

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ НА ТЕМУ:  
РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТА ПОЗИТРОННО-ЭМИССИОННОГО  
ТОМОГРАФА

Научный руководитель  
к. ф.-м. н.

А. В. Гробов

Выполнил  
студент группы М19-115

Н. М. Левашко

Москва 2020

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>1 Позитронно-эмиссионный томограф</b>	<b>3</b>
1.1 Принцип работы . . . . .	3
1.2 Изучение основной составляющей детектора . . . . .	4
<b>2 Создание модели установки</b>	<b>6</b>
<b>3 Экспериментальная установка</b>	<b>8</b>
3.1 Устройство . . . . .	8
3.2 Полученные результаты . . . . .	9
3.3 Будущий проект . . . . .	10
<b>Заключение</b>	<b>12</b>
<b>Список литературы</b>	<b>13</b>

# Введение

Одним из актуальных направлений в современной ядерной медицине является позитронно-эмиссионная томография. Однако используемая на сегодняшний день технология имеет ряд существенных недостатков. Одним из решений этой проблемы является создание позитронно-эмиссионного томографа (ПЭТ) с использованием жидкого аргона в качестве сцинтиллятора.

В данной работе будет рассмотрен один из модулей полноценной установки ПЭТ. Будут представлены сведения о принципах работы данного устройства, результаты по моделированию работы, а также имеющиеся на данный момент экспериментальные наработки.

Основная цель работы - изготовление прототипа кольца детектора для отработки необходимых методов анализа и считывания данных, и обеспечение, тем самым, возможности создания прототипа самого ПЭТ на аргоне.

# Глава 1

## Позитронно-эмиссионный томограф

### 1.1 Принцип работы

Позитронно-эмиссионная томография - это метод медицинской визуализации, который обычно используется для получения трехмерных изображений внутренних органов и частей тела испытуемых. Этот метод основан на детектировании двух гамма-квантов с энергией 511 кэВ, испускаемых вследствие аннигиляции электрона, присутствующего в тканях субъектов, с позитроном, испускаемым радионуклидами, введенными субъектам. Схематично процесс представлен на рисунке (1.1) и (1.2)

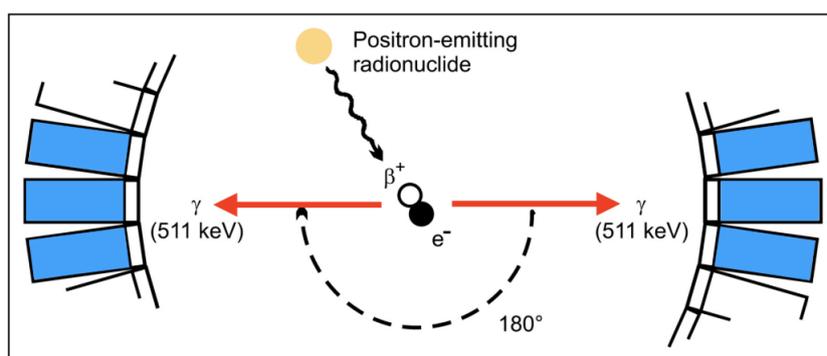


Рис. 1.1: Процесс аннигиляции электрона и позитрона, приводящий к рождению двух гамма-квантов

Испущенные гамма-кванты создают вспышки низкоэнергетичных фотонов в сцинтилляторе, которые затем регистрируются детекторной системой, состоящей, например, из матриц SiPM. Определяется местоположение вспышки, затем проводится восстановление позиции точки аннигиляции [2].

