**Санкт-Петербургский Государственный Университет**

**Физический факультет**

**Кафедра ядерно-физических методов исследования**



**Разработка дрейфовой камеры для измерения скорости дрейфа электронов в газовых смесях детекторов частиц**

**Магистерская работа студента дневного отделения**

**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Валияровой Адели Ринатовны**

**Научный руководитель:**

**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ к. ф.-м. н., Ильин Д. С.**

**Рецензент:**

**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ к. ф.-м.н., с. н. с., Гаврилов Г. Е.**

**Санкт-Петербург**

**2016**

**Оглавление**

[Введение 4](#_Toc451116799)

[1 Большие экспериментальные установки CERN с ГРД 7](#_Toc451116800)

[1.1 Детекторы и газовые смеси 7](#_Toc451116801)

[1. 2 Взаимодействие заряженных частиц в газовых средах 11](#_Toc451116802)

[1. 2.1 Удельные потери энергии 11](#_Toc451116803)

[1. 2.2 Ионизационные потери тяжелой заряженной частицы в среде 11](#_Toc451116804)

[1. 2.3 Ионизационные потери для электронов 12](#_Toc451116805)

[1. 2.4 Радиационная длина 13](#_Toc451116806)

[1. 2.5 Образование ионных пар 14](#_Toc451116807)

[1. 3 Основные характеристики газовых смесей 15](#_Toc451116810)

[1. 3.1 Коэффициент Таунсенда 15](#_Toc451116812)

[1. 3.2 Скорость дрейфа 16](#_Toc451116814)

[1. 3.3 Диффузия 16](#_Toc451116816)

[1. 3.4 Диффузия ионов и электронов в нулевом магнитном поле 16](#_Toc451116818)

[1. 3.5 Подвижность ионов 19](#_Toc451116820)

[1. 3.6 Угол Лоренца 20](#_Toc451116822)

[1. 4 Принцип работы газоразрядного детектора с усилением – пропорционального счетчика 20](#_Toc451116826)

[1. 5 Метод исследования скорости дрейфа электронов 24](#_Toc451116827)

[1. 5.1 Дрейфовые камеры 24](#_Toc451116831)

[1. 5.2 Примеры установок измерения скорости дрейфа из литературы 26](#_Toc451116835)

[2 Разработка дрейфовой камеры 30](#_Toc451116836)

[2.1 Описание методов моделирования 30](#_Toc451116838)

[2.2 Моделирование детектора в программе Garfield 30](#_Toc451116842)

[2.3 Конструкция дрейфовой камеры 31](#_Toc451116843)

[2. 4 Выбор и оптимизация геометрических параметров детектора 32](#_Toc451116844)

[2. 5 Вычисление скорости дрейфа 36](#_Toc451116846)

[2. 6 Оценка вклада факторов, влияющих на точность определения скорости дрейфа 40](#_Toc451116847)

[2. 7 Оценка толщины сцинтилляторов 45](#_Toc451116851)

[Заключение 47](#_Toc451116852)

[Список литературы 48](#_Toc451116853)

Введение

**Актуальность**. Газоразрядные детекторы ионизирующих излучений применяются в различных областях современной физики. Они просты по конструкции, компактны, удобны в работе, но во время работы необходимо следить за такими процессами, как взаимодействие газа с материалами, очистка газа, загрязнение газовой смеси и т.д. [1-7].

Большая часть газовых детекторов, используемых в физике высоких энергий, работает на основе смесей, содержащих парниковые газы, которые обеспечивают необходимо временное разрешение и газовое усиление. Для оценки вклада этих газов в атмосферный парниковый эффект используется потенциал глобального потепления (GWP) – параметром, численно определяющим радиационное (разогревающее) воздействие молекулы определенного парникового газа относительно молекулы СО2. К примеру, GEM-детекторы [8] (газовые электронные умножители), которые используются в экспериментальной установке CMS (Компактный мюонный соленоид) Большого Адронного Коллайдера (БАК), работают на основе Ar/CO2 газовой смеси [9]. Однако для достижения высокого временного разрешения к данной смеси добавляется CF4 [10]. Нужно отметить, что потенциал глобального потепления CF4 составляет 7390 [11]. Камеры с резистивными пластинами (Resistive Plate Chamber) [12] работают на основе R134a/C4H10/SF6 газовых смесей, средний GWP которых равен 1430. В настоящее время возникла необходимость исследовать новые газовые смеси, характеристики которых соответствовали бы предъявляемым требованиям. Основные газовые смеси, активно используемые в физики высоких энергий, и их транспортные свойства при меньшем содержании фреонов представлены в работах [13,14].

Сегодня проблема выбросов парниковых газов в атмосферу стала актуальной для всей современной индустрии. Поэтому при разработке газоразрядных детекторов необходимо принимать во внимание экологическое воздействие используемых газовых смесей на атмосферу. К тому же было показано, что наиболее часто используемые в детекторах газы R134a, CF4 и SF6 вносят наибольший вклад в парниковый эффект. В настоящее время основным решением данной проблемы является поиск новых экологически безопасных газовых смесей.

**Целью** данной работы является разработка и оптимизация параметров дрейфовой камеры для исследования характеристик новых газовых смесей в детекторах частиц.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Для создания модуля дрейфовой камеры для исследования скорости дрейфа электронов в газовых смесях при *Е=*500÷5000 В/см разработана модель детектора в программном пакете GARFIELD.
2. Проведена оптимизация электрического поля, и определены диапазоны рабочих положений источника 90Sr, в которых обеспечивается требуемая однородность электрического поля.
3. Построены временные зависимости для газовой смеси 60%Ar + 30%CO2 + 10%CF4 во всем рабочем диапазоне напряженностей электрического поля.
4. Проведена успешная проверка алгоритма определения скорости дрейфа для указанной газовой смеси, и определены вклады основных ошибок.

**Научная новизна**. Особенностью установки является возможность перемещения источника 90Sr вдоль модуля с малым шагом 200 мкм ÷ 1 мм, т.е. получения ряда экспериментальных точек и соответственно более точной аппроксимации данных, по сравнению с аналогами. Кроме этого, компактность детектора позволяет поместить его в соленоид небольшого размера для измерения скорости дрейфа от напряженности магнитного поля.

**Научная и практическая значимость.** Разработанный дрейфовый детектор позволяет исследовать характеристики новых рабочих газовых смесей, в частности измерения скорости дрейфа электронов при напряженностях полей *Е=*500÷5000 В/см с высокой точностью.

**Апробация работы**.Основные результаты работы были представлены на Школе ПИЯФ по физике конденсированного состояния (ФКС-2016).

**Публикации**.По результатам конференции опубликованы:

1. Валиярова, А. Р. Разработка дрейфовой камеры для измерения скорости дрейфа электронов в газовых смесях детекторов частиц / А.Р. Валиярова, Г.Е. Гаврилов, Д. С. Ильин // Сборник тезисов и список участников: 50-я Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния (ФКС-2016), 14-19 марта 2016 г., Санкт-Петербург / ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт». – Гатчина, 2016. – 216 с.
2. Валиярова А. Р, Гаврилов Г.Е., Ильин Д. С. Модель дрейфовой камеры для измерения скорости дрейфа электронов в газовых смесях детекторов частиц / Валиярова А.Р., Гаврилов Г.Е., Ильин Д. С. – Гатчина, 2016. – 20 с. – (Препринт / «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»; №29914)

**Структура и объем**. Диссертация состоит из введения, двух глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 51 страницу, 27 рисунков и 8 таблиц.

1. Большие экспериментальные установки CERN с ГРД
2. Детекторы и газовые смеси

Проблема загрязнения атмосферы – одна из наиболее актуальных проблем, с которой столкнулось человечество. Опасность промышленного загрязнения атмосферы заключается не только в том, что в воздух попадают губительные для всего живого вещества, но и в формировании условий, стимулирующих развитие парникового эффекта, вызывающего глобальные изменения климата Земли.

Основным источником загрязнения атмосферы в результате деятельности человека, как показывают последние исследования [15], являются промышленные выбросы углекислого газа. За последние 200 лет концентрация CO2 в атмосфере Земли выросла почти на 30%. Процесс загрязнения настолько масштабен, что привел к наблюдаемым глобальным экологическим явлениям, а именно к потеплению климата и сопровождающим его явлениям. Источниками загрязнения атмосферы могут быть не только промышленные предприятия, но и масштабные экспериментальные физические установки, такие как БАК.

На сегодняшний день на Большом Адронном Коллайдере в CERN (European Organization for Nuclear Research) работают 4 основные экспериментальные установки – детекторы ATLAS, ALICE, LHCb и CMS. Каждая из этих гигантских установок на 70-80% состоит из газоразрядных субдетекторов − пропорциональных камер, дрейфовых камер и резистивных плоско-параллельных камер. Как показано на Рис. 1.1, все эти гигантские детекторы расположены на кольце БАК вокруг точек столкновения пучков. Основным назначением детекторов ATLAS и CMS  является поиск бозона Хиггса и открытие «нестандартной физики», в частности [тёмной материи](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%91%D0%BC%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%8F). Детектор ALICE предназначен для изучения [кварк-глюонной плазмы](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%BA-%D0%B3%D0%BB%D1%8E%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B7%D0%BC%D0%B0" \o "Кварк-глюонная плазма) в столкновениях тяжёлых ионов свинца, а LHCb – для исследования физики [*b*-кварков](https://ru.wikipedia.org/wiki/B-%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%BA), что позволит лучше понять различия между [материей](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%8F_(%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D0%B0)) и [антиматерией](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE" \o "Антивещество).

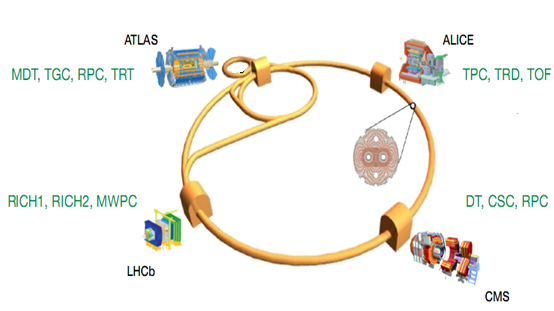
****

Рисунок 1.1: *Экспериментальные установки БАК* [16].

В состав вышеназванных экспериментальных установок БАК входит 10 различных газоразрядных детекторов, которые снабжаются рабочими газовыми смесями, состоящими из 10 газов: Ar, CO2, CF4, C4F10, iC4H10, SF6, nC5H12, H2, O2, CH4, N2 (в зависимости от типа детектора). Для обеспечения детекторов рабочими газовыми смесями на БАК используется 28 различных газовых систем. Из них:

* 14 систем замкнутой рециркуляции газовой смеси;
* 11 систем открытого продува газовой смеси;
* 3 системы подачи сжиженного газа.

