

Содержание

1	Введение	4
2	Программное обеспечение	8
2.1	Схема работы	8
2.2	Входные данные	10
2.3	Геометрия	12
2.4	Пример запуска	13
3	Параметризация детектора частиц	15
3.1	Трековая система	16
3.2	Калориметр	22
3.3	Реконструкция частиц	26
3.4	Мюонная система	27
3.5	Системы идентификации	28
3.5.1	Время-пролётная система	29
3.5.2	ТоР	29
3.5.3	АШИФ	30
3.5.4	ФАРИЧ	32
3.5.5	FDIRC	33
4	Результаты	35
5	Заключение	40
	Список литературы	41

1 Введение

Супер c - τ фабрика (СЧТФ) представляет собой проект нового электрон-позитронного коллайдера в институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск) на энергию от 2 до 5–6 ГэВ в системе центра масс со светимостью $10^{35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [1, стр. 11] (Рис. 1). Физическая программа СЧТФ включает в себя такие фундаментальные вопросы, как исследование физики D -мезонов, запрещенных и подавленных распадов c -кварков, проверки Стандартной модели в τ -распадах и другие.

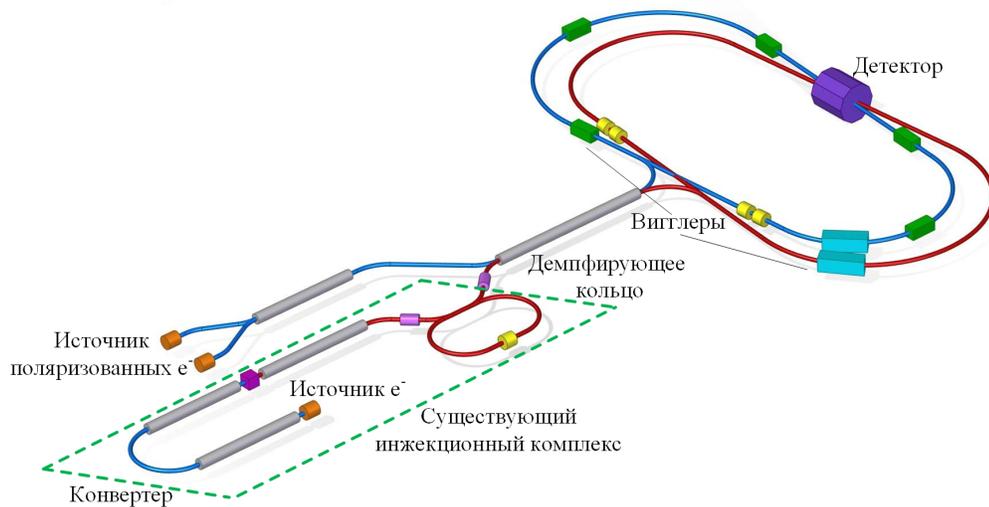


Рис. 1: Схема ускорительного комплекса Супер c - τ фабрика.

Место встречи электронов и позитронов в СЧТФ будет оборудовано универсальным детектором частиц (Рис. 4), который послужит для измерения их различных характеристик: координат, энергии, импульса. Кроме того, он будет оборудован системами идентификации частиц.

Важным этапом проектирования детектора является его компьютерное моделирование. На этапе разработки детектора моделирование позволяет определить параметры подсистем, необходимых для успешного выполнения

физической программы эксперимента. Также оно помогает в отладке алгоритмов реконструкции и в расчёте ожидаемых значений сигнала, получаемых с детектора, и шумов.

Компьютерное моделирование можно разделить по степени детализации на параметрическое и полное.

Полное моделирование осуществляется с помощью программного пакета Geant4 [2] или FLUKA [3]. Оно детально описывает взаимодействие частиц с веществом и требует значительных вычислительных затрат. Для него требуется описание геометрии, детальное описание материала каждой части детектора, оцифровки данных и реконструкции частиц. Возможно моделирование не только детектора целиком, но и отдельных его подсистем.

При моделировании с помощью пакета Geant4, частицы, которые моделируются генератором событий, проводятся через детектор с определённым шагом, который задаётся в описании. На каждом шаге для частицы случайным образом по вероятности возможных процессов принимается решение, какое взаимодействие произойдёт. Geant4 учитывает такие процессы взаимодействия частиц с веществом, как: электромагнитные процессы, адронные процессы, фотон-адронные и лептон-адронные процессы, моделирование распадов, параметризация ливней. Для выбранного таким образом процесса случайным образом выбираются требуемые параметры, например, угол рассеяния. На каждом шаге учитывается чувствительность материала, например, для расчёта поглощения энергии и процесса оцифровки. На выходе данные записываются в формате, аналогичном формату реальных выходных данных с детектора. Кроме того, дополнительно может быть смоделирована оцифровка сигнала.

Полное моделирование позволяет понять, какие параметры зарегистрированных частиц удастся получить, а также разрабатывать и проверять программы реконструкции ещё до того, как коллайдер и детектор будут сконстру-

ированы и введены в эксплуатацию. Более того, данный вид моделирования необходим на этапе отладки методики анализа данных, для определения лучших критериев отбора событий.

На ранней стадии разработки детектора используется параметрическое моделирование. В данном типе моделирования не учитывается взаимодействие частиц с веществом, нет распадов частиц, а также возможно наложение одной системы на другую. Параметрическое моделирование позволяет легко проверять большое число вариантов за счёт простого изменения параметров и изучать их влияние на работу детектора. Таким образом определяется общая структура детектора, например, какие системы идентификации лучше других подходят для заявленных экспериментов.

Для параметрического моделирования на данный момент существует несколько программных продуктов. Примерами такого программного обеспечения (ПО) является PAPAS (The Parametrized Particle Simulation) [4], Delphes [5]. PAPAS и Delphes используются для параметрического описания детектора, стоящего в месте столкновений электрон-позитронных пучков. Однако, они разработаны для моделирования экспериментов на высоких энергиях (≥ 100 ГэВ), для экспериментов на низких энергиях они не подходят. Кроме того, в них заложена параметризация лишь трековой системы, калориметра и мюонной системы.

Также существует множество программ для моделирования, ориентированных на конкретную задачу. Например, для моделирования пробега частиц низкой энергии (≤ 1 ГэВ) в веществе могут быть использованы SRIM [6], AIREX [7].

Целью дипломной работы является разработка пакета программного обеспечения для параметрического моделирования детектора СЧТФ. Для достижения поставленной цели, с учётом уже проделанной работы, были

поставлены следующие задачи:

- обновить параметризацию дрейфовой камеры согласно меморандуму [8];
- внедрить систему идентификации частиц FDIRC;
- внедрить мюонную систему;
- разработать пользовательский интерфейс для изменения параметров моделируемого детектора;
- проверить правильность проведения частиц через объем детектора;
- разработать реконструкцию частиц;
- провести анализ получаемых откликов детектора.

В данной работе в главе 2 описана общая логика работы и формат входных данных разрабатываемого программного обеспечения, а также объяснено, каким образом пользователь может взаимодействовать с разработанной программой. В главе 3 подробно излагается параметризация каждой из подсистем детектора, реализованного в ПО. Обзор результатов, полученных с помощью данного ПО дан в главе 4. Краткое заключение о проделанной работе представлено в главе 5.

2 Программное обеспечение

Программное обеспечение для параметрического моделирования детектора разрабатывается на языке Python. Данный язык был выбран по той причине, что разработка на Python не требует больших временных затрат. Он позволяет использовать множество встроенных функций, а также сторонних библиотек, которые значительно упрощают программирование. Например, в данной работе используются такая библиотека Python, как `numpy`.

Однако, одним из главных недостатков языка Python является низкая скорость исполнения кода относительно других языков программирования, например C/C++. Но различные средства языка позволяют получить достаточную для данного программного обеспечения скорость. Обработка 10000 событий для распада $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ со всеми распадами τ с энергией в системе центра масс 5 ГэВ занимает 4 мин 20 с, с включенным генератором частиц для распада π^0 в два фотона — 1 мин 6 с.

2.1 Схема работы

Программное обеспечение работает по схеме, изображённой на Рис. 2.

На первом этапе работы ПО считывает конфигурационные файлы, содержащие информацию необходимую для параметризации. Они подробнее будут описаны в подразделе 2.2 Входные данные.

Первичный генератор частиц не является частью пакета. С него на вход программы подается файл с событиями в формате ROOT-файла [9].

ROOT представляет собой систему обработки данных, разработанную в



Рис. 2: Схема работы программного обеспечения.

ЦЕРНе. Она используется для анализа данных и выполнения моделирования в области физики высоких энергий. Несмотря на то, что ROOT написан на языке C++, его можно использовать с другими языками (Python, R, Mathematica).

Модель событий создана с помощью пакета PODIO [10]. PODIO — библиотека C++ для создания и обработки данных в физике элементарных частиц. Данные представляют собой структуры, поддерживающие отношения (один-к-одному, один-ко-многим). Данный пакет имеет интерфейс Python, что позволяет использовать его в разрабатываемом программном обеспечении.

Во входном файле содержится информация о сгенерированных частицах, а именно их заряд, масса, импульс, координата вершины рождения частицы, идентификационный номер, согласно классификации Particle Data Group [11].

