

Проектирование детектора солнечных космических лучей

Стадничук Егор^{1,3}, Зелёный Михаил^{1,2,3}, Зимовец Иван³

¹МФТИ, ²ИЯИ РАН, ³ИКИ РАН

Аннотация

Введение

В связи с освоением космоса растёт потребность в космическом оборудовании. В данной работе разрабатывается малогабаритный телескоп для регистрации солнечных космических лучей (СКЛ). Солнечные космические лучи представляют собой поток протонов и электронов, излучаемый Солнцем. Детектор рассчитан на регистрацию электронов с кинетической энергией от 1 до 10 МэВ и протонов от 10 до 100 МэВ, поскольку именно такие частицы представляют научный интерес.

Телескоп имеет несколько задач. Первая задача, прикладная - мониторинг солнечных космических лучей. Обычно СКЛ представляют собой солнечный ветер и не наносят особого вреда космонавтам и космическому оборудованию. Однако во время солнечных вспышек и прочих спорадических явлений потоки СКЛ могут стать опасными. Предположим, что на Солнце произошла вспышка, породившая большой поток протонов и электронов. Поскольку электроны - лёгкие частицы, то они достигнут Земли быстрее протонов. Поэтому если детектор зарегистрирует всплеск потока электронов, это позволит предсказать всплеск потока протонов. После регистрации всплеска электронов детектор пошлёт сигнал на соседние космические станции и приборы, что позволит вовремя применить меры радиационной безопасности. Вторая задача имеет фундаментальный характер. Поскольку на сегодняшний день плохо изучен спектр СКЛ во время вспышек, то требуется детектор с хорошим энергетическим разрешением, способный работать при большом потоке частиц. В данной работе для детектора разрабатывается методика анализа данных, позволяющая определять спектр больших потоков частиц.

К телескопу предъявлено несколько требований. Во-первых, он должен иметь хорошее энергетическое разрешение. Также он должен работать при больших потоках частиц для измерения спектра во время солнечных вспышек. Во-вторых, для использования детектора в космосе он должен обладать малыми массо-габаритными характеристиками. В связи с этим возникла задача оптимизации геометрии детектора. Эта задача была решена в предыдущей работе с помощью моделирования на Geant4 (ссылка).

Конструктивно телескоп представляет собой сцинтилляционный цилиндр, разбитый на несколько шайб. Такая конструкция позволяет восстанавливать попиксельно кривые

потерь проходящих сквозь детектор частиц. Это позволяет определять как энергию частицы, так и её тип. Частица, проходя сквозь детектор, создаёт в каждой шайбе оптический сигнал, который затем выводится на фотодетектор. Фотодетектор преобразует оптический сигнал в электрический, который затем оцифровывается и передаётся со спутника на Землю. Таким образом предполагается на Земле получать информацию о космической погоде.

Отчёт по гранту Ивана Зимовца:

Для регистрации солнечных электронов и ионов в диапазонах энергий ~ 1 -10 МэВ и ~ 10 -100 МэВ в рамках проекта разрабатывается малогабаритный телескоп.

Обычно подобные телескопы представляют собой полупроводниковые (ППД) или сцинтилляционные детекторы. К преимуществам ППД можно отнести их компактность и высокую разрешающую способность. Однако недостатком единичного ППД является отсутствие пространственной чувствительности и возможности различения разных типов частиц.

При современном уровне технологий более целесообразной является разработка телескопа на основе сегментированного сцинтилляционного детектора. Среди преимуществ сцинтилляционного детектора можно отметить следующие:

- *Малое (порядка нескольких десятков наносекунд для органических и сотен пикосекунд для неорганических сцинтилляторов) время высвечивания, позволяющее работать в одночастичном режиме в широком диапазоне скоростей счёта (ППД имеют проблемы при скоростях счёта больше 10^4 частиц в секунду).*
- *Более высокая радиационная стойкость и долговечность по сравнению с полупроводниковыми детекторами, возможность создавать более толстые слои материала, отсутствие подложки.*
- *Меньшее по сравнению с ППД энергетическое разрешение, тем не менее достаточно для решения поставленных перед телескопом задач.*

Одна из проблем сцинтилляционных детекторов - необходимость для регистрации сцинтилляционного света, или габаритных и хрупких фотозлектронных умножителей, или лавинных фотодиодов, компактных, но имеющих худшее энергетическое разрешение, решена в настоящее время благодаря созданию кремниевых фотоумножителей (SiPM), представляющих из себя матрицы из лавинных фотодиодов.