Система газового снабжения каждого эксперимента представляет собой комплекс сложных установок и аппаратуры, занимающих более нескольких сотен метров, и обеспечивает чрезвычайно высокую надежность с точки зрения устойчивости качества газовой смеси, поступаемой в детекторы. Подача рабочих газовых смесей осуществляется из газосмесительных установок, находящихся на поверхности. Под высоким давлением (2÷4 бар) газ поступает на распределительную станцию в шахте на глубине до 235 м. Пройдя через детекторы экспериментальной установки, газовая смесь собирается из распределительных линий в циркуляционную систему низкого давления (≥1.0 бар) с эффективностью циркуляции до 90%.

В Таблице 1.1 представлены объемы и виды газовых смесей для каждого из субдетекторов, а также объем используемого газа и вклад каждого из них в формирование парникового эффекта, при скорости подачи рабочей газовой смеси со скоростью 1 объем в сутки.

Таблица 1.1: Газовые смеси, используемые в экспериментальных установках БАК.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Субдетекторы | RPC (Resistive Plate Chambers) | CSC (Cathode Strip Chambers) | GEM (Gas Electron Multiplier) |
| Экспериментальная установка | ALICE, ATLAS, CMS | CMS | LHCb |
| Газовая смесь | C2H2F4, iC4H10, SF6  95%, 4.5%, 0.3% | Ar, CO2, CF4  40%, 50%, 10% | Ar, CO2, CF4  45%, 15%, 40% |
| Объем газовой смеси | 15 м3 (каждый) | 90 м3 | < 1 м3 |
| Эффективность циркуляции газов | 90%  (ALICE открытый цикл) | 90% | открытый цикл |
| Вклад в парниковый эффект | 75% | 10% | 6% |

Рассмотрим с экологической точки зрения работу одного из субдетекторов CSC (Cathode strip chamber – катодные стриповые камеры) установки CMS, для того чтобы оценить воздействие газа CF4 на окружающую среду. Катодные многопроволочные стриповые камеры являются самым большим по объёму газа субдетектором эксперимента СМS, при этом используется газовая смесь 40%Ar + 50%CO2 + 10%CF4. На Рис. 1.2 представлен поперечный срез детектора CMS.

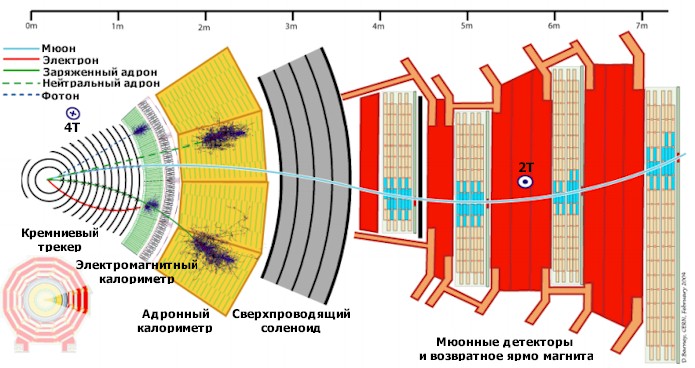


Рисунок 1.2: *Сектор детектора CMS* [17].

Общее количество катодных стриповых камер в эксперименте CMS составляет 540 штук. Каждый модуль CSC состоит из шести слоёв камер, каждая из которых обеспечивает пространственное разрешение мюонов 150 микрон. Необходимость перекрытия больших телесных углов для регистрации мюонов, вылетающих из точки взаимодействия, обусловила значительные размеры всех модулей CSC, в результате общий газовый объем детекторов составляет 90 м3. С помощью системы газового снабжения в модули катодных стриповых камер установки CMS рабочая газовая смесь подается со скоростью 2 объема в сутки. Таким образом, общий объем газа, поступающий в камеры CSC, равен 180 м3. Газовая система обеспечения CSC работает по схеме рециркуляции с эффективностью 90%, поэтому при каждой смене объема около 10% смеси заменяется в системе на смесь из внешней линии снабжения. Для извлечения СF4 из отработавшей газовой смеси 40%Ar + 50%CO2 + 10%CF4 в CMS создана специальная система рекуперации CF4. Эффективность этой системы составляет менее 75%. Следовательно, за сутки в атмосферу из газовой системы CSC выбрасывается 0.45 м3 газа СF4, что, учитывая его плотность *ρ*СF4 = 3.65 г/л, составляет 1.6 кг. Как уже было сказано, парниковый эффект для газов нормируется в единицах воздействия на атмосферу одного килограмма углекислого газа, и в единицах GWP СF4 имеет коэффициент 7390 кг СО2 [18]. Поэтому эквивалентом суточного выброса камер CSC является 1.6 × 7390 ≈ 12 тонн СО2. Годовой выброс СF4 в единицах GWP составляет тогда около 4380 тонн СO2. Необходимо отметить, что время жизни СО2 составаляет 50-200 лет, а время жизни CF4 в атмосфере составляет 50000 лет. Учитывая, что одна тепловая электростанция, работающая на природном газе, выбрасывает в год около 11000 тонн СO2, можно сказать, что работа только одних камер СSС является мощным источником загрязнения атмосферы Земли. Суммарный выброс всех установок БАК сопоставим в единицах GWP с выбросом десятка тепловых электростанций. Очевидно, что такая система газового снабжения нуждается в оптимизации состава рабочей газовой смеси.

Потенциалы глобального потепления некоторых парниковых газов перечислены в Таблице 1.2. В качестве эталонного газа взят CO2.

Таблица 1.2: Газы-кандидаты и парниковые газы, используемые в качестве рабочих смесей [15].

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Molecular name | Chemical formula | Refrigerant identifier | GWP | ODP  (Ozone Depletion Potential) |
| Chloropentafluoroethane | C2ClF3 | R115 | 7370 | 0.44 |
| Hexafluoroethane | C2F6 | R116 | - | - |
| Propane | C3H8 | R290 | 3 | 0 |
| Isobutane | C4H10 | R600a | 3 | 0 |
| Carbon Dioxide | CO2 | R744 | 1 | 0 |
| Tetrafluoromethane | CF3I | R1311 | 0 | 0 |
| Trifluoromethane | CHF3 | R23 | 0 | 0 |
| Sulfur Hexafluoride | SF6 | R7146 | 23000 | 0.04 |
| 1, 1, 1, 2 – Tetrafluoroethane | CH2FCF3 | R134a | 1430 | 0 |

Для замены CF4 и других газов на более экологичные газовая смесь должна обеспечивать все требуемые раюочие характеристики детектора. Чтобы разработать рабочую газовую смесь для того или иного типа детектора, необходимо изучить, как различные газовые компоненты и состав смеси влияют на характеристики детектора.

1. Взаимодействие заряженных частиц в газовых средах
2. Удельные потери энергии

Как известно, при прохождении частицы через вещество часть энергии частицы передается атомам вещества. Энергия, теряемая заряженной частицей в слое данного вещества единичной толщины, называется тормозной способностью и может быть охарактеризована величиной удельных потерь где *E* – энергия частицы, *x* – длина отрезка, прошедшего частицей. Сама величина существенно зависит от скорости частицы.

1. Ионизационные потери тяжелой заряженной частицы в среде

Потери энергии заряженной частицы в среде главным образом вызваны взаимодействиями с атомными оболочками. Среднее значение потерь элементарной заряженной частицы массой *m* >> *me* в результате взаимодействий с атомными оболочками при прохождении пути длиной *dx* описывается формулой Бете-Блоха:

*me* – масса электрона, (постоянная тонкой структуры), *β* = *v*/*c* (скорость частицы), , *Z* – заряд среды, *A* – массовое число среды, *NA* = 6,02∙1023 моль, *ρ* – плотность среды, *C* ≈ 8 (в зависимости от материала).

Потери энергии не зависят от массы проходящей через вещество частицы, но существенно зависят от скорости частицы. Кривая Бете-Блоха (Рис. 1.3) после резкого спада достигает своего минимума при *βγ* ≈ 4. При *βγ* → 1 *dE*/*dx* постепенно возрастает, такой "релятивистский подъем" вызван логарифмическим членом в Ур. 1.1.

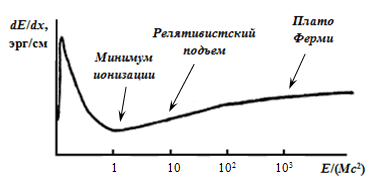


Рисунок 1.3: *Зависимость ионизационных потерь энергии от энергии тяжелых частиц* []*.*

1. Ионизационные потери для электронов

В области низких энергий электронов (E < 1 МэВ) определяющий вклад в потери энергии дают неупругие ионизационные процессы взаимодействия с атомными электронами, включающие ионизацию атомов. Передаваемая в одном столкновении энергия в среднем очень мала и при движении в веществе потери складываются из очень большого числа таких малых потерь.

Электроны с большей энергией теряют большую часть своей энергии из-за тормозного излучения. Для релятивистских электронов формула Бете-Блоха приобретает вид

Ионизационные потери энергии ограничены величиной, называемой критической энергией [19]:

Для аргона (*Z* = 18) *EC* = 37,5 МэВ.

1. Радиационная длина

Радиационная длина – это средняя толщина вещества, на которой энергия электрона уменьшается в *e* раз. Радиационные длины для различных веществ приведены в Таблице 1.3.

Радиационная длина атома может быть найдена [20]

(1.4)

Таблица 1.3: Значения *X0* для различных веществ.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Вещество | *X0* | |
| г/см2 | см |
| H (жидкость) | 63.04 | 890.4 |
| Воздух | 36.62 | 3.04·104 |
| Ar (жидкость) | 19.55 | 14.00 |
| C | 42.70 | 19.32 |
| Al | 24.01 | 8.897 |
| Fe | 13.84 | 1.757 |
| Cu | 12.86 | 1.436 |
| Pb | 7.43 | 0.5612 |

1. Образование ионных пар

При прохождении налетающей частицы через вещество она взаимодействует с веществом и теряет часть своей энергии на ионизацию атомов. В результате этого процессах образуется ионная пара. Число ионизаций, образованных налетающей частицей на 1 см пути, выражается через *NP* в единицах см-1. Если каждая образовавшаяся ионная пара обладает достаточной кинетической энергией, то она способна также произвести ионную пару, и этот процесс будет называться вторичной ионизацией. Число, равное сумме первичных и вторичных ионов на единицу длины, обозначается как *NT*, и главным образом зависит от вещества, энергии и массы налетающей частицы. Величина этого параметра определяет количество и размеры лавин, образующихся заряженной частицей в детекторе, газовая смесь которого находится под действием электрического поля.