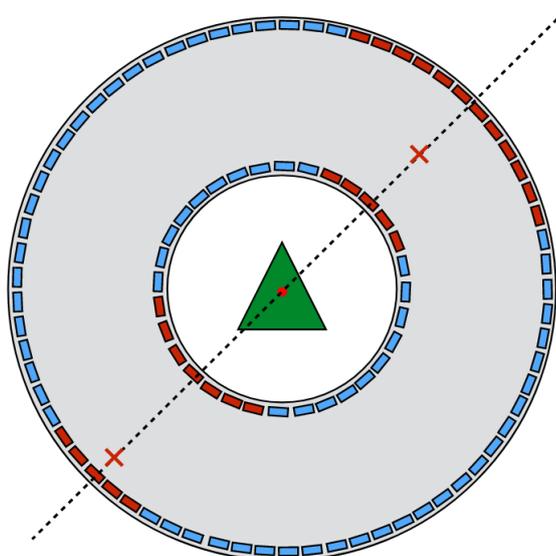


Рис. 1.2: Процесс регистрации гамма-квантов

Однако излученный гамма-квант может рассеяться на электроне и изменить свою изначальную траекторию, что может привести к неверному определению точки аннигиляции (рис. 1.3). Анализ таких событий - сложный и трудоемкий процесс [3].

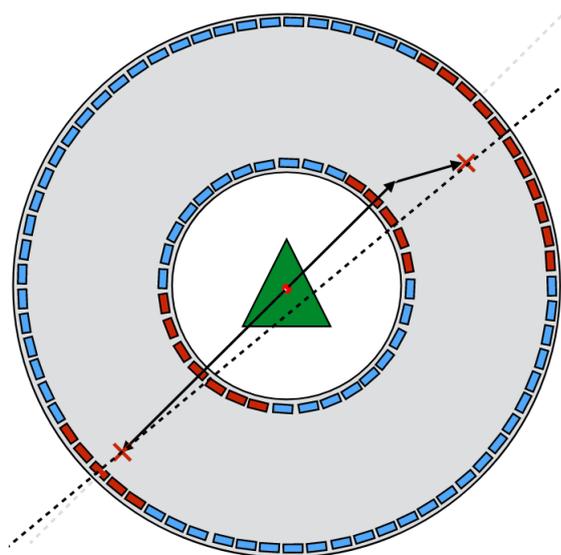


Рис. 1.3: Рассеяние гамма-кванта

## 1.2 Изучение основной составляющей детектора

Для лучшего понимания устройства и работы детектора было решено подробнее изучить его основополагающую детектирующую часть - сборку из SiPM.

С этой целью на базе кафедральной лаборатории электроники была изготовлена интересующая нас компонента детектора по следующей схеме (рис.1.4).

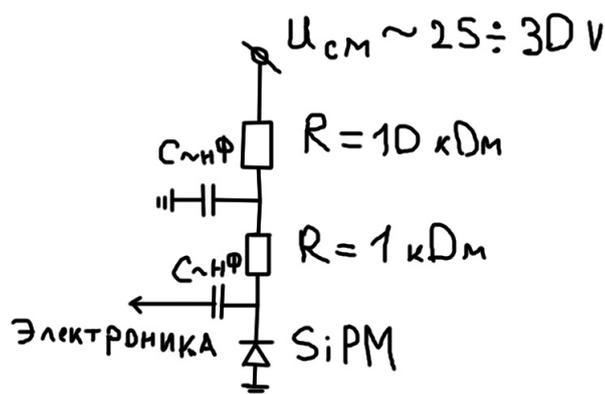


Рис. 1.4: Принципиальная электрическая схема сборки из кремниевого фотоумножителя

Результаты работы представлены ниже (рис.1.5). Был проведен тест изделия на предмет детектирования частиц, в результате которого было установлено, что изделие действительно работоспособно (рис.1.6). Тем не менее, имеется несколько недостатков. Изделие требует очень хорошего заземления и изоляции его элементов, так как случайное смещение изделия может привести к помехам и замыканию контактов.