Получив все необходимые входные данные ПО начинает обработку. Каждая частица проводится отдельно через все подсистемы детектора, которые возвращают свой отклик. Работа ПО может быть опционально скорректирована, что будет описано более подробно далее (подраздел 2.4 Пример запуска).

Результатом работы ПО является ROOT-файл, содержащий отклики всех подсистем детектора, а также данные о сгенерированных частицах. Опцио-

нально имеется возможность запустить визуализатор. На рисунке (Рис. 3), получаемом с него, изображён детектор в двух проекциях (XY и YZ) и расчётные траектории частиц, сгенерированных первичным генератором.

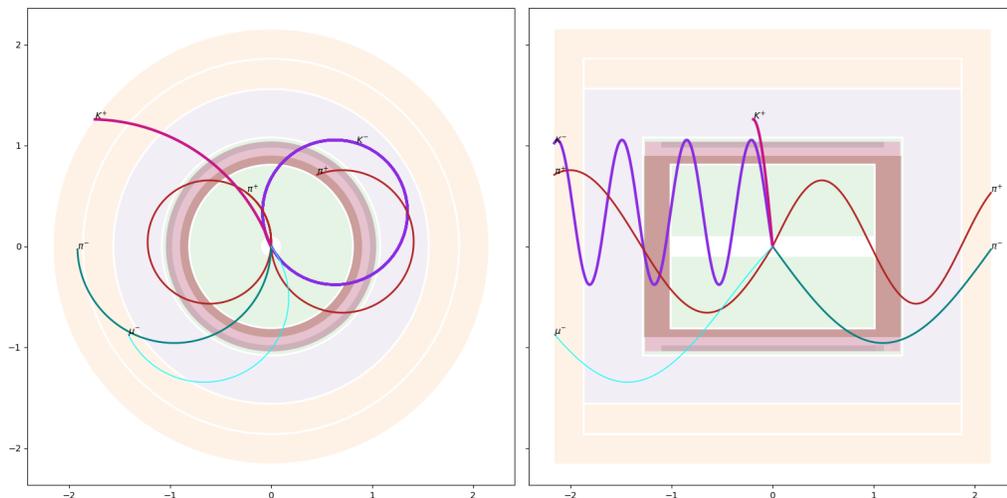


Рис. 3: Результат работы программного обеспечения: одно из сгенерированных событий. Слева — проекция XY, справа — проекция YZ. Масштабная сетка приведена в метрах.

2.2 Входные данные

В конфигурационных файлах содержится информация для параметризации детектора. Они имеют формат json.

Листинг 1: Конфигурационный файл.

```

1 {
2   "layout": "detlayout_std01.json",
3   "tracker": "trkpars_std01.json",
4   "pid": "pidpars_std01.json",
5   "calo": "calopars_std01.json",
6   "muon": "muonpars_std01.json",
7   "fdirc": "fdircpars_std01.json"
8 }
```

Для создания детектора в ПО используются несколько конфигурационных файлов. Один из них (`detlayout_std01.json`) полностью задаёт структуру детектора, т.е. то, какие подсистемы в нём есть. Кроме того, в данном файле содержится информация о геометрических размерах подсистем и величина магнитного поля, создаваемого магнитной катушкой.

Листинг 2: Конфигурационный файл с описанием структуры детектора.

```

1 {
2   "calo": {
3     # Внешний радиус подсистемы, м
4     "rMax": 1.55,
5     # Внутренний радиус подсистемы, м
6     "rMin": 1.09,
7     # Максимальная z координата подсистемы, м
8     "zMax": 1.86,
9     # Минимальная z координата подсистемы, м
10    "zMin": 1.293
11  },
12  "field": {
13    # Величина магнитного поля, Тл
14    "value": 1.5
15  },
16  "fdirc": {
17    "rMax": 1.04,
18    "rMin": 0.98,
19    "zMax": 1.1,
20    # Косинус угла, показывающего размер входного отверстия подсистемы
21    "hole_r": 0.3,
22    # Показатель преломления
23    "n": 1.5
24  },
25  ...

```

Следующий файл (`parttype.json`) содержит параметры для визуализации. В нём описаны характеристики линий, которыми на изображении, получаемом с визуализатора, отображаются траектории частиц: толщина, цвет, тип.

Листинг 3: Описание параметров визуализации для позитрона.

```
1   "-11": {
2       # Цвет
3       "color": "red",
4       # Тип
5       "lType": "-",
6       # Толщина
7       "width": 0.5,
8       # Подпись
9       "nameTeX": "e^{+}"
10  }
```

Для некоторых подсистем детектора существует отдельный конфигурационный файл, в котором хранится параметризация системы.

2.3 Геометрия

В разрабатываемом программном обеспечении детектор представляется набором вложенных друг в друга цилиндров. Их геометрические размеры задаются в конфигурационном файле, как уже говорилось ранее. Ось цилиндров направлена вдоль z для удобства расчётов. Данная ось направлена вдоль распространения пучков. Начало координат находится в точке их взаимодействия.

Траектории частиц в зависимости от их заряда могут представлять собой прямую (класс `Line`) или винтовую линию (класс `Helix`). В качестве параметров для линии хранится скорость частицы, её начальное положение и направление движения. Скорость вычисляется с использованием информации о массе и импульсе частицы. Для винтовой линии дополнительно рассчитывается её радиус. Метод `pathType()` возвращает тип траектории в формате строки ("`Line`" или "`Helix`"). Для обоих типов траектории могут быть рассчитаны:

- время пролёта до точки с заданной z -координатой (метод `timeAtZ(self, ← z)`);
- время пролёта до точки с заданным расстоянием от оси детектора и координаты частицы в данной точке (метод `timeAtRho(self, rho)`);
- координаты местоположения частицы в заданный момент времени (метод `locationAtTime(self, t)`);
- длина пути, пройденного частицей (метод `length(self, time)`).

Для винтовой линии также могут быть определены направление движения частицы в заданный момент времени (метод `directionAtTime(self, t)`) и фаза (метод `phaseAtTime(self, t)`).

Для определения пересечений различных элементов геометрии в ПО существует отдельный класс `Crosser`. Он позволяет рассчитывать время и определять точки пересечения траекторий и цилиндров, а также цилиндрических слоёв.

2.4 Пример запуска

Перед началом работы необходимо сконфигурировать систему и скопировать необходимые для работы файлы (Листинг 4).

Листинг 4: Конфигурация системы для запуска ПО в терминале.

```

1 # Вход в систему
2 ssh stark -X
3 # Настройка окружения
4 setupSCTAU; asetup SCTauSim, master, latest
5 # Создание рабочей директории
6 mkdir workarea

```

```

7 cd workarea
8 mkdir run
9 cd run
10 # Копирование необходимых файлов
11 cp /home/razuvaev/public/misc/↵
    pi_ms_f1_mppc2_px3_d200_mla4_graph2d.root .
12 cp /home/razuvaev/public/misc/gun1.cfg .
13 cp /home/whitem/public/misc/g4beamline_pi_plus_100k_parse.root ↵
    .
14 cp /home/whitem/public/misc/g4beamline_mu_plus_100k_parse.root ↵
    .
15 # Запуск
16 runparsim.py

```

Работа программного обеспечения может быть скорректирована с помощью опций, описанных в Таблице 1.

Таблица 1: Параметры запуска.

Параметр	Значение	Пример
-b, --batch	выключает визуализацию	runparsim.py -b
-i, --input	задаёт входной файл	runparsim.py -i ↵ ./jpsi_gen.root
-o, --output	задаёт файл для выходных данных	runparsim.py -o ↵ ./jpsi_out.root
-n, --neve	задаёт количество событий (по умолчанию 3142)	runparsim.py -n ↵ 12345
-c, --change	изменение параметров детектора (необходим конфигурационный файл)	runparsim.py -c ↵ parameters.dat
-g, --gun	генератор частиц	runparsim.py -g
-ig, --input-gun	чтение конфигураций генератора	runparsim.py -ig↵ file.json
--profile	вывод перечня использованных функций и времени их выполнения	runparsim.py --↵ profile

3 Параметризация детектора частиц

Столкновение электронов и позитронов приводит к рождению новых частиц, которые регистрируются детектором. Большинство универсальных детекторов частиц содержат такие подсистемы, как трековая система, калориметр, системы идентификации, сверхпроводящая катушка (Рис. 4).

