

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет  
МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

УДК 53-05

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
МОНИТОРИНГ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В  
ТЕСТОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Научный руководитель:

к.ф.-м.н.

П. Е. Тетерин

Выполнил:

А. И. Дуров

Москва 2020

# Содержание

Содержание . . . . .	1
1 Введение . . . . .	2
1.1 Основание для разработки . . . . .	2
1.2 Использование сцинтилляционных волокон для мони- торинга пучка . . . . .	3
1.3 Использование легированного кварца и оптоволокна для мониторинга пучка . . . . .	5
1.4 Использование одного легированного кварцевого во- локна, движущегося поперечно пучку . . . . .	6
1.5 Предлагаемое решение . . . . .	7
1.6 Использование SiPM . . . . .	8
1.7 Использование сцинтиллятора CsI . . . . .	10
1.8 Преимущества и недостатки предложенного решения	12
2 Ход работы . . . . .	13
2.1 Моделирование установки . . . . .	13
2.2 Корректирование установки под реальные детали и дальнейшая работа . . . . .	15
2.3 Усовершенствование установки - система поиска пучка	16
2.4 Усовершенствование установки - триггер пучка . . . .	16
3 Заключение . . . . .	17

# Цель работы

Целью работы является проектирование и создание установки для мониторинга пучка заряженных частиц на основе кремниевого фотоумножителя SiPM.

## 1 Введение

### 1.1 Основание для разработки

Как известно, прототипы новых детекторов подвергаются различным тестам во время разработки. Один из таких тестов – это тестирование пучком заряженных частиц (beam test). Он состоит в регистрации тестируемым детектором заряженных частиц из соответствующего направленного пучка. Тип и интенсивность частиц, а также их источник может варьироваться в зависимости от типа исследуемого детектора и от специфики его функций. Однако, во время такого тестирования зачастую возникает проблема позиционирования экспериментальной установки с исследуемым детектором относительно пучка, особенно если имеется большое расстояние между одним из исследуемых детекторов и источником частиц или в условиях, когда исследуемый детектор находится на пучке ограниченное время. Иными словами, не всегда удастся точно сказать, что именно в данную координату попали частицы из пучка согласно их предполагаемой траектории, ведь эта траектория могла претерпеть изменения за время движения частиц до исследуемой области.

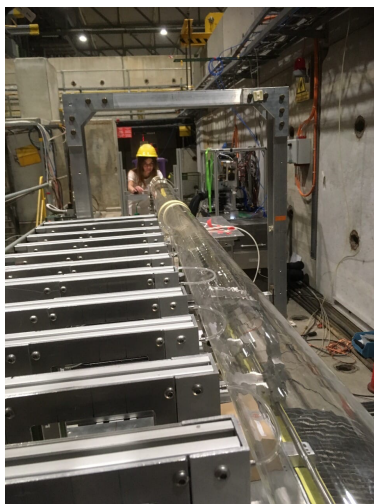


Рисунок 1 – Фотография с beam test'а 2018 года

## 1.2 Использование сцинтилляционных волокон для мониторинга пучка

Тем не менее, существует немало известных решений проблем мониторинга положения пучка заряженных частиц в установке для тестирования детектора. Одним из таких решений является использование сцинтилляционных волокон в детекторе [1].

В экспериментах со встречным пучком для спектрометров удобной является цилиндрическая конфигурация детектора. Вокруг области столкновения обычно располагаются концентрические оболочки из волокон, а из-за гибкости таких волокон они могут быть размещены на оболочке в виде различных конфигураций (см. рис. 2): осевой (измеряющей координату  $r\phi$ , обернутой по окружности (определяющей продольную координату  $z$ ) и спиральной (обеспечивающей стереоизмерение ( $u$  или  $v$ )). Такая оболочка, называемая "суперслоем" (superlayer) может состоять из нескольких слоев волокон, в которых одновременно измеряются несколько координат. Волокна обычно имеют диаметр около 0.5-1мм. Если же используются короткие волокна (длиной менее 1м), то скорость взаимодействия становится небольшой, и тогда для считывания целесообразно использовать ПЗС-матрицу с усилением изображения.

