

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.2

КОНСТРУКЦИЯ МУЛЬТИКАТОДНОГО СЧЕТЧИКА ДЛЯ ПОИСКА ТЕМНЫХ ФОТОНОВ

©2024 г. А. В. Копылов^{а,*}, И. В. Орехов^а, В. В. Петухов^а, А. Е. Соломатин^а

^аИнститут ядерных исследований Российской академии наук

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7А

*e-mail: kopylov@inr.ru

Поступила в редакцию 22.07.2024 г.

После доработки 19.08.2024 г.

Принята к публикации 25.09.2024 г.

Мультикатодный счетчик разработан для поиска холодной темной материи, предположительно состоящей из скрытых фотонов, путем регистрации одиночных электронов, эмитируемым с поверхности металлического катода счетчика в результате конверсии скрытых фотонов на его поверхности. Конструкция счетчика позволяет эффективно отделить фон от окружающей радиоактивности и от термоэмиссии электронов с поверхности нитей катодов путем вычитания скорости счета, измеренной в конфигурации с запирающим потенциалом. Дается подробное описание конструкции мультикатодного счетчика.

1. ВВЕДЕНИЕ

Природа темной материи является интригующей загадкой современности. Интрига заключается в том, что по массе – это основной компонент материи, заполняющей Вселенную, ее масса примерно в пять раз превышает массу видимой материи, но, несмотря на это, до сих пор не выяснено, из чего состоит темная материя. Предприняты значительные экспериментальные усилия для раскрытия природы темной материи, созданы установки с массой несколько тонн, но ответ на этот вопрос все еще не получен. В этой связи предлагается расширить географию поиска, в том числе путем включения в программу поиска новых частиц, например скрытых фотонов, предложенных еще в 80-х годах прошлого столетия [1–3]. Для поиска темных фотонов мы предложили использовать метод регистрации одиночных электронов, эмитируемых с поверхности металлического катода пропорционального счетчика при конверсии скрытого фотона с энергией (массой) больше работы выхода электронов из металла, которая для большинства металлов составляет величину примерно 4 эВ. При этом сами темные фотоны в ряде работ [4, 5] рассматриваются в виде трубчатых структур с электрическим и магнитным полем сложной конфигурации. Для

регистрации одиночных электронов, эмитируемых с поверхности металла при конверсии темных фотонов, мы разработали специальную конструкцию газового пропорционального счетчика с тремя катодами. Предлагаемый нами метод обладает высокой чувствительностью для массы скрытых фотонов от 10 до 40 эВ. Здесь приводится подробное описание этой конструкции мультикатодного счетчика и обобщен опыт, приобретенный нами в течение последних 8 лет проведенных с помощью этого счетчика исследований.

Согласно [6], если темная материя состоит из скрытых фотонов, мощность, поглощаемая катодом при конверсии скрытых фотонов, описывается выражением

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

Здесь $\alpha^2 = \cos^2 \theta$, где θ – угол между вектором электрического поля \mathbf{E} скрытого фотона и нормалью к поверхности; $\alpha^2 = 2/3$, если направление распространения изотропно; χ – константа кинетического смешивания, квадрат этой величины определяет величину примеси обычных фотонов в амплитуде скрытого фотона; ρ_{CDM} – плотность энергии холодной темной материи, которая здесь принималась равной 0.4 ГэВ/см^3 ; A_{cath} – площадь катода. Если энергия (масса) скрытого фотона превышает работу выхода электронов из металла катода, конверсия скрытого фотона будет вызывать эмиссию одиночного электрона с определенной квантовой эффективностью η . В этом случае мощность, поглощаемая катодом, может быть найдена по скорости счета одиночных электронов, эмитируемых катодом:

$$P = m_{\gamma'} R_{MCC} / \eta. \quad (2)$$

Здесь $m_{\gamma'}$ – масса (энергия) скрытого фотона; R_{MCC} – скорость счета одиночных электронов, здесь принимается, что эта скорость определяется исключительно конверсией скрытых фотонов в обычный фотон с последующим испусканием электрона; η – квантовая эффективность для процесса испускания одиночного электрона, которая здесь принимается равной квантовой эффективности для реального фотона с энергией $m_{\gamma'}$. Объединяя выражения (1) и (2), получаем

$$\chi_{sens} = 2.9 \cdot 10^{-12} \left(\frac{R_{MCC}}{\eta \cdot 1 \text{ Гц}} \right)^{1/2} \left(\frac{m_{\gamma'}}{1 \text{ эВ}} \right)^{1/2} \left(\frac{0.3 \text{ ГэВ/см}^3}{\rho_{CDM}} \right)^{1/2} \left(\frac{1 \text{ м}^2}{A_{MCC}} \right)^{1/2} \left(\frac{\sqrt{2/3}}{\alpha} \right). \quad (3)$$