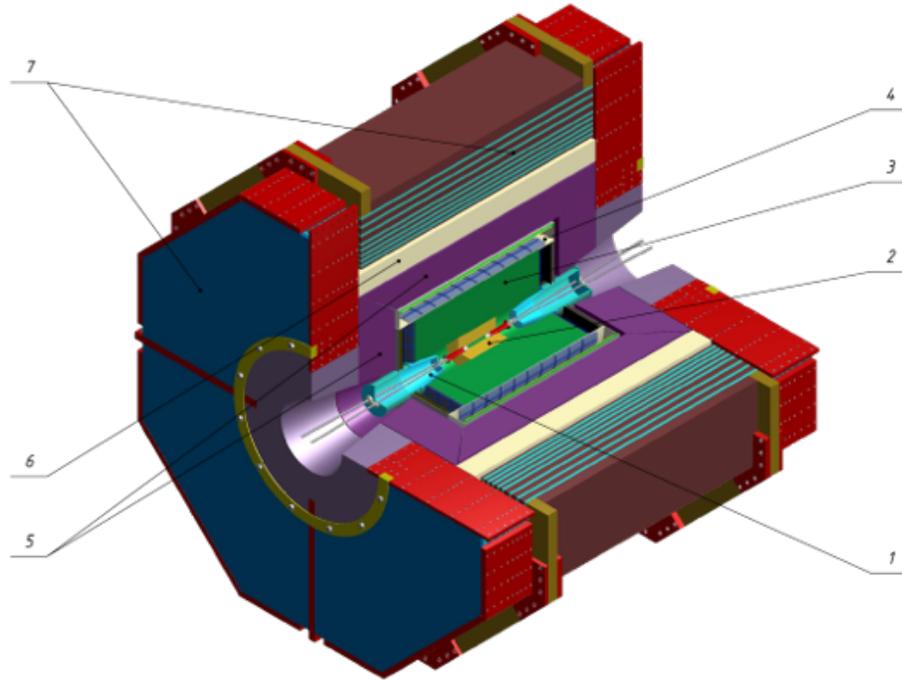


Рис. 4: Устройство детектора: 1 — вакуумная камера, 2 — внутренняя трековая система, 3 — дрейфовая камера, 4 — система идентификации, 5 — калориметр, 6 — катушка, 7 — мюонная система.

В данной главе описаны подсистемы детектора и их параметризация.

3.1 Трековая система

Планируется, что трековая система будет состоять из внутреннего и внешнего трекера.

Внутренний трекер служит для увеличения эффективности реконструкции мягких треков, а также для определения траекторий и импульсов короткоживущих частиц, например, K_S^0 . Для СЧТФ рассматривается три варианта внутреннего трекера: время-проекционная камера (ВПК), многослойный полосковый кремниевый детектор и цилиндрический каскадный газовый электронный умножитель (ГЭУ). На данный момент осуществляется моделирование внутреннего трекера с помощью Geant4.

Принципиальная схема конструкции время-проекционной камеры представлена на Рис. 5 [12, стр. 106]. Чувствительный объем камеры заполнен рабочим газом, например, смесью Ar и CO₂ в соотношении 80:20. Электродами, расположенными на торцах камеры создается равномерное аксиальное электрическое поле. Если ВПК большого размера, в центре находится дополнительно сеточный катод. В СЧТФ ВПК предполагается длиной 60 см. В чувствительном объеме камеры происходит первичная ионизация дрейфами заряженных частиц в направлении считывающих плоскостей, которые в большинстве случаев состоят из многопроволочных торцевых детекторов. Время прибытия первичных электронов на считывающие плоскости позволяет определить продольную z -координату. Радиальную компоненту можно получить из сработавшей проволоочки.

ВПК позволяет на один трек получить несколько сот точек, что гарантирует точное определение радиуса кривизны и энергетических потерь.

Многослойный кремниевый детектор представляет собой ионизационную

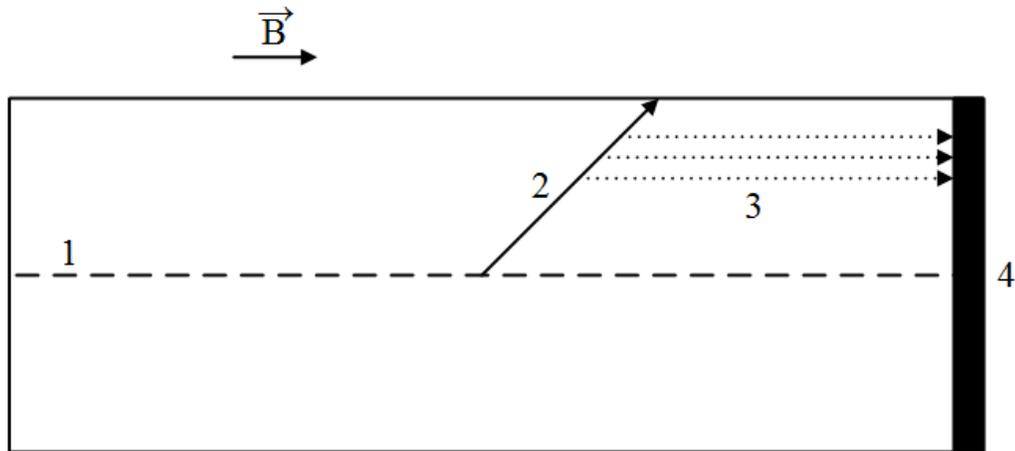


Рис. 5: Принципиальная схема конструкции ВПК: 1 — ось детектора, 2 — траектория частицы, 3 — первичная ионизация, 4 — считывающая плоскость.

камеру с твёрдым телом в качестве чувствительной среды. Заряженные частицы или фотоны в рабочей среде образуют электронно-дырочные пары, а электрическое поле, приложенные к полупроводниковому кристаллу, позволяет собирать образовавшиеся носители заряда.

Газовый электронный умножитель представляет собой тонкую диэлектрическую плёнку, покрытую с двух сторон медной фольгой, в которой проделано множество отверстий. Перед ГЭУ располагается катод и промежуток (дрейфовый промежуток), заполненный газом, например, аргоном. Первичные электроны, рождённые в этом промежутке, фокусируются в отверстиях, в которых под действием сильного электрического поля развиваются электронные лавины. Таким образом каждое отверстие представляет собой независимый пропорциональный счётчик. Часть электронов может перейти в следующий газовый промежуток через отверстие для усиления в следующем каскаде или для регистрации на аноде. В трековых системах получили широкое распространение трёх-каскадные ГЭУ [13].

В дрейфовой камере происходит определение траекторий частиц и ионизационных потерь энергии для идентификации. Дрейфовая камера имеет

проволочную структуру, состоящую из 10 суперслоёв по 4 ячейки в каждом (Рис. 6). 4 суперслоя являются аксиальными, т. е. параллельными оси детектора, а остальные — стереослои с проволочками, находящимися под углом к оси детектора. Стереоугол изменяется от 45 мрад до 76 мрад. Чувствительный объём камеры заполнен газом, согласно [1, стр. 66] предполагается использовать гелий-изобутан в пропорции 80:20. Существует несколько способов определения координаты частицы: измерение токовых сигналов на концах каждой анодной проволочки, измерение времени распространения сигналов по анодным проволочкам на обоих концах.

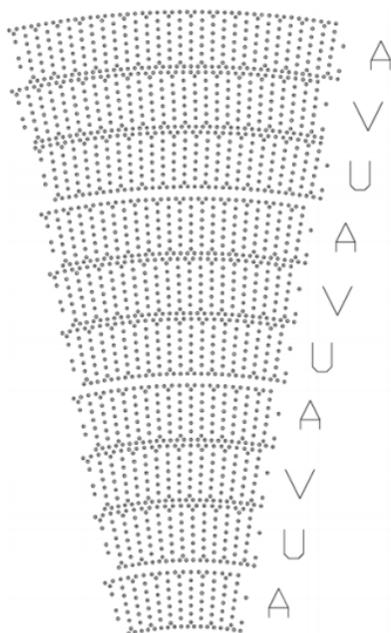


Рис. 6: Проволочная структура дрейфовой камеры [1]: А — аксиальные суперслои; U, V — стерео суперслои.

В разрабатываемом программном обеспечении пока отсутствует внутренний трекер, из-за отсутствия параметризации для него. Дрейфовая камера же занимается расчётом траектории частицы и потери энергии в трековой системе, описана в SctTracker.py. Параметры параметризации описаны в trkpars_std01.json.

Листинг 5: Параметры параметризации трековой системы.

```
1 {
2   # Матрица ковариации
3   "corrMtx": {
4     "pij": -0.08,
5     "pxi": 0.03,
6     "pxij": 0.03,
7     "xij": -0.08
8   },
9   # Минимальный поперечный импульс частицы, ГэВ
10  "minPt": 0.05,
11  # Параметры для параметризации импульса
12  "momres": [
13    0.0013,
14    0.045
15  ],
16  # Размер ячейки, радиус анодного слоя для аксиальных слоёв, мм
17  "layerAx": [
18    [
19      6.306,
20      217.306
21    ],
22    ...
23    [
24      7.091,
25      782.061
26    ]
27  ],
28  # Размер ячейки, радиус анодного слоя для суперслоёв, мм
29  "layerSt": [
30    [
31      6.473,
32      280.136
33    ],
34    ...
35    [
36      7.165,
37      730.775
38    ]
39  ],
40  # Вероятность зарегистрировать частицы в зависимости от импульса
41  "ptProb": [
42    [
43      0.1,
44      0.8
45    ],
46    ...
47    [
```

```

48         10.0,
49         0.99
50     ]
51 ],
52 # Радиационная длина, м
53 "radLen": 187,
54 # Параметры для разрешения импульса в плоскости ХУ
55 "resParPT": 0.00212,
56 # Параметры для разрешения z координаты импульса
57 "resParPZ": [
58     0.001281,
59     0.00308
60 ]
61 }

```

Согласно чертежу детектора СЧТФ (Приложение А), дрейфовая камера занимает следующее пространство: внутренний радиус — 0,2 м, внешний радиус — 0,8 м, максимальная z -координата — 1 м.

В дрейфовой камере в ПО могут быть зарегистрированы только заряженные частицы, их траектория представляет собой винтовую линию.