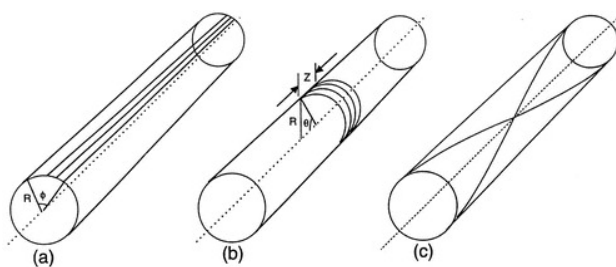


Рисунок 2 – Конфигурации размещения волокон на оболочке детектора

Пластиковый сцинтилляционный волоконный детектор сочетает в себе известную технику обнаружения частиц с использованием сцинтилляционных материалов и разработок в области флуоресцентных органических красителей, в области пластиковых волоконно-оптических технологий и в области фотодатчиков. Для иллюстрации принципа работы на рис. 3 схематически изображен универсальный волоконный детектор для "центрального слежения" в экспериментах со сталкивающимся пучком.

Принцип работы заключается в том, что пластиковые оптические волокна, легированные сцинтилляционными красителями, размещены на опорных цилиндрах, которые окружают точку вылета заряженных частиц. Образованные частицы проходят через волокна и оставляют там свою энергию, которая преобразуется в сцинтилляционный свет. Часть этого света оптически поглощается внутри волокна и перемещается к концу цилиндра, где легированное волокно соединяется с прозрачным оптоволоком. А прозрачное оптоволоконно, в свою очередь, «направляет» свет на некоторое расстояние к фотодатчику.

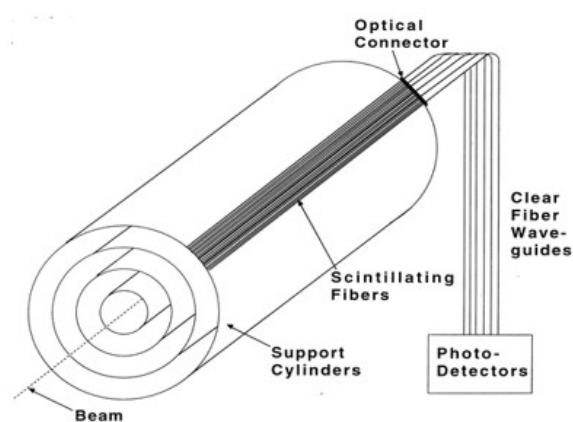


Рисунок 3 – Схематичное изображение установки, использующей сцинтилляционные волокна

### 1.3 Использование легированного кварца и оптоволокна для мониторинга пучка

Однако для мониторинга положения пучка сцинтилляционные волокна подходят только для низких токов из-за их очень низкой термостойкости. Но со временем для больших токов были предложены легированные  $Ce^{3+}$  кварцевые поверхности [2], благодаря чему наблюдалось сопротивление до температур 1300°C. Также было выявлено, что сцинтилляционный свет, испускаемый легированным  $Ce^{3+}$  кварцем, достигает максимума при 395нм, и поэтому данный материал хорошо подходит для считывания на основе фотоумножителей. Такие Легированные  $Ce^{3+}$  кремнеземные волокна были предложены для обнаружения нейтронов [3], лучевого мониторинга [4] и дозиметрии в адронотерапии [5]. Благодаря своим сцинтилляционным свойствам и термостойкости непокрытые легированные кварцевые волокна представляют собой перспективный инструмент для мониторинга положения пучка от десятых нА до сотен мкА. Детектор, основанный на достаточно быстрой сцинтилляции, легко адаптируется как к импульсным, так и к непрерывным лучам. Следует также отметить, что волокна, расположенные в определенном порядке, естественно подвержены неоднородному облучению, поэтому их относительная реакция изменяется со времени из-за повреждения, вызванного излучением, что требует частой процедуры калибровки. Более того, в случае производства радиоизотопов интенсивные поля излучения (в основном возникающие за счет нейтронов) не позволяют использовать front-end электронику или ПЗС-матрицы.

## 1.4 Использование одного легированного кварцевого волокна, движущегося поперечно пучку

В связи с изложенными выше фактами было разработано еще одно устройства, которое также решает проблему мониторинга позиционирования пучка заряженных частиц, однако которое тоже имеет свои некоторые недостатки. Как следует из названия раздела, в данном устройстве (представленное на рис. 4) используется одно легированное кварцевое волокно, которое движется поперечно пучку [6].

