

О ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ СКОРОСТИ СЧЕТА СКРЫТЫХ ФОТОНОВ С ПОМОЩЬЮ МУЛЬТИКАТОДНЫХ СЧЕТЧИКОВ

*А. В. Копылов**, *И. В. Орехов*, *В. В. Петухов*

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Рассмотрена возможность наблюдения суточных вариаций скорости счета скрытых фотонов с использованием мультикатодных счетчиков. Показано, что, располагая детекторы в трех шахтах на разных географических широтах (Пюхасалми, Финляндия; БНО, Россия; ИНО, Индия) и проводя измерения с тремя различными ориентациями детекторов, можно получить достаточно полный ряд данных, чтобы определить направление вектора поля скрытых фотонов. Приводятся результаты измерений, полученные в настоящее время с помощью разработанных нами счетчиков.

The possibility to observe diurnal variations in the count rate of dark photons using the multicathode counters is investigated. We show that placing detectors at three different mines at different latitudes (Pyhäsalmi in Finland, Baksan in Russia, and INO in India) and conducting the measurements with three different orientations of detectors, one can obtain quite a complete series of data to determine the direction of the dark photon field. We present the results of the measurements fulfilled by the presently developed counters.

PACS: 14.70.Bh; 14.80.-j; 95.35.+d

ВВЕДЕНИЕ

Природа темной материи — это до сих пор неразгаданная загадка для современной физики. Согласно данным астрофизических наблюдений, ее масса более чем в пять раз превышает массу видимой материи, и тем не менее до сих пор не получены надежные экспериментальные данные относительно ее природы, которые были бы подтверждены в независимом эксперименте. Благодаря своей массе темная материя влияет на движение звезд, но до сих

*E-mail: beril@inr.ru

пор она не была зарегистрирована физическими приборами, несмотря на колоссальные усилия, предпринимаемые исследователями для решения этой задачи. В настоящее время основные работы сосредоточены на поиске массивных слабовазаимодействующих частиц (WIMP), которые в результате упругого рассеяния на ядрах должны оставить след от ионизации в рабочем веществе детектора. Наиболее продвинутыми среди них являются эксперименты с жидкими инертными газами [1–3]. Прогресс, достигнутый в этих экспериментах, настолько значителен, что верхний предел близок к ожидаемому эффекту от солнечных нейтрино (дно от нейтрино), что ставит естественный предел для этого метода. В этих условиях делаются попытки расширить географию поиска. Среди множества предлагаемых вариантов возможными кандидатами на темную материю также являются скрытые фотоны, которые впервые были рассмотрены Л.Б. Окунем в 1982 г. [4]. Осцилляции скрытых фотонов в обычные фотоны за счет кинетического смешивания [5] делают возможным их регистрацию. Поиск скрытых фотонов был предпринят в ряде работ, например в [6], в том числе на ускорителях [7]. В работе [8] предложен новый метод поиска скрытых фотонов с помощью параболической антенны, который имеет естественное ограничение сверху за счет поглощения ультрафиолетового излучения материалом антенны. В качестве дальнейшего развития этого метода в область более высоких энергий нами было предложено использовать фотоэффект от поглощения фотона с испусканием электрона. В данном случае вместо антенны применяется газовый пропорциональный счетчик с высоким коэффициентом газового усиления ($> 10^5$) [9], который регистрирует одиночные электроны, испускаемые с поверхности катода. В таком детекторе мишенью являются свободные электроны вырожденного электронного газа металла, а эффект пропорционален площади катода. Поскольку в этом случае регистрируются электроны эмиссии, данный метод чувствителен при энергии фотонов выше работы выхода материала, из которого изготовлен катод. По этой причине данный метод дополняет метод параболических антенн расширением в более высокую область энергии, т. е. выше примерно 4 эВ. В этой области энергии существуют довольно жесткие ограничения, полученные с помощью детекторов, где чувствительной средой является определенный объем вещества мишени, например, в работах [10, 11]. Но там, в отличие от нашего детектора, мишенью являются валентные электроны атомов рабочего вещества. Поскольку строгой теории скрытых фотонов пока не существует, физика этих двух процессов может значительно отличаться. Согласно данным работы [8], усредненная по времени мощность, поглощаемая антенной (в нашем случае — катодом счетчика), описывается выражением

$$P = 2\alpha^2 \chi^2 \rho_{\text{CDM}} A_{\text{cath}}, \quad (1)$$

где $\alpha^2 = \langle \cos^2 \theta \rangle$, θ — угол между вектором поля скрытых фотонов и нормалью к поверхности катода (скобки означают усреднение по плотности