Для расчёта ошибки измерения координаты точки вылета частицы используется матрица ошибок, задаваемая в конфигурационном файле.

Импульсное разрешение рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma(p_t) = p_t \sqrt{(\alpha p_t)^2 + \beta^2}, \quad (1)$$

где p_t - импульс частицы в плоскости ХУ.

В первой версии параметризации трековой системы коэффициенты $\alpha = 0,13$ и $\beta = 0,45$ были взяты из эксперимента ВаВаг. В обновлённой версии параметризации измеренный импульс рассчитывается по формулам представленным ниже [8].

$$\alpha = \alpha_0 \frac{L_0^2}{L^2} \sqrt{\frac{42}{N+1}} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{53,9 \times 10^{-3}}{vB} \times (1 + \cos^2 \theta)^{\frac{3}{4}} \times \frac{(1 + 0,038 \ln \frac{L_{tr}}{X_0})}{\sqrt{LX_0 \sin \theta}}, \quad (3)$$

где N — число измерений координаты, $\alpha_0 = 2,12 \times 10^{-3}$ из моделирования, L_0 — разность максимального и минимального радиусов дрейфовой камеры, L — расстояние пройденное частицей (Рис. 7), v — скорость частицы в единицах скорости света, B — величина магнитного поля, θ — угол отклонения от оси цилиндра, представляющего собой трековую систему, L_{tr} — длина траектории частицы в дрейфовой камере, X_0 — радиационная длина внутри трековой системы.

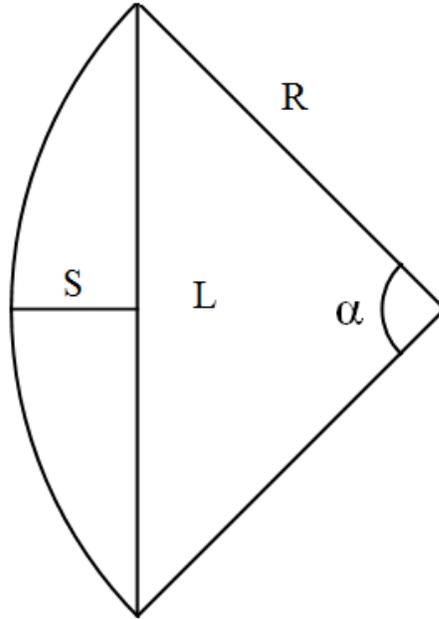


Рис. 7: Иллюстрация к формуле 3.

$$\sigma_{\theta}^{MS} = \frac{14 \times 10^{-3} z}{vp} \sqrt{\frac{L_{tr}}{X_0}} \left(1 + 0,038 \ln \frac{L_{tr}}{X_0} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta}^0 = \begin{cases} c/N_z, & \theta \leq 40,16^\circ \\ d \sin^2 \theta / \sqrt{N_z}, & \theta > 40,16^\circ \end{cases} \quad (5)$$

$$\sigma_p = p \sqrt{\alpha^2 p_t^2 + \beta^2 + \text{ctg}^2 \theta \times \sigma_{\theta}^2}, \quad (6)$$

где σ_{θ}^{MS} — разрешение, связанное с многократным рассеянием, z — заряд

частицы, σ_θ^0 связано с пространственным разрешением, $c = 1,28 \times 10^{-3}$, $d = 3,08 \times 10^{-3}$, N_z — число измерений z -координаты, σ_p — разрешение по полному импульсу, p_t — поперечная величина импульса.

Число измерений координаты рассчитывается как число слоёв проволочек, пересечённых частицей. Используемые для этого радиусы и размеры ячеек слоёв заданы в конфигурационном файле (Листинг 5). Частицы, имеющие менее 6 измерений координаты (т. е. мягкие треки), не имеют отклика трековой системы. Остальные параметры, используемые в формулах, рассчитываются из геометрических соображений.

Отклик трековой системы содержит информацию об идентификационном номере частицы, её импульсе, времени нахождения в дрейфовой камере, начальном местоположении, потерях энергии.

3.2 Калориметр

Калориметр представляет собой подсистему детектора, которая служит для измерения энергии и координат частиц, являясь главной системой регистрации γ -квантов.

Различные частицы по разному взаимодействуют с веществом и, соответственно, отклик калориметра у них отличается.

Фотоны, электроны и позитроны являются ливнеобразующими частицами. При прохождении через вещество калориметра они взаимодействуют с электронами и ядрами атомов, в результате чего возникает электромагнитный ливень из электронов и фотонов, которые затем воздействуют на регистрирующую систему. Возникший электромагнитный ливень является причиной слияния кластеров, что в дальнейшем может привести к потере данных о событии.

Мюоны не участвуют в сильных взаимодействиях, и калориметр регистрирует узкий кластер.

Адроны (например, пионы, каоны) способны участвовать в сильном взаимодействии. Они могут развивать адронные каскады, однако это происходит при больших энергиях, чем те, которые планируются в СЧТФ. Энергичные заряженные адроны ведут себя как минимально-ионизирующие частицы.

Нейтроны, нейтрино и анти-нейтрино проходят через вещество калориметра без взаимодействия, а потому в большинстве случаев не регистрируются.

Из-за разницы во взаимодействии частиц с веществом, калориметры могут быть использованы для идентификации частиц, в частности они помогают разделить электроны, адроны и мюоны. А мюоны можно отличить от пионов и электронов по их низкому энерговыделению.

Калориметры бывают двух типов: гомогенные и гетерогенные (или сэмплинг калориметры).

В гомогенных калориметрах поглощающий материал одновременно является и детектирующим. Такие калориметры можно разделить на следующие классы:

- полупроводниковые калориметры (кремниевые, германиевые),
- черенковские калориметры,
- сцинтиляционные калориметры,
- калориметры с жидкими благородными газами (аргон, ксенон) (например, на КМД-3 [14]).

В сэмплинг калориметрах слои поглотителя чередуются с детектирующими слоями. В качестве поглотителя часто используют свинец, железо,

медь, уран. Также гетерогенные калориметры можно разделить на классы в зависимости от типа активной среды:

- сцинтиляционные калориметры,
- газовые калориметры,
- твердотельные калориметры (кремний),
- жидкостные калориметры (аргон).

В проекте СЧТФ планируется использовать электромагнитный калориметр полного поглощения на основе кристаллов чистого йодистого цезия.

В параметрическом моделировании калориметр, согласно чертежу (Приложение А), занимает следующую область: внутренний радиус — 1,05 м, внешний радиус — 1,875 м, максимальная z координата — 1,255 м, минимальная z координата — 1,909 м. В параметрическом моделировании размеры калориметра заданы таким образом, чтобы он располагался в описанной области.

Стоит уточнить, что деления калориметра на кристаллы не происходит.

Параметры для параметризации содержатся в отдельном файле (calopars_std01.json):

Листинг 6: Параметры параметризации калориметра.

```

1 {
2   # Длина кластера для электронов и фотонов, м
3   "clSizeEGamma": 0.015,
4   # Длина кластера для остальных частиц, м
5   "clSize": 0.045,
6   "eMin": {
7     # Минимальная энергия регистрации в боковой части калориметра, МэВ
8     "barrel": 0.015,
9     # Минимальная энергия регистрации в основании калориметра, МэВ
10    "endcap": 0.015
11  },
12  # Параметры для разрешения по энергии

```

```

13     "resPar": [
14         1.34e-2,
15         0.066e-2,
16         0.0,
17         0.82e-2
18     ],
19     # Максимально допустимый косинус угла между треком частицы и осью ←
цилиндра
20     "costhMax": 0.9
21 }

```

Если энергия частицы меньше e_{Min} , или она физически не попадает в калориметр, что проверяется по максимально допустимому косинусу, то такие частицы отбрасываются, у них нет отклика калориметра.

Энергия, измеренная калориметром, разыгрывается случайным образом по нормальному распределению с математическим ожиданием, рассчитываемом по формуле:

$$E = \sqrt{m^2 + p^2}, \quad (7)$$

где m — масса частицы, p — её импульс.

Среднеквадратичное отклонение σ_E рассчитывается следующим образом [15], где E измеряется в ГэВ:

$$\sigma_E = E \sqrt{0,000134^2 + \left(\frac{0,00066}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{0,00081}{\sqrt[4]{E}}\right)^2}. \quad (8)$$

Первое слагаемое отвечает за неоднородности отклика детектора, второе — шумовая компонента, третье указывает на флуктуации частиц в ливне.

В результате отклик калориметра содержит информацию об энергии, выделяемой частицей, положении и размере кластера калориметра.

3.3 Реконструкция частиц

Реконструкция подразумевает под собой сшивку, т. е. объединение данных, полученных разными подсистемами детектора.

В разрабатываемом программном обеспечении предполагается сшивка данных полученных трековой системой и калориметром с учётом геометрического пересечения кластеров (реализована в файле `Reconstruction.py`). Выполняется она уже после прогона всех частиц через все подсистемы детектора.