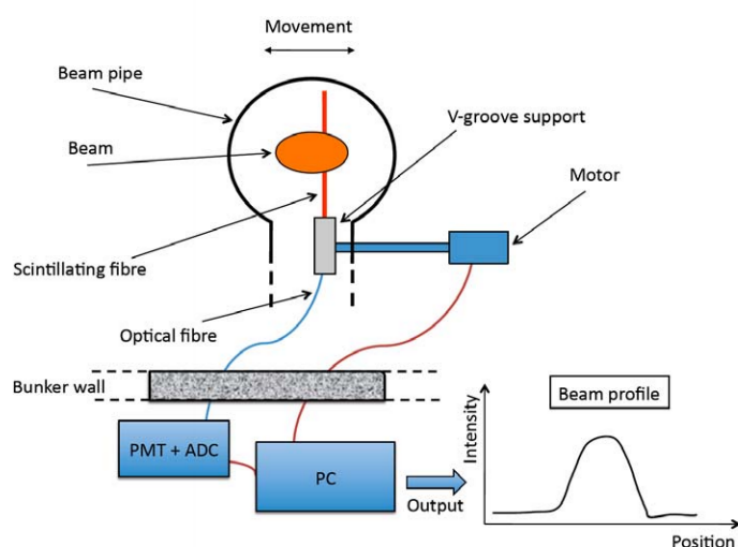


Рисунок 4 – Схематический вид установки, использующей одно легированное кварцевое волокно, движущееся поперечно пучку

В отличие от хрупких и трудных в обращении непокрытых легированных кварцевых волокон, здесь используется сенсорное волокно длиной около 10см. Для передачи сигнала от сцинтилляции, индуцированной падающими частицами пучка, волокно соединяется с обычным оптоволоком с помощью V-образного соединения. Таким образом, сигнал может передаваться на расстояние нескольких метров с незначительным затуханием. Однако данная реализация требует некоторой осторожности, чтобы ограничить потери сцинтилляционных фотонов. V-образное соединение расположено внутри вакуумной камеры, и оптоволокно выводится к воздуху по специальному пути. Для получения дистанционного управления дви-

жением, V-образное соединение соединяется с линейным двигателем (или можно соединить с любым другим подвижным устройством посредством вакуумной герметичной подачи линейного движения). Таким образом, отпадает необходимость в двигателе, расположенном внутри вакуумной камеры, а считывающее и управляющее устройство может быть расположено в, условно говоря, диспетчерской, вдали от полей излучения, создаваемых вблизи луча. Поскольку детектор состоит из одного волокна, проходящего поперек пучка, влияние износа из-за радиационного повреждения на равномерность отклика заметно подавляется.

## 1.5 Предлагаемое решение

Таким образом, перечисленные выше методики обладают некоторыми недостатками, которые имеют немалое значение при использовании в сфере экспериментальной физики элементарных частиц (в основном это вызвано тем, что многие методики разрабатывались и использовались/используются в медицинских целях), а именно:

1. Простые сцинтилляционные волокна - применяются только для малых токов из-за низкой термостойкости
2. Легированные  $Ce^{3+}$  кварцевые поверхности и оптоволокно - требуют частой калибровки, а также дороги в использовании.
3. Установка, использующая одно легированное кварцевое волокно, движущееся поперечно пучку, - сложная в сборке и эксплуатации, а также обладающая достаточно хрупкими и трудными в использовании компонентами (хоть и не такими хрупкими по сравнению с непокрытыми легированными кварцевыми волокнами)

Поэтому в данной работе описывается другое решение проблемы, основанное на использовании установки, основанной на применении координатного стола с детектором на кремниевом фотоумножителе (SiPM). Для прототипа будет использоваться модель саен sr5606с на основе кристалла CsI. SiPM был выбран в связи с тем, что его использование освобождает экспериментатора от перечисленных выше недостатков применения других методик поиска пучка.



## 1.6 Использование SiPM

Кремниевые фотоумножители (SiPM) - твердотельные однофотоночувствительные устройства на основе однофотонного лавинного диода, реализованного на общей кремниевой подложке [7] [8]. SiPM - один из основных и самых часто используемых видов устройств, используемых в экспериментальной физике элементарных частиц.

### 1. Устройство SiPM:

На кремниевом кристалле n-типа создаются микро-области p-типа. такая микро-область (ячейка) называется пикселем. Между ячейками p-типа и кристаллом n-типа образуется p-n переход. Число таких ячеек обычно составляет от 100 до 500 штук на  $\text{мм}^2$ . Каждая ячейка работает независимо и к каждой отдельно подключен высокоомный резистор и приложено одинаковое напряжение смещения. Пример изготовленного SiPM можно увидеть на рис. 5.