скрытых фотонов и площади поверхности катода счетчика); ρ_{CDM} — локальная плотность темной материи; A_{cath} — площадь катода счетчика; χ — параметр кинетического смешивания, который определяет «примесь» реальных фотонов в поле скрытых фотонов и входит в лагранжиан:

$$L = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}F'_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} - \frac{\chi}{2}F_{\mu\nu}F'^{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2}A'_\mu A'^\mu, \quad (2)$$

где A_μ и A'_μ — поля фотона и скрытого фотона; $F_{\mu\nu}$ и $F'_{\mu\nu}$ — соответственно тензоры напряженности поля; $m_{\gamma'}$ — масса скрытого фотона.

Как видно из выражения (1), ожидаемый эффект в нашем детекторе пропорционален площади катода. Цилиндрическая форма катода счетчика обеспечивает его способность различать направление в случае, если поле скрытых фотонов не изотропно. Например, если поле направлено вдоль оси катода счетчика, $\langle \cos^2 \theta \rangle = 0$ и ожидаемый эффект равен нулю. Наибольшее значение эффекта будет в том случае, когда направление поля скрытых фотонов перпендикулярно оси катода и $\langle \cos^2 \theta \rangle = 1/2$. Поверхность катода при этом должна быть достаточно гладкой — зеркальной, чтобы микронеровности не приводили к нарушению этого равенства. Проверку качества зеркальной поверхности планируется проводить по методике, изложенной в работе [12]. Поверхность считается зеркальной, если интенсивность диффузного отражения составляет не более нескольких процентов от интенсивности зеркального отражения. Счетчик в этом случае обладает направленностью, т. е. может работать как телескоп. Это обстоятельство можно использовать для получения доказательной базы регистрации скрытых фотонов, как будет показано далее.

Структура данной работы следующая: сначала мы приводим описание детектора и формулируем требования к ним для успешного проведения такого эксперимента, затем подробно рассматриваем возможности постановки эксперимента с такими детекторами в трех шахтах (Пюхасалми в Финляндии, Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) в России и Индийской нейтринной обсерватории (ИНО) в Индии) на разных географических широтах и с разной ориентацией счетчиков. В заключении сформулированы выводы.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И РАБОТЫ МУЛЬТИКАТОДНОГО СЧЕТЧИКА

В настоящее время в Институте ядерных исследований РАН (Троицк, Москва) проводится эксперимент PHELEX (PHoton–ELectron EXperiment) по поиску скрытых фотонов с помощью мультикатодного счетчика. Подробное описание конструкции и методы обработки данных приведены в работе [9]. Здесь представлено краткое изложение, необходимое для понимания дальнейшего текста. Метод основан на регистрации одиночных электронов, испускаемых с поверхности катода при конверсии скрытого фотона. В этом

случае мощность, поглощаемая катодом, может быть найдена по скорости счета одиночных электронов, эмитируемых катодом:

$$P = m_{\gamma'} R_{\text{МСС}} / \eta. \quad (3)$$

Здесь $m_{\gamma'}$ — масса скрытого фотона; $R_{\text{МСС}}$ — скорость счета одиночных электронов; η — квантовая эффективность испускания одиночного электрона, которая принимается равной квантовой эффективности для реального фотона с энергией $E_{\gamma} = m_{\gamma'}$. Данные по квантовой эффективности взяты из работы [10]. Как и в [11, 13–16], ввиду отсутствия других данных мы рассматриваем предельный случай, когда вся плотность энергии темной материи обусловлена скрытыми фотонами, поэтому мощности, определяемые выражениями (1) и (3), должны быть равны. Объединяя (1) и (3), получаем выражение для чувствительности метода:

$$\chi = 2,9 \cdot 10^{-12} \left(\frac{R_{\text{МСС}}}{\eta \cdot 1 \text{ Гц}} \right)^{1/2} \left(\frac{m_{\gamma'}}{1 \text{ эВ}} \right)^{1/2} \left(\frac{0,3 \text{ ГэВ/см}^3}{\rho_{\text{CDM}}} \right)^{1/2} \times \\ \times \left(\frac{1 \text{ м}^2}{A_{\text{cath}}} \right)^{1/2} \left(\frac{\sqrt{2/3}}{\alpha} \right). \quad (4)$$