За счет сегментации детектора и отдельного съёма света с разных слоев, можно частично идентифицировать геометрию трека частицы и фильтровать события в нужном апертурном окне без использования громоздких коллиматоров.

Создание многослойного сцинтилляционного детектора позволяет проводить анализ не только по полной выделенной энергии, но и по форме кривой зависимости ионизационных потерь от пробега частицы, а также отсекал фоновые события, анализируя расположения сработавших слоев. На рисунке показаны зависимости для потерь на единицу длины в зависимости от глубины проникновения для протонов с энергией 100 МэВ и для электронов с энергией 10 МэВ. Следует отметить два факта - кривые ионизационных потерь протонов имеют характерную особенность - пик Брэгга и разницу в ионизационных потерях

протонов и электронов, что позволяет, измерив зависимость энергосвечения от пробега с высокой точностью определить тип и энергию частицы.

Методика измерения и анализа

Методика измерения спектра частиц стандартная для сцинтилляционных детекторов. Заряженная частица при прохождении сквозь сцинтиллятор теряет энергию, часть которой преобразуется в видимый свет. Видимый свет затем регистрируется фотодетектором. Количество зарегистрированных фотонов прямо пропорционально энергии, потерянной внутри сцинтиллятора. При прохождении сквозь сцинтиллятор у заряженных частиц есть характерная функция потерь энергии на единицу длины пути. Для протонов, например, функция потерь обладает пиком Брега, по пространственному положению которого можно однозначно судить об энергии протона.

(Красивый рисунок с пиком Брега)

Детектор представляет собой цилиндр, сегментированный на несколько сцинтилляционных шайб. Такая конструкция позволяет восстанавливать функцию потерь частиц в зависимости от глубины проникновения в детектор попиксельно. Таким образом, помимо информации о полном энергосвечении частицы детектор получает информацию о профиле её кривой потерь, что позволяет с хорошим разрешением определять тип частицы и её энергию.

Существует два режима работы детектора. Первый режим - одночастичный. Он работает в том случае, когда частота регистрации частиц ниже скорости считывания электроники. В этом случае есть возможность анализировать каждую частицу отдельно. Энергия и тип частицы восстанавливается по её кривой потерь методом максимизации правдоподобия. Второй режим работы детектора - интегральный. Он включается в том случае, когда скорость считывания электроники меньше частоты прихода частиц. В интегральном режиме информация о спектре частиц восстанавливается из суммарной кривой их потерь, полученной за время экспозиции. Спектр получается путём решения обратной задачи методом регуляризации Турчина (ссылка), наименьших квадратов или фитированием спектра частиц. Результат восстановления спектра частиц в интегральном режиме на модельных данных методом статистической регуляризации представлены на рисунках:

(рисунок)

Экспериментальная часть

Макет детектора представляет собой цилиндр, составленный из 20 сцинтилляционных шайб. В качестве сцинтиллятора используется материал на основе полистирола. Диаметр шайбы - 3 см, толщина 0.4 см. Каждый сцинтиллятор обёрнут

светоотражающим материалом - тайвеком. Сцинтилляционный свет регистрируется с помощью фотодетекторов SiPM hamamatsu S12575-015P. Существует два способа регистрации света с помощью SiPM. Первый способ - прикрепить фотодетектор непосредственно к шайбе. Второй способ - собирать сцинтилляционный свет с помощью оптоволоконна и вывести оптоволоконно к фотодетектору (рисунок).