Из этого выражения следует, что основным ограничением метода является фоновая скорость счета одиночных электронов, которая для стандартных детекторов фотонов, таких как ФЭУ, ВЭУ, счетчиков фотонов на основе газовых электронных умножителей составляет довольно значительную величину, порядка 10^{-1} Гц/см^2 и выше. В разработанном нами методе измерения с помощью специального детектора – мультикатодного счетчика – фоновая скорость счета одиночных электронов по результатам проведенных нами измерений [7–9] составила величину меньше 10^{-4} Гц/см^2 для счетчика с медным катодом и меньше 10^{-5} Гц/см^2

для счетчика с алюминиевым катодом. Поскольку квантовая эффективность металлов, используемых нами для сплошного катода счетчика, максимальна в диапазоне от 10 до 40 эВ, предложенный нами метод поиска темных фотонов обладает наиболее высокой чувствительностью для массы скрытого фотона в этом диапазоне. При этом расчетная плотность частиц темных фотонов составляет от 10 до 40 миллионов частиц на кубический сантиметр, если исходить из принятой нами величины $\rho_{CDM} = 0.4 \text{ ГэВ/см}^3$. Для сравнения плотность реликтовых нейтрино и плотность реликтовых фотонов составляют соответственно примерно 150 н и 500 частиц на кубический сантиметр.

2. КОНСТРУКЦИЯ МУЛЬТИКАТОДНОГО СЧЕТЧИКА

На рис.1 представлен мультикатодный счетчик. За основу конструкции был взят пропорциональный счетчик с газовым наполнением. В качестве рабочего газа в нем использовались смеси $\text{Ar} + 10\% \text{ CH}_4$ и $\text{Ne} + 10\% \text{ CH}_4$. В отличие от обычного пропорционального счетчика он имеет не один, а три катода. Принципиальная схема мультикатодного счетчика была нами представлена в работе [7]. Получены верхние ограничения на константу кинетического смешивания для массы темных фотонов от 10 до 40 эВ [8]. Здесь мы приводим более подробное описание устройства, опираясь на опыт работы и результаты проведенных нами исследований. Внешний катод 4 в виде сплошного металлического цилиндра является источником одиночных электронов, которые предположительно эмитируются с поверхности катода при конверсии скрытых фотонов. Как следует из выражения (3), чем больше поверхность этого катода, тем выше чувствительность детектора. В разных счетчиках мы использовали металлический катод диаметром от 140 до 200 мм и длиной примерно 500 мм, при этом площадь катода составляла от 0.2 м^2 до 0.3 м^2 .

Рис. 1. Изображение мультикатодного счетчика.

Электроны, эмитируемые с внешнего катода, дрейфуют по направлению к центральному счетчику, где образуют электронные лавины вблизи поверхности анода 5. Анод изготовлен из позолоченной нити сплава вольфрам-рений диаметром 25 мкм. Для регистрации одиночных электронов необходим большой (более 10^5) коэффициент газового усиления, следовательно, большой градиент поля вблизи анода. Для обеспечения требуемого градиента поля первый катод 6 центрального счетчика имеет сравнительно небольшой (около 40 мм) диаметр. Этот катод выполнен из нихромовых нитей диаметром 50 мкм, натянутых на расстоянии примерно 6.5 мм друг от друга по окружности вокруг анода. На расстоянии порядка 5 мм от внешнего катода находится второй катод 7, изготовленный также из нихромовых нитей диаметром 50 мкм, натянутых на расстоянии порядка 4.8 мм

друг от друга по окружности вблизи внешнего катода. Расстояние между нитями было выбрано в основном из технологических соображений. При этом результаты калибровки счетчика показали, что неоднородность поля при этом не повлияла заметно на характеристики детектора. Вид на внутренние элементы счетчика с торца представлен на рис. 2.

Рис. 2. Вид на внутренние элементы счетчика с торца.

Сборка счетчика была нетривиальной задачей, в основном из-за сложности мультикатодной конструкции. Для натяжения коаксиальной системы проволочных электродов (нитей) использовалась специальная оснастка с тремя направляющими штангами, как это изображено на рис. 3. По завершению натяжения нитей вся система помещалась внутрь внешнего металлического катода, торцевые изолирующие диски из акрилового стекла закреплялись на торцах металлического катода и направляющие штанги удалялись. Для уменьшения краевого эффекта с внутренней стороны акриловых дисков размещались кольцевые фокусирующие электроды, на которые подавался потенциал второго катода.

Рис. 3. Мультикатодная система с оснасткой.

Счетчик работает в двух конфигурациях, различающихся разностью потенциалов между вторым и внешним катодами, как это показано на рис. 4.

Рис. 4. Потенциалы в конфигурациях 1 и 2.

