 10.1088/1748-0221/17/11/T11011.
- [24] I. Alekseev et al., Phys. Rev. D **106**(5), L051101 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevD.106.L051101.
- [25] V. Belov et al., Chin. Phys. C **49**, 5 (2025). DOI: 10.1088/1674-1137/adb9c8.
- [26] D. Yu. Akimov et al., Phys. Rev. D **111**(7), 072012 (2025). DOI: 10.1103/PhysRevD.111.072012.
- [27] А. М. Коновалов, А. В. Лубашевский, А. В. Лукьяшин, Д. О. Саутнер, Краткие сообщения по физике ФИАН **52**(11), 46 (2025). DOI: 10.3103/S1068335625602766.
- [28] А. Д. Быстряков, Г. Д. Игнатов, А. М. Коновалов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **51**(12), 24 (2024). DOI: 10.3103/S1068335624601675.
- [29] E. Aprile et al., Noble Gas Detectors (Wiley, 2008). ISBN: 9783527405978 (Print), 9783527610020 (eBook) (2008). DOI: 10.1002/9783527610020.
- [30] D. Akimov et al., Physics **5**(2), 492 (2023). DOI: 10.3390/physics5020034.
- [31] I. Alekseev et al., JINST **11**(11), P11011 (2016). DOI: 10.1088/1748-0221/11/11/P11011.

- [32] H. Bechteler et al., Annual Report, Jul-Spez **255**, 62 (1984). ISSN 0170-8937. https://juser.fz-juelich.de/record/827248/files/J%C3%BCl_Spez_0255_Baur.pdf.
- [33] А. В. Абрамов и др. (коллорабация iDREAM), Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия **80**(2), 2520203 (2025). DOI: 10.3103/S0027134925700377.
- [34] W. Greiner, J. Reinhardt, *Quantum electrodynamics. Example 3.17*. (Springer-Verlag, 1994). eBook ISBN 978-3-642-88022-3. DOI: 10.1007/978-3-642-88022-3.
- [35] B. L. Henke, E. M. Gullikson, J. C. Davis, Atom. Data Nucl. Data Tabl. **54**(2), 181 (1993). DOI: 10.1006/adnd.1993.1013.
- [36] M. J. Berger et al., NIST Standard Reference Database 8 (XGAM). DOI: 10.18434/T48G6X. <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>.
- [37] M. Atzori Corona et al., Phys. Rev. D **107**(5), 053001 (2023). DOI: 10.1103/PhysRevD.107.053001. G. Cowan, K. Cranmer, E. Gross, O. Vitells, Eur. Phys. J. C **71**, 1554 (2011). DOI: 10.1140/epjc/s10052-011-1554-0.
- [38] D. Aristizabal Sierra, V. De Romeri, L. J. Flores, D. K. Papoulias, J. High Energy Phys. **2021**, 294 (2021). DOI: 10.1007/JHEP03(2021)294.
- [39] Byung Ju Park et al., Phys. Rev. Lett. **134**(20), 201002 (2025). DOI: 10.1103/PhysRevLett.134.201002.
- [40] M. Smirnov et al., Phys. Rev. D **104**(11), 116024 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevD.104.116024.
- [41] P. J. Bendt, E. T. Journey, *Gamma Spectra from ^{233}U , ^{235}U , and ^{239}Pu During Thermal Neutron Irradiation*, in *Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy* (Plenum Press, New York, 1979). DOI: 10.1007/978-1-4613-2940-4_40.
- [42] Ф. Я. Овчинников, В. В. Семенов, *Эксплуатационные режимы ВВЭР* (Энергоатомиздат, 1988).
- [43] N. Arefyeva et al., Phys. Rev. D **106**(3), 035029 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevD.106.035029.
- [44] W. W. M. Allison, J. H. Cobb, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **30**, 253 (1980). DOI: 10.1146/annurev.ns.30.120180.001345.

Поступила в редакцию 7 апреля 2026 г.

После доработки 13 апреля 2026 г.

Принята к публикации 14 апреля 2026 г.