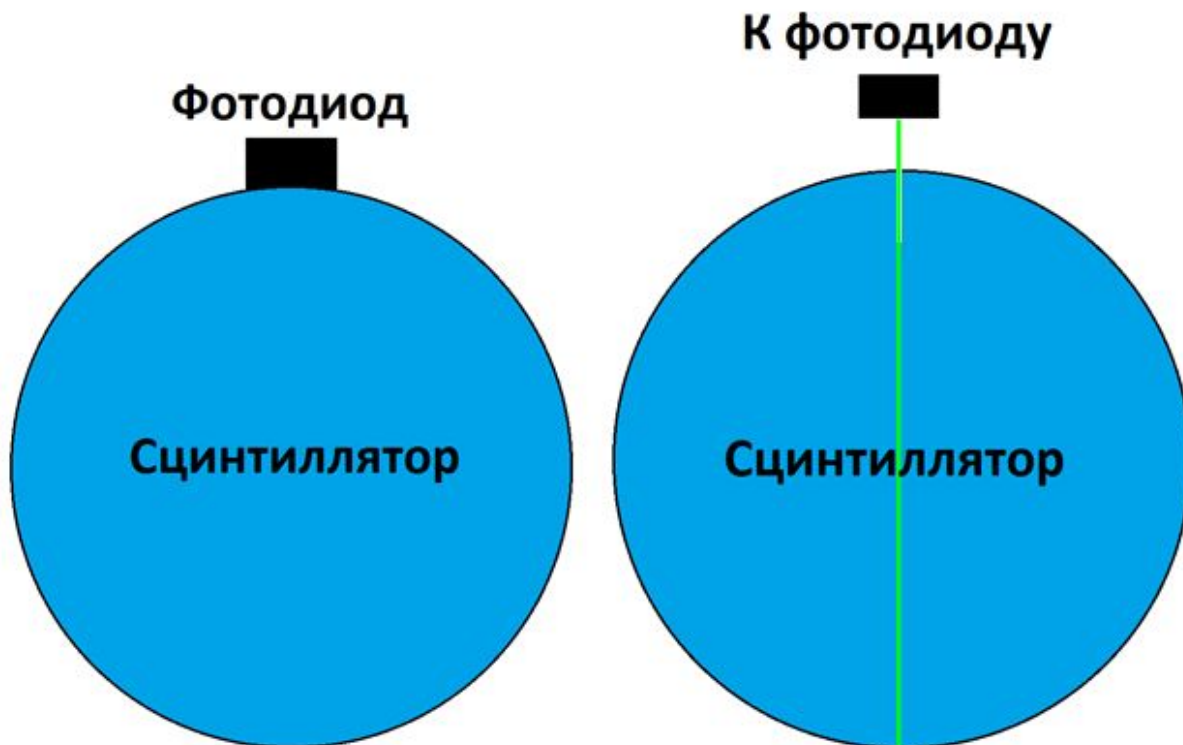


Рисунок . Два способа сбора света с шайб детектора с помощью фотодетектора.

Чтобы выбрать оптимальную конструкцию шайбы детектора был проведён следующий эксперимент. Были собраны первый и второй варианты присоединения фотодетектора. Затем полученные шайбы облучались с помощью лабораторного бета источника Sr 90. Он излучает бета электроны с энергией до 1.5 МэВ. Полученные сигналы передавались на компьютер при помощи схемы, представленной на рисунке . По сигналу шайб определялись следующие параметры системы шайба + фотодетектор: количество фотоэлектронов и однородность светосбора. Количество фотоэлектронов - параметр, который показывает величину сигнала шайбы детектора на единицу выделенной в шайбе энергии частицей высокой энергии. Однородность светосбора показывает, насколько сильно зависит сигнал шайбы детектора от точки входа частицы в шайбу.