Связь между первичной ионизацией и атомным номером может быть найдена с помощью экспериментальных данных [21]:

которая выполняется при нормальных условиях (1 атм и 20°С). Эта формула дает хорошее согласие с экспериментальными данными для углеводородов, но почти не подходит для молекул, содержащих главным образом фтор, к примеру, для CF4. Отличие результатов, полученных экспериментально и по этой формуле, составляет до 30%.

Довольно трудно оценить общее число ионов. Несмотря на то, что не существует общей формулы, есть самый простой способ – это использование сечения рассеяния для расчета электронов первичной ионизации и использование моделирования Монте-Карло для прослеживания вторичных электронов. Число пар ионов не зависит от энергии и массы налетающей частицы. Для налетающей частицы величина *W* = ∆*E*/*N* определяет среднюю энергию, необходимую для образования одной пары ионов. Величина *W* представляет собой функцию, слабо меняющуюся с изменением энергии частицы [22], и таким образом, ее можно рассматривать постоянной для некоторого интервала значений энергии. Общее число ионов на единицу длины можно найти, используя

Среднее значение *W* для газовой смеси может быть найдено, если известны значения *W* для газовых компонент [21]

где *nm* указывает на индекс молекулы, а *f*(*nm*) – относительное число молекул данного вида газовой смеси.

Тяжело предсказать значение *W*, и не существует прямого способа получить точную оценку, основанную только на экспериментальных данных.

В Таблице 1.4 приведены параметры взаимодействия заряженных частиц с газовыми смесями. Приведённые данные для газовых смесей вычислены на основе известных рабочих параметров для составляющих газовых компонент [15].

Таблица 1.4. Некоторые параметры газовых смесей [15].

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Газовая смесь | , МэВ∙см2/г | , г/см2 | *,* см-1 |
| 40%Ar+50%CO2+10%CF4 | 1.67 | 29.21 | 36.72 |
| 40%Ar+55%CO2+5%CF3I | 1.667 | 28.31 | 45.97 |
| 40%Ar+59%CO2+1%CF3I | 1.67 | 29.29 | 36.43 |
| 40%Ar+50%CO2+10%CF3I | 1.64 | 27.07 | 57.56 |

3. Основные характеристики газовых смесей
5. Коэффициент Таунсенда

Среднее расстояние, которое прошел электрон между двумя последовательными столкновениями в газе, называется средней длиной свободного пробега. Обратная величина, определяющая число актов ионизаций на пути в один сантиметр, называется первым коэффициентов Таунсенда. Этот параметр определяет газовое усиление для различных газов. Если *n*0 – число первичных электронов в электрическом поле в отсутствии усиления, *n* – число электронов в лавине, пройденной расстояние x, которое определяется *n* = *n*0*eαx*, а газовое усиление *G* дается выражением *G* ≡ *n*/*n*0 = *eαx*. Первый коэффициент Таунсенда зависит от природы газа, электрического поля и давления. Второй коэффициент Таунсенда *η*, равный числу электронов, выбиваемых с поверхности одним положительным ионом. С учетом эмиссии электронов газовое усиление примет вид

2. Скорость дрейфа

В отсутствии электрического поля движение электронов в газе хаотичное, при этом они обладают тепловой энергией . Под действием электрического поля электроны начинают двигаться в направлении приложенного поля со средней скоростью *vd* (среднее расстояние, проходимое дрейфующим электроном, в единицу времени). Скорость дрейфа зависит от давления, температуры, а также наличие загрязняющих веществ, таких как вода и кислород, может повлиять на величину скорости дрейфа. Компьютерная программа MAGBOLTZ позволяет вычислять скорости дрейфа электронов с использованием метода Монте-Карло путем отслеживания многочисленных столкновений электронов с молекулами газа на микроскопическом уровне.

2. Диффузия

Электроны и ионы в газах под действием электрического поля двигаются вдоль направления поля. Но присутствует часть электронов, которая вследствие рассеяния на молекулах газа отклоняются от этого направления. Рассеяние, приводящее к изменению скорости дрейфа, называется продольной диффузией, а рассеяние, приводящее к смещениям, называется поперечной диффузией. В холодных газах, таких как углекислый газ, диффузия мала, а величина скорости дрейфа не велика. Это приводит к нелинейной X-T-зависимости. Такие газы, как аргон, обладают более высокой диффузией; но при смешивании с многоатомными (органическими) газами в большинстве случаев диффузия уменьшается, а скорость дрейфа возрастает.

2. Диффузия ионов и электронов в нулевом магнитном поле

Заряженные частицы, образованные при ионизации, довольно быстро теряют свою энергию из-за многократных столкновений с молекулами газа, поэтому необходимо учитывать распределение средней тепловой энергии газа. Среднее значение тепловой энергии в кинетической теории газов дается выражением *сТ* = 3/2*kT* = 0,04 эВ при нормальных условиях, а функция распределение Максвелла имеет вид

При отсутствии других эффектов распределение заряженных частиц подчиняется закону Гаусса:

где *dN*/*N* – часть заряженных частиц, находящихся в элементе *dx* на расстоянии *x* от  
начала координат и через некоторое время *t*; *D* обозначает коэффициент диффузии. Среднеквадратичное распределения, или стандартное отклонение, определяется соответственно

для линейной и объемной диффузии. В качестве примера на Рис. 1.4 изображено пространственное распределение ионов, образованных в воздухе при нормальных условиях и различных временных интервалов; значения коэффициентов диффузии нескольких ионов в соответствующих газах приведены в Таблице 1.5.

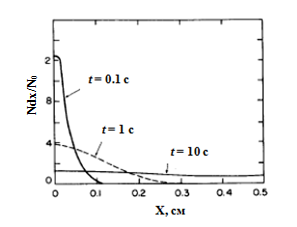


Рисунок 1.4: *Пространственное распределение ионов, образованных в воздухе, при нормальных условиях и при различных временных интервалах* [23].

Таблица 1.5: Значения длин свободного пробега, скоростей дрейфа, коэффициентов диффузии и подвижности для различных газов при нормальных условиях [23-26].

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Газ | λ, см | *v*, см/с | *D*+, см2/с | μ+, см2 × с-1 × В-1 |
| H2 | 1.8 × 10-5 | 2 × 105 | 0.34 | 13.0 |
| He | 2.8 × 10-5 | 1.4 × 105 | 0.26 | 10.2 |
| Ar | 1.0 × 10-5 | 4.4 × 104 | 0.04 | 1.7 |
| O2 | 1.0 × 10-5 | 5.0 × 104 | 0.06 | 2.2 |
| H2O | 1.0 × 10-5 | 7.1 × 104 | 0.02 | 0.7 |

В процессе диффузии происходит столкновение ионов с молекулами газа; средняя длина свободного пробега, средняя скорость, и время между столкновениями также приведены в таблице. Электроны движутся гораздо быстрее, чем ионы (из-за их небольшой массы), их средняя тепловая скорость составляет примерно 107 см/сек; Кроме того, из-за их небольшого размера, их средняя длина свободного пробега обычно в четыре раза больше, чем средняя длина свободного пробега ионов в том же газе.

В газе положительный ион может рекомбинировать с отрицательно заряженным ионом или с электроном. Процесс передачи заряда также возможен с молекулой собственного газа или с молекулами другого рода, обладающими более низкими потенциалами ионизации.

Электроны же могут быть нейтрализованы ионом, могут быть присоединены к молекуле, имеющей электронное сродство (электроотрицательное), или могут быть поглощены на стенках. Вероятность прилипания *h* практически равна нулю для водорода и всех благородных газов, но для других газов это величина имеет вполне определенные значения, которые приведены в Таблице 1.6. В таблице также представлено среднее время прилипания *t* = (*hN*)-1, где *N* – число столкновений за единицу времени. Можно заметить, что, например, в кислороде среднее время, за которое произойдет прилипание электрона, составляет 140 нс. Коэффициент прилипания сильно зависит от электрического поля.

Таблица 1.6: Значения коэффициентов прилипания, чисел столкновений и средних времен прилипания для электронов в различных газах при нормальных условиях [27, 23, 26].

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Газ | *h* | *N*, с-1 | *t*, с |
| CO2 | 6.2 × 10-9 | 2.2 × 1011 | 0.71 × 10-7 |
| O2 | 2.5 × 10-5 | 2.1 × 1011 | 1.9 × 10-7 |
| H2O | 2.5 × 10-5 | 2.8 × 1011 | 1.4 × 10-7 |
| Cl | 4.8 × 10-4 | 4.5 × 1011 | 4.7 × 10-9 |

2. Подвижность ионов

При приложении электрического поля к объему газа происходит движение ионов вдоль направления поля. Средняя скорость этого медленного движения (не путать с непосредственной скоростью ионов) называется дрейфовой скоростью *w*+, и она оказывается прямо пропорциональной уменьшающемуся полю *Е*/*p* до очень высоких полей, *p* – давление газа. Поэтому величину *μ*+, называемую подвижностью, удобно определить

Значение подвижности для каждого иона, движущегося в данном газе, вполне конкретное. Постоянная подвижность является прямым следствием того факта, что вплоть до очень высоких полей средняя энергия ионов практически не изменена; позже будет видно, что это для электронов это совсем не так.

Связь подвижности с коэффициентом диффузии имеет вид

Значения подвижности и коэффициента диффузии для ионов, движущихся в газе, приведены в Таблице 1.5, а Таблица 1.7 дает подвижность некоторых ионов, дрейфующих в газах, которые обычно используются в пропорциональных и дрейфовых камерах.

Таблица 1.7. Экспериментальные значения подвижности для нескольких ионов в различных газах при нормальных условиях [25].

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Газ | Ионы | Подвижность, см2 × с-1 × В-1 |
| Ar | (OCH3)2C | 1.51 |
| IsoC4H10 | (OCH3)2C | 0.55 |
| (OCH3)2CH2 | (OCH3)2C | 0.26 |
| Ar | IsoC4 | 1.56 |
| IsoC4H10 | IsoC4 | 0.61 |
| Ar | C | 1.87 |
| CH4 | C | 2.26 |
| Ar | C | 1.72 |
| CO2 | C | 1.09 |

В многокомпонентной смеси *G*1, *G*2, … , *G*n подвижность *μ*i+ иона *G*i+ определяется соотношением (закон Бланка):

где *р*j – это объемная концентрация газа j в смеси, *μ*ij*+* – подвижность иона *G*i*+* в газе *G*j [28].

