

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 531.3, 539.1.05

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К БАКАЛАВРСКОЙ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ НА GEANT4 (МОДЕЛИРОВАНИЕ
ФИЗИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
СЦИНТИЛЛЯЦИЙ В ЖИДКОМ ГЕЛИИ)**

Студент _____ Д. С. Голубков

Научный руководитель,
с.н.с. ОФН, НИЦ "Курчатов-
ский институт" _____ И. Н. Мачулин

Научный консультант,
к.ф.-м.н., в.н.с., НИЦ "Курча-
товский институт" _____ А. Я. Балыш

Москва 2020

РЕФЕРАТ

Отчет 29 с., 23 рис., 1 табл., 6 ист.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Пакет моделирования Geant4, жидкий гелий, оценка светосбора, Тёмная материя.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Разработка программы Монте-Карло в пакете Geant4 для моделирования установки с сцинтиллятором в виде жидкого гелия. Моделирование физических параметров детектора и сравнение с экспериментальными данными.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТАРИЙ

- Программный пакет GEANT4.
- Программный пакет ROOT.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработана физическая модель установки для изучения сцинтилляций в жидком гелии. В результате моделирования получены ожидаемые результаты работы установки, проведена оценка светосбора, выполнено сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА GEANT4 (МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ В ЖИДКОМ ГЕЛИИ)

Студент

_____ Д. С. Голубков

Научный руководитель,
с.н.с. ОФН, НИЦ "Курчатов-
ский институт"

_____ И. Н. Мачулин

Научный консультант,
к.ф.-м.н., в.н.с., НИЦ "Курча-
товский институт"

_____ А. Я. Балыш

Рецензент,
в.н.с., НИЦ "Курчатовский
институт"

_____ А. М. Бакаляр

Секретарь ГЭК,
к.ф.-м.н.

_____ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,
д.ф.-м.н., проф.

_____ М. Д. Скорохватов

СОДЕРЖАНИЕ

1	Детекторы на основе жидких благородных газов	6
2	Эксперименты по поиску Тёмной материи на жидких благородных газах	7
3	Описание экспериментальной установки для изучения сцинтилляций в жидком гелии	9
4	Моделирование установки в Geant4	11
5	Модель для изучения сцинтилляций в жидком гелии	14
6	Модель для изучения светосбора в установке без гелиевой мишени	15
7	Результаты моделирования установки с жидким гелием	16
8	Результаты моделирования светосбора в установке без гелиевой мишени	24
9	Заключение	28
	Список использованных источников	29

ВВЕДЕНИЕ

Изучение природы Тёмной материи является одной из основных задач современной физики. Астрономические наблюдения последних десятилетий определенно свидетельствуют в пользу того, что, помимо наблюдаемой, во Вселенной имеется значительное ($\sim 85\%$) количество материи, которая не наблюдается иначе, как через гравитационное взаимодействие, и именуется Тёмной материей. Это одна из самых интригующих проблем фундаментального естествознания конца XX столетия, и от результата ее решения в значительной степени будет зависеть научная картина мира в предстоящем будущем.

Присутствие Тёмной материи наблюдается по создаваемым ею гравитационным эффектам. Наиболее убедительными экспериментальными фактами существования Тёмной материи, полученными из космических наблюдений, являются: обнаружение гравитационного линзирования далеких галактик скоплениями галактик, расположенными перед ними и результаты измерения скоростей слоёв гало, для звезд в спиральных галактиках. В зависимости от класса предполагаемых частиц Тёмной материи, можно ожидать, что гравитационное взаимодействие будет для этих частиц не единственным.

Поскольку отсутствует чёткое понимание свойств Тёмной материи, ввиду множества интерпретаций, во всех исследовательских работах, как правило, заранее оговаривается рассматриваемый класс частиц служащий кандидатом на роль Тёмной материи. Самые распространённые кандидаты на роль частиц Тёмной материи: аксионы (масса $\sim 10^{-6} - 10^{-2}$ эВ), легчайшие суперсимметричные частицы - нейтралино ($10 - 1000$ ГэВ), реликтовые чёрные дыры, частицы Калуцы-Клейна.

Наиболее активно рассматриваемой в настоящее время гипотезой является представление большей части небарионной Тёмной материи в виде массивных частиц с массой в диапазоне 1 ГэВ – 1 ТэВ, слабо взаимодействующих с обычной материей, так называемые частицы WIMP (Weakly

Interacting Massive Particles, дословно: слабовзаимодействующие массивные частицы) [1].

Частицы WIMP особенно привлекательны в качестве кандидатов на Тёмную материю ввиду ряда очевидных достоинств. Во-первых, появление WIMПов в теоретической физике частиц мотивировано проблемой нарушения электрослабой симметрии. Во-вторых, согласно стандартным космологическим предположениям, их тепловая реликтовая распространённость естественным образом совпадает с той, которая требуется для Тёмной материи. Слабое взаимодействие с материей может быть достаточным для того, чтобы они могли быть обнаружены в прямых экспериментах [2].

В экспериментах по прямой регистрации WIMP измеряют энергию, выделившуюся в процессе их рассеяния на ядрах мишени. Для регистрации ядра отдачи и измерения его энергии могут быть использованы ионизационные, сцинтилляционные и калориметрические детекторы или их комбинации [2].

1. ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ

В настоящее время в мире для поиска частиц Тёмной материи действуют около 15 детекторов на основе жидких благородных газов [3]. Детекторы отличаются друг от друга размерами, формой, конструктивными особенностями и типом мишени (детектирующим веществом). В основном, в качестве мишени используются жидкие инертные газы: жидкий ксенон (LXe), жидкий аргон (LAr) и жидкий неон (LNe). Мишени представляют собой детектирующее вещество – сцинтиллятор. Время высвечивания сцинтилляторов на основе жидких благородных газов $\sim 10^{-8}$ с. Длины волн излучаемого света лежат в области дальнего ультрафиолета. Поэтому световые вспышки, возникающие в жидкости при прохождении заряженной частицы, не могут быть непосредственно зарегистрированы при помощи обычных ФЭУ (имеется ввиду ФЭУ серийного производства). Для решения этой проблемы используют переизлучатели ультрафиолетового света в видимый диапазон, например TPВ (TetraPhenylButadiene). Или, в частности, окно для фотокатода ФЭУ изготавливают из фторида магния (MgF_2), который пропускает диапазон длин волн 112 – 830 нм. Основными характеристиками сцинтилляторов являются световой выход, спектр излучения и время высвечивания (См. таблицу 1.1) [4].

Таблица 1.1 — Сцинтилляционные свойства жидких благородных газов

Сцинтиллятор	LHe	LAr	LXe
Плотность	0.147 g/cm ³	1.395 g/cm ³	2,942 g/cm ³
Длина волны излучения	80 nm	128 nm	176 nm
Время высвечивания	10 ns/13 s	6 ns/1500 ns	4.3 ns/27 ns
Световой выход	20000 ph/MeV	50000 ph/MeV	63000 ph/MeV
Коэффициент преломления	1.028	1.45	1.55

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПОИСКУ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ НА ЖИДКИХ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗАХ

Ввиду того, что частицы Тёмной материи имеют относительно малую массу, их обнаружение является большой сложностью. Более легкие WIMP имеют меньшую кинетическую энергию и выделяют лишь небольшую её часть при упругом рассеянии на стандартных тяжелых мишенях, таких как германий и ксенон. В общем случае тяжелые ядра слабо чувствительны к лёгким WIMP, поскольку для типичных энергетических порогов детекторов (~ 5 кэВ) они чувствительны только к небольшой части распределения скоростей WIMP [5].

Модели распределения скорости WIMP обычно предполагают максвелловское распределение $f(v) = e^{-\frac{(v+v_E)^2}{v_0^2}}$, где $v_E = 244$ км/с - скорость Земли в Млечном пути, а $v_0 = 230$ км/с - средняя скорость частицы, которая гравитационно связана с Млечным путем. Предполагается, что это распределение справедливо вплоть до галактической скорости разбега $v_{esc} = 544$ км/с. Вероятный энергетический порог для экспериментов с Тёмной материей Хе, Ge и Не составляет около 5 keV_r. Но для WIMP с массой 1 ГэВ, какой предсказывают её асимметричные модели Тёмной материи, его скорость должна быть особенно большой, чтобы выделялось по крайней мере 5 кэВ. Эта минимальная скорость, v_{min} , равна $v_{min} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot E_R \cdot M_T / \mu}$, где E_R - энергия отдачи, μ - приведённая масса WIMP-мишени: $\mu = M_D \cdot M_T / (M_D + M_T)$, M_D и M_T - массы частицы Тёмной материи и массы ядра мишени соответственно. Для $E_R = 5$ кэВ и $M_D = 1$ ГэВ значение v_{min} равно 504, 386 и 191 км/с для Хе, Ge и Не соответственно. Таким образом, в данном случае наиболее вероятно превышение порога скорости именно для Не.