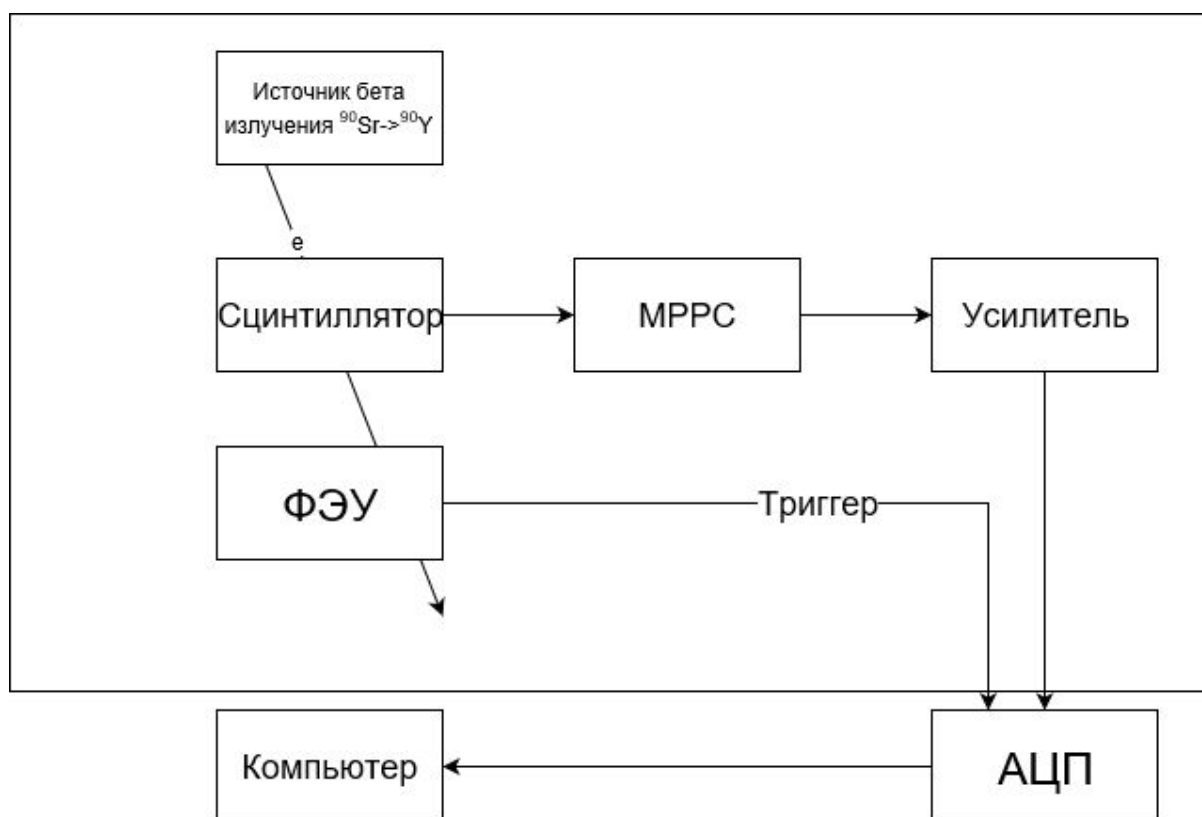


Рисунок . Схема сбора данных с сцинтилляционных шайб. MPPC (Multi-Pixel Photon Counters) - фотодетектор SiPM hamamatsu.

Оказалось, что конструкция с фотодетектором, прикреплённым непосредственно к шайбе даёт в 3 раза большее количество фотоэлектронов по сравнению с конструкцией с оптоволоком. Однако второй способ крепления фотодетектора обеспечивает почти полную однородность светосбора в отличие от первого. При креплении MPPC непосредственно к шайбе сигнал при попадании частицы на край шайбы падает больше чем в 2 раза по сравнению с попаданием в центр. В конструкции с оптоволоком на краю шайбы сигнал меньше на 10-20%. Поскольку отличие количества фотоэлектронов в 3 раза уменьшает погрешность лишь в корень из 3 раз, то вторая конструкция оказалась гораздо более эффективной. Таким образом, оптический сигнал в макете выводится из сцинтиллятора с помощью оптоволокну. Следует отметить, что конструкция с оптоволоком обладает ещё одним существенным преимуществом. Есть возможность выводить свет достаточно далеко от цилиндра детектора, чтобы регистрируемые протоны и электроны не попадали на SiPM и электронику. Это позволяет добавить экранирование в конструкцию детектора, что продлевает срок его службы.