В конфигурации 1 потенциал на внешнем катоде ниже потенциала на втором катоде примерно на 20 В, так что электроны, испускаемые с поверхности внешнего катода, могут свободно дрейфовать по направлению к центральному счетчику. В этой конфигурации измеряется эффект плюс фон. Эффект определяется скоростью эмиссии одиночных электронов с поверхности внешнего металлического катода. Фон определяется двумя процессами: эмиссией с поверхности нитей и события от ионизирующих частиц, пересекающих счетчик по коротким трекам на его обоих торцах.

В конфигурации 2 потенциал на втором катоде ниже потенциала на внешнем катоде примерно на 40 В. В этой конфигурации электроны, испускаемые с поверхности внешнего катода, не могут дрейфовать к центральному счетчику, так как второй катод здесь служит барьером, на котором электроны рассеиваются назад в сторону внешнего катода. В этой конфигурации счетчик измеряет только фон, обязанный последним двум каналам.

Для определения оптимальной разности потенциалов между вторым и внешним катодами в конфигурациях 1 и 2 были проведены измерения скорости счета при облучении счетчика УФ-излучением ртутной лампы, результаты которых представлены на рис. 5, взятом из работы [9]. Как следует из этого рисунка, оптимальной разностью потенциалов является +20 В для конфигурации 1 и -40 В для конфигурации 2. При разности потенциалов

более +20 В часть электронов, эмитируемых из внешнего катода, захватывается вторым катодом, что приводит к потере части событий. Разность потенциалов –40 В для конфигурации 2 была выбрана как величина, надежно обеспечивающая полное подавление событий от электронов от внешнего катода в этой конфигурации. Следует отметить, что эта разность потенциалов много меньше величин самих потенциалов, которые составляют примерно 2300 В, и поэтому можно ожидать, что малое изменение потенциала на внешнем катоде при переключении с одной конфигурации на другую не влияет на счетную характеристику счетчика. Это было подтверждено результатами, полученными при калибровке счетчика.

Рис. 5. Скорость счета при калибровке счетчика в зависимости от разности потенциалов на первом и втором катодах $\Delta U = U_2 - U_1$.

Эффект находится как разность счета в двух конфигурациях $R_1 - R_2$. Какова доля каждого из этих двух каналов в генерации фона нам неизвестно. Эта неопределенность является основным источником систематической ошибки измерения. Действительно, при вычитании фона, обязанного электронам, испускаемым с поверхности нитей второго катода, следует учесть, что электроны, испускаемые в сторону внешнего катода, не будут достигать центрального счетчика, так как будут заперты в пространстве между внешним и вторым катодами. Величина фона зависит от материала, из которого изготовлены нити катодов. Если учесть оба канала фона: и от электронов, эмитируемых с поверхности нитей (a) и от краевого эффекта (b) получим систему двух уравнений для двух разных конфигураций мультикатодного счетчика:

$$a + b = R_1 \quad (4)$$

для первой конфигурации и

$$a + kb = R_2 \quad (5)$$

для второй конфигурации. Здесь $k = (n_1 + n_2/2)/(n_1 + n_2)$, где n_1 и n_2 – соответственно количество нитей первого и второго катодов. Решая эту систему уравнений, находим

$$b = (R_1 - R_2)/(1 - k) \quad (6)$$

и, соответственно,

$$a = R_1 - b. \quad (7)$$

Чтобы достичь высокой чувствительности измерений, необходимо, чтобы вклад нитей в фон был пренебрежимо мал. При выполнении этого условия фон в первой и второй

конфигурациях будет примерно равным и процедура вычитания фона, измеренного во второй конфигурации, из суммарной скорости счета, измеренной в первой конфигурации, будет корректной. Таким образом, нужно подобрать такой материал для нитей счетчика, который давал бы пренебрежимо малый фон от нитей. С этой целью нами были проведены измерения скорости счета со счетчиками одинаковой конструкции, но с нитями из разных материалов. В первом случае мы использовали нити из нихрома, во втором случае – нити из позолоченного сплава вольфрама с рением. В обоих случаях толщина нитей была 50 микрон.

На рис. 6 приведены результаты измерений в течение 100 суток на счетчике с нитями из нихрома. На этом рисунке видно, что средние скорости счета в первой и второй конфигурациях были примерно равны и, следовательно, вклад нитей в фон был пренебрежимо мал. На рис. 7 приведены результаты измерений в течение 40 суток на счетчике с нитями из вольфрам-рениевого сплава. Средние скорости счета в двух конфигурациях в этом случае существенно различались. В этой конструкции счетчика количество нитей было: $n_1 = 20$, $n_2 = 100$ и $k = 0.58$. Отсюда, следуя выражениям (6) и (7), находим $b = 0.17$ Гц и $a = 0.10$ Гц.

Рис. 6. Скорости счета, измеренные на счетчике с нитями из нихрома – нижний рисунок, температура счетчика – верхний рисунок.

Рис. 7. Скорости счета, измеренные на счетчике с нитями из вольфрам-рениевого сплава с позолотой.