Как видно из выражения (4), чувствительность этого метода определяется фоновой скоростью счета, которая может быть весьма значительной за счет краевых эффектов, эмиссии электронов от химических примесей на внутренней поверхности детектора и пр. Для вычитания фоновой скорости из суммарной скорости счета нами был разработан счетчик специальной конструкции. В непосредственной близости (на расстоянии примерно 5 мм) от сплошного металлического катода диаметром 192 мм и длиной 495 мм был размещен второй катод в виде ряда натянутых нитей из нихрома с зазором между ними 4,5 мм. На катод из нитей подавался поочередно потенциал выше (конфигурация 1) и ниже (конфигурация 2) потенциала сплошного катода. В первом случае электроны, эмитируемые из сплошного катода, могли свободно дрейфовать в газе по направлению к аноду, во втором — электроны отталкивались этим (запирающим) потенциалом назад к сплошному катоду.

Измерения проводились поочередно в этих двух конфигурациях, причем во второй конфигурации измерялась только фоновая скорость, поскольку электроны, эмитируемые из катода, не достигали анода, а геометрия в обоих случаях была почти одинакова. Величина эффекта находилась как разность измеренных скоростей счета в первой и второй конфигурациях. На рис. 1 представлен счетчик в процессе сборки, на рис. 2 — упрощенная схема детектора со счетным каналом в составе преусилителя и платы АЦП.

Внутри счетчика на расстоянии 40 мм от анодной нити располагался третий катод из нихромовых нитей диаметром 50 мкм, образующий (вместе

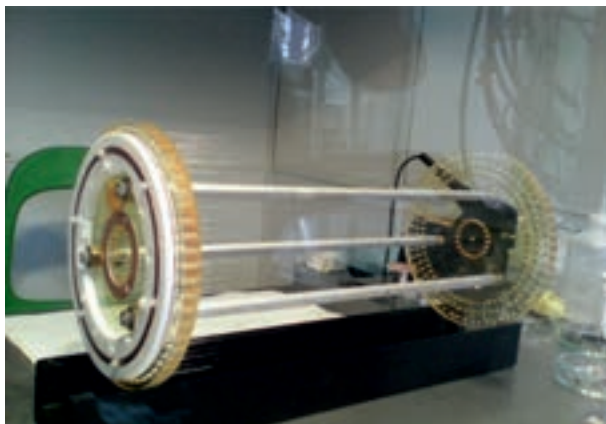


Рис. 1. Счетчик в процессе сборки

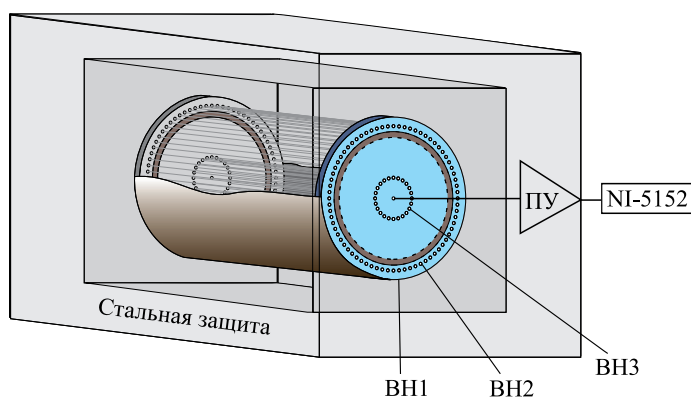


Рис. 2. Схема мультикатодного счетчика: ВН1, ВН2, ВН3 — высокое напряжение на катодах 1, 2 и 3; ПУ — предусилитель; NI-5152 — плата АЦП 8 бит

с анодной нитью диаметром 25 мкм) внутренний пропорциональный счетчик. Напряжение ВН3 выбиралось таким, чтобы обеспечить высокий коэффициент газового усиления ($> 10^5$). Электроны, испускаемые с поверхности первого (сплошного) катода, дрейфовали по направлению к внутреннему счетчику, образуя лавину вблизи анода, и затем регистрировались с помощью зарядочувствительного предусилителя. Амплитуда импульса получалась пропорциональной собранному заряду на нити, форма импульса записывалась с помощью платы 8-битного АЦП NI-5152 с частотой 10 МГц в интервале ± 50 мВ и шагом оцифровки около 400 мкВ. Анализировались только те ин-

тервалы времени, когда «нулевая» линия не выходила за пределы ± 2 мВ, при этом учитывалось только «живое» время счетчика. Измерения проводились круглосуточно: сериями по 12 ч — дневное и ночное. Данные каждой серии обрабатывались в режиме офлайн с целью отбора полезных событий и дискриминации фоновых [9], и в результате мы получали одну точку измерений (рис. 3). Калибровка счетчика выполнялась с помощью УФ-излучения ртутной лампы через кварцевое окно в стенке счетчика, при этом записывался спектр одноэлектронных импульсов в обеих конфигурациях. Для защиты от окружающего гамма-излучения детектор был помещен в стальной бокс с толщиной стенки примерно 300 мм.