Рис. 1.5: Часть сборки без кремниевого фотоумножителя

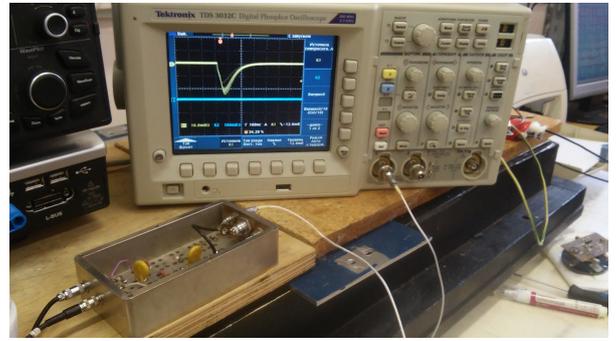


Рис. 1.6: Тест работы изделия

Также была начата работа над созданием прототипа из двух SiPM (рис.1.7), с помощью которых можно было бы, используя схему совпадений, попробовать определить координату источника. Это достигалось бы при помощи серии измерений на разных участках установки. Полученные данные бы после обрабатывались, и извлекалась одна координата источника. Для определения других координат, модуль пришлось бы перемещать в других направлениях. Однако работа в этом направлении была приостановлена ввиду внешних обстоятельств. Тем не менее, был получен полезный опыт работы с устройствами.

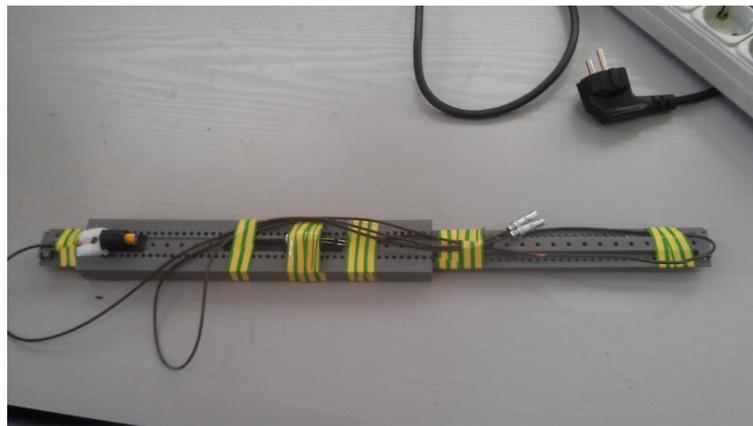


Рис. 1.7: Модуль из двух SiPM для определения координаты источника

## Глава 2

### Создание модели установки

При разработке любого проекта всегда полезно провести предварительное моделирование. Это позволяет устранить множество недочетов еще на стадии проектирования, а также определить некоторые первоначальные возможные характеристики установки. С нуля был создан проект составной части позитронного эмиссионного томографа в среде компьютерного моделирования GEANT4 [5].

Проект представляет собой кольцо (рис.2.1) с внешним диаметром  $d_1 = 300$  мм, внутренним диаметром  $d_2 = 240$  мм и высотой  $h = 30$  мм с внутренними отверстиями под сцинтилляционные кристаллы. Источник помещается на вращающуюся платформу посередине. Гамма-кванты после аннигиляции позитрона попадают в сцинтилляторы, расположенные в боковых отверстиях, после чего рожденные фотоны регистрируются кремниевыми фотопумножителями(SiPM).