Суммарная длина нитей первого и второго катодов в обоих случаях составляла 60 метров. Таким образом, скорость эмиссии электронов с поверхности нити из позолоченного вольфрам-рениевого сплава составила $2.8 \cdot 10^{-3}$ Гц на метр нити. Относительно высокую скорость эмиссии можно объяснить присутствием в рении долгоживущего ($T_{1/2} = 4.1 \cdot 10^{10}$ лет) радиоактивного изотопа ^{187}Re , содержание которого в природном рении равно 62.6%. В качестве возможного механизма можно предположить насыщение метастабильных уровней металлического вольфрама бета-частицами от распада ^{187}Re , снятие возбуждения которых приводит к эмиссии электронов с поверхности нитей. По результатам этих измерений мы видим, что нихром является более подходящим материалом для катодов мультикатодного счетчика.

Во время экспозиции счетчик помещался в специальный стальной бокс с толщиной стенки примерно 300 мм для подавления внешнего гамма-излучения. 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) и по результатам измерения мы получили, что в этой области энергий интенсивность гамма-излучения ослаблялась защитой примерно в 100 раз. Для счетчика с медным катодом измеренная скорость счета одиночных электронов снаружи пассивной защиты оказалась выше скорости внутри защиты примерно на 20%. Отсюда видно, что вклад внешнего гамма-излучения в скорость счета одиночных электронов для этого счетчика составил пренебрежимо малую величину менее 0.2%. Дальнейшее совершенствование детектора с использованием более чистых материалов, как мы надеемся, позволит добиться более низкой фоновой скорости счета. В этом случае вкладом фона от внешнего гамма-излучения уже нельзя будет пренебречь. Возможно, потребуется также дополнительная пассивная защита из материала с более низким содержанием урана, радия, тория. Эти вопросы подлежат дальнейшему исследованию.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено описание конструкции мультикатодного счетчика. Счетчик используется для поиска темных фотонов путем регистрации одиночных электронов, эмитируемых с поверхности сплошного металлического катода при конверсии темных фотонов на его поверхности [10]. Счетчик обладает наибольшей чувствительностью для массы темного фотона от 10 до 40 эВ. Расчетная плотность скрытых фотонов с такими массами составляет от 10 до 40 миллионов частиц в кубическом сантиметре, если принять плотность темной материи в окрестностях Солнца примерно 0.4 ГэВ на кубический сантиметр. Для сравнения плотность реликтовых нейтрино составляет примерно 150 частиц на кубический сантиметр, а плотность реликтовых фотонов – примерно 500 частиц на кубический сантиметр. Фоновая скорость счета мультикатодного счетчика зависит от материала нитей катодов. Измерена скорость эмиссии одиночных электронов с поверхности нитей из нихрома и из позолоченного сплава вольфрам-рений. Показано, что применение нихрома обеспечивает более низкий фон мультикатодного счетчика. Этот результат может быть использован при конструировании многопроволочных газовых детекторов ионизирующего излучения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках федерального проекта “Развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров” государственного проекта “Наука и университеты” от 28 декабря 2023 г. № ДС/45-пр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fayet P.* // Nucl. Phys. 1981. V. 187. P. 184. [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(81\)90122-X](https://doi.org/10.1016/0550-3213(81)90122-X)
2. *Okun L.B.* // Sov. Phys. JETP. 1982. V. 56. P. 502.
3. *Georgi H., Ginsparg P.H., Glashow S.L.* // Nature. 1983. V. 306. P. 765.
<https://doi.org/10.1038/306765a0>
4. *Dzunushaliev V., Folomeev V.* // Phys. Rev. D. 2021. V. 104. P. 116027.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.116027>
5. *Dzunushaliev V., Folomeev V.* // Phys. Rev. D. 2022. V. 105. P. 016022.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.016022>
6. *Horns D., Jackel J., Lindner A., Lobanov A., Redondo J., Ringwald A.* // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2013. V. 4. P. 16. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2013/04/016>
7. *Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2018. V. 910. P. 164. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.09.075>
8. *Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V.* // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2019. V. 07. P. 008.
<https://doi.org/10.1088/1475-7516/2019/07/008>
9. *Kopylov A.V., Orekhov I.V., Petukhov V.V.* // Physics of Atomic Nuclei. 2019. V. 82. P. 1317.
<https://doi.org/10.1134/S1063778819090060>
10. *Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V.* // Moscow University Physics Bulletin. 2022. V. 77. P. 315. <https://doi.org/10.3103/S002713492202053>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Изображение мультикатодного счетчика: 1 – кварцевое стекло, 2 – окна для калибровки, 3 – корпус, 4 – внешний катод, 5 – анод, 6 – первый катод, 7 – второй катод, 8 – предусилитель.
- Рис. 2.** Вид на внутренние элементы счетчика с торца. Нити на малом диаметре – первый катод, на большом диаметре – второй катод.
- Рис. 3.** Мультикатодная система с оснасткой: 1 – торцевые диски из оргстекла (полиметилметакрилат), 2 – фокусирующие кольцевые электроды, 3 – направляющие штанги, 4 – нити второго катода, 5 – нити первого катода, 6 – нить анода, 7 – контактные площадки для нитей.
- Рис. 4.** Потенциалы в конфигурациях 1 и 2.
- Рис. 5.** Скорость счета при калибровке счетчика в зависимости от разности потенциалов на первом и втором катодах $\Delta U = U_2 - U_1$. Стрелками показаны оптимальная разность потенциалов для конфигураций 1 и 2.
- Рис. 6.** Скорости счета, измеренные на счетчике с нитями из нихрома – нижний рисунок, температура счетчика – верхний рисунок.
- Рис. 7.** Скорости счета, измеренные на счетчике с нитями из вольфрам-рениевого сплава с позолотой. Темные точки – конфигурация 1, светлые точки – конфигурация 2.