2. Угол Лоренца

В скрещенных электрическом и магнитном полях сила Лоренца заставляет электроны дрейфовать под углом к силовым линиям электрического поля, называемым углом Лоренца и определяемым произведением величины магнитного поля на время между взаимодействиями. Таким образом, угол Лоренца тем больше, чем меньше сечение взаимодействия электрона с молекулами газа. Также угол Лоренца зависит от величин магнитного и электрического полей. Обычно угол Лоренца велик при малых электрических полях и падает с увеличением электрического поля.

4. Принцип работы газоразрядного детектора с усилением – пропорционального счетчика

Рассмотрим тонкий слой газа, например, 1 см слой газовой смеси 70%Ar + 30% Изобутан при нормальных условиях между двумя плоскими электродами. Минимально ионизирующая заряженная частица образуют в результате ионизации в этом слое около 120 пар ионов; если этот заряд собирается на одном электроде, соответствующий сигнал будет равен

где при *n* = 120 и типичной емкости *С* = 10 пФ, *V* ~ 2 мкВ. Такой сигнал невозможно зарегистрировать, поскольку он будет соразмерен с шумами предусилителей.

Самыми распространенными детекторами ионизирующих излучений являются газонаполненные детекторы. Конструктивно газонаполненные детекторы представляют собой замкнутые газовые объемы с двумя электродами, к которым приложена разность потенциалов. Если между электродами приложено сильное электрическое поле, то происходит лавинное усиление, что приводит к повышению амплитуды сигнала на несколько порядков. Но такая геометрия детектора обладает несколькими серьезными ограничениями. К примеру, величина зарегистрированного сигнала не пропорциональна энергии, образованной в результате ионизации. Коаксиальная геометрия электродов позволяет преодолеть это ограничение (Рис. 1.5).

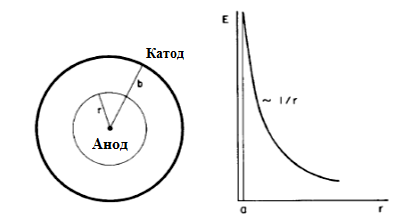


Рисунок 1.5: *Пропорциональный счетчик и форма электрического поля вблизи анодной проволочки. Вблизи анода поле возрастает настолько, что становится возможным размножение электронов* [28].

Тонкая металлическая проволока натягивается вдоль оси цилиндра и изолируется от него для того, чтобы между электродами можно было приложить разность потенциалов. Полярность выбирается таким образом, чтобы центральная проволочка была положительна относительно внешнего цилиндра. Электрическое поле максимально на поверхности анодной проволоки и быстро спадает как *r*-1 в направлении катода; при использовании тонких проволочек можно получить очень высокие значения полей вблизи анода. Работа счетчика может быть объяснена следующим образом. Электроны, образовавшиеся в результате первичной ионизации, дрейфуют к аноду, а положительные ионы соответственно к катоду. Но вблизи анода, как правило, на расстоянии нескольких радиусов проволочки, где поле становится настолько сильным, происходит усиление; начинает развиваться каплеобразная лавина, в передней части которой располагаются электроны, а в задней части – ионы.



Рисунок 1.6: *Развитие лавины в пропорциональном счетчике* [28].

За счет диффузии и малого радиуса анода эта лавина окружает проволочку, как показано на Рис. 1.6. Положительные ионы начинают дрейфовать к катоду.

Зависимость развития различных мод газового усиления в газоразрядном детекторе от напряжения приведена на Рис. 1.7. Здесь показана вольт-амперная характеристика газоразрядного промежутка, где красная кривая соответствует α-частицам, обладающим высокой удельной ионизацией, а синяя – β-частицам.

*Область рекомбинации*

В этой области напряжение мало для создания электрического поля, достаточного для сбора всех образованных в результате первичной ионизации частиц. Вместо этого происходят два процесса: медленный дрейф ионов к электродам и их рекомбинация. Очевидно, что с увеличением напряжения число собранных ионов возрастает, но рост происходит до тех пор, пока не будет достигнуто значение насыщенности. По этой причине газообразные ионизационные камеры не работают при этих напряжениях.

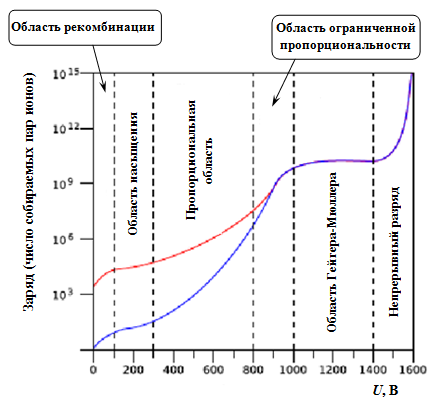


Рисунок 1.7: *Вольт-амперная характеристика газоразрядного промежутка*. *Красная линия соответствует α-частицам, синяя – β-частицам* [29]*.*

*Область насыщения*

При значениях напряжения, равных около 100 В, достигается насыщение: этого напряжения недостаточно, чтобы обеспечить сбор всех ионных пар, образованных заряженной частицей. Но в то же время напряжение еще не столь велико для создания вторичной ионизации. Соответственно, газовое усиление в этой области отсутствует.

*Пропорциональная область*

Напряжение в этой области настолько велико, что возникает большой градиент потенциала вблизи анода. Оказывается возможным газовое усиление, так как скорости первичных электронов достаточно для создания вторичной ионизации, лавины Таунсенда. В этой области амплитуда импульса напряжения пропорциональна количеству образованных ионов.

*Область ограниченной пропорциональности*

По мере увеличения напряжения электроны вылетают с поверхности катода под действием электрического поля, что приводит к образованию лавины Таунсенда, распространяющейся вдоль анода, в то время как положительные ионы стремятся остаться там, где они были образованы. На этом участке уже сказывается влияние пространственного заряда положительных ионов и соседних лавин, мешающих взаимному развитию. В этом случае величина начальной ионизации влияет на коэффициент газового усиления таким образом, что его возможный рост ограничивается при сильной первичной ионизации по сравнению с наиболее быстрым увеличением при слабой ионизации.

*Область Гейгера-Мюллера*

На этом участке газовое усиление возрастает настолько, что собираемый заряд не зависит от первичной ионизации. Это так называемая область Гейгера-Мюллера. Однако разряд, как и в предыдущих областях, остается вынужденным, то есть начинается после прохождения ионизирующей частицы. Это область работы счётчиков Гейгера-Мюллера.

*Область непрерывного разряда*

И, наконец, напряжение увеличивается настолько, что происходит непрерывный разряд. Плато Гейгера – это последняя область, используемая для непрерывно приложенных напряжений. Области, находящиеся выше, не используются для регистрации частиц.

1. Метод исследования скорости дрейфа электронов


5. Дрейфовые камеры

Одной из основных характеристик газовой смеси является скорость дрейфа электронов, поскольку эта характеристика влияет на временное разрешение детектора и его быстродействие.

Дрейфовые камеры (Рис. 1.8) – это газонаполненные детекторы, предназначенные для регистрации заряженных частиц. Заряженная частица, проходя через газовый объем в момент времени *t* = 0 (этот момент регистрируется триггерной системой – обычно органический сцинтиллятор), ионизирует атомы газа, что приводит к образованию электрон-ионных пар. В электрическом поле, которое прикладывается к газовому объему, образовавшиеся ионы и электроны начинают дрейфовать в противоположных направлениях: электроны двигаются по направлению к аноду, а положительно заряженные ионы – к катоду. В качестве анода обычно используется тонкая проволочка диаметром 20 мкм - 50 мкм для получения электрического поля высокого напряжения вблизи анода. В окрестности анодной проволочки электроны ускоряются этим полем настолько, что они становятся способными ионизировать другие молекулы газа. Поскольку этот процесс повторяется несколько раз, то электроны образуют размножающуюся лавину, которая регистрируется как отрицательный электрический импульс. Процесс размножения электронов в газе называется газовым усилением.

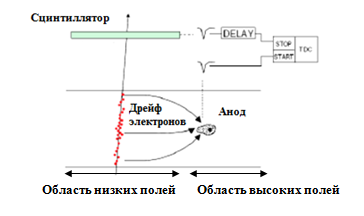


Рисунок 1.8: *Принцип работы дрейфовой камеры*.

Обычно для измерения скорости дрейфа применяется следующий подход. Измеряется время дрейфа электронов ионизации от трека частицы с измеренной координатой - *x*, до анодной проволочки в однородном электрическом поле. Скорость дрейфа определяется из измеренной зависимости времени сбора электронов на аноде при заданных положениях источника электронов по формуле

где *dt = t2* - *t1* – разница между временами прихода электронов на анод, соответствующим двум различным положениям источника *x2* и *x1*, соответственно, *dx = x2* - *x1*.

На графике ниже (Рис. 1.9) представлена зависимость скоростей дрейфа для большинства широко используемых газовых смесей от приложенного электрического поля.

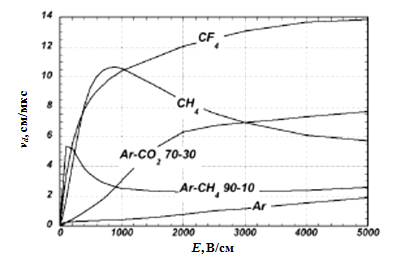


Рисунок 1.9: *Зависимости скоростей дрейфа электрона от электрического поля для нескольких стандартных газовых смесей при нормальных условиях* [28].

4. Примеры установок измерения скорости дрейфа из литературы

В литературе представлено несколько методик по определению скоростей дрейфа в газах. Они отличаются применяемой техникой образования электронов. В некоторых экспериментальных установках электроны образовывались под действием УФ-лазера, либо радиоактивным источником β-частиц, например 90Sr.