На вход в `Reconstruction.py` подаются все отклики, полученные в калориметре, которые включают в себя размер кластера, время попадания и точку входа частицы в калориметр, энерговыделение. Дополнительно из конфигурационного файла считываются размеры калориметра. Далее выполняется следующий алгоритм:

- Объединение геометрически пересекающихся кластеров. Кластеры представляются в виде шаров с центром в точке входа частицы в калориметр и радиусом, равным размеру кластера. Для ливнеобразующих и минимально ионизирующих частиц характерные размеры кластеров различны.
- Нахождение соответствия между треками и кластерами. Сначала для первой частицы, поступившей на обработку в соответствии с точкой входа её в калориметр, находится соответствующий ей отклик калориметра (класс `CaloHit`), и для данной частицы устанавливается соответствие между ней и объединённым кластером, которому принадлежит данный отклик, затем тоже самое происходит для второй частицы, но уже «занятый» кластер не рассматривается.
- Пересчёт параметров кластеров. Энергия частицы, измеренная в кало-

риметре, рассчитывается как сумма энергий, выделенных частицей в кристаллах. Время срабатывания калориметра берётся как минимальное среди времён. Размер кластера рассчитывается как объединение площадей кристаллов. Точка конверсии рассчитывается как среднее взвешенное с учётом энергий, выделенных частицей в кристаллах.

На выход подаются новые отклики калориметра, которые приписываются зарегистрированным частицам.

3.4 Мюонная система

Мюонная система используется для отделения мюонов от пионов и других частиц, рождаемых при столкновении, а также для регистрации космических мюонов. Для этого измеряется глубина проникновения частицы в поглотитель. Проникновение мюонов в поглотитель определяется ионизационными потерями энергии заряженных частиц и ядерными взаимодействиями адронов с веществом поглотителя.

В разрабатываемом программном обеспечении работа мюонной системы основана на данных, полученных моделированием с помощью пакета G4Beamline [16], основанном на Geant4, и описана в SctMuon.py. В моделировании на основе G4Beamline сохранена основная геометрия (мюонная система представляет собой цилиндр из 8 слоёв поглотителя (железо), между которыми находятся чувствительные слои (полистерол), торец цилиндра смоделирован аналогично слоями; размеры мюонной системы были выбраны согласно чертежу СЧТФ (Приложение А)). Также смоделированы магнитная катушка и калориметр, другие системы отсутствуют. Частицы, которые имеют импульс больше 4 ГэВ, разыгрываются как частицы с импульсом 4 ГэВ, так как для них отсутствуют

данные моделирования на основе Geant4.

В результате работы мюонной системы в выходной файл записывается номер наиболее удалённого от центра детектора слоя, где частица была зарегистрирована.

3.5 Системы идентификации

Системы идентификации используются для определения типа рождаемых частиц. Задача сводится к определению заряда и массы частицы в добавление к уже имеющимся измерениям энергии и импульса. Для ожидаемых в конечном состоянии частиц кратность заряда не превышает единицы. Таким образом для заряженных частиц остаётся произвести разделение по массе, для чего могут быть использованы зависимости ионизационных потерь и черенковского излучения от скорости частицы, либо прямое измерение времени пролёта с целью определения скорости.

Существует множество различных систем идентификации, например, время-пролётная система (ВПС), ТоР и т. д. Мюонную систему также можно отнести к системам идентификации. В проекте СЧТФ планируется использовать ФАРИЧ и мюонную систему, так как они удовлетворяют всем требованиям идентификации частиц в СЧТФ.

Для возможности проведения сравнений различных опций в разрабатываемом программном обеспечении реализовано несколько систем идентификации частиц: время-пролётная система (ВПС), черенковский счётчик с восстановлением черенковского угла по времени распространения излучения в радиаторе (ТоР), пороговый аэрогелевый черенковский счётчик со сбором света на переизлучатели спектра (АШИФ), детектор черенковских колец на основе

фокусирующего аэрогеля (ФАРИЧ), фокусирующий детектор черенковских колец с полным внутренним отражением (FDIRC).

3.5.1 Время-пролётная система

В системе идентификации ВПС (ToF — Time-of-Flight) по импульсу частицы и времени её пролёта в дрейфовой камере определяется скорость, из которой в дальнейшем определяется масса частицы.

В параметрическом моделировании на выходе система выдает измеренное время, координату точки входа частицы в систему и соответствующее время. Измеренное время разыгрывается по нормальному распределению с разрешением 35×10^{-12} с. Координата и время входа частицы в систему рассчитывается в классе, соответствующем типу трека частицы.

3.5.2 ТоР

Схема системы идентификации ТоР (Time-of-Propagation) изображена на Рис. 8 [17]. Когда заряженная частица проходит через радиатор, она порождает излучение Вавилова-Черенкова. Фотоны распространяются к концам излучателя посредством полного внутреннего отражения. Фотоны, распространяющиеся назад, отражаются плоским зеркалом на конце радиатора. На переднем конце фотоны фокусируются зеркалом на плоскость фотодетектора.

В разрабатываемом программном обеспечении данная система возвращает те же параметры, что и ВПС, только имеет разрешение 50×10^{-12} с.

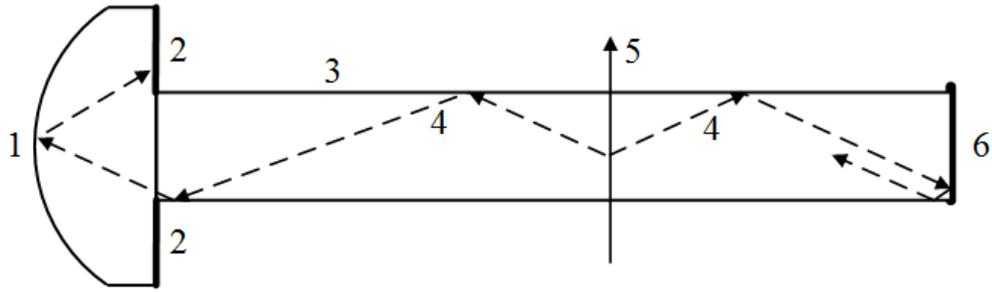


Рис. 8: Структурная схема ToP: 1 — фокусирующее зеркало, 2 — фотодетектор, 3 — радиатор, 4 — траектория фотона, 5 — траектория частицы, 6 — зеркало.

3.5.3 АШИФ

АШИФ (ASHIPN — Aerogel SHifter PHotomultiplier) является счётчиком частиц, имеющий следующий принцип работы. В аэрогелевом блоке находится переизлучатель в виде пластины (Рис. 9), занимающий минимальный телесный угол. Переизлучатель представляет собой флуоресцирующее вещество, т. е. способное поглощать свет определённой длины волны и переизлучать его на большей длине волны. Примерно половина света, попавшего в переизлучатель, выходит наружу, остальной свет за счёт полного внутреннего отражения достигает фотокатода ФЭУ.

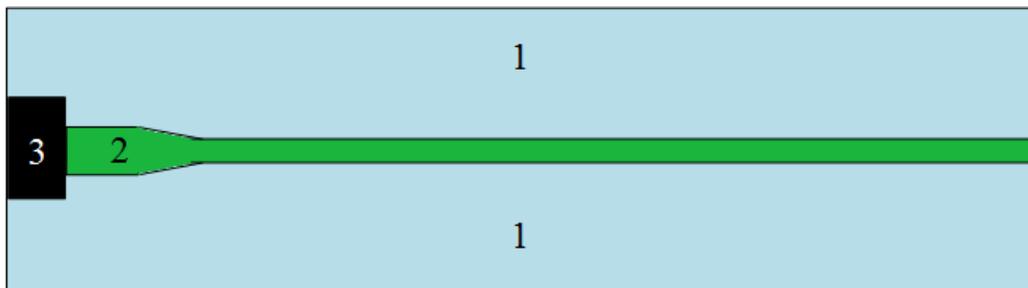


Рис. 9: Структурная схема АШИФ: 1 — аэрогель, 2 — переизлучатель, 3 — ФЭУ.

В разрабатываемом программном обеспечении система АШИФ возвращает число регистрируемых фотоэлектронов. Коэффициент преломления может

быть равным $n = 1,015$ или $n = 1,03$. В детектре АШИФ предполагается использование трёх слоёв аэрогеля: один слой с $n = 1,03$ и два с $n = 1,015$. Количество регистрируемых электронов разыгрывается по распределению Пуассона с разрешением, которое рассчитывается по следующим формулам (Рис. 10, Рис. 11):

$$\beta = \frac{p}{m}, \quad (9)$$

$$l = t\beta c, \quad (10)$$

$$k = \frac{21l}{2 \times 2 \times 0,16} \xi \left(1 + \frac{1}{\beta^2}\right) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{\beta^2}\right) \left(1 + \operatorname{erf} \left[\beta - \left|\frac{\sqrt{T}}{0,0001}\right|\right]\right), \quad (11)$$

$$N_{\text{p.e.}} = 0,03 + \frac{21l}{0,16} \left(1 - \frac{1}{\beta^2(n^2 - 1)}\right) \left(1 + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[10^4 \left(\beta - \left|\frac{1}{n^2 - 1}\right|\right)\right]\right) + k, \quad (12)$$

где p — импульс частицы, m — масса частицы, t — время, которое частица находилась в системе АШИФ, c — скорость света, если $n = 1,015$ коэффициенты $T = 2,93$, $\xi = 0,07$, если $n = 1,03$, то $T = 2,08$, $\xi = 0,05$. Данная параметризация была предоставлена Барняковым А. Ю.