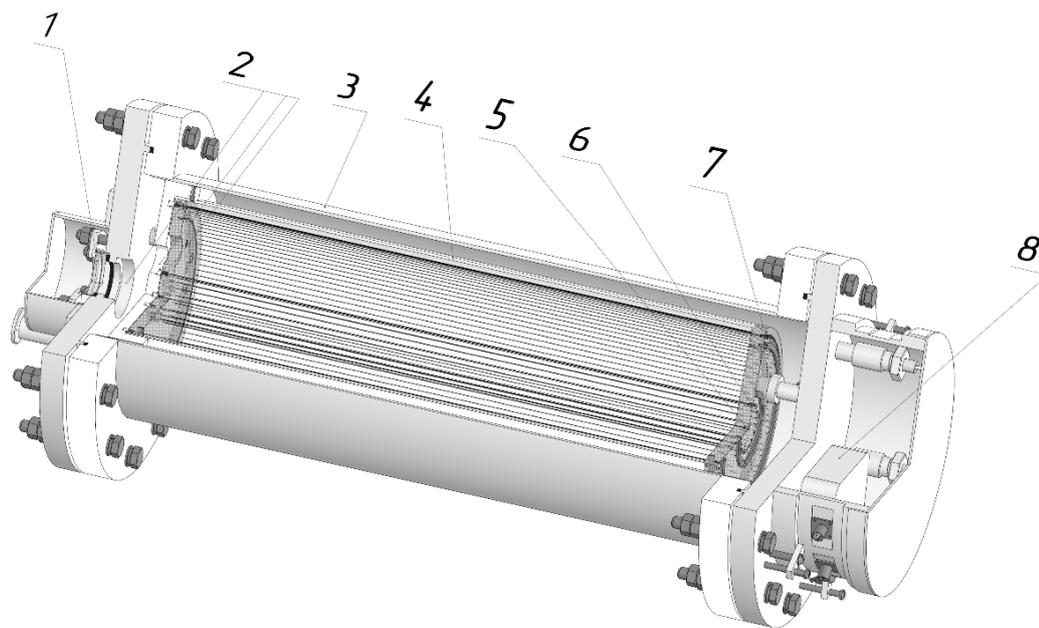


Рис. 1.