Установка была расположена на первом этаже здания (Троицк, Москва). Толщина стальной защиты 300 мм обеспечивает ослабление линии 1460,7 кэВ от ^{40}K примерно в $5 \cdot 10^3$ раз, линии 1764,5 кэВ от ^{214}Bi — примерно в $3 \cdot 10^3$ раз, линии 2614,5 кэВ от ^{208}Tl — примерно в 10^3 раз. Однако эффективный коэффициент ослабления фона от внешнего гамма-излучения намного меньше. Фон определяется главным образом интенсивностью вблизи максимума спектра гамма-излучения при энергии примерно от 100 до 200 кэВ. Нами был измерен спектр гамма-излучения снаружи и внутри пассивной защиты с помощью низкофоновый детектор NaI(Tl). Полученные данные показали, что в этой области энергии интенсивность гамма-излучения ослаблялась защитой примерно в 100 раз.

На рис. 3 приведены результаты измерений, выполненных с использованием счетчика с алюминиевым катодом и фокусирующими кольцами по тор-

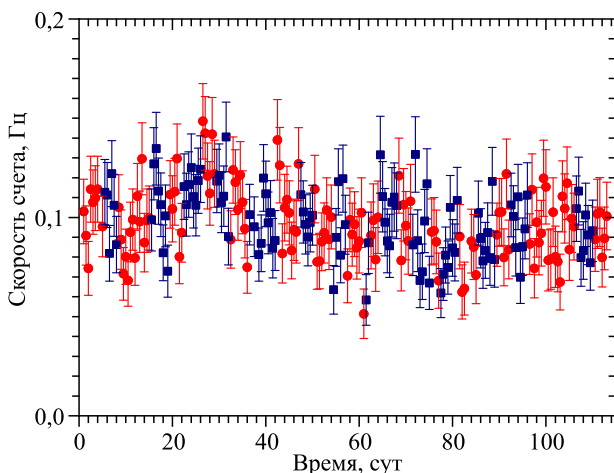


Рис. 3. Скорости счета, измеренные в конфигурациях 1 (кружки) и 2 (квадраты). Температура счетчика изменялась в диапазоне от 5 до 15 °С

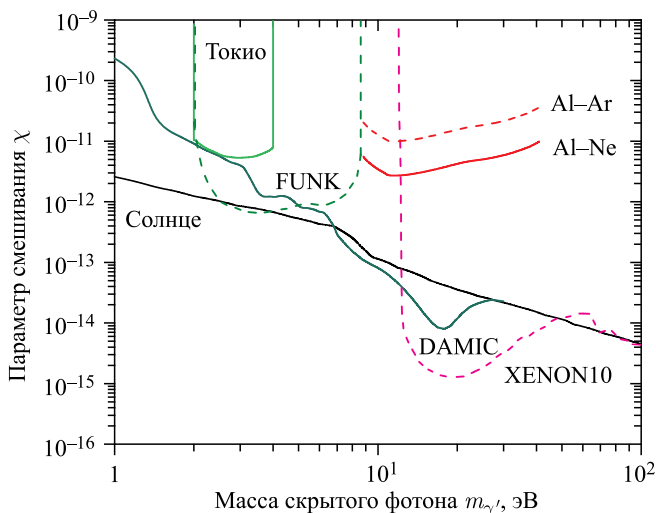


Рис. 4. Верхний предел, полученный в серии измерений Al–Ar [15] со смесью Ar + CH₄ (10%) и Al–Ne со смесью Ne + CH₄ (10%). Здесь ограничения Токио приведены из [14], FUNK — из [16], XENON10 — из [11] и DAMIC — из [13]. Все данные представлены на уровне достоверности 90%, кроме FUNK и Al–Ar, Al–Ne, которые на уровне достоверности 95%

цам счетчика (для уменьшения краевого эффекта, вызванного траекториями мюонов с обрезанием на торцах счетчика).