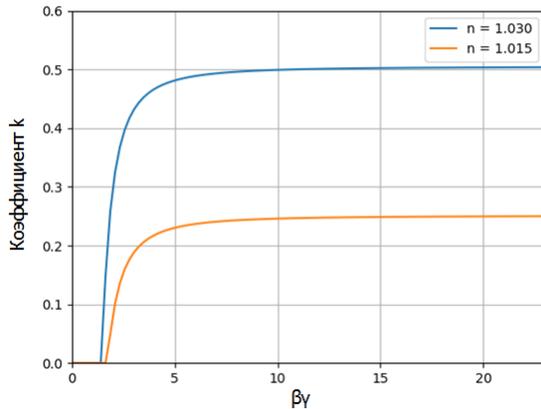


Рис. 10: Зависимость коэффициента k от $\beta\gamma$ частицы.

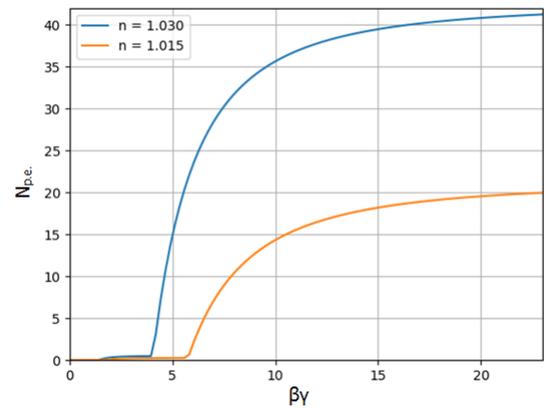


Рис. 11: Зависимость ожидаемого количества регистрируемых фотоэлектронов в АШИФ от $\beta\gamma$ частицы.

3.5.4 ФАРИЧ

ФАРИЧ (FARICH — focusing aerogel ring imaging Cherenkov) — это детектор черенковского излучения на основе «фокусирующего» аэрогеля. При пролёте через аэрогель частица порождает черенковское излучение, которое распространяется в виде конуса. Излучение образует на поверхности фотодетектора изображение в виде кольца, по радиусу которого определяется скорость частицы. Для этого используется следующая формула (Рис. 12):

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}, \quad (13)$$

где $\beta = v/c$, v — скорость частицы, c — скорость света, n — показатель преломления среды.

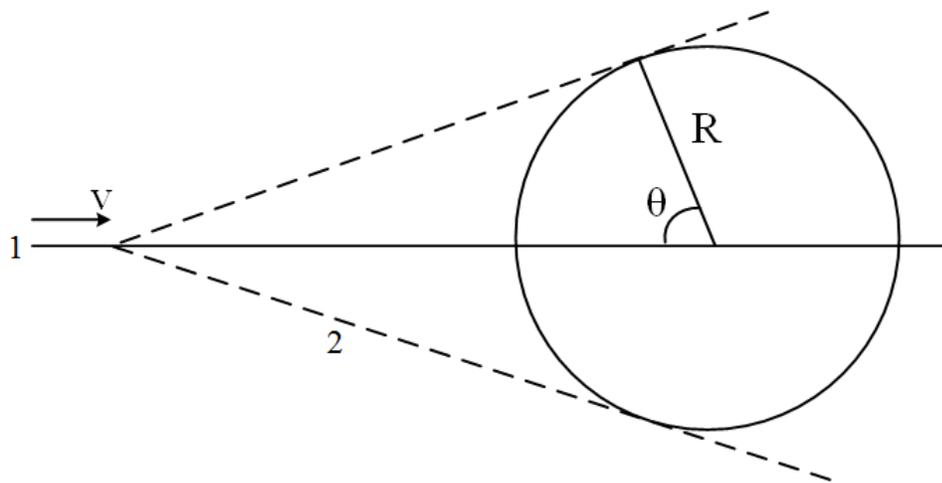


Рис. 12: Геометрия черенковского излучения: 1 — траектория движения частицы, 2 — траектория движения фотонов.

В разрабатываемом программном обеспечении ФАРИЧ работает, основываясь на данных, полученных полным моделированием данной подсистемы. Входные данные хранят в себе зависимость β -фактора, по которому в дальнейшем может быть восстановлена скорость частицы, и зависимости ошибки

измерения от импульса частицы и угла, под которым она попадает в ФАРИЧ. Если соответствующих угла и импульса нет в используемых данных, то применяется интерполяция с помощью методов, предоставляемых пакетом ROOT.

На выход система подаёт точку входа частицы в ФАРИЧ, число зарегистрированных фотоэлектронов и измеренный β -фактор.

3.5.5 FDIRC

FDIRC (focusing detection of internally reflected cherenkov light) представляет собой систему идентификации, которая позволяет отделять каоны и пионы с импульсом до 1–2 ГэВ/с.

Радиатор имеет прямоугольную форму (Рис. 13). За счёт этого, фотоны черенковского излучения распространяются вдоль пластины из-за полного внутреннего отражения. Сбор черенковского света осуществляется на цилиндрическую поверхность фокусирующего зеркала. Для получения данных с детектора используется позиционно-чувствительный фотоприёмник. Из-за разницы черенковских углов частиц длина пути и время прохождения света по детектору различны.

В разрабатываемом программном обеспечении производится расчёт черенковского угла, разыгранный по Гауссу с разрешением в 8 мрад. Результат записывается только если будет выполняться условие появления черенковского света и угол меньше угла полного внутреннего отражения, т. е.:

$$\beta > \frac{1}{n}, \quad (14)$$

$$\sin \left(\theta + \operatorname{arctg} \left(\frac{p_z}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2}} \right) \right) > \frac{1}{n}, \quad (15)$$

где $n = 1,5$ показатель преломления, θ — черенковский угол, p_x, p_y, p_z — компоненты импульса частицы, $\beta = p/E$, где E — энергия частицы.

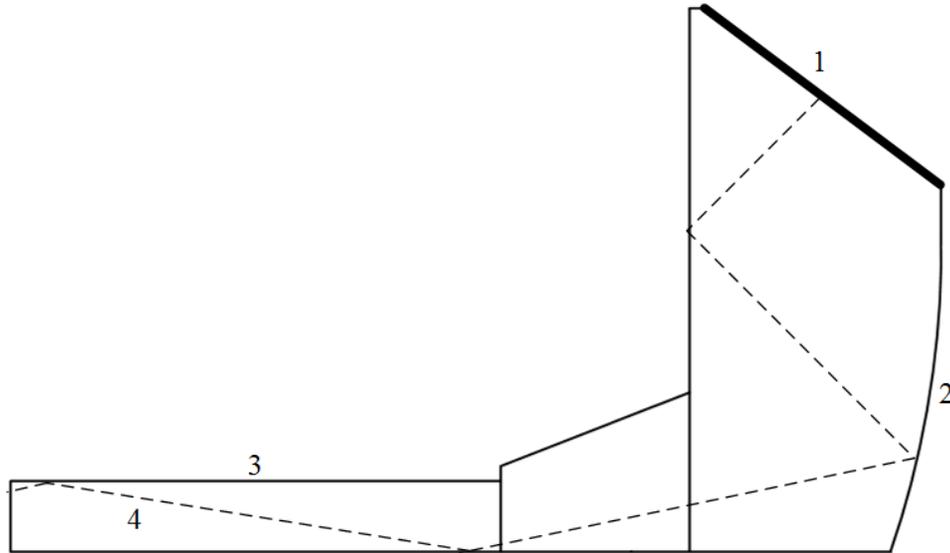


Рис. 13: Схема FDIRC детектора: 1 — фотоприёмник, 2 — цилиндрическое зеркало, 3 — радиатор, 4 — траектория фотона.

4 Результаты

В Таблице 2 приведены подсистемы детектора, наличие их параметризации, реализации в PAPERAS и разрабатываемом программном обеспечении. До выполнения дипломной работы уже был разработан «каркас» программного обеспечения с основными системами. В ходе работы над дипломом были разработаны следующие системы: мюонная система (класс `SctMuon`), система идентификации FDIRC (класс `SctFDIRC`), результат с которой изображён на Рис. 14.

Таблица 2: Подсистемы детектора: + — наличие параметризации/разработанной подсистемы, — — отсутствие, \pm — находится в стадии разработки.

	Подсистема	Параметризация	PAPERAS	ПО
Трековая система	Многослойный кремниевый детектор	—	—	—
	ВПК	—	—	—
	Каскадный ГЭУ	—	—	—
	Дрейфовая камера	+	+ BaBar	+
	ДК TraPid [18]	\pm	—	\pm
Калориметр	PureCsl	+	+	+
	LXe	—	—	—
Системы идентификации	ВПС	+	+	+
	ToP	+	+	+
	АШИФ	+	+	+
	ФАРИЧ	+	+	+
	FDIRC	+	—	+
	Мюонная система	+	—	+

Мюоны обладают высокой проникающей способностью, они с большей вероятностью проникают в самые последние слои мюонной системы. Для пионов же вероятность пройти через вещество без взаимодействия уменьшается с возрастанием полной толщины поглотителя, что и изображено на Рис. 15,

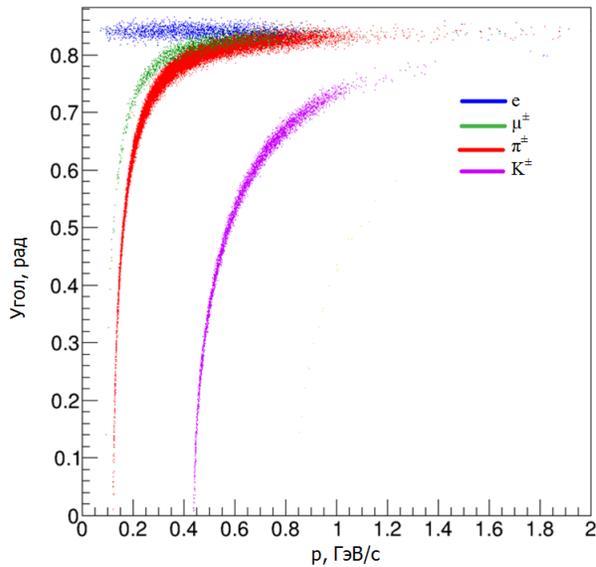


Рис. 14: Зависимость угла, регистрируемого в системе идентификации FDIRC в зависимости от импульса.