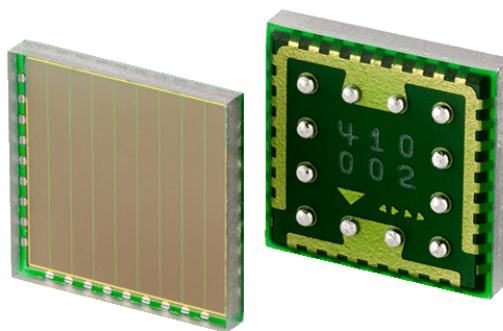


Рисунок 5 – SiPM

### 2. Принцип работы SiPM:

Попавший в ячейку фотон за счёт фотоэффекта создает свободные носители - электрон и дырку. Напряжение смещения выбирается таким, чтобы в области p-n перехода даже одиночный носитель (как электрон, так и дырка) мог инициировать лавину, переходящую в

Гейгеровский разряд.

Гашение Гейгеровского разряда происходит благодаря перераспределению части напряжения смещения с р-п перехода на резистор, в результате чего напряжение на р-п переходе уменьшается и разряд прекращается. Это аналогично гашению разряда в несамогасящемся счётчике Гейгера. Важно отметить, что в SiPM'е каждая ячейка является отдельным независимым микроприёмником фотонов.

### 3. Как снимается сигнал:

Чтобы понять, как происходит снятие сигнала с SiPM'а нужно обратить внимание на несколько следующих фактов:

- (a) Сигнал, снимаемый с SiPM - сумма всех сигналов (т.е. от всех сработавших ячеек);
- (b) Амплитуда не зависит от числа зарядов;
- (c) Сигналы от каждой сработавшей ячейки одинаковый;
- (d) Суммарный сигнал пропорционален числу фотонов, попавших в ячейки SiPM'а (т.е. числу сработавших ячеек);
- (e) Число фотонов в одной ячейке должно быть в несколько раз меньше числа ячеек, т.е. чтобы в каждую ячейку попадал один фотон, тогда SiPM будет пропорциональным фотоприёмником, т.е. сигнал на выходе будет пропорционален числу фотонов;
- (f) При увеличении интенсивности световой вспышки амплитуда сигнала с SiPM'а выходит на насыщение и SiPM теряет свойство пропорциональности, т.е. свет вспышки не должен быть слишком интенсивным;
- (g) Чувствительная область по отношению к полной поверхности составляет от 30% до 80 %;
- (h) Максимумальная чувствительная площадь составляет примерно  $5 \times 5 \text{ мм}^2$ ;
- (i) Коэффициент умножения:  $M \approx 10^5 \div 10^8$

Достоинства SiPM:

1. Работа в магнитных полях;
2. Низкое напряжение питания (порядка  $50 \div 60\text{В}$ );
3. Хорошее временное разрешение.

Недостатки SiPM:

1. Высокие шумы (темновой счёт)

## 1.7 Использование сцинтиллятора CsI

Чистый (нелегированный) йодид цезия CsI (изображенный на рис. 6) представляет собой сцинтилляционный материал с высокой тормозящей способностью к гамма-лучам благодаря своей относительно высокой плотности и атомному номеру. Нелегированный CsI имеет другие сцинтилляционные свойства по сравнению с более широко распространенными CsI(Tl) и CsI(Na), активированные таллием или натрием, соответственно [8].

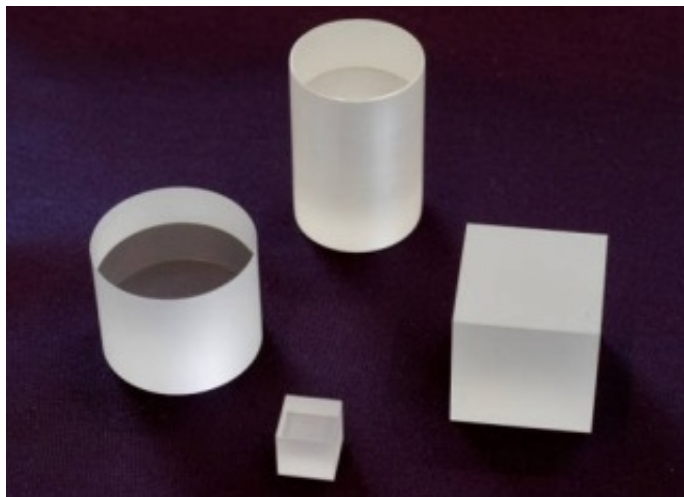


Рисунок 6 – Кристалл CsI

Чистый CsI находит применение главным образом в экспериментальной физике благодаря комбинации быстрого времени спада и относительно высокой плотности материала. Сцинтиллятор CsI имеет незначительную гигроскопичность, поэтому контакта с водой и высокой влажностью следует избегать.