Вычитанием скоростей счета, полученных в конфигурациях 1 и 2, мы определили наименьшую измеренную на настоящее время скорость счета одиночных электронов: $r_{\text{MCC}} = R_{\text{MCC}}/A_{\text{cath}} = (0,33 \pm 0,7) \cdot 10^{-6}$ Гц/см². Это существенно ниже, чем темновой ток таких приборов, как ФЭУ, ВЭУ, что говорит о преимуществе данного детектора. Подставляя R_{MCC} в выражение (4), находим верхнее ограничение на константу χ . На рис.4 приведено соответствующее ограничение наряду с верхним пределом, полученным в более ранних измерениях со смесью Ar + CH₄ (10%).

Как видно из рис. 4, верхний предел ограничения, найденного в этой работе, находится в области, закрытой данными из солнечной эволюции. Но следует отметить, что эти данные получены для солнечной плазмы с колоссальными плотностями и температурами, которые недостижимы в настоящее время в лаборатории. Поэтому физика процессов здесь может отличаться в деталях, которые могут оказаться весьма существенными. Для этой области масс есть также более сильные ограничения, полученные в экспериментах, где рабочей средой является не поверхность, а объем рабочего вещества. В этих детекторах мишенью являются валентные электроны, в то время как в нашем случае мишенью являются свободные электроны вырожденного электронного

газа металла. Для дальнейшего снижения скорости счета необходимо вычитать эффект, производимый мюонами, которым на этом уровне измерений уже нельзя пренебречь, либо проводить измерения на больших глубинах, где поток мюонов пренебрежимо мал. Планируется также обеспечить более высокую чистоту конструкционных материалов счетчика и окружающих материалов по радиоактивным примесям и охлаждать детектор с целью снижения темнового тока от термоэмиссии примесей на поверхности нитей. Для успеха такого эксперимента необходимо, чтобы счетная система позволяла накапливать информацию по нескольким каналам счета с записью формы каждого импульса круглосуточно в режиме онлайн. Обработку данных можно производить в режиме офлайн. Решение этих вопросов позволит существенно повысить чувствительность метода и приступить к эксперименту, изложенному ниже.

СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ОТ СКРЫТЫХ ФОТОНОВ В ШАХТАХ ПЮХАСАЛМИ (ФИНЛЯНДИЯ), БНО (РОССИЯ) И ИНО (ИНДИЯ)

В экспериментах с параболической антенной [13, 15], а также в измерениях Al–Ag [14] и Al–Ne направление поля фотонов предполагалось изотропным, и в этом случае принималось, что $\alpha^2 = \langle \cos^2 \theta \rangle = 2/3$. В случае, если поле скрытых фотонов имеет определенную направленность, становится возможным наблюдение суточных вариаций скорости счета в детекторе, обусловленных изменением величины $\alpha^2 = \langle \cos^2 \theta \rangle$ на протяжении суток за счет вращения Земли. Для регистрации этого эффекта удобно иметь три совершенно одинаковых счетчика, расположенных перпендикулярно относительно друг друга: один счетчик — вертикально, второй — вдоль параллели и третий — вдоль меридиана. Поскольку угол η между вектором поля темного фотона и осью счетчика при этом будет зависеть также от широты расположения детектора, представляется целесообразным выбрать для этого три шахты: на высоких, средних и низких широтах. В качестве первой вполне подходит шахта Пюхасалми (Финляндия) на широте 64° , в качестве второй — БНО (Россия) на широте 43° и в качестве третьей — ИНО (Индия) на широте 10° . На рис. 5 (левая, центральная и правая колонки) приведены усредненные за 1 ч величины α^2 для каждой из этих шахт при трех различных ориентациях детекторов. Мы видим, что временной ход имеет весьма характерный вид на протяжении суток, отличающийся при разных счетчиках и разных направлениях поля скрытых фотонов относительно земной оси и разных широтах. Обнаруженные различия можно использовать в предлагаемом эксперименте как доказательную базу, подтверждающую сам факт существования направ-