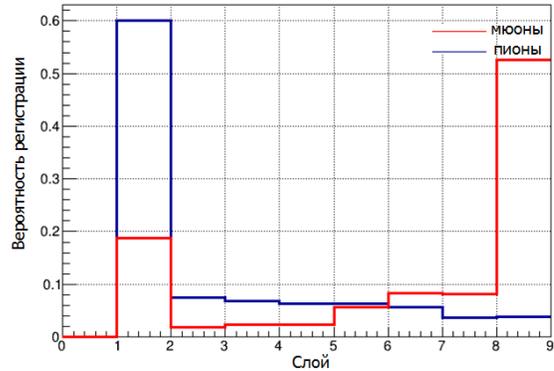


Рис. 15: Распределение вероятности для мюонов и пионов долететь до определённого слоя в мюонной системе.

полученном по данным, полученным с разрабатываемого ПО.

В рамках работы над дипломной работой для классов, работающих с геометрией (*Helix*, *Line*, *Crosser*), были написаны тесты. Они проверяют для каждого типа трека (прямая или винтовая линия) координаты и время пересечения их с цилиндрами и цилиндрическими слоями.

В ходе написания тестов, были найдены и исправлены ошибки в проведении частиц через объём детектора. Были проверены пересечения цилиндра (Рис. 16) и цилиндрического слоя (Рис. 17) с различными типами треков.

Также был написан пользовательский интерфейс для изменения параметров детектора. Для этого необходимо написать конфигурационный файл специального формата (Листинг 7) и запустить программное обеспечение с соответствующей опцией. Строки данного файла содержат название параметра и соответствующую величину. Пустые строки и строки с некорректными названиями игнорируются.

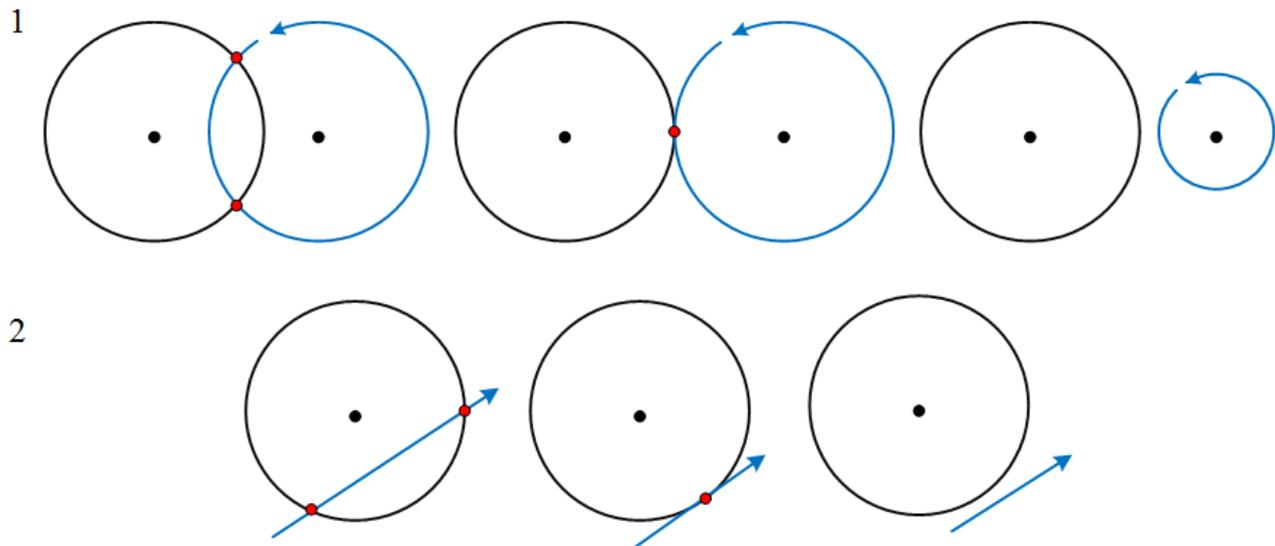


Рис. 16: Схематическое изображение случаев в плоскости XU , проверенных тестами для цилиндра и 1 — винтовой линии, 2 — прямой.

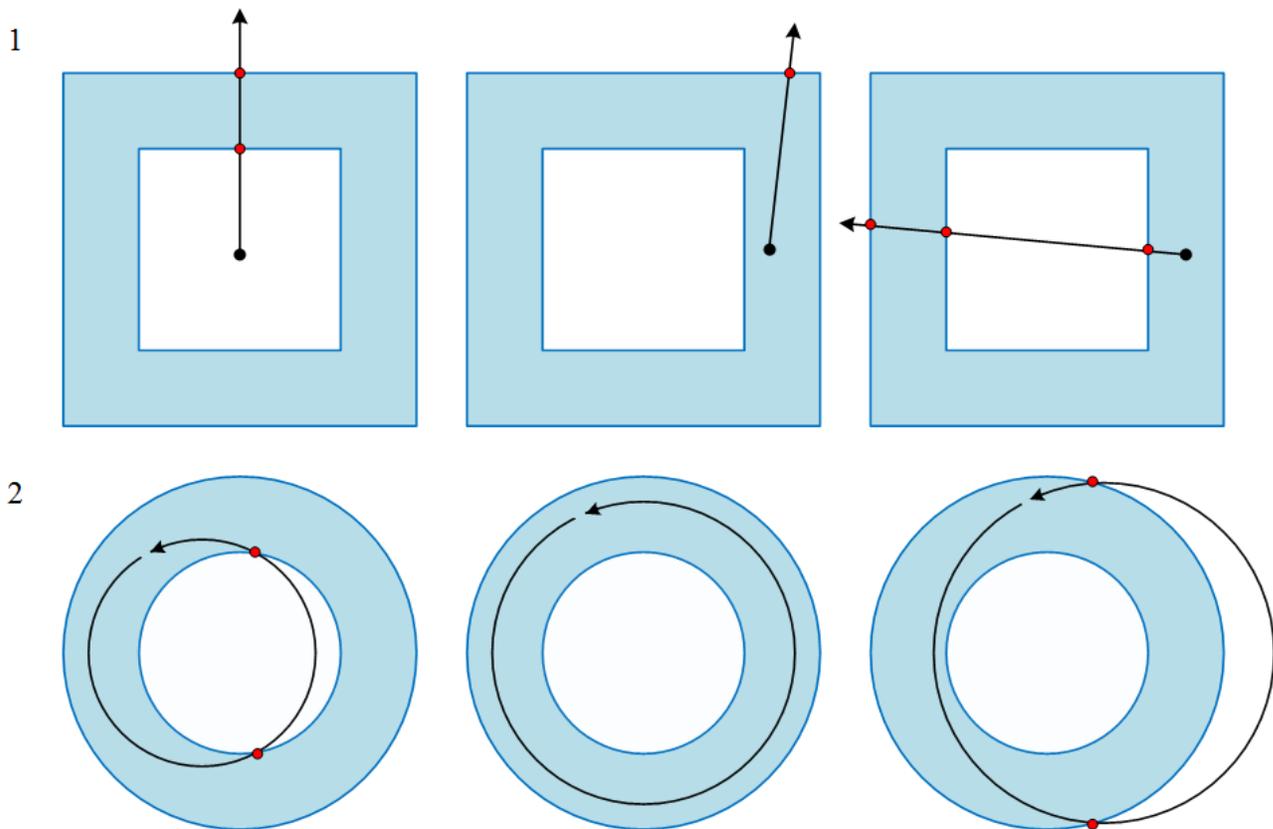


Рис. 17: Схематическое изображение случаев проверенных тестами для цилиндрического слоя для случаев: 1 — в плоскости XZ для прямой линии, 2 — в плоскости XU для винтовой линии.

Листинг 7: Пример конфигурационного файла для изменения параметров детектора.

```

1 coil.rMax 1.86
2 field.value 1.4
3 tracker.radLen 185
4 tracker.corrMtx.xij -0.08
5 tracker.momres [0.001,0.04]

```

Была переписана параметризация калориметра с учётом геометрического слияния кластеров (алгоритм описан в подразделе 3.3 Реконструкция).

Для проверки правильности работы алгоритма построены следующие распределения Рис. 19, Рис. 18. Согласно теории, с увеличением энергии π^0 , фотоны должны сближаться, что видно на Рис. 18. Как следствие кластеры, регистрируемые в калориметре, будут склеиваться, а значит эффективность будет падать, что и иллюстрирует Рис. 19.