В эксперименте в отделении нейтринной физики НИЦ "Курчатовский институт" проводятся исследования физических параметров установки с сцинтиллятором в виде жидкого гелия. Гелий имеет лёгкое ядро, вследствие чего будет выделяться большая энергия ядра отдачи при рассеянии частиц WIMP малой массы порядка $1 \text{ ГэВ}/c^2$ на мишени. Жидкое состояние гелия имеет большую плотность, чем газообразное, что позволит преобразовывать большее количество энергии влетающих частиц.

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ В ЖИДКОМ ГЕЛИИ

В эксперименте с жидким гелием была осуществлена экспериментальная проверка возможности регистрации возникающего в жидком гелии сцинтилляционного сигнала.

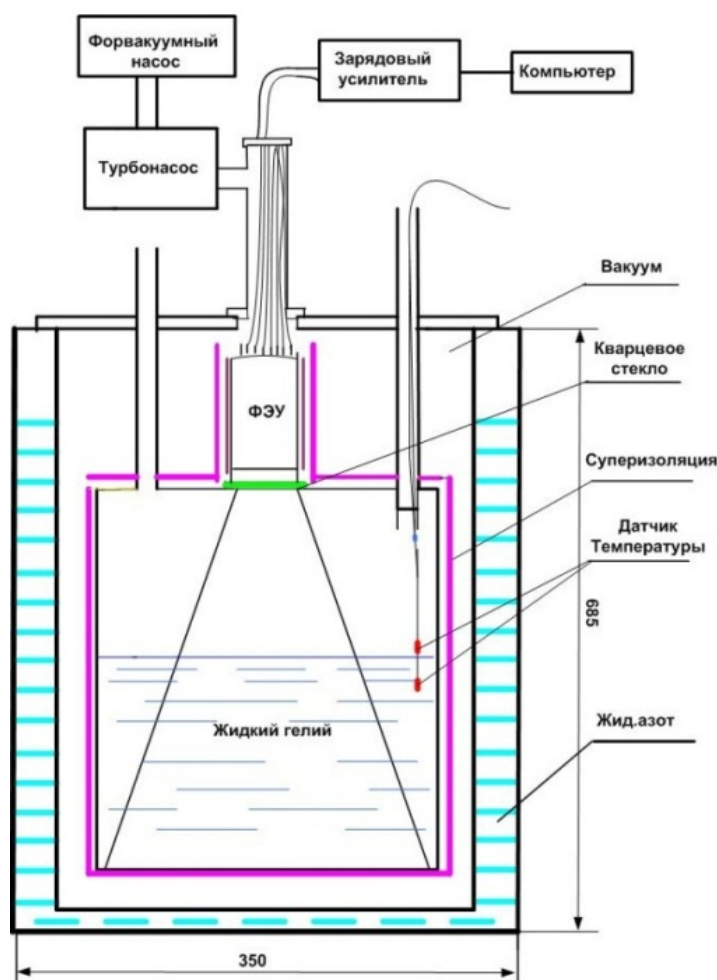


Рисунок 3.1 — Схематичное изображение стенда

В танк с жидким азотом помещен вакуумный криостат, внутри которого находится гелиевый криостат, окруженный со всех сторон тепловой защитой. В верхнюю крышку гелиевого сосуда вставлено кварцевое стекло, через которое внутренний объем просматривается низкотемпературным фотоумножителем 9939 КВ. Функционирование вакуумного криостата обеспечивается воздухопроводом с форвакуумным и турбомолекулярным насосами и контролируется измерителем вакуума «МЕРАДАТ-ВИТ».

По этому же каналу выводы ФЭУ вынесены наружу и через специальный вакуумный разъем попадают на электронный блок, где размещены высоковольтный делитель, блок высокого напряжения, питание блока нагрева ФЭУ, выводы датчиков температур, зарядовый усилитель. Сигнал с фотоумножителя усиливается зарядовым усилителем, через инвертор подается на амплитудно-цифровой преобразователь и регистрируется в памяти компьютера.

В гелиевый криостат входят две трубки. Одна из них служит для заливки гелия в криостат, во второй размещен световод, соединенный со светодиодом, используемым для контроля за параметрами ФЭУ и датчики температуры. Внутри гелиевого криостата находится светоотражающий конус из тайвека с нанесенным на его внутреннюю поверхность конвертором фотонов вакуумного ультрафиолета (ВУФ) в видимый свет. Жидкий гелий заливался несколько выше середины гелиевого объема, и уровень гелия контролировался двумя температурными датчиками. Объем для заливки гелия составляет около 3,6 л., рабочий объем – 1,2 л. Снаружи стенд окружен слоем свинца толщиной 10 см.

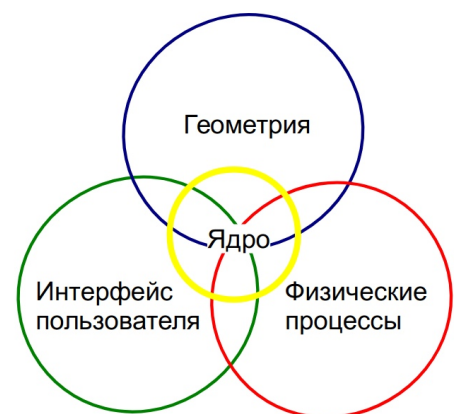
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ В GEANT4

Пакет программ Geant4 написан на языке программирования `c++` и используется как инструмент для моделирования прохождения частиц через вещество [6]. Области его применения включают физику высоких энергий, ядерную физику и физику ускорителей, а также исследования в области медицины и космической науки. Geant4 имеет много типов геометрических методов для описания самых сложных и реалистичных геометрий, содержит множество физических моделей взаимодействия частиц с веществом:

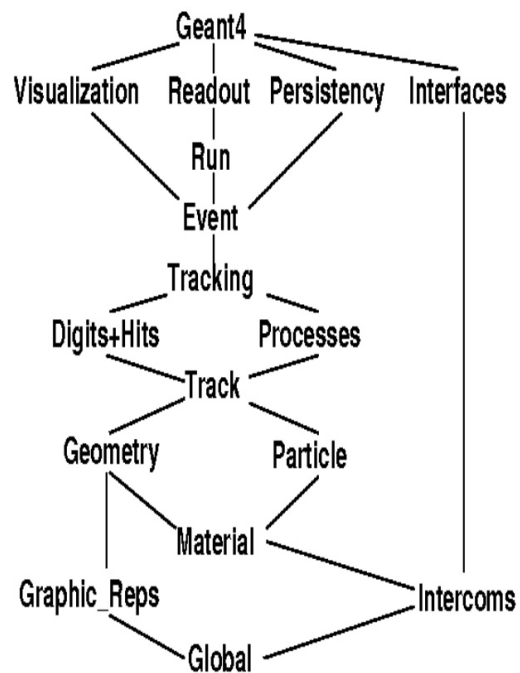
- Электромагнитные процессы
- Адронные процессы
- Фотон-адронные и лептон-адронные процессы
- Параметризация
- Методы использования статистических весов
- Процессы с участием оптических фотонов
- Моделирование распадов

Базовый механизм реализации модели физической установки заключается в:

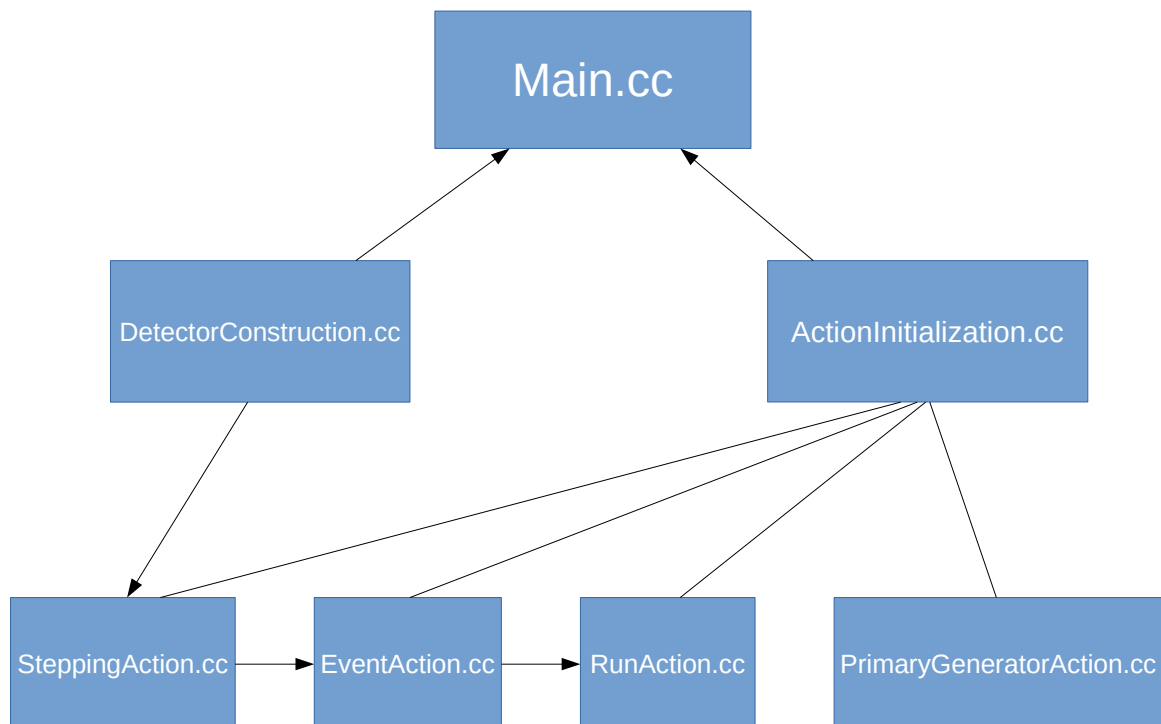
- описание геометрии
- описание физических процессов
- визуализация интерфейсов пользователя



Ядро Geant4 состоит из 17 категорий классов. Классы, описывающие основные понятия: сеанс, событие, трек, шаг, срабатывание, траектория.



Разработанная в ходе выполнения бакалаврской работы программа моделирования имеет следующую структуру:



При моделировании использовался стандартный физический лист *FTFP_BERT* с подключением физического листа для оптики *G4OpticalPhysics*. В ходе написания программы, было замечено, что физ. лист радиоактивного распада *G4RadioactiveDecayPhysics* не учитывал рождение конверсионных электронов, вследствие чего процесс образования продуктов распада радиоактивного источника ^{207}Bi был прописан дополнительно.

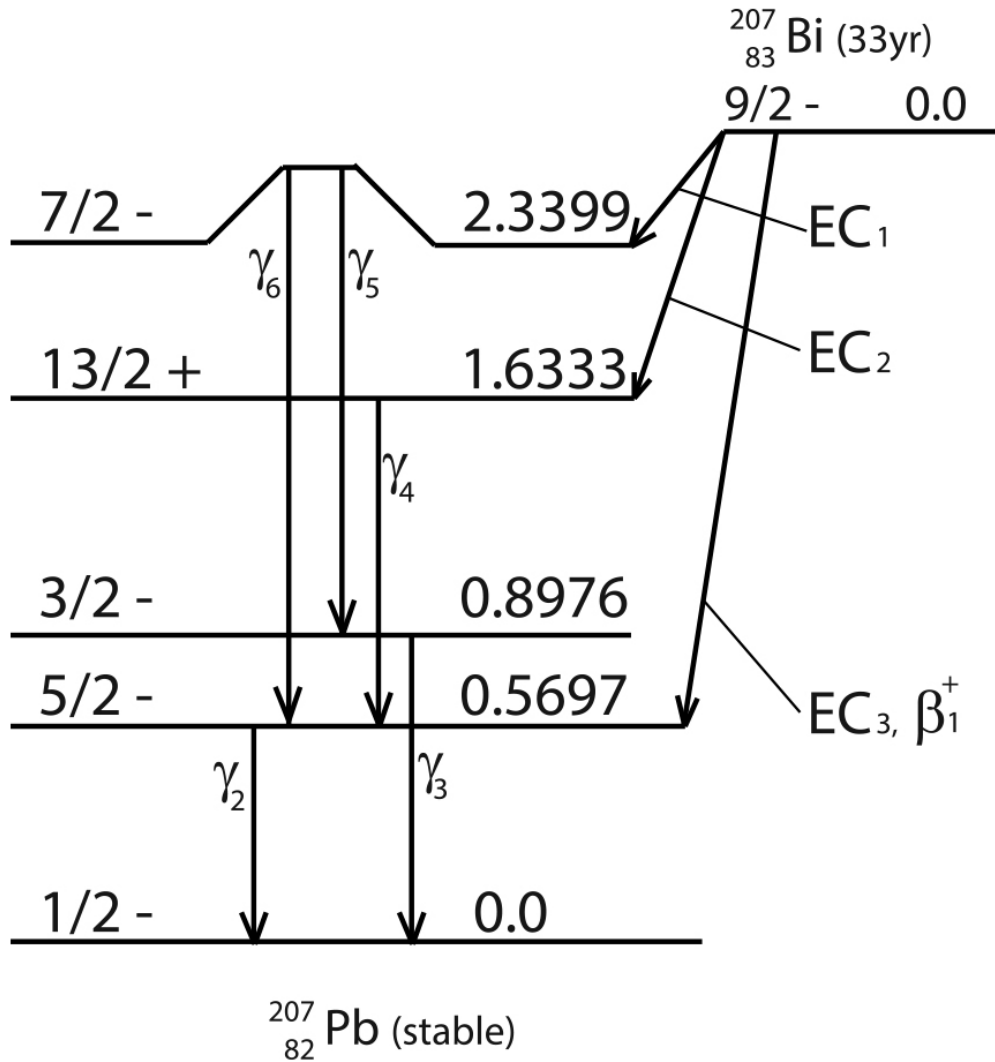


Рисунок 4.1 — Схема распада ядра ^{207}Bi в результате е-захвата (EC) и уровни возбуждения в ядре ^{207}Pb .

Кроме испускания γ -квантов, снятие возбуждения может происходить путем непосредственной передачи энергии ($E_{\text{перехода}} = E_i - E_f$) одному из конверсионных электронов атомной оболочки, в результате чего электрон покидает пределы атома.

5. МОДЕЛЬ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ В ЖИДКОМ ГЕЛИИ

Разработана модель установки для изучения сцинтилляций в жидком гелии с радиоактивным источником ^{207}Bi ($E_\beta = 0.5$ МэВ и 1 МэВ). Схематическое изображение конструкции модели приведено на рис.5.1. Установка представляет собой сцинтилляционный детектор с жидким сцинтиллятором. В корпус из ватмана формой урезанного конуса высотой 21 сантиметр залит жидкий гелий до высоты 11 сантиметров, выше которого находится газообразный гелий. Корпус с сцинтиллятором с помощью стеклянной пластины соединён с майларовым световодом, после которого идёт фотоприёмник в виде ФЭУ. Внутренняя поверхность корпуса (Tyvec) покрыта отражающим составом TPВ (TetraPhenylButadiene) для переизлучения сцинтилляционного света жидкого гелия (80 нм) в область чувствительности ФЭУ.