Фотография собранного макета детектора представлена на рисунке . Фотография электроники представлена на рисунке . Электроника крепится к макету снизу так, что оптоволокну присоединяется непосредственно к SiPM через оптическую изоляцию. Все SiPM расположены на теплопроводящей подложке, что позволяет выравнивать их температуру. На электронной плате присутствует термopapa, позволяющая

определять температуру фотодетекторов. К электронике подключается блок slow control, подающий напряжение на SiPM в зависимости от их температуры.

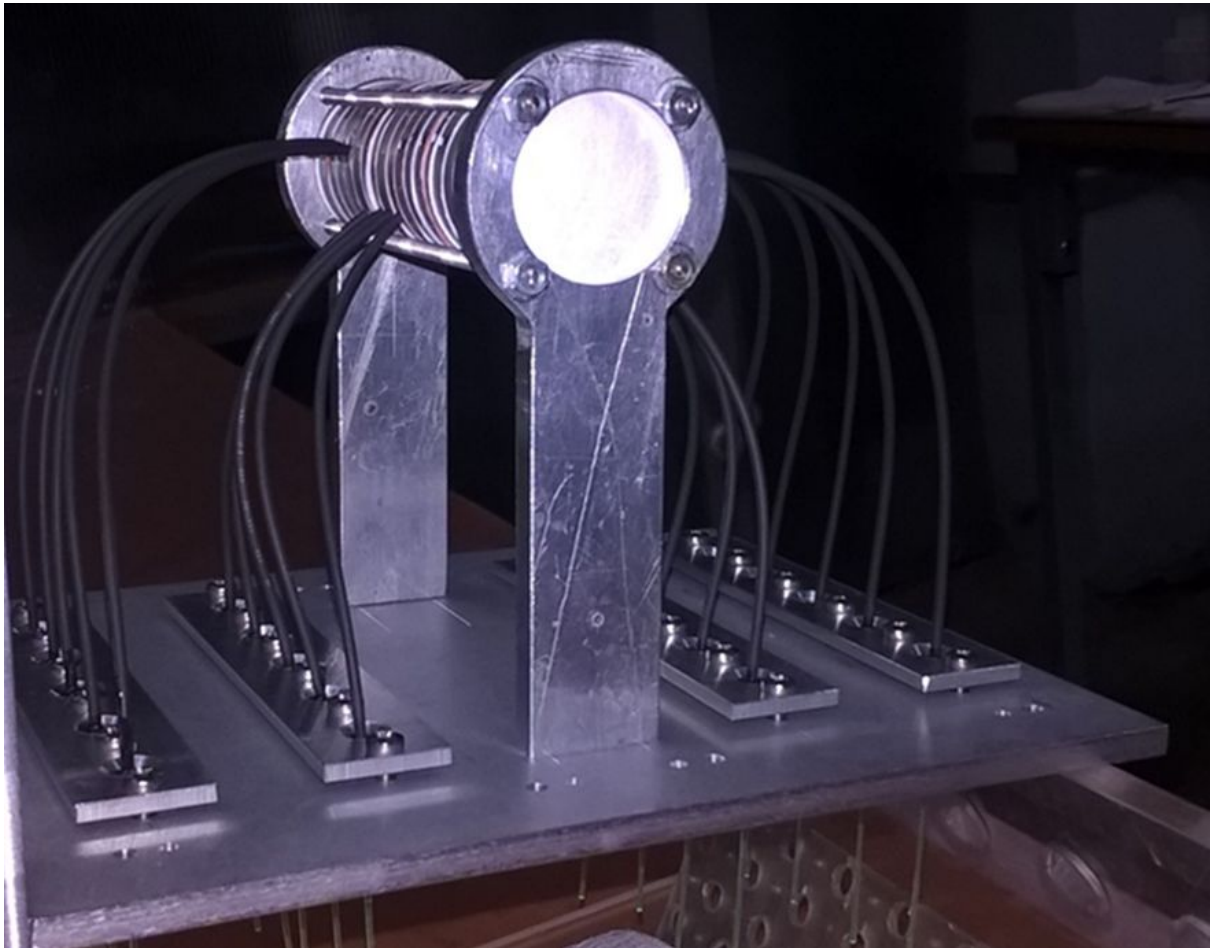


Рисунок . Макет детектора.

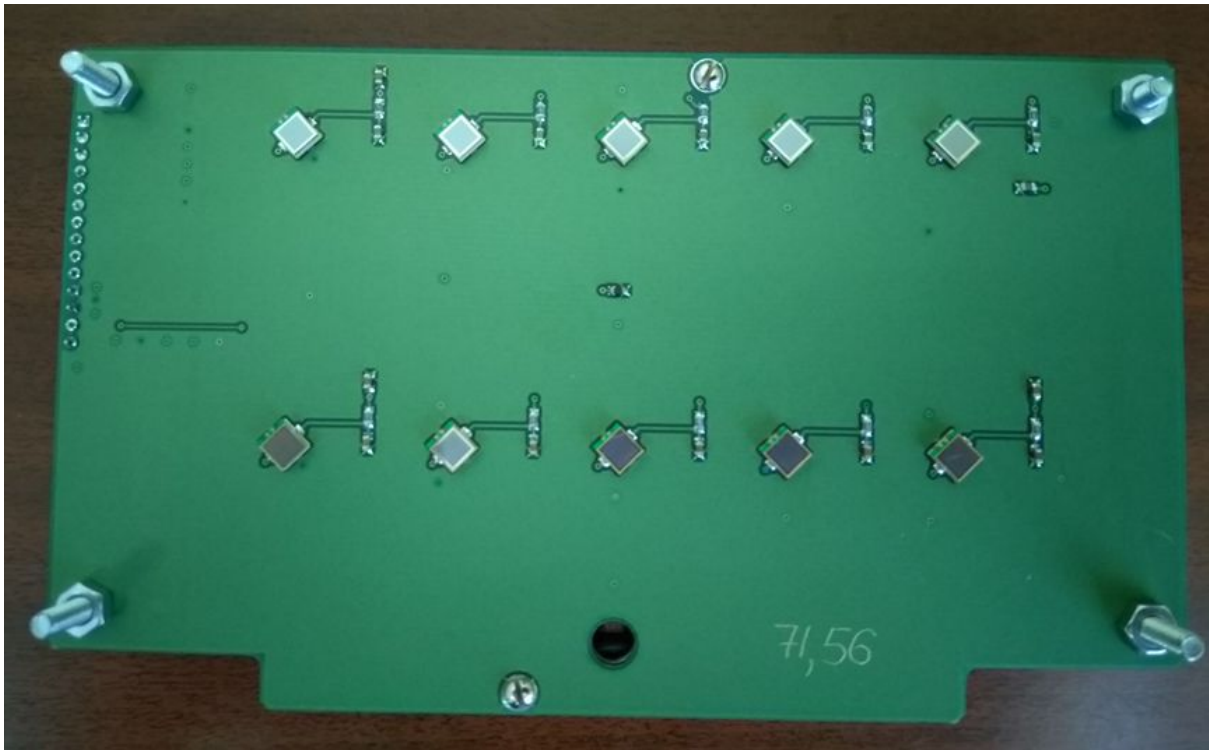


Рисунок . Электроника.