Экспериментальная установка, которая использовалась в работе [30], схематически представлена на Рис. 1.10. Дрейфовая камера содержит 40 электродов, выполненных в виде колец из нержавеющей стали, расположенных на расстоянии 10 мм ± 0.1 мм с использованием тефлоновой прокладки. Электроды соединены между собой посредством цепи резисторов для создания однородного поля. Самый верхний электрод подсоединен к источнику высокого напряжения, который обеспечивает выходное напряжение вплоть до 50 кВ, самый нижний электрод находится под нулевым потенциалом. В каждом электроде просверлена дырка диаметром 25 мм. Электроны в однородном поле дрейфуют сквозь эти дырки к сигнальной проволочке, расположенной ниже самого последнего электрода. Проволочка частично окружена u-образным катодом, находящимся под потенциалом земли. Для ограждения сигнальной проволочки от наведенного заряда отверстие в нижнем электроде покрыто никелевой сеткой. Газовая смесь в камере ионизируется под действием лазера на азоте с длиной волны 337 нм, длительностью импульса 500 пс. Лазерный пучок разделяется на два отдельных, которые фокусируются вдоль оси дрейфовой камеры. Ультрафиолетовый лазер образует электронные кластеры в основном путем ионизации примесей в газовой смеси. Резервуар высокого давления оборудован четырьмя парами кварцевых окошек, расположенных напротив друг друга, которые используются в качестве входа и выхода лазерного пучка. Измеряя ∆*t*, разность времен прихода между двумя отдельными сигналами, соответствующие одному лазерному импульсу, мы можем вычислить *v* = ∆*x*/∆*t*, компонента скорости дрейфа, параллельная электрическому полю *E*.



Рисунок 1.10: *Схематичное изображение экспериментальной установки* [30].

В начале измерений в резервуаре высокого давления откачивается воздух, и несколько раз он продувается аргоном. Измерения выполняются вскоре после того, как камера полностью наполнится газом. Ошибка в определении дрейфовой скорости составляет 0.5%.

В работе [31] представлена другая методика измерения дрейфовой скорости электрона в дрейфовой камере. Дрейфовая камера (Рис. 1.11) наполнялась газовой смесью аргона и метана (Ar + 40%CH4) под давлением 1 атм. Дырка диаметром 2 мм, сделанная в катоде, была закрыта 5 мкм медной фольгой. Радиоактивный источник 210Po был размещен на фольге. Кремниевый детектор, диаметр которого составлял 15 мм, регистрировал α-частицы и был расположен на расстоянии 6 мм от источника α-частиц. Сигнал от кремниевого детектора использовался в качестве "старта" для измерений времени дрейфа. Ядра отдачи, образованные в результате α-распада, испускаются в объеме дрейфовой камеры и образовывают около 103 электронов вблизи (≤ 50 мкм) катода.

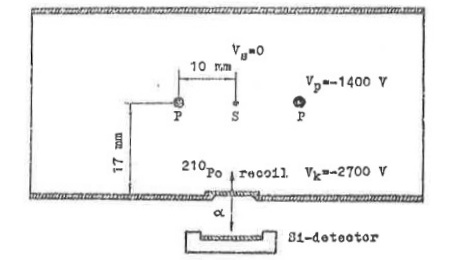


Рисунок 1.11: *Схематическое изображение дрейфовой ячейки, используемой для измерения скоростей дрейфа электронов. S – сигнальная проволочка диаметром 30 мкм, P – полеформирующая проволочка диаметром 75 мкм* [31].

В работе [32] дрейфовая ячейка была разделена на две части (Рис. 1.12). Область дрейфа электронов сделана из латунных и тефлоновых пластинок. Латунные пластинки, которые подключены к делителю напряжения, определяют форму дрейфового поля. Сигналы формируются на анодной проволочке диаметра 20 мкм, расположенной внутри малой камеры, которая ограничивает область дрейфа. Для проведения измерений дрейфовой скорости самое большое значение электрического поля составило 2.6 кВ/см.

|  |  |
| --- | --- |
| Рисунок 1.12: *Вид дрейфовой ячейки в разрезе* [32]. | Рисунок 1.13: *Вид экспериментальной установки* [32]. |

Экспериментальная установка изображена на Рис. 1.13. Дрейфовая ячейка установлена на столике, который перемещается с высокой точностью. Источник электронов 90Sr помещен над дрейфовой камерой. В самой ячейке имеются четыре окна шириной 0.38 мм, два окна расположены сверху, два оставшихся — снизу, которые покрыты тонкой пленкой из пластика. Через эти окнам электроны от источника 90Sr попадают в дрейфовую область. Помимо свинцовых коллиматоров, латунные пластины осуществляют окончательную коллимацию электронного пучка. На небольшом пластиковом сцинтилляторе генерируется начальный сигнал от электронов, проникающих внутрь камеры, который далее попадает на преобразователь время-код. При этом и источник электронов, и фотоэлектронный умножитель остаются неподвижными. Информацию о дрейфовой скорости получают из величины дрейфовой области (расстояние между верхним окном и нижним) и разницей между измеренными временами прихода сигнала. Расстояние между окнами может быть измерено с точностью до ±6 мкм. Типичное распределение времен прихода показано на Рис. 1.14. Ширина полученного пика составляет 6-7 нс. Статистическая ошибка в определении времен прихода сигнала равна ±0.2 нс, которая соответствует ошибки в определении расстояния примерно ±10 мкм.

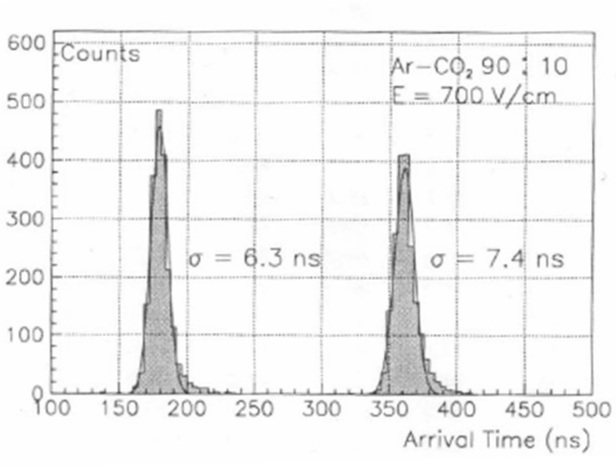


Рисунок 1.14: *Распределение времен прихода электронов* [32].

К недостаткам перечисленных методов относится постоянное положение источников относительно анода, т.е. время дрейфа определяется только по двум экспериментальным точкам. В основе данной работы лежит новый принцип с использованием системы передвижных коллиматоров. При таком подходе время прихода электронов от различных положений источника описывается набором экспериментальных точек, что в перспективе дает возможность измерения скорости дрейфа с более высокой точностью.

В связи с идеологией измерений особые требования должны предъявляться к механической точности системы перемещения, а также получения однородного электрического поля в детекторе в рабочей области облучений.

1. Разработка дрейфовой камеры

Для изучения характеристик новых рабочих газовых смесей, в частности измерения скорости дрейфа электронов при низких напряженностей полей *Е =* 500÷5000 В/см (область работы большинства детекторов), был разработан компактный дрейфовый детектор. За основу конструкции детектора взят модуль дрейфового детектора FTC [33].

2. Описание методов моделирования

Моделирование дрейфовой камеры осуществлялось в программном пакете GARFIELD версии 7.45 – это программа с открытым кодом, разработанная Др.Робом Веенхофом из CERN, предназначена для расчета плоских и трехмерных дрейфовых камер. Данный программный пакет позволяет получать распределение полей (как электрического, так и магнитного) внутри дрейфовых камер, строить линии дрейфа электронов и ионов. Также эта программа может помочь в поиске оптимальных значений полей для конкретной геометрии [34].

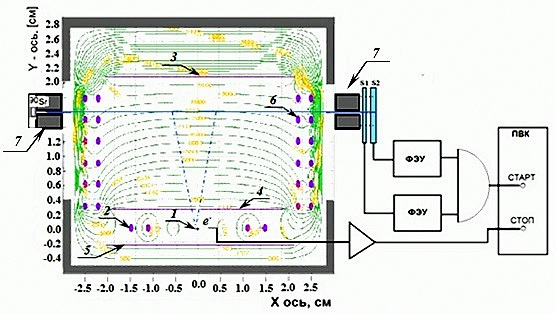
Для расчета характеристик газовых смесей, таких как коэффициента Таунсенда, продольной и поперечной диффузии, скорости дрейфа электронов, используется программа MAGBOLTZ [35]. Программный пакет MAGBOLTZ предназначен для численного решения кинетического уравнения Больцмана для электронов в газовых смесях под воздействием электрического и магнитного полей.

Для расчета ионизационных потерь энергии высокоэнергичной частицы в газах с учетом дельта-электронов используется программа HEED [36]. Также существует возможность учета многократного рассеяния влетающей частицы. HEED может воспроизводить процесс поглощения фотонов в газовых детекторах при фотоионизации. Данная программа, как и MAGBOLTZ, в основном использовалась (и продолжает использоваться) как компонент упомянутой выше программы GARFIELD.

2. 2. Моделирование детектора в программе Garfield

Принципиальная схема установки представлена на Рис. 2.1. Дрейфовая камера состоит из двух областей: рабочей области детектора с однородным электрическим полем и регистрирующей области (анодная плоскость).

Формирование узкого пучка электронов от источника 90Sr осуществляется системой из двух соосно связанных коллиматоров (7), которые перемещаются вместе с источником, в плоскости перпендикулярной плоскости анода. При прохождении электрона через систему коллиматоров сцинтилляционные счетчики S1 и S2, предназначенные для регистрации времени пролета электронов от источника 90Sr, дают быстрые «стартовые» сигналы. При этом электроны от источника, проходя через рабочий объем камеры, ионизируют молекулы газа. Электроны первичной ионизации под действием электрического поля дрейфуют к сигнальной проволочке (1), инициируя «стоповые» сигналы.



**Модуль «И»**

**ПУ**

Рисунок 2.1: *Блок-схема установки для измерения скорости дрейфа электронов: 1 – сигнальная проволочка, 2 – полеформирующие проволочки, 3 – дрейфовый катод, 4, 5 – катоды, 6 – краевые проволочки, 7 – система связанных соосных коллиматоров.*

Таким образом, событием является наличие сигналов на преобразователе «время-код» (ПВК): «СТАРТ» − сигнал, формируемый логикой «И» при наличии двух сигналов со сборки сцинтилляторов (и фотоэлектронных умножителей – ФЭУ) S1 и S2, который свидетельствует о прохождении прямолинейного трека электронов от источника и «СТОП» - цифровой сигнал с анодного предусилителя (ПУ), фиксирующий время развития лавины на аноде, Рис. 2.1.

Во временном спектре преобразователя «время-код» (ПВК) для каждого положения источника наблюдаются пики, соответствующие времени собирания электронов на аноде. Диапазон рабочих положений источника соответствует области однородного электрического поля для каждого рабочего напряжения на электроде (3) и рассчитывается с использованием GARFIELD. Измерение разности между пиками на спектре ПВК для различного положения источника позволяет определить скорость дрейфа электронов. При этом вклад области нелинейного поля вблизи анодной нити учитывается как постоянная составляющая, не зависящая от положения источника.