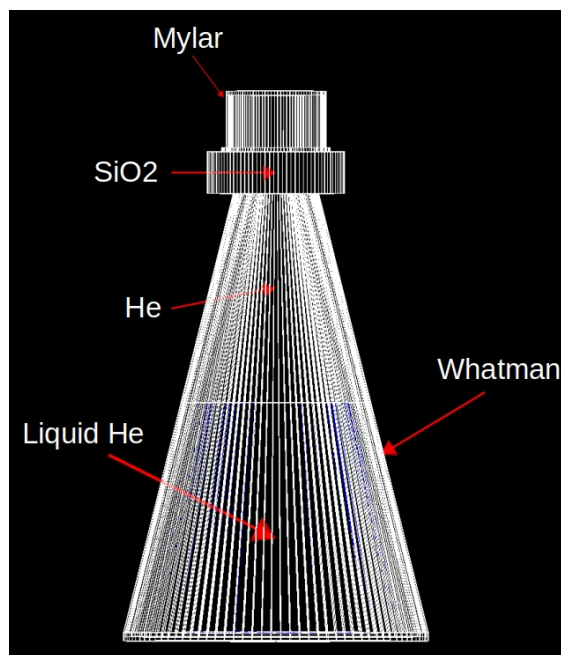


Рисунок 5.1 — Схема установки в пакете Монте-Карло Geant4 для регистрации сцинтилляций в жидком гелии

6. МОДЕЛЬ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВЕТОСБОРА В УСТАНОВКЕ БЕЗ ГЕЛИЕВОЙ МИШЕНИ

Для оценки светосбора установки была использована иная конструкция, схематическое изображение которой приведено на рис.6.1. В качестве источника света использовалась ”сцинтилляционная лампочка”, представляющая собой сферу диаметром 10 мм, заполненную сцинтиллятором на основе толуола с точечным источником электронов, находящимся в центре сферы. Радиус лампочки достаточен для поглощения конверсионных электронов (~ 1 МэВ) радиоактивного источника ^{207}Bi . Источник света перемещался по оси рабочего конуса от его дна по направлению к входному окну ФЭУ. Жидкий и газообразный гелий при измерениях были заменены на воздух.

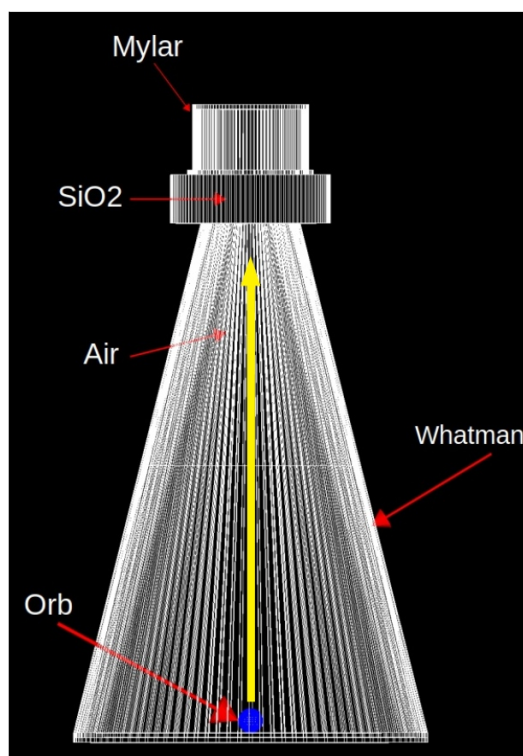


Рисунок 6.1 — Схема установки в пакете Монте-Карло Geant4 для оценки светосбора

7. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТАНОВКИ С ЖИДКИМ ГЕЛИЕМ

В результате моделирования регистрации электронов энергией 1 МэВ (источник расположен на дне установки) были получены распределения числа зарегистрированных фотоэлектронов и фотоэлектронов по времени их регистрации при значениях коэффициента отражения тайвека 0.90 и 0.95 (согласно имеющимся литературным данным: коэффициент отражения тайвека лежит в диапазоне 0.90 - 0.95).

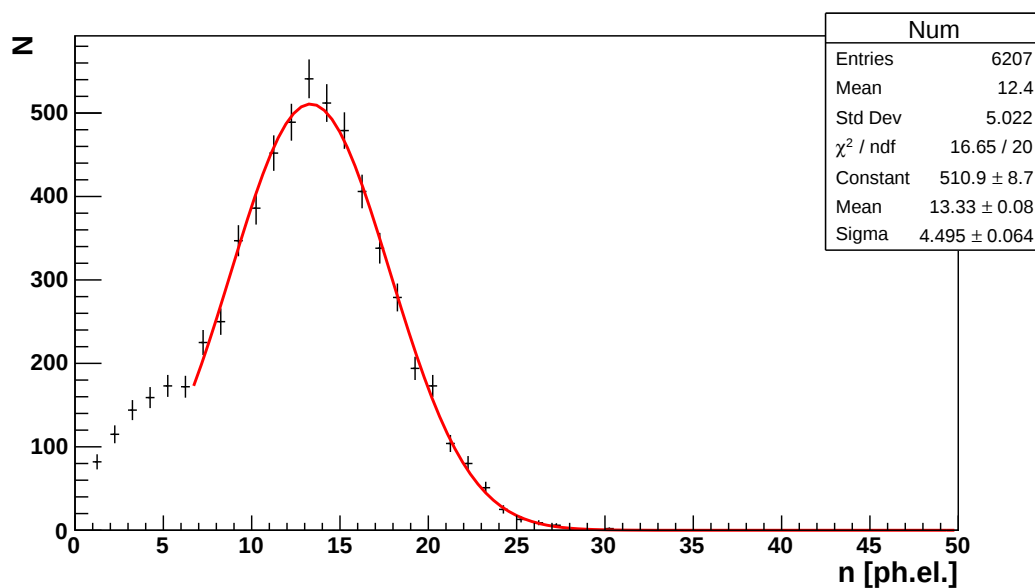


Рисунок 7.1 — Число зарегистрированных фотоэлектронов в установке при регистрации электронов энергией 1 МэВ (Коеф. отраж. = 0.90)

Среднее количество фотоэлектронов = 13

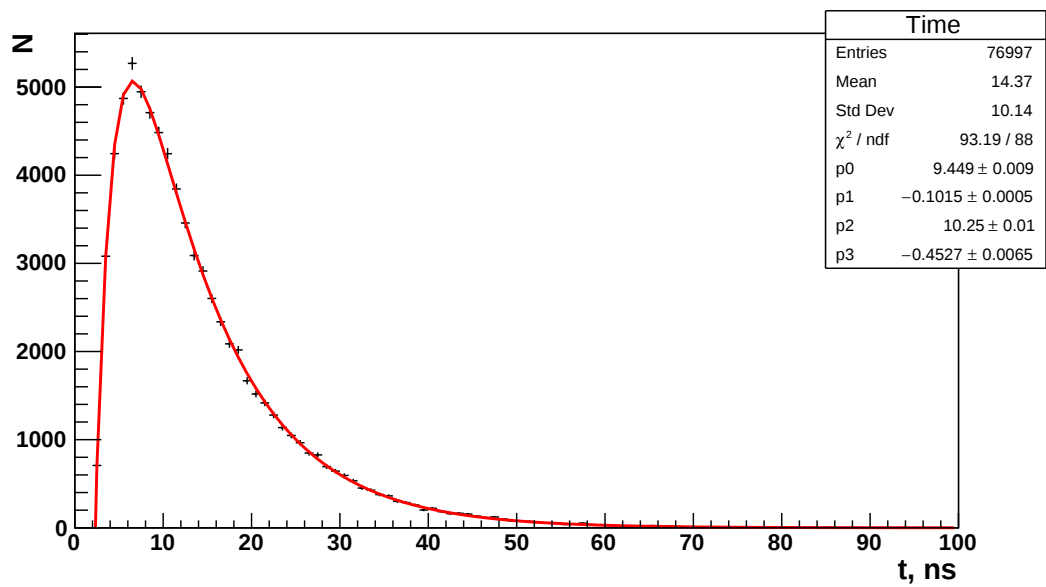


Рисунок 7.2 — Распределение фотоэлектронов по времени, момент времени $t = 0$ соответствует времени вылета электрона (Коэф. отраж. = 0.90)

Время спада ≈ 10 нс, время нарастания ≈ 2.2 нс

Распределения по времени фитировались функцией: $e^{(p0)+(p1) \cdot t} - e^{(p2)+(p3) \cdot t}$
 $(A \cdot e^{-t/\tau_{\text{спада}}} - B \cdot e^{-t/\tau_{\text{нарастания}}})$