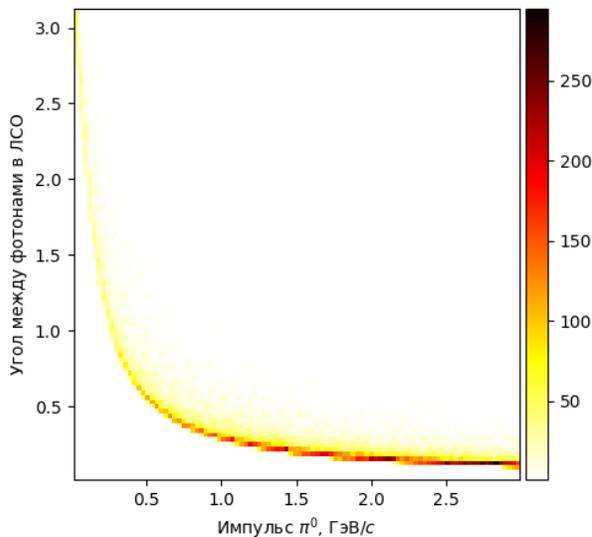


Рис. 18: Распределение угла между фотонами при распаде π^0 в зависимости от импульса.

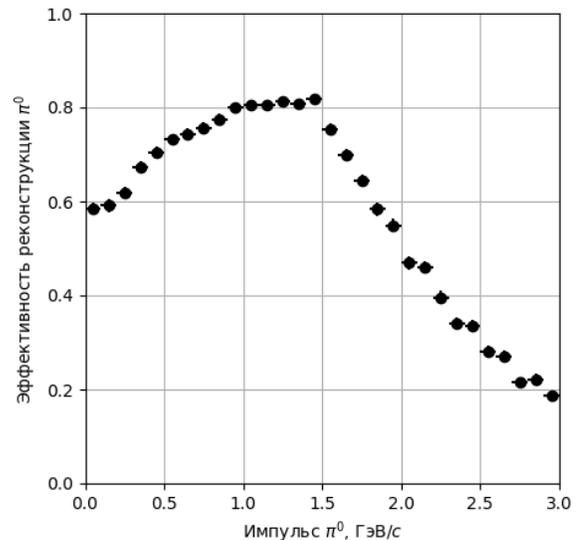


Рис. 19: Эффективность регистрации π^0 в зависимости от импульса.

Новая параметризация импульсного разрешения для дрейфовой камеры подробно описана в подразделе 3.1 Трековая система. Результаты работы

дрейфовой камеры изображены на Рис. 20 и Рис. 21.

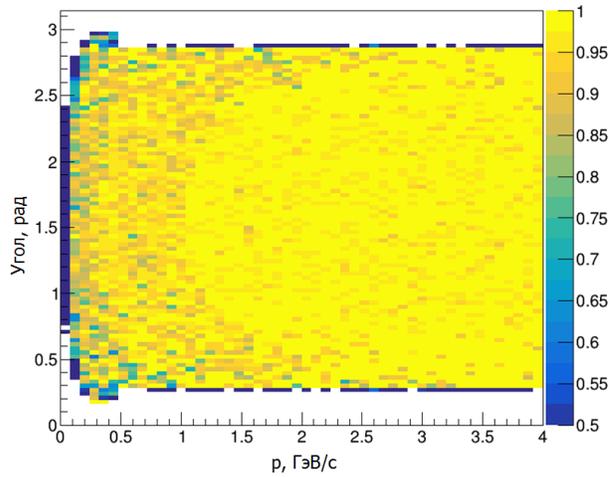


Рис. 20: Распределение эффективности регистрации π^0 в дрейфовой камере в зависимости от импульса и угла, между частицей и осью z .

img/trk_res.png

Рис. 21: Зависимость импульсного разрешения для π^0 , летящего под углом к оси z близком к 60° , от импульса.

5 Заключение

В ходе работы над дипломом были выполнены задачи по развитию программного обеспечения для параметрического моделирования детектора Супер s - τ фабрики:

- обновлена параметризация дрейфовой камеры;
- внедрена система идентификации частиц FDIRC;
- внедрена мюонная система;
- разработан пользовательский интерфейс для изменения параметров моделируемого детектора;
- проверена правильность проведения частиц через объем детектора;
- разработана реконструкция частиц,
- проведён анализ откликов разработанных подсистем детектора.

Конечным результатом является программное обеспечение для параметрического моделирования детектора Супер s - τ фабрики.

На данный момент уже есть пользователи разрабатываемого программного обеспечения и с его использованием написано несколько статей [19], [20], [21].

В дальнейшем планируется перенести разработанное программное обеспечение в рамки проекта Augoга с использованием функционала Gaudi на языке C/C++. Это позволит увеличить скорость выполнения кода.

Список литературы

1. Супер-Чарм-Тау фабрика: концептуальный проект. В 2-х т. Т.1 / В. В. Анашин [и др.]. — Новосибирск, 2018. — с. 136.
2. Geant4 — a simulation toolkit / S. Agostinelli [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — июль. — т. 506, № 3. — с. 250—303. — DOI: [10.1016/s0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(03)01368-8).
3. A Monte Carlo program for four-fermion production at e^+e^- colliders / A. Denner [и др.] // Computer Physics Communications. — 2003. — июль. — т. 153, № 3. — с. 462—507. — DOI: [10.1016/S0010-4655\(03\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(03)00205-4).
4. *HEP-FCC*. PAPAS (PARametrized PArticle Simulation) [Электронный ресурс]: рабочая программа. — URL: <https://github.com/HEP-FCC/papas>.
5. DELPHES 3, A modular framework for fast simulation of a generic collider experiment / J. de Favereau [и др.] // JHEP. — 2014. — т. 02. — с. 057. — DOI: [10.1007/JHEP02\(2014\)057](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2014)057). — arXiv: [1307.6346](https://arxiv.org/abs/1307.6346) [hep-ex].
6. *Ziegler J. F.* SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) [Электронный ресурс]: рабочая программа. — 2013. — URL: <http://srim.org/>.
7. *Sciutto S. J.* AIRES (Simulation of Particle Air Showers) [Электронный ресурс]: рабочая программа. — 2019. — URL: <http://aires.fisica.unlp.edu.ar/>.
8. *Тодышев К. Ю.* Меморандум по модели ДК для s - τ фабрики. — Новосибирск, 2019. — с. 6.
9. *CERN*. ROOT Data Analysis Framework [Электронный ресурс]: рабочая программа. — 2018. — URL: <https://root.cern/>.
10. *AIDASoft*. PODIO (Plain-Old-Data I/O) [Электронный ресурс]: рабочая программа. — URL: <https://github.com/AIDASoft/podio>.

11. Particle Data Group [Электронный ресурс] / М. Tanabashi [и др.]. — 2019. — URL: <http://pdglive.lbl.gov/Viewer.action>.
12. *Грунен К.* Детекторы элементарных частиц / под ред. Л. М. Курдадзе, С. И. Эйдельман ; пер. Н. Ю. Эйдельман, Ю. И. Эйдельман. — Новосибирск : Сибирский хронограф, 1999. — с. 408.
13. *Бузулуцков А. В.* Физические основы работы каскадных газовых электронных умножителей (обзор) // Новосибирск: Вестник НГУ. — 2008. — т. 3, № 3. — с. 59—73.
14. Liquid xenon calorimeter for CMD-2M detector / L. M. Barkov [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. — 2002. — т. 494. — с. 378—380. — DOI: [10.1016/S0168-9002\(02\)01506-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01506-1).
15. *Epifanov D.* Pure CsI calorimeter for Super C-Tau factory // Super C-Tau factory workshop. — BINP. 05.2018.
16. G4beamline Particle Tracking in Matter Dominated Beam Lines / Т. J. Roberts [и др.] // EPAC 2008. — 2008. — июнь. — WEPP120. — с. 2776—2779.
17. Time-of-Propagation Cherenkov counter for particle identification / М. Akatsu [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. — 2000. — янв. — т. 440, № 1. — с. 124—135. — DOI: [10.1016/S0168-9002\(99\)00819-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00819-0).
18. *Cataldi G., Grancagnolo F., Spagnolo S.* Cluster counting in helium based gas mixtures // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1997. — февр. — т. 386, № 2-3. — с. 458—469. — DOI: [10.1016/S0168-9002\(96\)01164-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)01164-3).
19. Particle identification for the Super Charm-Tau Factory at Novosibirsk / A. Y. Barnyakov [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. — 2020. — апр. — т. 958. — с. 4. — DOI: [10.1016/j.nima.2019.162352](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162352).

20. The Super c - τ Factory identification system options / A. Y. Barnyakov [и др.] // EPJ Web of Conferences. — 2019. — июнь. — т. 212. — с. 11. — DOI: [10.1051/epjconf/201921201012](https://doi.org/10.1051/epjconf/201921201012).
21. Overview of PID options for experiments at the Supr Charm-Tau Factory / A. Y. Barnyakov [и др.] // Journal of Instrumentation. — 2020. — апр. — т. 15. — с. 11. — DOI: [10.1088/1748-0221/15/04/C04032](https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/04/C04032).

Приложение А. Чертёж детектора СЧТФ