1. Конструкция дрейфовой камеры

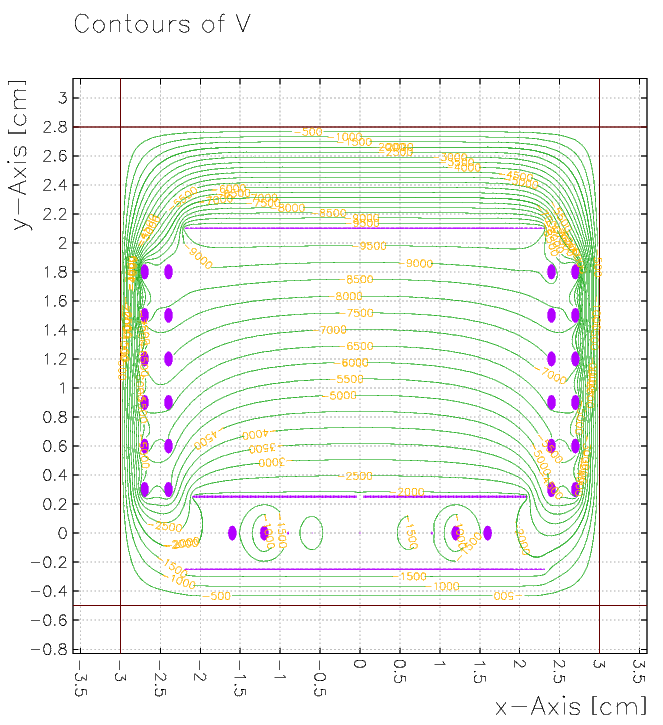
Регистрирующая плоскость дрейфовой камеры, Рис. 2.1, состоит из анодных и полеформирующих проволочек. Центральная анодная проволочка (1) является сигнальной, а полефомирующие проволочки необходимы для сглаживания поля между катодами (4) и (5). Эти катоды расположены на расстоянии 2.5 мм от анодной плоскости.

Для минимизации разброса измеряемого времени дрейфа электронов осуществляется сбор первичных электронов на аноде лишь с малого участка трека. Для этого в верхнем катоде (4) имеется узкая щель шириной 1 мм. Все остальные электроны из трека собираются без газового усиления на полеформирующих анодных проволочках, пройдя через проволочный катод (4).

Выбор напряженности электрического поля в дрейфовом промежутке осуществляется установкой напряжения на дрейфовом электроде (3), расположенный на расстоянии 21 мм от анода. Формирование однородного электрического поля обеспечивается системой электродов: катодные плоскости (3) и (4) и боковыми электродами (6) с распределенным потенциалом. Двойной ряд проволочек электродов (6) позволяет обеспечить более однородное электрическое поле внутри дрейфового объема и эффективное сглаживание краевого эффекта [37-38].

1. Выбор и оптимизация геометрических параметров детектора

Однородность электрического поля внутри дрейфового объема является одним из ключевых параметров, определяющих точность измерений данной установки. Этот параметр оценивался величиной *ΔΕ/E0*, где *E0* = *E* (*x* = 0, *y* = 1.2 см) – напряженность электрического поля в центре области дрейфа (Рис. 2.2).

**

Область дрейфа

(3)

Рисунок 2.2: *Конфигурация электрического поля в дрейфовой камере. Напряжение на катоде (3) HVcath = 8000 В/см*.

Однородность поля в диапазоне рабочих напряженностей 500÷5000 В/см достигалась подбором потенциалов рабочих напряжений на электродах (2), (4), (5). Напряжение на сигнальной проволочке составляет 0 В.

На Рис. 2.3 приведен график зависимости напряженности электрического поля *E = E (x = 0, y)* при различных напряжениях на дрейфовом катоде (3). Значения напряжений на дрейфовом катоде *HVcath* и соответствующие им значения напряженностей электрического поля в центре области дрейфа *E0* представлены на Рис. 2.4.

Рисунок 2.3: *График зависимости напряженности E = E (x = 0, y) при различных напряжениях на дрейфовом катоде HVcath*.

На Рис. 2.3 следует отметить, что при *HVcath* > 6000 В требуется дополнительно оптимизировать напряжение на катодах (4) и (5), поскольку наблюдается частичная экранировка электронов на катоде (4) и снижение эффективности сбора электронов на аноде.

Рисунок 2.4: *График зависимости напряженности электрического поля в центре области дрейфа E0 от напряжения на дрейфовом катоде HVcath. Ошибки соответствуют однородности электрического поля ΔΕ/E0 = 3%.*

*Оценка рабочего диапазона перемещений источника 90Sr*

Одной из задач моделирования было определение допустимого диапазона перемещений источника 90Sr относительно анода, в котором обеспечивается заданная однородность электрического поля *Е*. Результаты оценки, сделанной по данным Рис. 2.3, приведены на Рис. 2.5, где для параметра *ΔΕ/E0* установлены значения 1 и 3%. Численные значения приведены в Таблице 2.1.

Рисунок 2.5: *Диапазоны рабочих положений источника 90Sr при различных напряженностях электрического поля E0 в дрейфовом промежутке. Показаны верхние и нижние границы диапазонов для электрических полей с однородностью на уровне ΔΕ/E0 = 1% (▲) и ΔΕ/E0 = 3% (●). Пунктирная линия соответствует центру дрейфового промежутка y = 12 мм. Пунктирная линия соответствует центру дрейфового промежутка y = 12 мм, сплошные линии – катоды (3) y = 21 мм и (4) y = 2.5 мм*.

На Рис. 2.5 видно, что наибольший диапазон однородного электрического поля в дрейфовом промежутке (*y =* 0.5÷2.0 см при *ΔΕ/E0 =* 3%) достигается при напряженностях поля *E* = 1000-1500 В/см, а при *E* > 1500 В/см рабочий диапазон сужается до *y =* 0.8÷1.6 см (*ΔΕ/E0 =* 3%), но сохраняется постоянным вплоть до *E* = 5000 В/см*,* что вполне достаточно для проведения измерений скорости дрейфа.

Таблица 2.1: Рабочий диапазон положений источника быстрых электронов 90Sr относительно анода (*x = 0, y = 0*) и соответствующая однородность электрического поля *ΔΕ/E0*, где *E0=E* (x = 0, y = 1.2 см).

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| HVcath, В | E0, В/см | ymin ÷ ymax, мм | | ∆E/E0, %  (4 мм ÷ 21 мм) |
| ∆E/E0 = 1% | ∆E/E0 = 3% |
| 2800 | 515.6 | 11.2 ÷ 12.9 | 9.4 ÷ 14.6 | 5.9 |
| 3500 | 894.2 | 4.5 ÷ 19.7 | 4.0 ÷ 20.0\* | 1.6 |
| 4000 | 1164.0 | 4.7 ÷ 20.0 | 4.0 ÷ 20.0\* | 1.7 |
| 5000 | 1705.0 | 9.8 ÷ 14.8 | 4.0 ÷ 20.0\* | 2.8 |
| 6000 | 2246.0 | 10.3 ÷ 13.7 | 6.5 ÷ 19.7 | 3.3 |
| 7000 | 2787.0 | 10.6 ÷ 13.5 | 7.3 ÷ 17.1 | 3.8 |
| 8000 | 3328.0 | 10.5 ÷ 13.3 | 7.8 ÷ 16.7 | 4.1 |
| 9000 | 3869.0 | 10.7 ÷ 13.3 | 8.2 ÷ 16.3 | 4.4 |
| 10000 | 4410.0 | 10.7 ÷ 13.3 | 8.5 ÷ 15.9 | 4.6 |
| 11000 | 4950.0 | 10.8 ÷ 13.2 | 8.6 ÷ 15.9 | 4.7 |

\**ΔΕ/E0 <* 3%

2. Вычисление скорости дрейфа

*Скорость дрейфа электронов*

В качестве тестовой газовой смеси для симуляций взята рабочая газовая смесь Ar/CO2/CF4, которая используется в катодных стриповых камерах CSC установки CMS (БАК).

На Рис. 2.6 приведен график зависимости скорости дрейфа электронов от напряженности электрического поля, вычисленный для газовой смеси CSC программой MAGBOLTZ, входящей в программный пакет GARFIELD. Данный график вычисляется стандартным образом для любых газов, содержащихся в библиотеке программы. Приведенная зависимость *v(E)* имеет широкое плато в области *Е =* 3000÷20000 В/см, что ослабляет влияние неоднородности поля, вызванной погрешностью изготовления детектора, на измеряемую скорость дрейфа. Однако существует большое количество рабочих газовых смесей, где такого плато нет вообще.

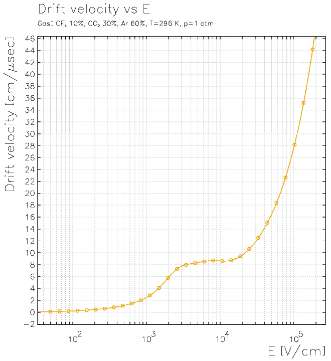
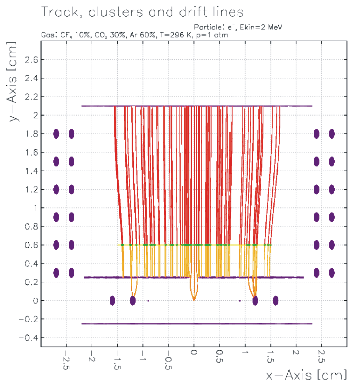


Рисунок 2.6: *Скорость дрейфа электронов для газовой смеси 60%Ar + 30%CO2 + 10%CF4, вычисленная в программе MAGBOLTZ*.

Поэтому задача симуляции включала в себя оценку влияния параметров конструкции детектора и газовой смеси на точность определяемой скорости дрейфа по алгоритму, описанному в 1.5.

*Симуляция прохождения частицы от источника 90Sr*

Образование первичных кластеров ионизации при прохождении быстрых электронов от источника 90Sr вычислялось программой HEED, также включенной в программный пакет GARFIELD. Результат вычисления в программе приведен на Рис.2.7.

**

Линии дрейфа электронов

Трек электрона

Линии дрейфа ионов

Рисунок 2.7: *Симуляция* *прохождения электрона от источника 90Sr через объем дрейфовой камеры. Зеленым цветом выделены кластеры ионизации, красные линии соответствуют линиям дрейфа ионов, желтые – линиям дрейфа электронов. Напряжение на катоде HVcath = 9100 В*.

Для образовавшихся первичных электронов с использованием метода Монте-Карло строились линии дрейфа для электронов, и вычислялось среднее время дрейфа электронов до анода (Рис.2.8).