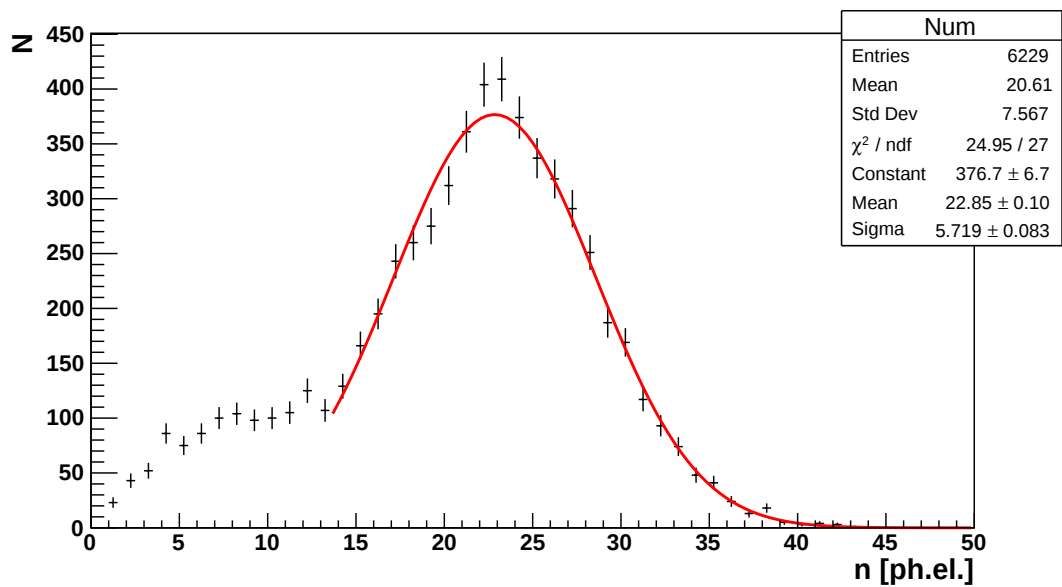


Рисунок 7.3 — Число зарегистрированных фотоэлектронов в установке при регистрации электронов энергией 1 МэВ (Коэф. отраж. = 0.95)

Среднее количество фотоэлектронов = 23

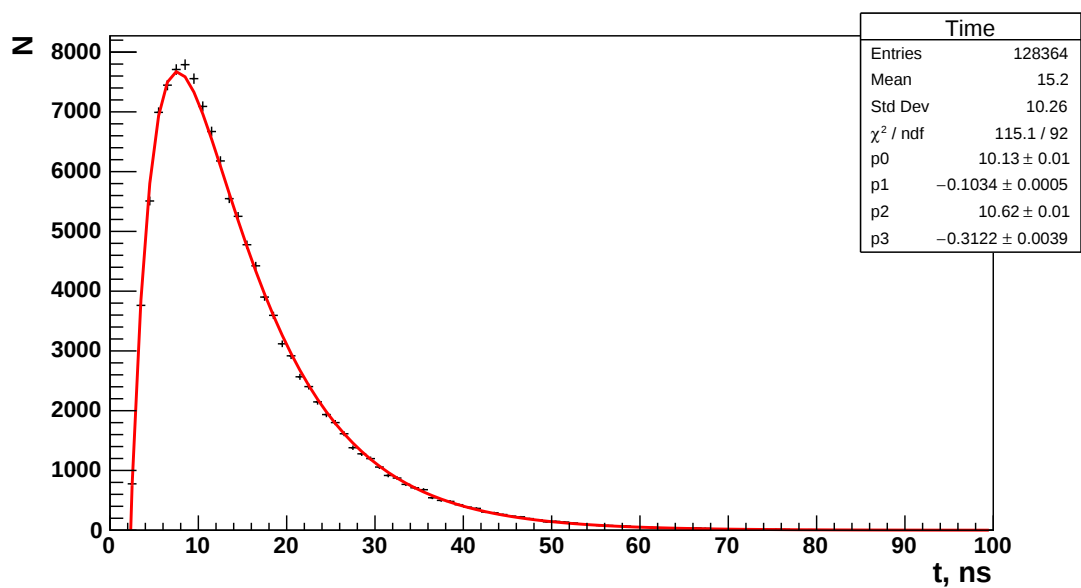


Рисунок 7.4 — Распределение фотоэлектронов по времени, момент времени $t = 0$ соответствует времени вылета электрона (Коэф. отраж. = 0.95)

Время спада ≈ 10 нс, время нарастания ≈ 3.2 нс

Также были получены результаты с источником излучения ^{207}Bi с учётом полной схемы его распада:

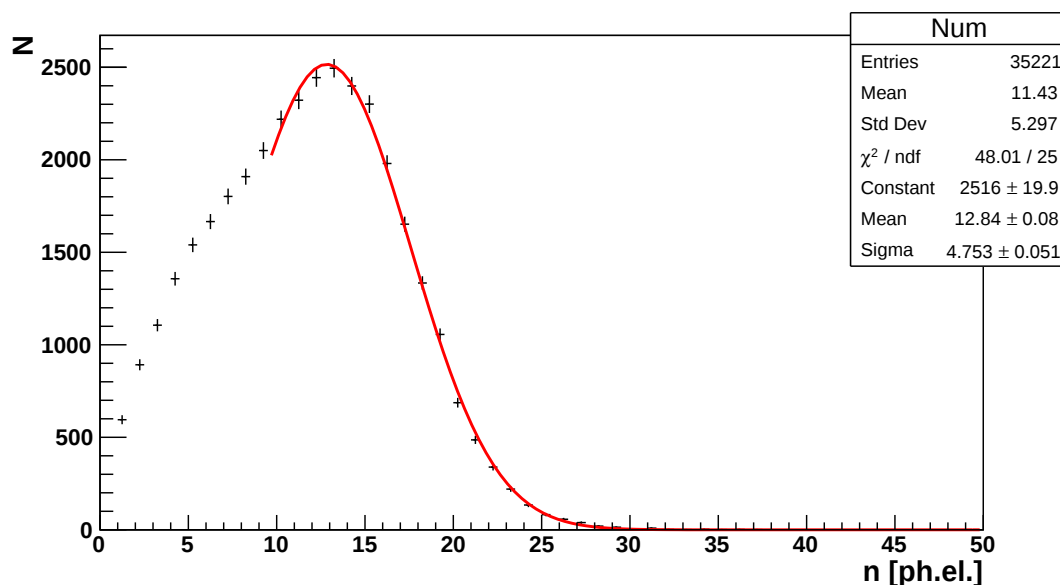


Рисунок 7.5 — число зарегистрированных фотоэлектронов в установке при регистрации конверсионных электронов источника ^{207}Bi (Коэф. отраж. = 0.90)

Среднее количество фотоэлектронов = 13

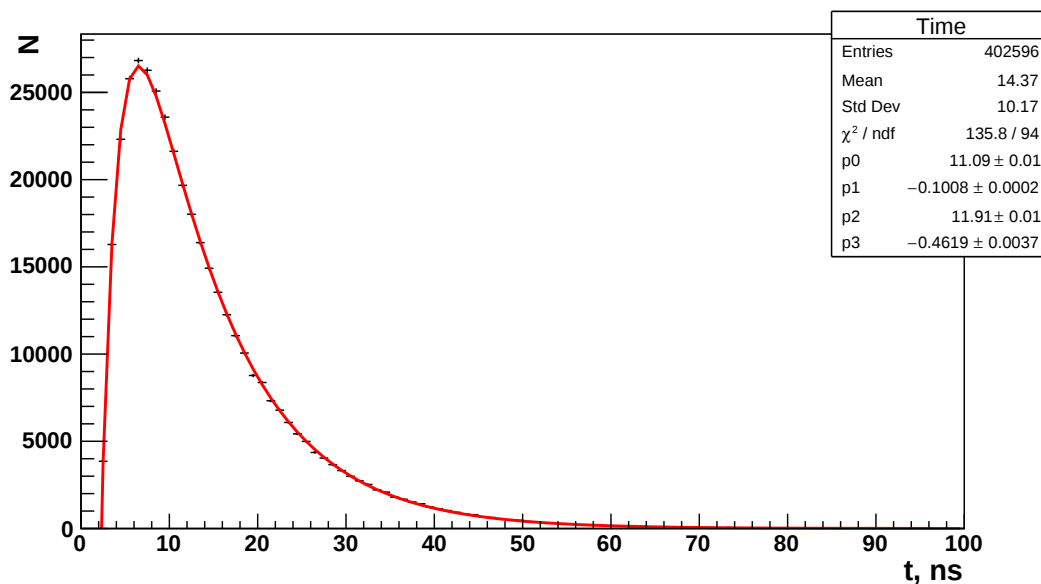


Рисунок 7.6 — Распределение фотоэлектронов по времени, момент времени $t = 0$ соответствует времени вылета конверсионного электрона (Коэф. отраж. = 0.90)