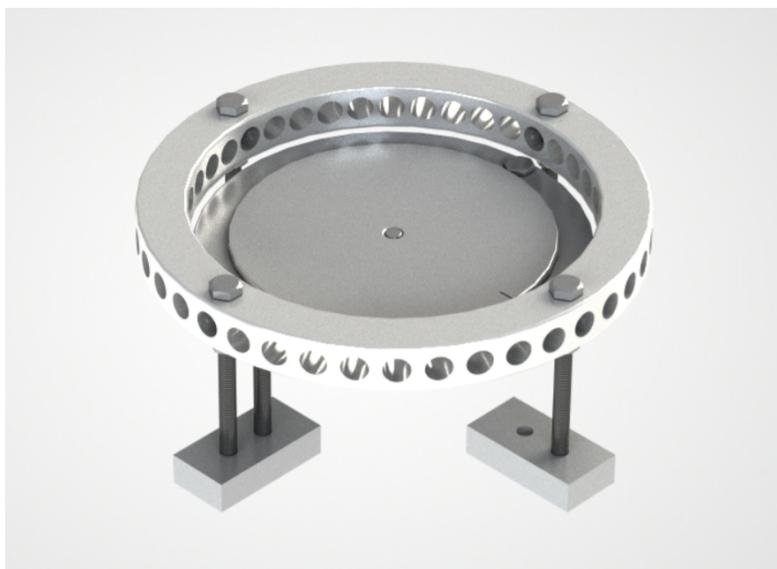


Рис. 2.1: Проект экспериментальной установки для отработки методики измерений на части ПЭТ

По данным чертежам была создана модель установки(рис.2.2). Прделана немалая работа по программированию физики процесса сцинтилляции(рис.2.3), а также снятию сигнала с SiPM(рис.2.4). Однако проект требует некоторой доработки. В частности, необходимо добавить отражающее покрытие на кристалл, учесть квантовые эффекты при регистрации фотонов SiPM, осуществить реализацию снятия сигнала одновременно с нескольких SiPM. Тем не менее, уже на этой стадии разработки можно проводить грубый анализ. По форме импульса можно установить долю быстрой и медленной сцинтилляционной компоненты кристалла. После полной реализации проекта необходимо создать алгоритм для определения координаты радиоактивного источника. Это является основополагающей задачей на данный момент.