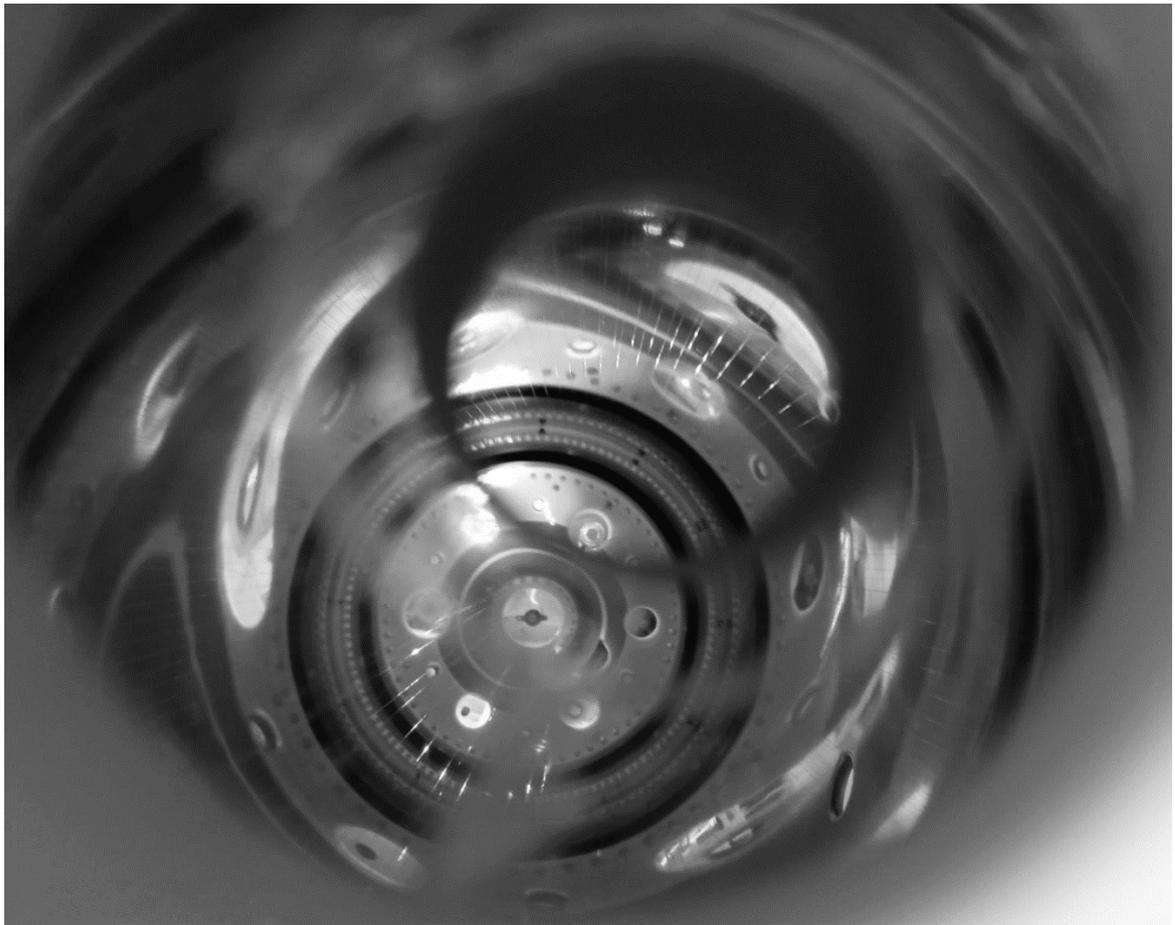


Рис. 2.

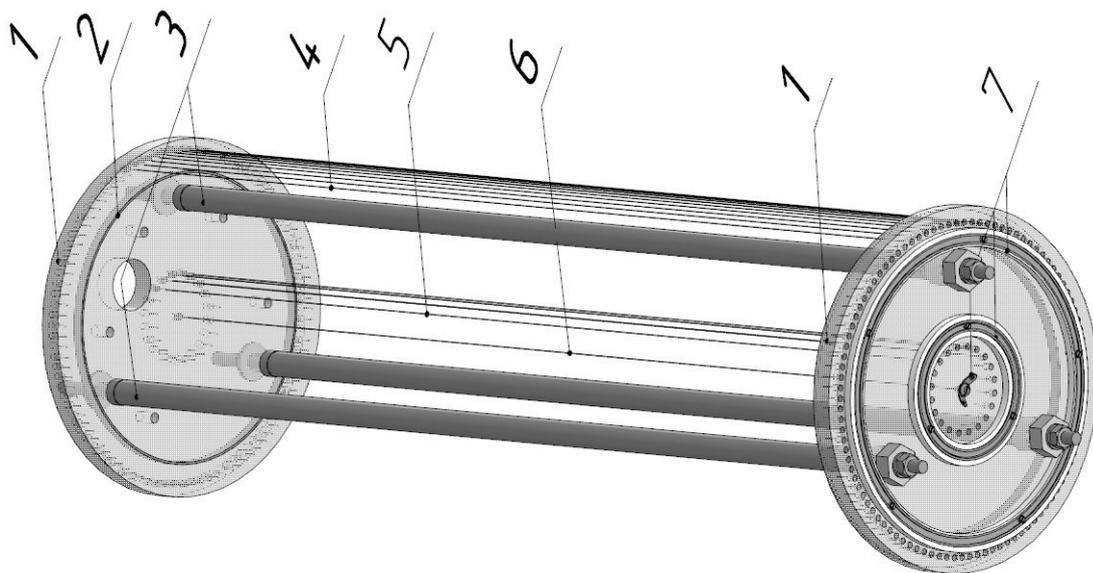


Рис. 3.