Зависимость оптимального напряжения, которое нужно подавать на SiPM, от температуры известна и описана в документации (ссылка). Однако в данной работе она была проверена экспериментально. Система шайба + фотодетектор была помещена в термостат. Шайба облучалась с помощью лабораторного бета источника. Сначала при комнатной температуре было выставлено оптимальное напряжение на SiPM, указанное в документации. Был измерен отклик системы на бета излучение. Затем при разных температурах подбиралось такое напряжение, чтобы отклик был такой же, как и при комнатной температуре. Получилась зависимость оптимального напряжения на SiPM от температуры (рисунок). При повышении температуры MPPC на 1 градус Цельсия необходимо увеличить напряжение на 58.5 мВ. Она согласуется с зависимостью, указанной в документации фотодетектора, в которой сказано, что напряжение необходимо менять на 60 мВ при изменении температуры на 1 градус.

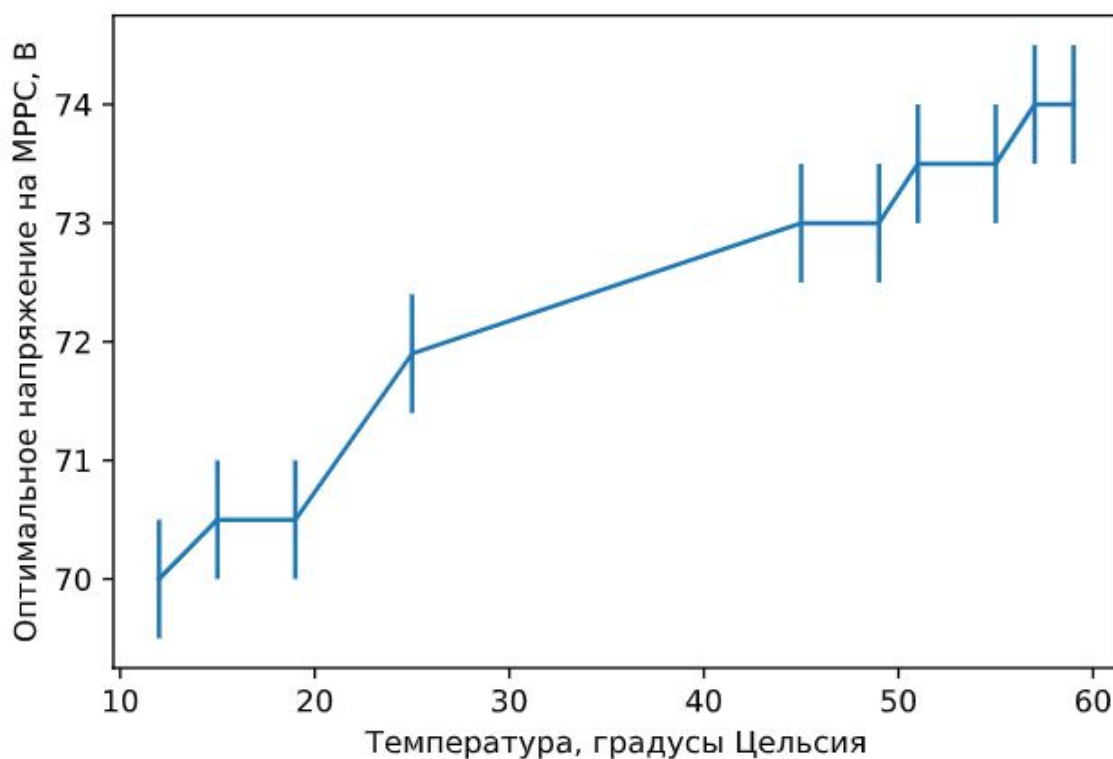


Рисунок . Зависимость оптимального напряжения на фотодетекторе hamamatsu S12575-015P от температуры.

Заключение

В данной работе был собран макет солнечных космических лучей. Была установлена зависимость необходимого напряжения на фотодетекторах от температуры. Было проведено тестирование макета детектора на космических мюонах. Также детектор был откалиброван на космических мюонах.

Автор благодарен лаборатории экспериментальной ядерной физики (?) ИЯИ РАН за оказанную помощь в работе над проектом. Автор выражает особую благодарность Ивашкину А.П.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект No 17-72-20134).