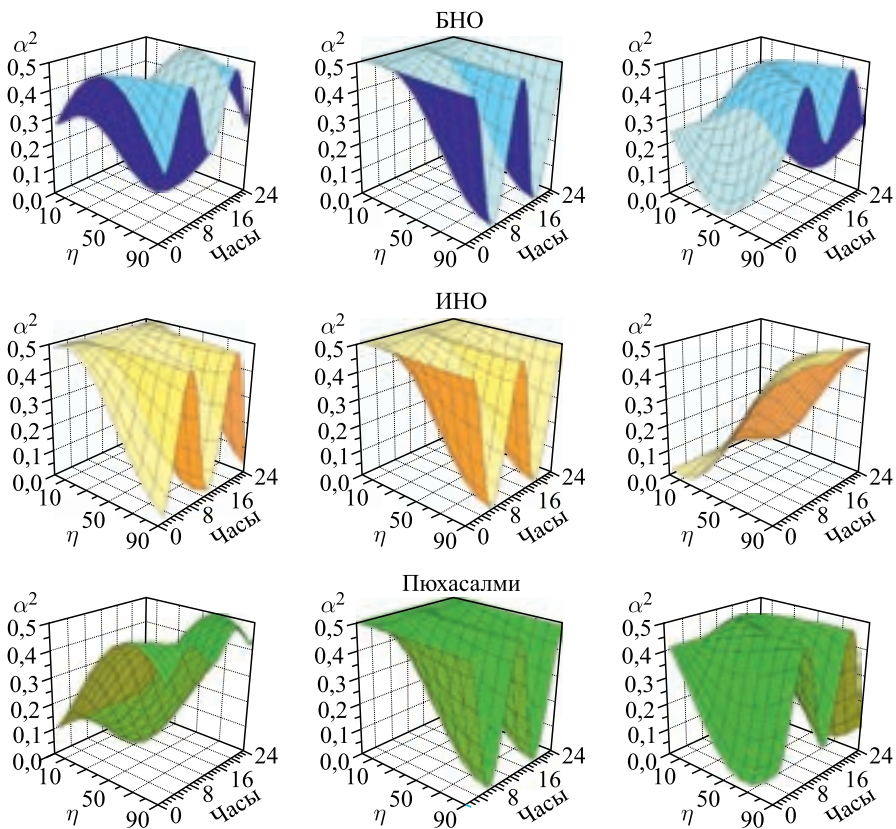


Рис. 5. Усредненная за 1 ч величина $\alpha^2 = \langle \cos^2 \theta \rangle$ в зависимости от направления поля скрытого фотона (угол η , градусы) при трех ориентациях счетчика: левая колонка — ось счетчика расположена вертикально, центральная — вдоль параллели, правая — вдоль меридиана

ленного поля скрытых фотонов. Сезонные вариации в данном случае не предполагаются. Более долговременные вариации скорости счета возможны только в случае, если направленность поля темных фотонов или плотность их энергии изменятся на траектории движения Солнца вокруг центра Галактики.

Здесь также следует учитывать разницу во времени из-за разной географической долготы местоположения этих шахт. Для каждой шахты мы выбрали фазу так, что ноль часов соответствует времени, когда вектор поля скрытых фотонов лежит в плоскости соответствующего меридиана. Абсолютное же направление вектора поля скрытых фотонов может быть зафиксировано

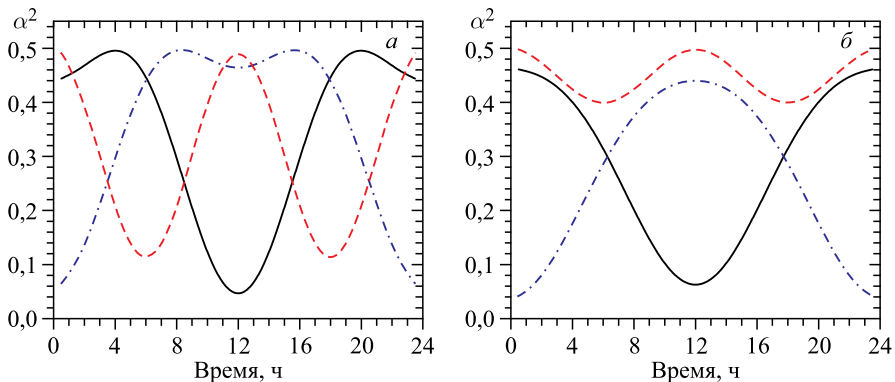


Рис. 6. Усредненная за 1 ч величина $\alpha^2 = \langle \cos^2 \theta \rangle$ в зависимости от направления поля скрытого фотона при трех ориентациях счетчика на БНО (Россия): сплошная линия — ось счетчика расположена вертикально; штриховая — вдоль параллели, штрихпунктирная — вдоль меридиана. Рис. *a* — угол 63° , рис. *б* — 27°