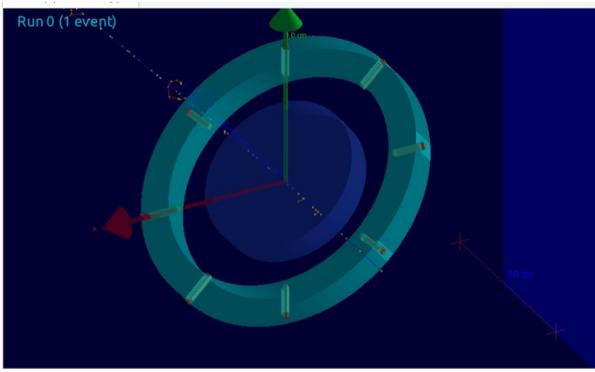


Рис. 2.2: Модель кольца детектора

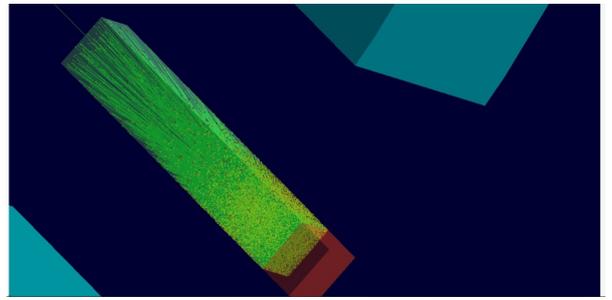


Рис. 2.3: Сцинтилляционная вспышка в кристалле

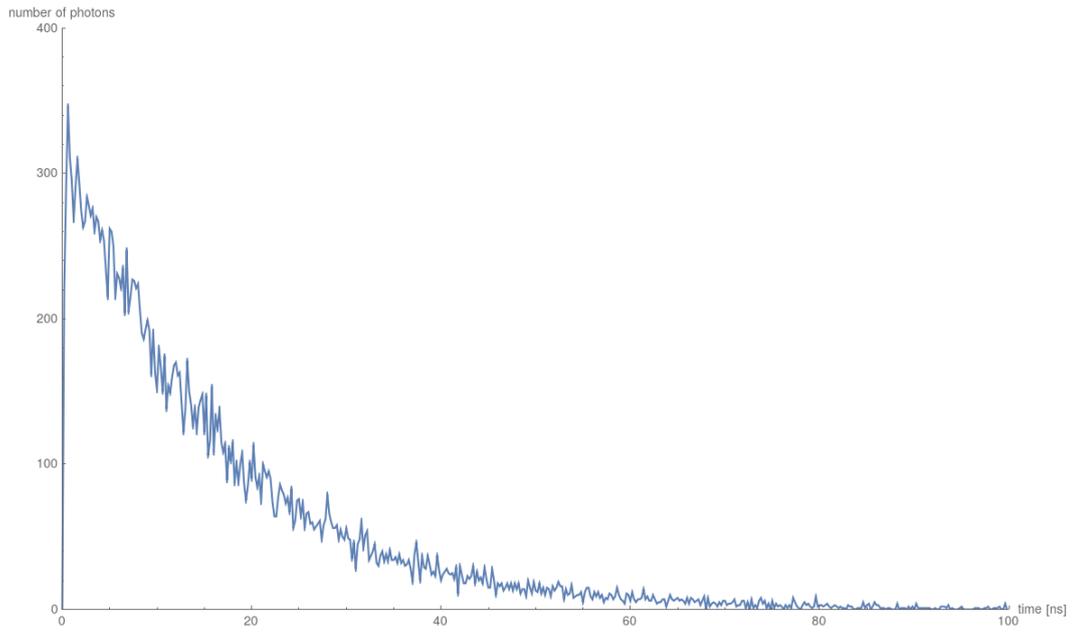


Рис. 2.4: Зависимость числа попавших в SiPM сцинтилляционных фотонов от времени для набора из 10000 событий

# Глава 3

## Экспериментальная установка

### 3.1 Устройство

Для тестирования отдельных элементов будущего проекта была собрана специальная установка (рис.3.1). Она представляет из себя следующее: источник гамма-квантов, пластиковая трубка, выступаемая в качестве сцинтиллятора и световода, 2 кремниевых фотоумножителя (рис.3.2), 2 предусилителя с комплектом батарей, интегральная схема специального назначения PETIROC2A (рис.3.3), персональный компьютер. Источник можно перемещать вдоль пластиковой трубки, изменяя его положение относительно двух SiPM, сигналы с которых поступают на интегральную схему, где происходит их обработка и последующая передача на ПК для взаимодействия с пользователем. Сама схема PETIROC2A - это 32-канальная внешняя интегральная схема специального назначения (ASIC), предназначенная для считывания показаний кремниевых фотоумножителей (SiPM) для приложений измерения времени пролета частиц. Детекторная часть установки помещена в светонепроницаемую коробку для защиты от постороннего фона. Схематично установка изображена на (рис.3.4).



Рис. 3.1: Общий вид экспериментальной установки



Рис. 3.2: Детектирующий элемент установки: сборка SiPM, предусилитель, питаемый от батарей, вывод сигнала



Рис. 3.3: Интегральная схема специального назначения PETIROC2A

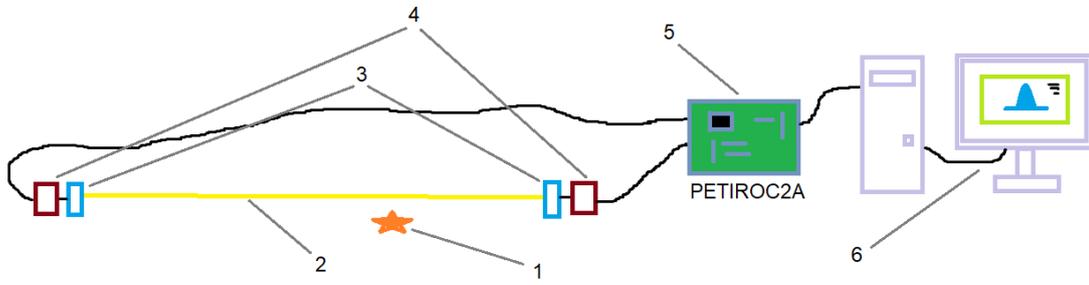


Рис. 3.4: Схематичное изображение установки. Здесь 1 - источник гамма-квантов, 2 - пластиковая трубка, выступающая в роли сцинтиллятора, 3 - схема включения SiPM, 4 - предусилители, 5 - плата PETIROC2A, 6 - ПК для отображения получаемых данных

### 3.2 Полученные результаты

Была проведена серия измерений на данной установке. Результаты представляют собой набор гистограмм при разном положении источника, при его отсутствии, а так же с различным видом питания предусилителя.