Нелегированный CsI имеет максимум излучения при 315 нм с интенсивностью одна десятая от интенсивности излучения легированных кристаллов CsI. При комнатной температуре световой выход очень низок, но при охлаждении до  $-77^{\circ}\text{C}$  увеличивается в 10 раз. Фотоэлектронный выход в комбинации с бищелочным фотокатодом ФЭУ составляет около 400 фотоэлектронов/МэВ при комнатной температуре. Для небольших кристаллов энергетическое разрешение составляет 17-18% по линии 662 кэВ.

Сцинтиллятор CsI имеет короткую компоненту времени спада 16 нс, которая представляет 70-80% светового выхода из кристалла. Также существует значительно более медленная компонента времени спада 1000 нс, пиковая длина волны которой приходится на 500 нм. Эта компонента представляет 20% общего светового выхода из кристалла. Несмотря на то, что охлаждение чистого CsI увеличивает общий световой выход, также растет медленная компонента времени спада.

Также стоит отметить, что чистый CsI представляет собой самый дешевый из сцинтилляционных кристаллов, имеющих быстрое время спада.

## 1.8 Преимущества и недостатки предложенного решения

Преимущества данной установки состоят в том, что:

1. Установка достаточно простая и удобная в использовании;
2. Установка достаточно дешевая в реализации по сравнению с использованием оптоволокна или легированного кварца;
3. Управление будет как ручным с использованием контроллера, так и дистанционным с помощью соответствующего программного кода. Такая вариативность полезна, например, когда экспериментатор не может находиться рядом с установкой и соответственно он будет управлять ею дистанционно, либо наоборот – если возникнет необходимость вручную изменить положение платформы с детектором;
4. Установка обладает маневренностью, что будет полезно в случае, когда нужно будет обеспечить быстрое перемещение детектора на SiPM, например, когда исследуемый детектор находится на пучке ограниченное время.

Недостатком является тот факт, что с её помощью невозможно отследить профиль пучка (в отличие, как раз-таки, от аналогов), так как разрабатывается она по принципу true/false по факту наличия пучка в данной точке пространства.

## 2 Ход работы

### 2.1 Моделирование установки

Первым этапом работы было проектирование установки в программе для 3D-моделирования T-Flex. Данный выбор программы основывался на большом опыте работы с ней, однако в связи с некоторыми недостатками в дальнейшем будет осуществлен переход на другую платформу для моделирования.

Задача для проектирования состояла в том, чтобы получить такую установку, которая будет осуществлять передвижение небольшой платформы с установленным детектором на основе SiPM по двум координатам. Сравнив некоторые варианты реализации идеи, было решено сделать конструкцию, принцип работы которой основывается на работе фрезерного станка CNC 3018 (см. рис. 7).

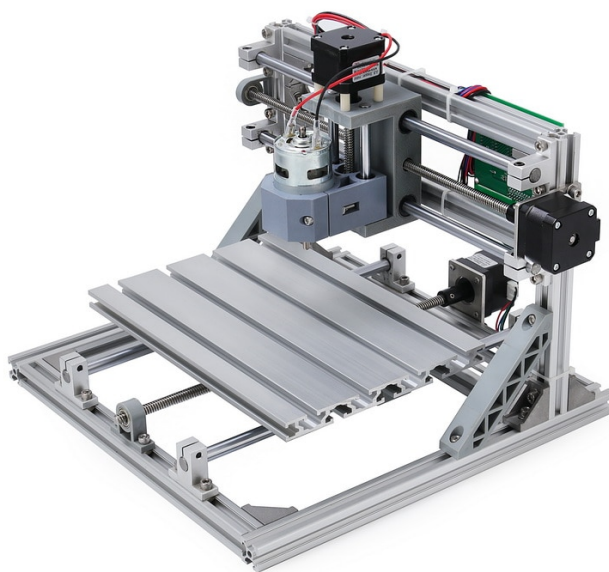


Рисунок 7 – Фрезерный станок CNC 3018

Принцип заключается в следующем:

Передвижение рабочего устройства по каждой из координатных прямых осуществляется с помощью ходовых винтов, приводимых во вращение с помощью шаговых двигателей. Чтобы обеспечить неподвижность рабочего устройства относительно отклонений от прямой, вдоль которой происходит

движение, используются направляющие валы. Также стоит отметить, что вся конструкция в целом имеет прочную, устойчивую опору.