Время спада ≈ 10 нс, время нарастания ≈ 2.2 нс

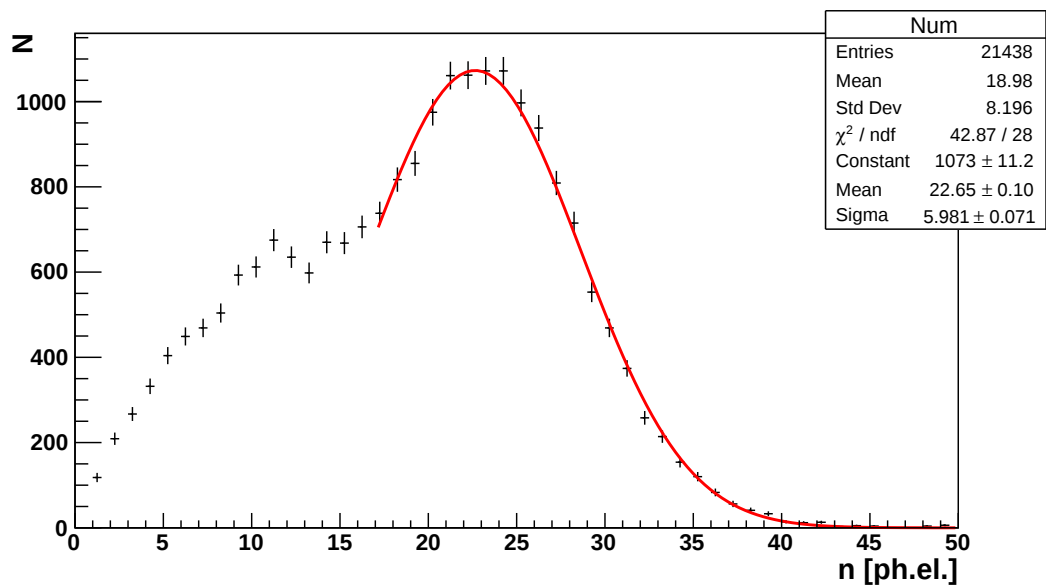


Рисунок 7.7 — число зарегистрированных фотоэлектронов в установке при регистрации конверсионных электронов источника ^{207}Bi (Коэф. отраж. = 0,95)

Среднее количество фотоэлектронов = 23

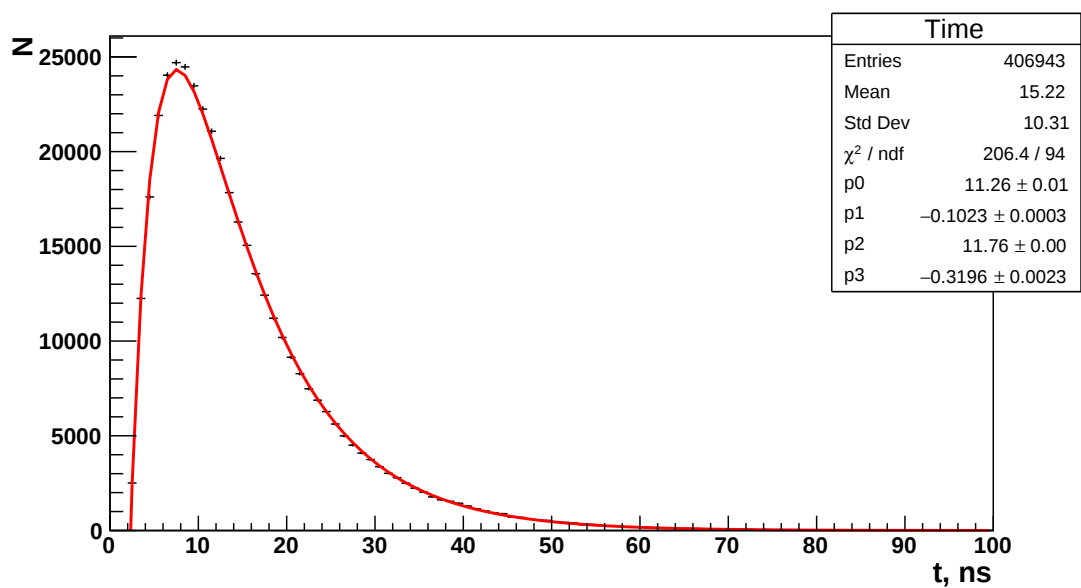


Рисунок 7.8 — Распределение фотоэлектронов по времени, момент времени $t = 0$ соответствует времени вылета конверсионного электрона (Коэф. отраж. = 0.95)

Время спада ≈ 10 нс, время нарастания ≈ 3.1 нс

На рис.7.9 и рис.7.10 приведены промоделированные спектры гамма излучения от радиоактивного источника ^{207}Bi :

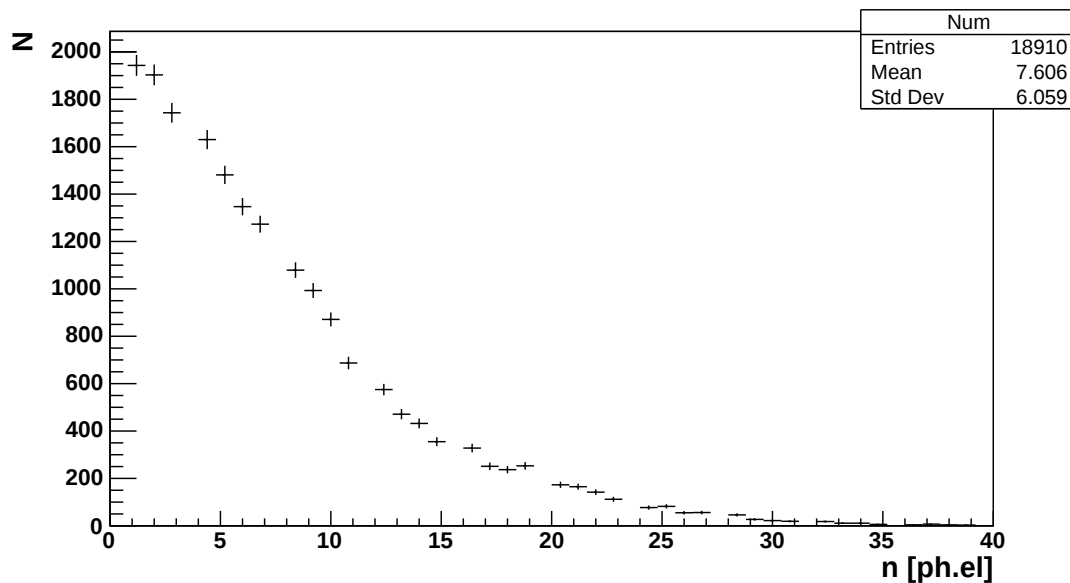


Рисунок 7.9 — Число зарегистрированных фотоэлектронов от гамма излучения (Коэф. отраж. = 0.95)

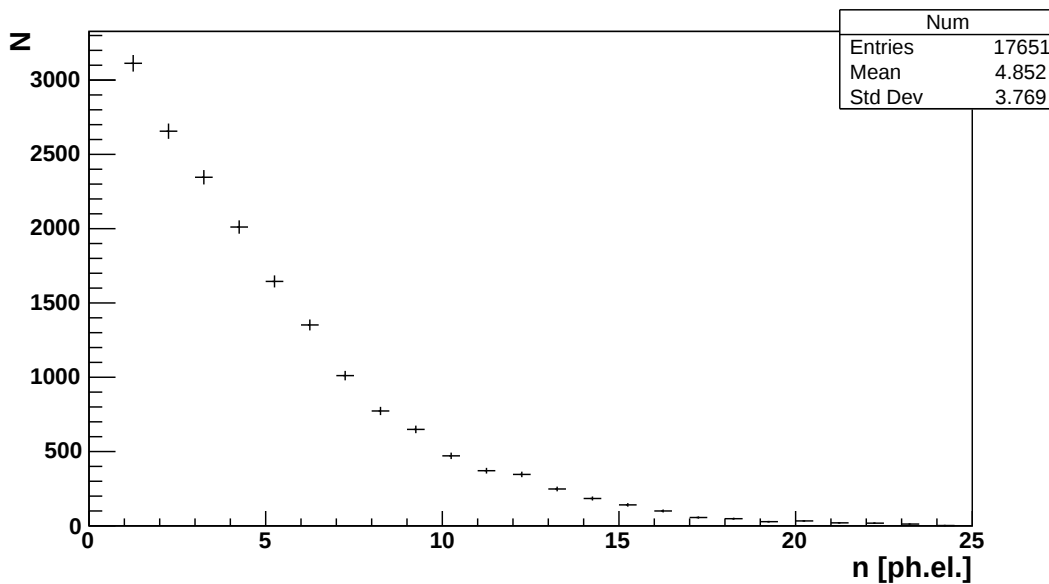


Рисунок 7.10 — Число зарегистрированных фотоэлектронов от гамма излучения (Коэф. отраж. = 0.90)

Полученный спектр электронов от радиоактивного источника при значениях коэффициента отражения тайвека 0.90 и 0.95 приведены на рис.7.11 и рис.7.12 вместе с экспериментальным спектром. В целях визуального сравнения экспериментального и смоделированного распределений числа фотоэлектронов была проведена нормировка смоделированных данных.