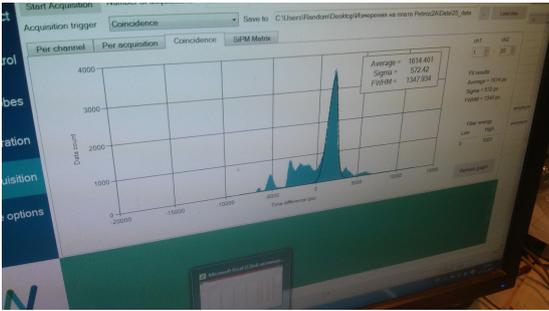


Рис. 3.5: Вид программы для работы с сигналом

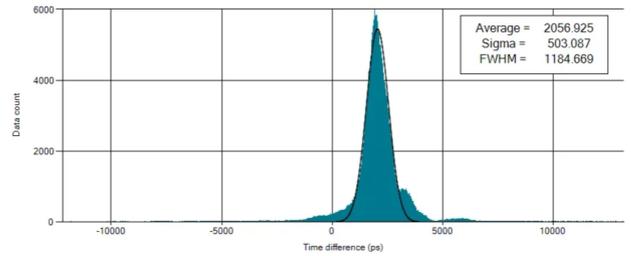


Рис. 3.6: Пример получаемых данных

Покажем, как можно грубо оценить положение источника по получаемым данным. Для начала получим формулу, затем произведем расчеты. Итак, наш источник расположен где-то на оси трубки в точке  $x$ . Свет от этой точки дойдет до концов трубки и зарегистрируется через время  $t_1$  и  $t_2$  для левого и правого края соответственно. Тогда пройденное светом расстояние можно вычислить, умножив время на скорость света в трубке  $v$ . Задаем систему координат так, чтобы начало координат соответствовало середине трубки. Тогда, зная длину трубки  $l$ , можно найти координату источника.

$$x = \frac{l}{2} - vt_2 \tag{3.1}$$

Однако в нашем распоряжении имеется только величина  $\Delta t = t_1 - t_2$ . Поэтому добавляем условие, что оба световых пучка суммарно проходят всю длину трубки, и решаем систему:

$$\begin{cases} v(t_1 + t_2) = l \\ t_1 - t_2 = \Delta t \end{cases} \tag{3.2}$$

Учитывая изменение скорости света в материале, для  $x$  получаем:

$$x = \frac{1}{2} \frac{c}{n} \Delta t, \quad (3.3)$$

где  $n$  - показатель преломления материала трубки.

В связи с особенностями измерений величину  $\Delta t$  необходимо модифицировать, учитывая значение этой величины при положении источника в начале координат -  $\Delta t_0$ .

$$x = \frac{1}{2} \frac{c}{n} (\Delta t - \Delta t_0),$$

Тем самым, посчитанное значение координаты будет соответствовать действительности.

Подставим численные значения и сравним полученный результат с известным положением источника. Показатель преломления полистирола - материала трубки -  $n = 1.588$ , длина трубки  $l = 45$  см,  $\Delta t_0 = 3500$  пс. Тогда для случая на 3.6 получаем:

$$x = \frac{1}{2} \frac{c}{n} (\Delta t - \Delta t_0) = -13.58$$

Известное положение источника  $x_k = -7$  см. Ошибка составила  $\delta = 0.94$ . Вероятнее всего данное значение объясняется внутренними дефектами трубки, а также недостаточной калибровкой "нулевого" значения.