После изучения изложенного выше принципа было произведено 3D-моделирование установки, обладающей схожим механизмом действия. Результат можно увидеть на рис. 8.

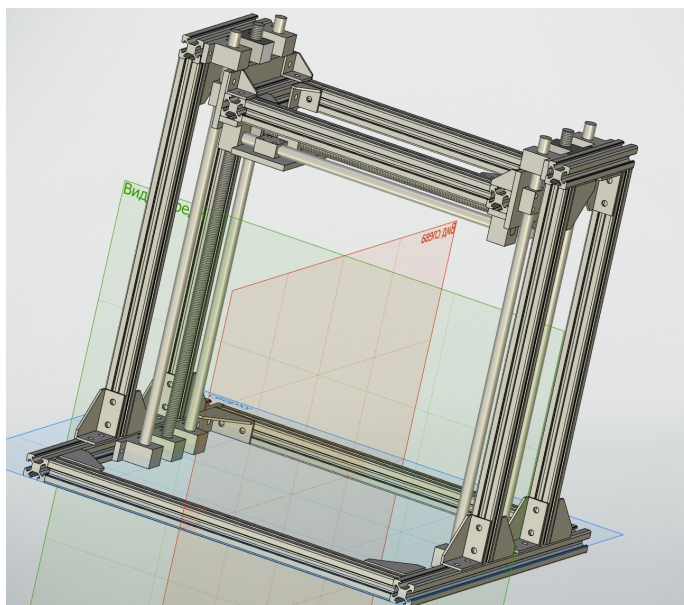


Рисунок 8 – Внешний вид спроектированной установки

## 2.2 Корректирование установки под реальные детали и дальнейшая работа

После моделирования установки идет этап покупки необходимых материалов для изготовления прототипа. Однако в связи с недостатком деталей необходимых размеров возникла проблема покупки необходимых материалов. В связи с чем были произведены корректировки в модели, а именно: были изменены размеры рабочей плоскости установки, и, как следствие, габаритные размеры установки. Также в качестве шагового двигателя была выбрана модель NEMA17, обладающая определенными размерами, под которые пришлось изменять некоторые параметры установки. Итоговый результат проектирования можно увидеть на рис. 9.

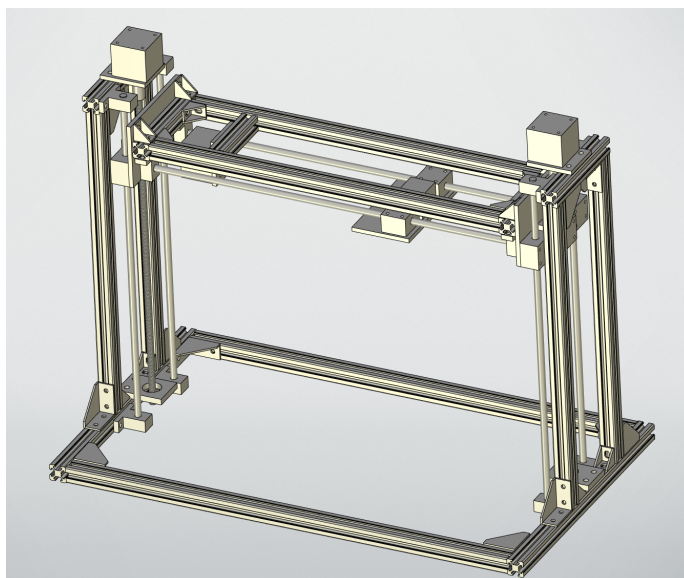


Рисунок 9 – Внешний вид спроектированной установки после изменений

После покупки необходимых деталей, на данный момент разработка установки находится на этапе сборки и корректирования физического состояния конструкции. Также производится программирование шаговых двигателей для корректной работы в заданных условиях.