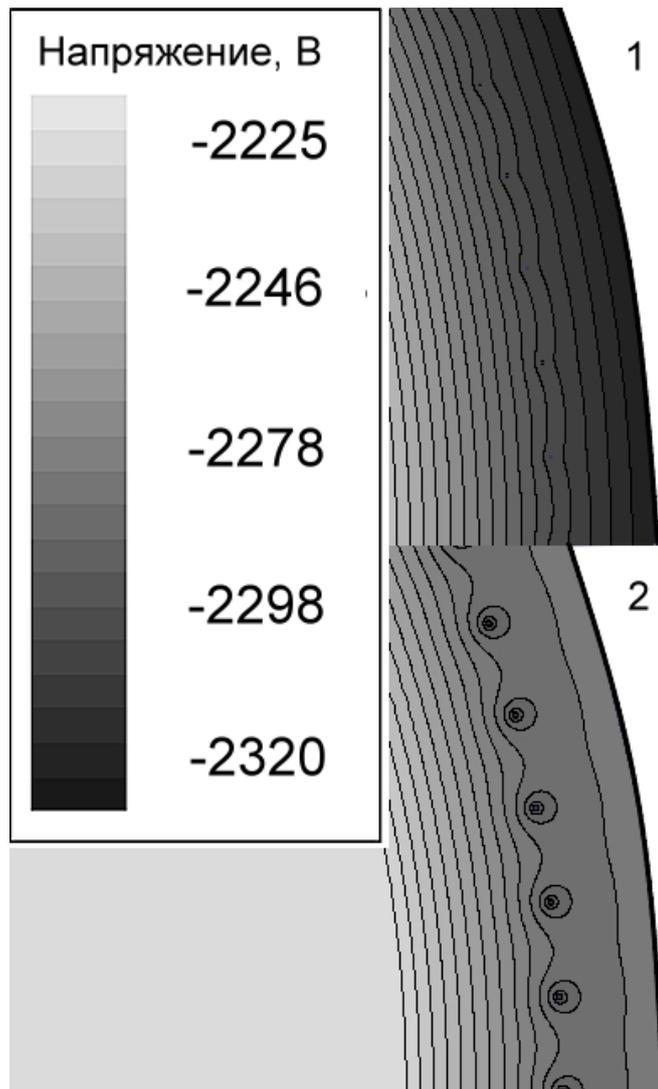


Рис. 4.

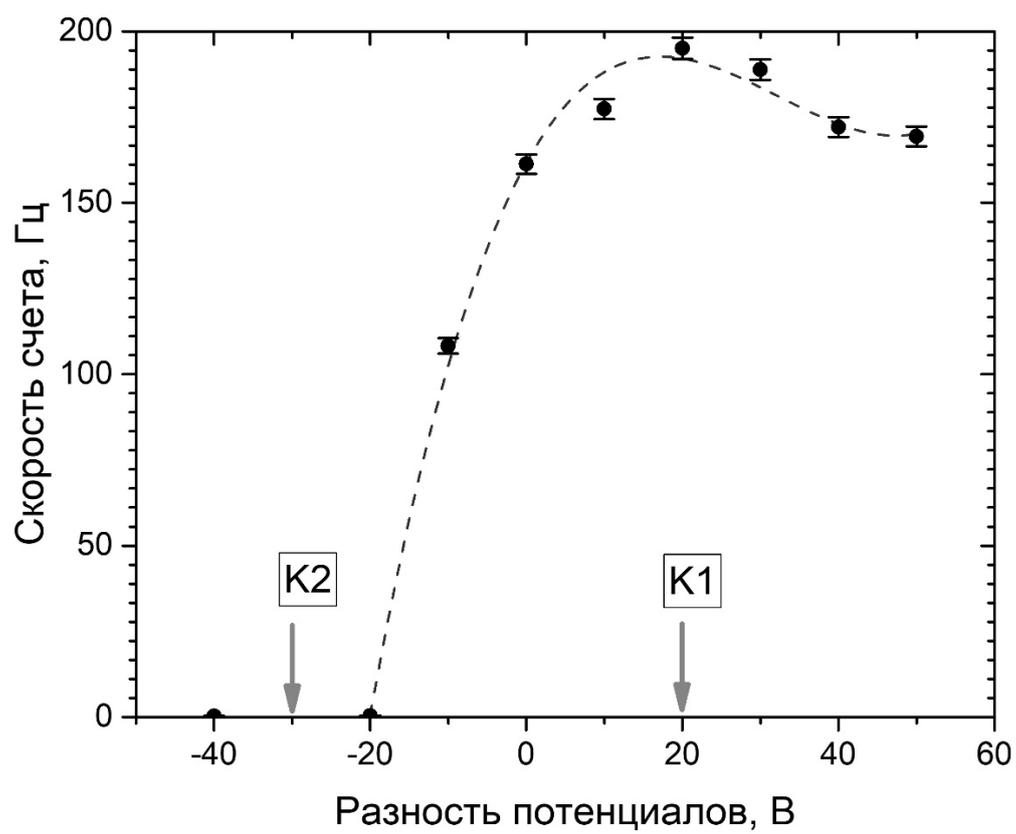


Рис. 5.