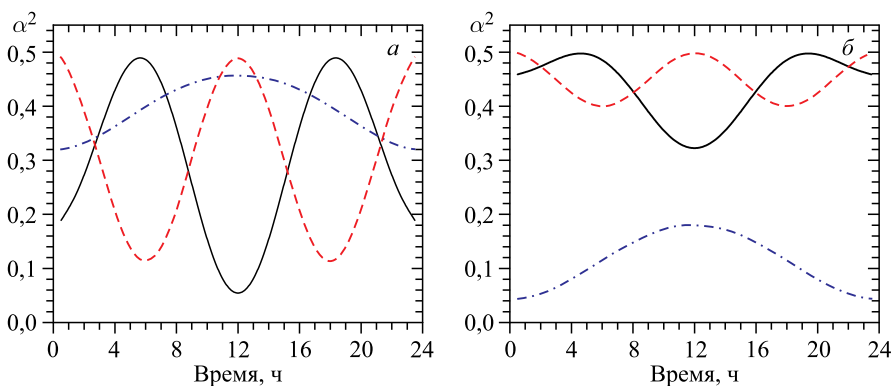


Рис. 7. То же, что и на рис. 6, но для счетчиков в шахте ИНО (Индия)

абсолютной фазой временного хода событий, полученной по совокупности данных измерений на всех девяти детекторах.

На рис. 6–8 видна сильная зависимость временного хода величины α^2 от угла между направлением поля скрытых фотонов и осью Земли. Для каждой широты приводятся соответствующие кривые для угла 63° , что при некоторой фазе соответствует направлению поля фотонов к полюсу Галактики, и для угла 27° , что при некоторой фазе соответствует направлению поля в плоскости диска Галактики вблизи Солнечной системы. Видно существенное различие

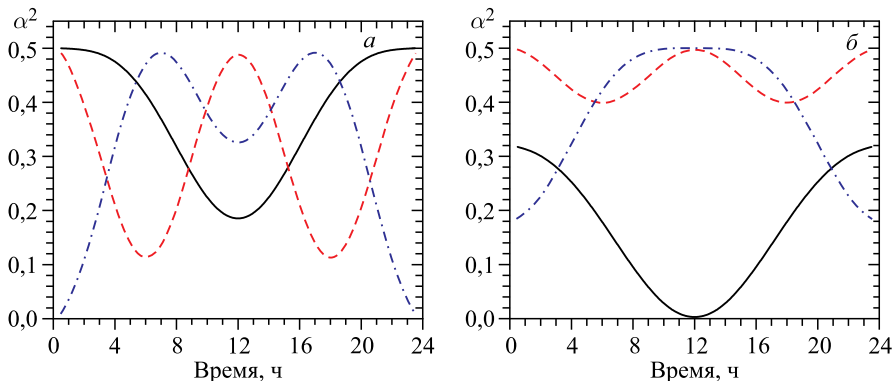


Рис. 8. То же, что и на рис. 6, но для счетчиков в шахте Пюхасалми (Финляндия)

временного хода в обоих случаях по совокупности данных с трех детекторов на каждой широте, что позволит при достаточно большой набранной статистике определить абсолютную фазу суточного хода и тем самым определить направление вектора поля скрытых фотонов.

Здесь важно то, что для получения результата не требуется прецизионного измерения абсолютной величины эффекта, достаточно определить, как эффект изменяется на протяжении суток. Это тем более важно, потому что в экспериментах по поиску скрытых фотонов, как правило, очень трудно доказать, что первичная ионизация, созданная скрытым фотоном, не теряется частично с момента ее рождения до момента ее регистрации. В данном случае мы обходим эту проблему. Как видно из приведенных рисунков, при заданном угле между вектором поля скрытых фотонов и осью вращения Земли временной ход для счетчика, расположенного вдоль параллели, не зависит от географической широты расположения детектора. Это обстоятельство может быть использовано для контрольного измерения на всех трех широтах.

Представляется целесообразным также использовать еще один счетчик с более шероховатой (матовой) поверхностью катода для проведения контрольного измерения. Необходимость этого диктуется тем, что для обеспечения способности счетчика выделять направление поверхность катода счетчика должна быть отполирована до уровня, гарантирующего зеркальное отражение потока фотонов. Счетчик с матовым катодом не имеет такой способности, и в этом случае мы должны получить другую временную картину. В качестве материала катода представляется наиболее целесообразным использовать медь с гарантированно низким содержанием радиоактивных примесей, покрытую слоем алюминия, хрома или никеля в качестве зеркального покрытия. Для матовой поверхности катода можно тот же металл напылить на медь. Работа выхода для алюминия — 4,2 эВ, для хрома — 4,6 эВ и для никеля —