# DTA_4000_1.2cm.png

Рисунок 2.8: *Временное распределение электронов. Напряженность электрического поля 3912 В/см. Положение источника 1.2 см, коллиматор 1 мм. Газовая смесь 60%Ar + 30%CO2 + 10%CF4*.

*Зависимость времени дрейфа от напряженности поля*

На Рис.2.9. приведен график зависимости определенного в GARFIELD времени дрейфа электронов до анода от положения источника 90Sr.



Рисунок 2.9: *Среднее* *время дрейфа электронов в детекторе в газовой смеси 60%Ar + 30%CO2 + 10%CF4 при напряженности в дрейфовой области E0 = 1164 В/см. Время дрейфа рассчитано для положений источника x1 = 0.9 см и x2 = 1.6 см ΔΕ/E0 = 3%.*

Из Ур. (1.16) скорость дрейфа для данной напряженности поля *E0* составит:

(2.1)

где *s* = *y2* - *y1* – расстояние между положениями источника *y2* и *y1* для рабочего диапазона источника (Рис. 2.9) при *ΔΕ/E0* = 3%, а <*ti*> - среднее время дрейфа электронов для i-го положения источника. Видно, что при удалении от анода погрешность величины *t* увеличивается, что связано с увеличением вклада диффузии электронов в газе (см. 2.6).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Рисунок 2.10: *График зависимости скорости дрейфа электронов v(E) в газовой смеси 60%Ar + 30%CO2 + 10%CF4: сплошная линия – данные MAGBOLTZ (Рис. 2.6), точки – расчетные значения скорости по Ур.(2). Ошибки по х соответствуют ΔE/E=3%, по у – суммарные погрешности[[1]](#footnote-1) для двух положений источника, с учетом ширины коллиматора 1 мм*.

Результат определения скорости дрейфа для напряженностей поля в диапазоне *E* = 500÷5000 В/см приведен на Рис. 2.10. Видно, что значения скорости дрейфа, определенные при симуляции детектора по описанному выше алгоритму, совпадают с исходными данными MAGBOLTZ: < 2.5%. Это означает, что предложенная конструкция дрейфового детектора позволит правильно интерпретировать экспериментальные данные при работе реального детектора.

1. Оценка вклада факторов, влияющих на точность определения скорости дрейфа

Основные факторы, которые вносят вклад в погрешность измерения скорости дрейфа, можно разделить на две группы:

* систематические погрешности: неоднородность электрического поля, диффузия электронов, ширина коллиматора и др.;
* статистические погрешности: статистика набора.

*Неоднородность электрического поля*

Основным фактором, влияющего на точность определения величины скорости дрейфа, является неоднородность электрического поля в дрейфовом промежутке детектора.

Из Рис. 2.6 видно, что заданная величина неоднородности электрического поля в различных областях зависимости *v(E)* для газовой смеси 60%Ar + 30%CO2 + 10%CF4 дает существенно отличающиеся результаты. Пусть Δ*v/v –* стабильность скорости, равная

(*X*%)/*v*() (2.2)

где *k* – коэффициент, характеризующий динамику зависимости *v(E)* на данном участке *E*, аппроксимированного прямой линией (Рис.2.11), *ΔE0*(*Х*%) – абсолютное значение флуктуации напряженности поля *E0*,соответствующее *ΔE/E* = *Х*%, *v*(*E0*) – скорость дрейфа электронов при *E = E0*.

Рисунок 2.11: *График зависимости скорости дрейфа электронов от напряженности электрического поля в дрейфовом объеме для газовой смеси 60%Ar + 30%CO2 + 10%CF4, построенный по данным MAGBOLTZ. ki – наклон прямой аппроксимации.*

Тогда имеем, для двух областей *E*

1. *Область E < 2500 В/см, k1 = 29E-4(см/мкс)/(В/см)*

*E0* = 1164 В/см (HVcath = 4000 В), *v*= 2.93 см/мкс:

* =>
* *=>*

1. *Область E > 2500 В/см, k2 = 2E-4 (см/мкс)/(В/см)*

*E0* = 3869 В/см (HVcath = 9000 В), *v0* = 8.08 см/мкс:

* =>
* *=>*

Таким образом, наибольшая ошибка измерения скорости дрейфа электронов в газовой смеси 60%Ar + 30%CO2 + 10%CF4, обусловленная неоднородностью напряженности поля в дрейфовой области детектора, будет наблюдаться в области низких напряженной поля *E < 2500* В/см, и не будет превышать < 3.5% в рабочей области *у =* 4.1 ÷ 21.0 мм (*ΔE/E =* 3%). Для 2500 В/см < *E* < 5000 В/смошибка не превышает < 0.3% в указанной области *у*.

*Диффузия электронов*

Среднеквадратичное отклонение, обусловленное диффузией электронов при дрейфе к аноду, определяется:

(2.3)

где *D*(*E*) – коэффициент диффузии электронов в электрическом поле с напряженностью *E*, *l* и *v* – длина и скорость дрейфа электронов соответственно.

Вследствие того, что над дрейфующими электронами в электрическом поле совершается дополнительная работа, коэффициент диффузии *D*(*E*) обладает изотропными свойства. Соответственно вводят коэффициенты продольной *DL*(*E*) и поперечной диффузии *DT*(*E*).

При оценке вклада диффузии электронов в ошибку времени прихода электронов на анод учитывалась только продольная диффузия (вдоль направления дрейфа). График зависимости *σD*(*E*) вычислялся в программе MAGBOLTZ (Рис.2.12).

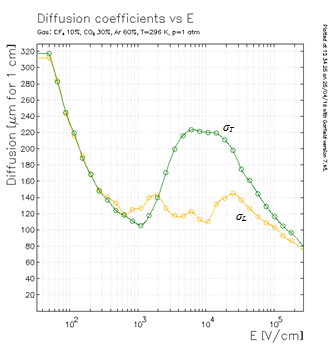


Рисунок 2.12: *Зависимости диффузии электронов σD(E) от напряженности электрического поля для газовой смеси 60%Ar + 30%CO2 + 10%CF4, вычисленные в MAGBOLTZ: σL – продольная диффузия, σT – поперечная диффузия*.

Видно, что в рабочем диапазоне *E* = 500÷5000 В/см при положении источника 90Sr на расстоянии *y* = 1.2 см от анода вклад диффузии электронов не превысит = 153 мкм. Для *E =* 1164 В/см (HVcath = 4000 В, *vD* = 2.93 см/мкс) 5.2 нс, что составляет 1.5% от среднего времени дрейфа электронов <*T*> ≈ 345 нс.

*Неопределенность положения начальной ионизации (электронов) относительно анода*

Первый тип погрешности *σ*y(*t*) и наибольший определяется шириной коллиматора *Dcoll*

 , (2.4)

где *v(E)* – скорость дрейфа из Рис. 2.9.

Второй тип погрешности *σx*(*t*) определяется шириной отверстия *dcath* = 1 мм в катоде (4), при этом *σx*(*t*) << *σ*y(*t*), и ею можно пренебречь.

Суммарная ошибка при учете диффузии электронов, как независимого случайного фактора, составляет

(2.5).

Тогда при напряженности поля *E* = 1164 В/см длядвух вариантов коллиматоров имеем[[2]](#footnote-2):

* *Dcoll* = 0.5 мм: *σ*(*t*) = 7.1 нс (*σ*Garf(*t*) = 6.4 нс);
* *Dcoll* = 1.0 мм: *σ*(*t*) = 10.9 нс (*σ*Garf(*t*) = 10.4 нс).

Оценки, получаемые из Ур. (2.5), хорошо согласуются с результатами моделирования в GARFIELD. Несколько завышенное значение *σ*(*t*) возникает из-за учета максимальной ошибки, вносимой диффузией электронов.

Следует отметить, что финальный выбор ширины коллиматоров следует определять исходя из приемлемого соотношения времени набора, интенсивности источника и требуемого временного разрешения.

*Статистические ошибки*

Для вычисления скорости дрейфа используется Ур. (2.1). Выражение для погрешности имеет вид

, (2.6)

где погрешность среднего, соответствующей величины, *N –* размер выборки, *s = x2-x1*. Если принять, что Δ*s* = 0 (рассматривается только статистическая погрешность) и Δ*t1* = Δ*t2* = Δ*t*, то получим

(2.7)

Из Ур. (2.7) следует, что погрешность измеряемой скорости дрейфа обратно пропорциональна расстоянию между положениями источника *s* и пропорциональна .

Оценим необходимый размер выборки *N*, при котором , пологая = 0.5%. Используя Ур. (2.7) и , получаем

(2.8)

Тогда для *v*= 2.93 см/мкс, *σ(t)* = 11 нс, *s =* 1 мм, то < 0.5% достигается при *N >* 7·103 событий, а для уровня , необходимо *N >* 1.7·105 событий.

*Другие ошибки*

Следующие факторы должны быть приняты во внимание при анализе реальных данных с детектора:

1. Стабильность высокого напряжения на катоде (3): *ΔHVcath ~ ΔE;*
2. Допуски номиналов сопротивлений на электродах с распределенным потенциалом (6), Рис. 2.1;
3. Временное разрешение ПВК. Из Ур. (2.6) имеем

или .

Если *Δt =* 100 пкс, *s =* 1 мм, *vD* = 3 см/мкс, то *Δv/v* = 0.3%;

1. Точность позиционирования коллиматоров Δ*v* ~ Δ*s* (Ур. (2.6), Δ*t1 =* Δ*t2 = 0*);
2. Разрешение триггерной системы: флуктуации числа фотонов в сцинтилляторах при регистрации электронов, временное разрешение ФЭУ и электроники;
3. Стабильность температуры и давления;
4. Стабильность состава и продува газовой смеси.


8. Оценка толщины сцинтилляторов

В качестве радиоактивного источника электронов взят 90Sr, который распадается распадается следующим образом:

В процессе β-распада 90Y образуются электроны с энергией 2.27 МэВ, достаточной для регистрации этих электронов вторым сцинтиллятором.

В качестве сцинтилляционного материала детекторов рассмотрен вариант пластикового сцинтиллятора BC-400 [39] с быстрым временем высвечивания 2.4 нс, что является ключевым параметром для данной установки, поскольку определяет точность определения времени сигнала «СТАРТ». Этот вид сцинтиллятора производится на основе поливинилтолуола плотностью ρ = 1.032 г/см3.

Электроны, пройдя первый сцинтиллятор S1, должны достичь второго сцинтиллятора S2. Наличие двух сигналов от этих сцинтилляторов подтвердит факт пролета электрона.