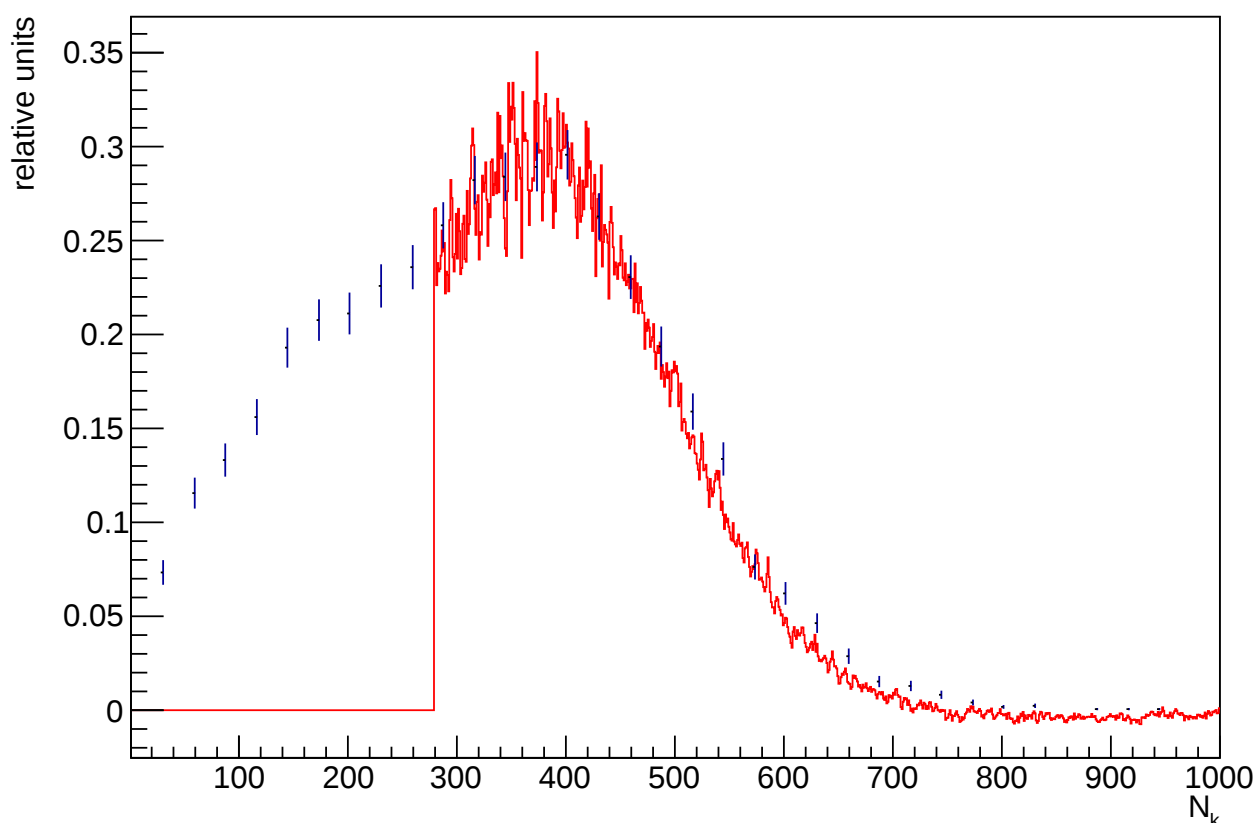


Рисунок 7.11 — Распределения числа зарегистрированных фотоэлектронов от источника ^{207}Bi внизу конуса (Коэф. отраж. = 0.90). Синим цветом показан смоделированный спектр, красным цветом - экспериментальный.

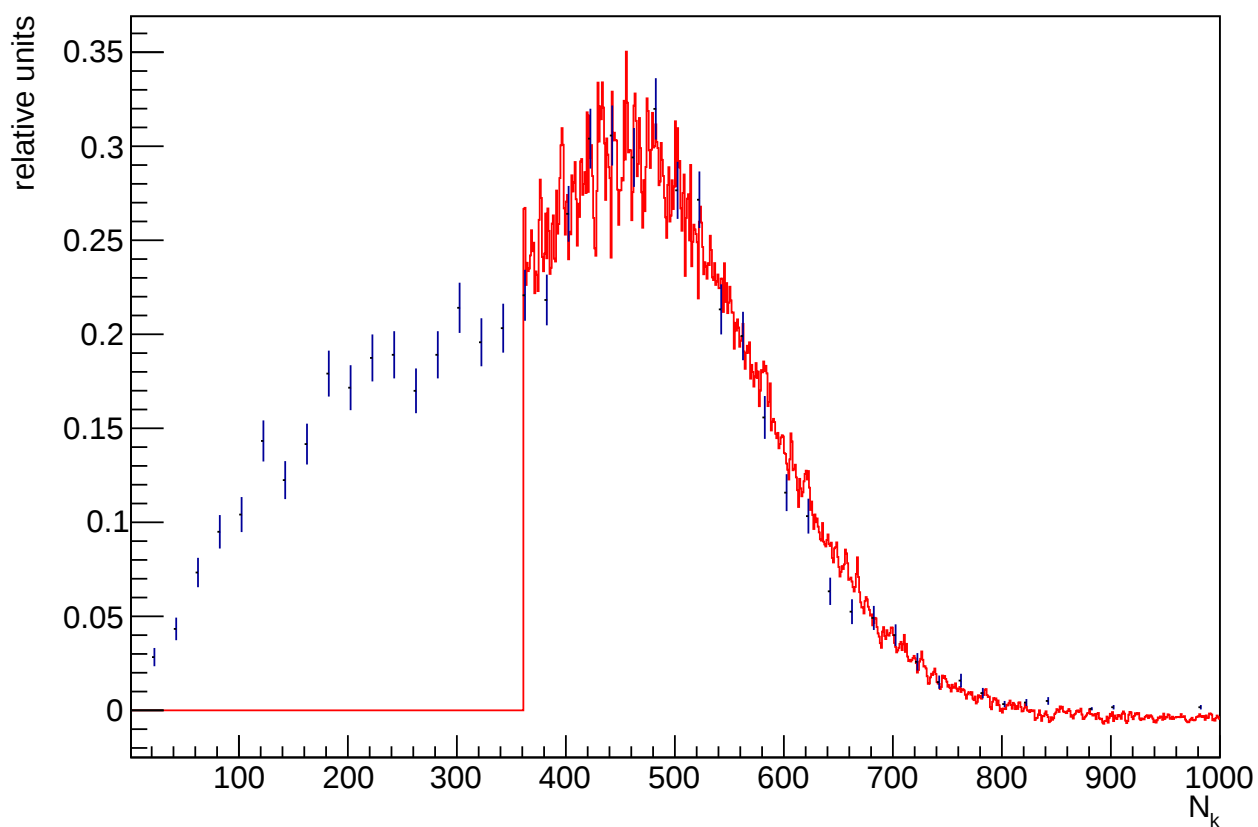


Рисунок 7.12 — Распределения числа зарегистрированных фотоэлектронов от источника ^{207}Bi внизу конуса (Коэф. отраж. = 0.95). Синим цветом показан смоделированный спектр, красным цветом - экспериментальный.

8. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВЕТОСБОРА В УСТАНОВКЕ БЕЗ ГЕЛИЕВОЙ МИШЕНИ

В результате моделирования работы установки для оценки светосбора были построены графики зависимости светосбора от положения источника для значений коэффициента отражения тайвека 0.90 и 0.95 и изображены вместе с экспериментальной зависимостью на рис.8.1. Все кривые нормированы на единицу.