## 2.3 Усовершенствование установки - система поиска пучка

После сборки рабочего прототипа установки, работа не будет прекращена. В дальнейшем установка будет усовершенствована системой поиска пучка, основанная на визуализации пучка с помощью самовыравнивающегося лазерного указателя (см. рис. 10).

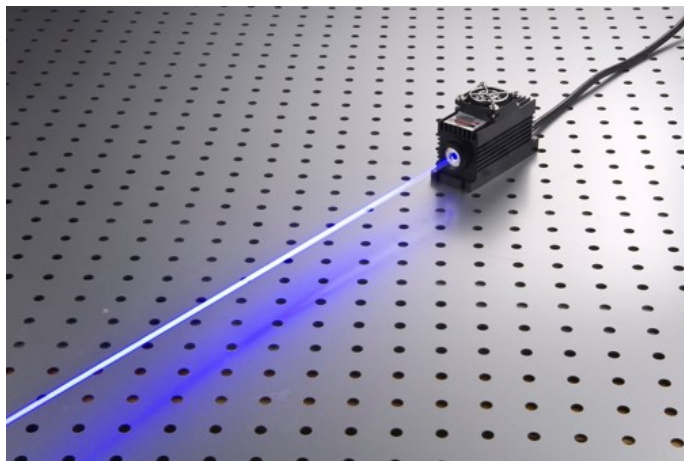


Рисунок 10 – Самовыравнивающийся лазерный указатель

Система визуализации будет работать таким образом, что лазер будет указывать на ход (направление) пучка и корректировать направление лазерного пучка согласно изменениям в направлении пучка заряженных частиц, что позволит увидеть невооруженным глазом, куда направлен пучок, казалось бы, невидимых частиц.

## 2.4 Усовершенствование установки - триггер пучка

Также усовершенствование будет заключаться в использовании триггера пучка, что, как следствие, дает такую настройку установки, что, пока, детектор находится В пучке, система будет сканировать окружающее детектор пространство на предмет нахождения пучка. Иными словами, все вместе это можно назвать Интеллектуальным поиском пучка.

### 3 Заключение

В первую очередь данная установка будет использована научной группой во время ближайшего эксперимента на пучке. Также она будет полезна тем исследователям, которые занимаются разработкой и модернизацией детекторов, а особенно тем из них, кто имеет детекторы небольших размеров для тестирования, находящихся в их непосредственном распоряжении. Также стоит напомнить, что такая система будет особенно удобна в той ситуации, когда тестируемый детектор находится на пучке ограниченное количество времени. Было произведено 3D-моделирование установки и её корректировка под реальные условия. По окончании работы будет изготовлен рабочий прототип установки, который будет обладать не только большой мобильностью, но и который будет более простым и дешевым в реализации по сравнению с аналогами. Также будут реализовано усовершенствование установки в виде визуализации пучка и его интеллектуальный поиск. И наконец, будет проведено само тестирование детектора с известным принципом работы с помощью построенного прототипа установки с применением мини-спектрометра на основе SiPM с использованием сцинтиллятора CsI.

# Список литературы

1. *Ruchti R. C.* The use of scintillating fibers for charged-particle tracking // Annual Review of Nuclear and Particle Science. — 1996. — т. 46:281—319. — с. 645.
2. *Akchurin N., Wigmans R.* Quartz fibers as active elements in detectors for particle physics // Review of Scientific Instruments. — 2003. — т. 74(6):2955—2972.
3. *Ottonello P.* Slow neutron beam diagnostics with a scintillating fiber detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 366. — 1995. — т. 248—253.
4. *Finocchiaro P.* A scintillating fibre-based profiler for low intensity ion beams // Instruments and Methods in Physics Research 385. — 1997. — т. 31—36.
5. *Veronese I.* Feasibility study for the use of cerium-doped silica fibres in proton therapy // Radiation Measurements 45. — 2010. — т. 635—639.
6. A beam monitor detector based on doped silica and optical fibres / S. Braccini [и др.] // RJournal of Instrumentation. — 2011. — т. T02001. — с. 13.
7. *Gundacker Stefan T. R. M.* Experimental time resolution limits of modern SiPMs and TOF-PET detectors exploring different scintillators and Cherenkov emission // Physics in Medicine & Biology. — 2020.
8. *Клемин С. Кузнецов Ю. Ф. Л.* Кремниевый фотоэлектронный умножитель // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. — 2007. — авг. — с. 80—86.