4,91–5,01 эВ. Соответственно, у этих металлов разный порог фотоэмиссии электрона с поверхности металла, что также может быть использовано в данном эксперименте. Корпус счетчика представляется целесообразным изготовить из титана. Этот металл достаточно технологичен и к тому же содержит довольно низкую концентрацию радиоактивных примесей, как это показали наши предыдущие измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена возможность проведения эксперимента по поиску скрытых фотонов с тремя мультикатодными счетчиками с ортогональной ориентацией на трех разных широтах в трех шахтах: в БНО (Российская Федерация), Пюхасалми (Финляндия) и ИНО (Индия). Проведение измерений на разных широтах в случае наблюдения разного временного хода скоростей счета позволит получить независимое подтверждение результатов тремя независимыми экспериментами. Важно, что здесь не требуется прецизионного измерения абсолютной величины эффекта, достаточно измерить его временной ход. Показано также, что в случае, если поле скрытых фотонов имеет выделенное направление, его вектор может быть восстановлен по временному ходу и абсолютной фазе, полученным в результате этих экспериментов. Обсуждаются требования к счетчикам и счетным системам для успешного проведения эксперимента.

Работа была выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований ИЯИ РАН. Авторы выражают признательность Г. И. Рубцову за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aprile E. et al. (XENON Collab.)*. Dark Matter Search Results from a One Ton-Year Exposure of XENON1T // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 121. P. 111302.
2. *Akerib D. S. et al. (LUX Collab.)*. Results from a Search for Dark Matter in the Complete LUX Exposure // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 118. P. 021303.
3. *Agnes P. et al. (DarkSide Collab.)*. DarkSide-50 532-Day Dark Matter Search with Low-Radioactivity Argon // *Phys. Rev. D.* 2018. V. 98. P. 102006.
4. *Okun L. B.* Limits on Electrodynamics: Paraphotons? // *JETP.* 1982. V. 56. P. 502.
5. *Holdom B.* Two $U(1)$'s and ϵ Charge Shifts // *Phys. Lett. B.* 1986. V. 166. P. 196.
6. *Gninenko S. N.* Search for MeV Dark Photons in a Light-Shining-through-Walls Experiment at CERN // *Phys. Rev. D.* 2014. V. 89. P. 075008.
7. *Banerjee D. et al. (NA64 Collab.)*. Improved Limits on a Hypothetical $X(16.7)$ Boson and a Dark Photon Decaying into e^+e^- Pairs // *Phys. Rev. D.* 2020. V. 101. P. 071101(R).

8. *Horns D., Jaeckel J., Lindner A., Lobanov A., Redondo J., Ringwald A.* Searching for WISPy Cold Dark Matter with a Dish Antenna // JCAP. 2013. V. 04. P. 016.
9. *Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V.* A Multi-Cathode Counter in a Single-Electron Counting Mode // Nucl. Instr. Meth. A. 2018. V. 910. P. 164;
Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V. Method of Search for Hidden Photons of Cold Dark Matter Using a Multi-Cathode Counter // Phys. Atom. Nucl. 2019. V. 82. P. 1317.
10. *Cairns R. B., Samson J. A. R.* Metal Photocathodes as Secondary Standards for Absolute Intensity Measurements in the Vacuum Ultraviolet // J. Opt. Soc. Am. 1966. V. 56. P. 1568.
11. *Bloch I. M., Essig R., Tobioka K., Volansky T., Yu Tien-Tien.* Searching for Dark Absorption with Direct Detection Experiments // JHEP. 2017. V. 06. P. 87.
12. *Stover J. C.* Optical Scattering: Measurement and Analysis. 2nd ed. SPIE Press, 1995.
13. *Settimo M. (DAMIC and DAMIC-M Collabs.).* Search for Low-Mass Dark Matter with the DAMIC Experiment. arXiv:2003.09497.
14. *Suzuki J., Horie T., Inoue Y., Minowa M.* Experimental Search for Hidden Photon CDM in the eV Mass Range with a Dish Antenna // JCAP. 2015. V. 09. P. 042.
15. *Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V.* Results from a Hidden Photon Dark Matter Search Using a Multi-Cathode Counter // JCAP. 2019. V. 07. P. 008.
16. *Andrianavalomahefa A. et al. (FUNK Experiment Collab.).* Limits from the FUNK Experiment on the Mixing Strength of Hidden-Photon Dark Matter in the Visible and Near-Ultraviolet Wavelength Range. arXiv:2003.13144.