По результатам измерений выявлен ряд особенностей, связанных с использованием пластиковой трубки. Во-первых, существуют области на этой трубке, где очень сильно ухудшается временное разрешение (в 2-3 раза). В большинстве своем значение стандартного отклонения колеблется от 300 до 400 пс, однако в областях оно может достигать и 900-1000 пс. Вероятнее всего, это связано с внутренними дефектами самой трубки и решается путем ее замены на более качественную. Во-вторых, коллиматор практически не влияет на временное разрешение.

Далее планируется более тщательная калибровка установки с целью исследования именно пространственного разрешения.

### 3.3 Будущий проект

В ближайшем будущем планируется создание полноценной установки на 8 SiPM с использованием 4 светопроводящих трубок. Данная конструкция позволит производить измерения нескольких пространственных координат положения радиоактивного источника в пространстве. Предположительный вариант установки изображен на (рис.3.7).

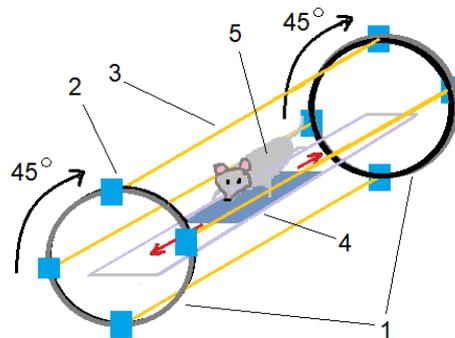


Рис. 3.7: Схематическое изображение установки с 2 кольцами. Здесь 1 - кольца с детекторными системами, 2 - SiPM вместе с предусилителем, 3 - пластиковая трубка, выступающая в роли сцинтиллятора, 4 - выдвигная платформа для помещения источника внутрь установки, 5 - источник или исследуемое тело с источником

Она будет представлять из себя 2 кольца с 4 SiPM на каждом. Кольца соединены между собой светопроводящими трубками. Внутри конструкции с помощью выдвижной платформы помещается источник или тело с источником. Обеспечена возможность поворота колец с трубками вокруг оси на 45 градусов, что улучшит пространственное разрешение путем увеличения статистики и наличием измерений в других плоскостях.

# Заключение

В данной работе рассматривался один из модулей полноценной установки ПЭТ. Были представлены сведения о принципах работы данного устройства, результаты по моделированию работы, а также имеющиеся на данный момент экспериментальные наработки.

Была создана модель кольца детектора в среде компьютерного моделирования GEANT4 с целью отработки необходимых методов анализа и считывания данных с будущего элемента детектора, приведены первичные данные результатов моделирования. В будущем планируется создание алгоритма определения координаты источника радиоактивного излучения по данным симуляций, также будет проведена доработка имеющегося проекта.

В дальнейшем также планируется продолжить работу с имеющейся экспериментальной установкой. Более подробно будет исследовано влияние качества сцинтилирующей пластиковой трубки на временное разрешение установки. Кроме того, планируется создание полноценного детектора на 8 SiPM с поворотными кольцами. Параллельно с этим будут вестись работы по созданию моделей имеющейся экспериментальной установки и будущего проекта.

# Список литературы

1. Cristiano Galbiati. *Detector, three-dimensional direct positron imaging unit, and method to estimate the differential of the radiation dose provided to cancer cells and healthy tissues during hadrotherapy*, 2016. (United States Patent Application Publication ,Pub. No.: US 2016/0367205 A1)
2. J.M. Benlloch-Rodriguez. *PETALO, a new concept for a Positron Emission TOF Apparatus based on Liquid xenOn*, 2016, (arXiv:1605.09615)
3. J. Renner, J.M. Benlloch-Rodríguez, J.V. Carrión and others. *Processing of Compton events in the PETALO readout system*, 2019. (arXiv:2001.04724)
4. DarkSide collaboration. <http://darkside.lngs.infn.it/>
5. S.Agostinelli, J.Allison, K.Amako and others. *Geant4—a simulation toolkit*, 2003. ([https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8))