Средняя энергия электронов равна 933.5 кэВ. Произведем оценку толщины сцинтиллятора, исходя из того, что в первом сцинтилляторе должна поглотиться половина средней энергии, то есть = 466.75 кэВ.

Рисунок 2.13: *График зависимости потерь энергии от пробега электронов. Красная кривая соответствует электронам с начальной энергией E0 = 935.5 кэВ, синяя кривая – электронам с энергий E0 = 2,27 МэВ*.

Из Рис. 2.13 (красная кривая) видно, что потери составят 466.75 кэВ при толщине сцинтиллятора *R*1(см) = *R*1(г/см2)/*ρ*(г/см3) = 0.16 см. Это и будет толщина первого слоя сцинтиллятора. Толщина второго сцинтиллятора должна соответствовать оставшейся от полной энергии электронов (синяя кривая). Таким образом, получаем

*R*2(см) = *R*(см) - *R*1(см) = 0.95 см,

где *R*(см) – пробег электронов с начальной энергией *E0 =* 2.27 МэВ.

Заключение

Газоразрядные детекторы частиц широко используются в самых различных физических экспериментах, в том числе и на Большом Адронном Коллайдере (БАК) в CERN. Состав рабочей газовой смеси для детекторов обычно выбирается исходя из ряда взаимосвязанных факторов: конструкции, планируемой радиационной загрузки, набора требуемых характеристик детектора. На сегодняшний день интерес к разработке новых газовых смесей обусловлен ещё и экологическими требованиями.

Для изучения характеристик новых рабочих газовых смесей, в частности измерения скорости дрейфа электронов при низких напряженностей полей *Е =* 500 ÷ 5000 В/см, коэффициента газового усиления была разработана компактная дрейфовая в программном пакете GARFIELD.

Особенностью установки является возможность перемещения источника 90Sr вдоль модуля с малым шагом 200 мкм ÷ 1 мм, т.е. получения ряда экспериментальных точек и соответственно более точного фитирование данных, по сравнению с аналогами. Кроме этого, компактность детектора позволяет поместить его в соленоид небольшого размера для измерения скорости дрейфа от напряженности магнитного поля.

Проведена оптимизация электрического поля, и определены диапазоны рабочих положений источника 90Sr, при котором обеспечивается заданная однородность электрического поля. Построены временные зависимости для газовой смеси 60%Ar + 30%CO2 + 10%CF4 во всем рабочем диапазоне напряженностей электрического поля. Проведена успешная проверка алгоритма определения скорости дрейфа для указанной газовой смеси, и определены вклады основных ошибок.

Проведенная работа будет использована в дальнейшем при разработке прототипа дрейфового детектора для установки по измерению скорости дрейфа.

**Благодарности**. Выражаю особую благодарность научному руководителю к. ф.-м. н. Д. С. Ильину за помощь на всех этапах выполнения диссертации и помощь при оформлении диссертации, а также к. ф.-м. н. Г.Е. Гаврилову за участие в обсуждении полученных результатов.

Список литературы

1. M. Abbrescia, A. Colaleo, R. Guida, G. Iaselli, R. Liuzzi, F. Loddo, M. Maggi and B. Marangelli et al., Gas analysis and monitoring systems for the RPC detector of CMS at LHC, physics/0701014.
2. S. Colafranceschi, L. Benussi, S. Bianco, L. Fabbri, M. Giardoni, B. Ortenzi, A. Paolozzi and L. Passamonti et al., Operational experience of the gas gain monitoring system of the CMS RPC muon detectors, Nucl. Instrum. Meth. A 617 (2010) 146.
3. L. Benussi, S. Bianco, S. Colafranceschi, D. Colonna, L. Daniello, F. L. Fabbri, M. Giardoni and B. Ortenzi et al., The CMS RPC gas gain monitoring system: An Overview and preliminary results, Nucl. Instrum. Meth. A 602 (2009) 805 [arXiv:0812.1108 [physics.ins-det]].
4. L. Benussi, S. Bianco, S. Colafranceschi, F. L. Fabbri, M. Giardoni, B. Ortenzi, A. Paolozzi and L. Passamonti et al., Sensitivity and environmental response of the CMS RPC gas gain monitoring system, JINST 4 (2009) P08006 [arXiv:0812.1710 [physics.ins-det]].
5. S. Colafranceschi, L. Benussi, S. Bianco, L. Passamonti, D. Piccolo, D. Pierluigi, A. Russo and G. Saviano et al., Performance of the Gas Gain Monitoring system of the CMS RPC muon detector and effective working point fine tuning, JINST 7 (2012) P12004 [PoS RPC 2012 (2012) 046] [arXiv:1209.3893 [hep-ex]].
6. S. Colafranceschi, R. Aurilio, L. Benussi, S. Bianco, L. Passamonti, D. Piccolo, D. Pierluigi and A. Russo et al., A study of gas contaminants and interaction with materials in RPC closed loop systems, PoS RPC 2012 (2012) 056 [JINST 8 (2013) T03008] [arXiv:1210.1819 [physics.ins-det]].
7. L. Benussi, S. Bianco, S. Colafranceschi, F. L. Fabbri, F. Felli, M. Ferrini, M. Giardoni and T. Greci et al., Study of gas purifiers for the CMS RPC detector, Nucl. Instrum. Meth. A 661 (2012) S241 [arXiv:1012.5511 [physics.ins-det]].
8. F. Sauli and A. Sharma, Micropattern gaseous detectors, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 49 (1999) 341
9. A. Sharma, Muon tracking and triggering with gaseous detectors and some applications, Nucl. Instrum. Meth. A 666 (2012) 98.
10. M. Alfonsi, G. Bencivenni, P. De Simone, F. Murtas, M. Poli Lener, W. Bonivento, A. Cardini and D. Raspino et al., Aging measurements on triple-GEM detectors operated with CF4 based gas mixtures, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 150 (2006) 159.
11. International Panel on climate changes. [http://www.ipcc.ch/publications and data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html](http://www.ipcc.ch/publications%20and%20data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html)
12. R. Santonico and R. Cardarelli, Development of Resistive Plate Counters, Nucl. Instrum. Meth. 187 (1981) 377.
13. Y. Assran, PhD Thesis 2013, University of Cairo, Egypt.
14. Y. Assran and A. Sharma, Transport Properties of operational gas mixtures used at LHC, arXiv:1110.6761 [physics.ins-det].
15. Properties of potential eco-friendly gas replacements for particle detectors in high-energy physics. L. Benussi, S. Bianco, D. Piccolo, G. Saviano, S. Colafranceschi, J. Kj\_lbro, A. Sharma, D. Yang, G. Chen, Y. Ban, Q. Li. May 2, 2015.
16. F. Jensen: Analysis, Characterization and Optimization of an Analogue Optical Link for Data Readout from a Particle Detector. Ph.D. thesis; 1999
17. Турчихин, Семен. Мюонные детекторы CMS: дрейфовые трубки, катодные полосковые камеры, камеры с резистивными пластинами [Электронный ресурс] / С. Турчихин. – Электрон. текстовые дан. – Москва: МГУ. – Режим доступа: http://nuclphys.sinp.msu.ru/students/md\_dt/index.html, свободный.
18. GHG Protocol Global Warming Potential Values, 2015. http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/tools/Global-Warming-Potential-Values.pdf.
19. Eidelman S. et al., (Particle Data Group) Review of Particle Physics: Experimental methods and colliders // Physics Letters B. 2004. V. 592 (1-4), 1-1109. January 10, 2006. <http://pdg.ldl.gov/>.
20. Y. S. Tsai, Pair Production and Bremsstrahlung of Charged Leptons, Rev. Mod. Phys. 46 (1974) 815 [Erratum-ibid. 49 (1977) 521].
21. I. B. Smirnov, “Modeling of ionization produced by fast charged particles in gases,” Nucl. Instrum. Meth. A 554 (2005) 474.
22. Average energy required to produce an ion pair. Technical report, ICRU Report 31, 1979.
23. L.B. Loeb, Basic processes of gaseous electronics (University of California Press, Berkeley, 1961).
24. S.C. Curran and J.D. Craggs, Counting tubes, theory and applications (Butterworths, London, 1949).
25. G. Schultz, G. Charpak and F. Sauli, Mobilities of positive ions in some gas mixtures used in proportional and drift chambers, Rev. Physique Appliquge 12*,* 67 (1977).
26. J. Townsend, Electrons in gases (Hutchinson, London, 1947).
27. H.W. Fulbright, Ionization chambers in nuclear physics, inEncyclopedia of Physics (Ed. S. Fliigge) (Springer-Verlag, Berlin, 1958), p. 1
28. F. Sauli, Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers, CERN-77-09 (1977). [
29. William Frass C4: Particle Physics Major Option. Particle Detectors. Michaelmas, 2009.
30. Th. Berghöfer, J. Blümer and J. R. Hörandel, A measurement of drift velocities of electrons in xenon-methane mixtures, Nucl. Instr. Meth. A 525 (2004) 544.
31. A.A. Vorobyov, V.S. Guselnikov, A.Yu. Maiorov, Monitoring of electron drift velocity in drift chambers with alpha-decay recoils, Nucl. Instr. Meth. A 301 (1991) 167.
32. T*.* Zhao*,* Y*.*Chen*,* S. Han, J. Hersh, A study of electron drift velocity in Ar–CO2 and Ar–CO2–CF4 gas mixtures, Nucl. Instr. Meth. A 340 (1994) 485.
33. G. Alkhazov et. al. Forward tracking chamber (FTC) in L3 detector. Part1. General description. PNPI preprint EP-23-1996, 2115.
34. R. Veenhof. Garfield - simulation of gaseous detectors. <http://garfield.web.cern.ch/garfield/>
35. S. Biagi. Magboltz - transport of electrons in gas mixtures. <http://magboltz.web.cern.ch/magboltz/>
36. I. B. Smirnov. HEED – Interaction of particles with gases. <http://heed.web.cern.ch/heed/>
37. G. Gavrilov et. al. Nucl. Instr. Meth. A 356 (1995) 189
38. V. Andreev et. al. PNPI preprint 2247, 1998
39. Organic Scintillation Materials. Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc. http://www.crystals.saint-gobain.com/

1. Для наглядности приведены средние квадратические отклонения *σ*(*v*). Погрешности, вычисленные из Ур. (2.6), составляют < 1.5% и лежат в пределах размера точек. [↑](#footnote-ref-1)
2. Соответствующие значения *σ*Garf*(t)* в скобках получены в GARFIELD с учетом диффузии электронов. [↑](#footnote-ref-2)