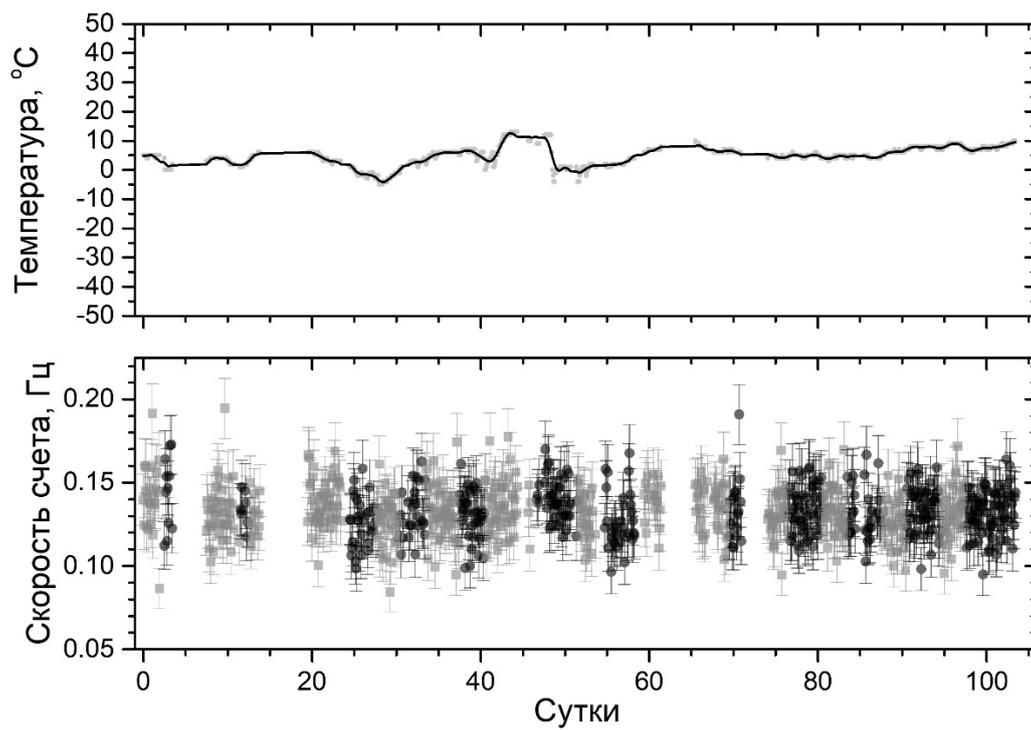


Рис. 6.

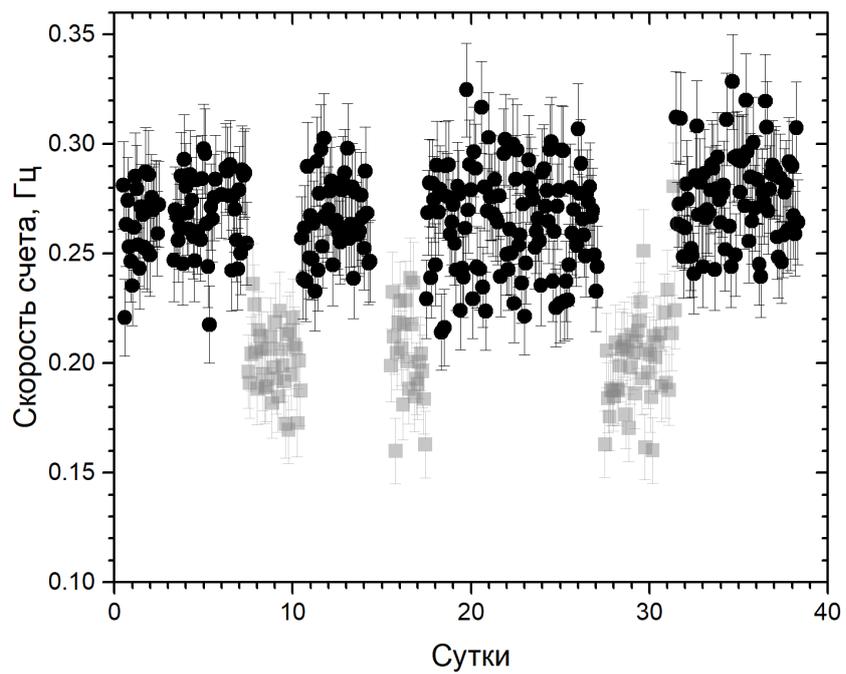


Рис. 7.

~~Multi-Cathode Counter for Dark Photons Searching Construction~~

~~Anatoly Kopylov*, Igor Orekhov, Valery Petukhov and Alexei Solomatin~~

~~*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*~~

~~**Annotation:** The multi-cathode counter is designed to search for cold dark matter, presumably composed of dark photons, by detecting single electrons emitted from the surface of the metal cathode of the counter during the conversion of dark photons on its surface. The counter design allows for the efficient discrimination of the background from an ambient radioactivity and the electron thermal emission by subtracting the count rate measured in the blocking potential configuration. The paper provides a detailed description of the design of a multi-cathode counter.~~

~~**Keywords:** dark matter, dark photons, proportional counter.~~