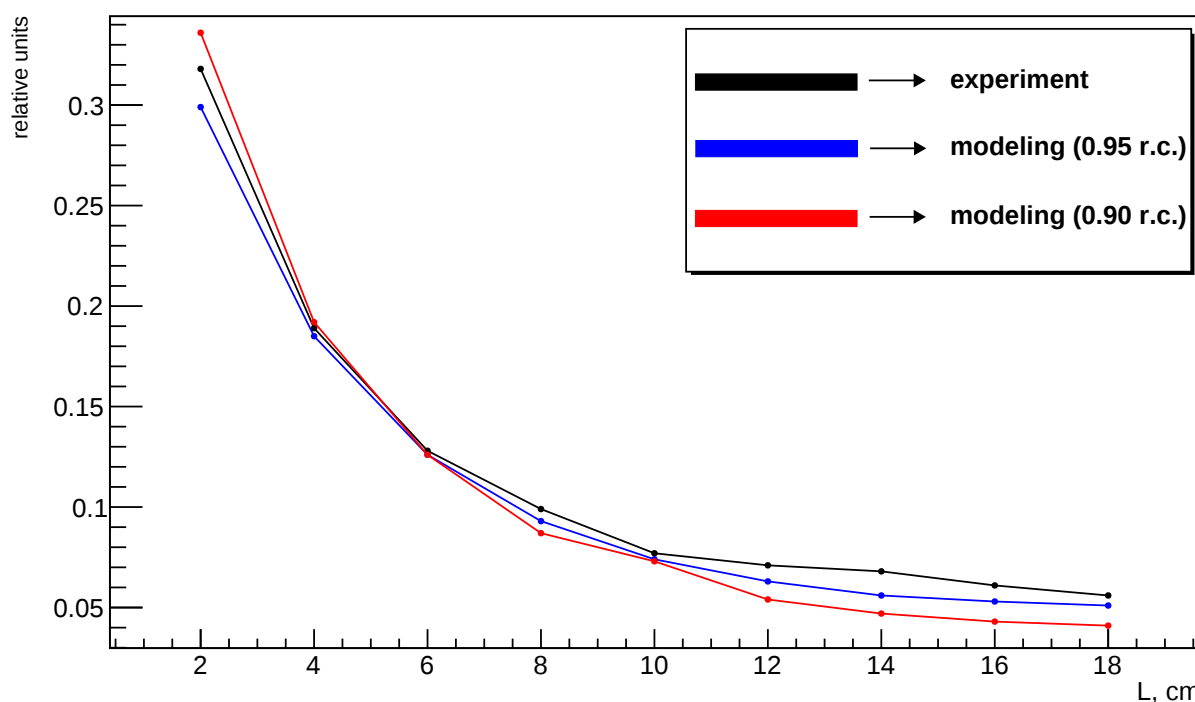


Рисунок 8.1 — Зависимость светосбора от положения источника

Как следует из полученного графика на кривой зависимости светосбора от положения источника можно выделить два участка - линейный рост в нижней части конуса, и резкий подъём при приближении к ФЭУ.

Подъём кривой при приближении к входному окну связан с добавкой за счёт попадания части прямого пучка на ФЭУ.

Добавка света за счёт прямого пучка позволяет оценить абсолютную величину светосбора, обусловленную отражением от поверхности конуса. Для этого светоотражающий конус был заменён на такой же конус, но с внутренней поверхностью из чёрного бархата, что исключает отражение света от поверхности. В этом случае свет, попадающий на фотокатод, определяется исключительно прямым пучком.

Для определения точности модели при разных значениях параметра коэффициента отражения тайвека были построены графики отношения экспериментальных данных светосбора к моделированным и изображены на рис.8.2.

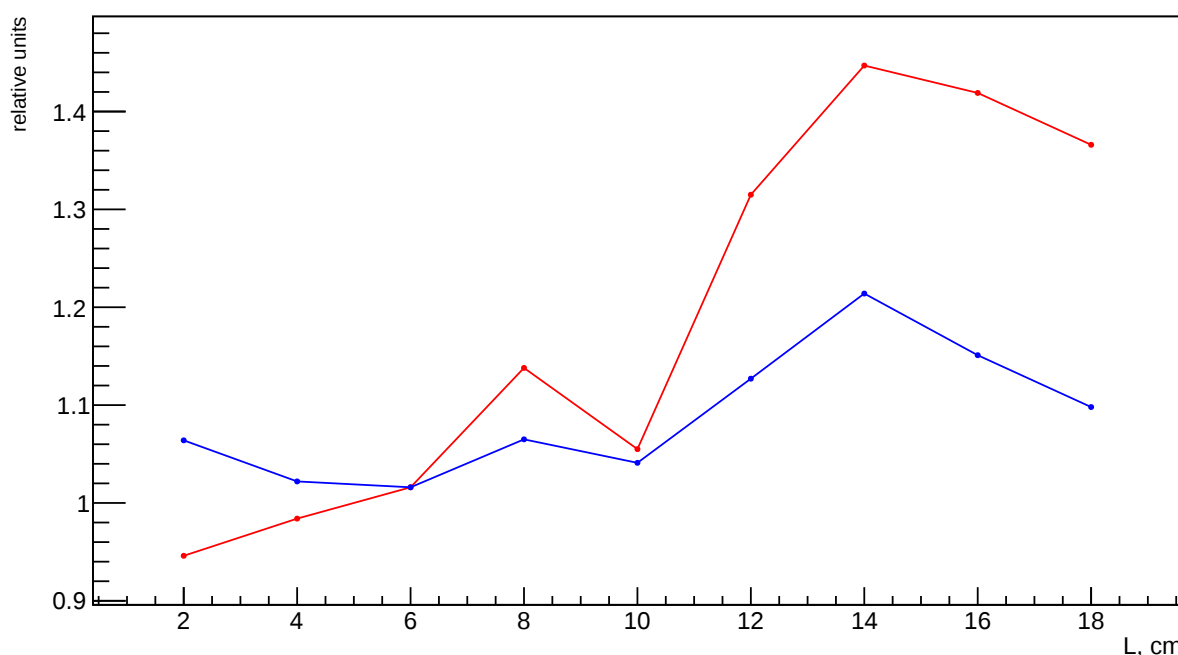


Рисунок 8.2 — Кривая отношения экспериментальной зависимости светосбора от положения источника к смоделированной. Красным цветом показано отношение при моделировании с параметром коэффициента отражения - 0.90, синим цветом - 0.95

По графику видно, что коэффициент отражения 0.95 больше подходит для описания светосбора в установке, заполненной воздухом.

Дополнительно проводились измерения светосбора вблизи ФЭУ.

Между ФЭУ и кварцем находится световод, боковая поверхность которого покрыта либо черным бархатом (свет полностью поглощается), либо майларом (зеркальное отражение) (см.рис.8.3). В моделировании с конусом (точка 2) боковая поверхность световода была покрыта майларом, а боковая поверхность и дно конуса были покрыты черным бархатом.

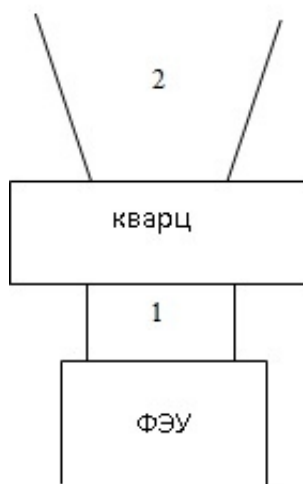


Рисунок 8.3 — Схематическое изображение установки вблизи ФЭУ

Доля света, полученная для точки 1, определяется исключительно прямым пучком (все отражения поглощаются черным бархатом) и составляет 0,15 от полного количества (экспериментальная доля - 0.16). Доля света в точке 2 (на расстоянии 2 см от кварцевого стекла) определяется более сложным образом. Часть света, пройдя через кварц, не поглощается боковой поверхностью световода, а отражается от майлара и увеличивает светосбор по сравнению с ожидаемым из геометрических соображений. Количество света, полученное для точки 2, равно 0.08 от полного количества (экспериментальная доля - 0.1).

Сравнение спектра зарегистрированных фотоэлектронов в точке 1 с экспериментом приведено на рис.8.4. В целях визуального сравнения распределений числа фотоэлектронов была проведена нормировка экспериментальных и смоделированных данных.

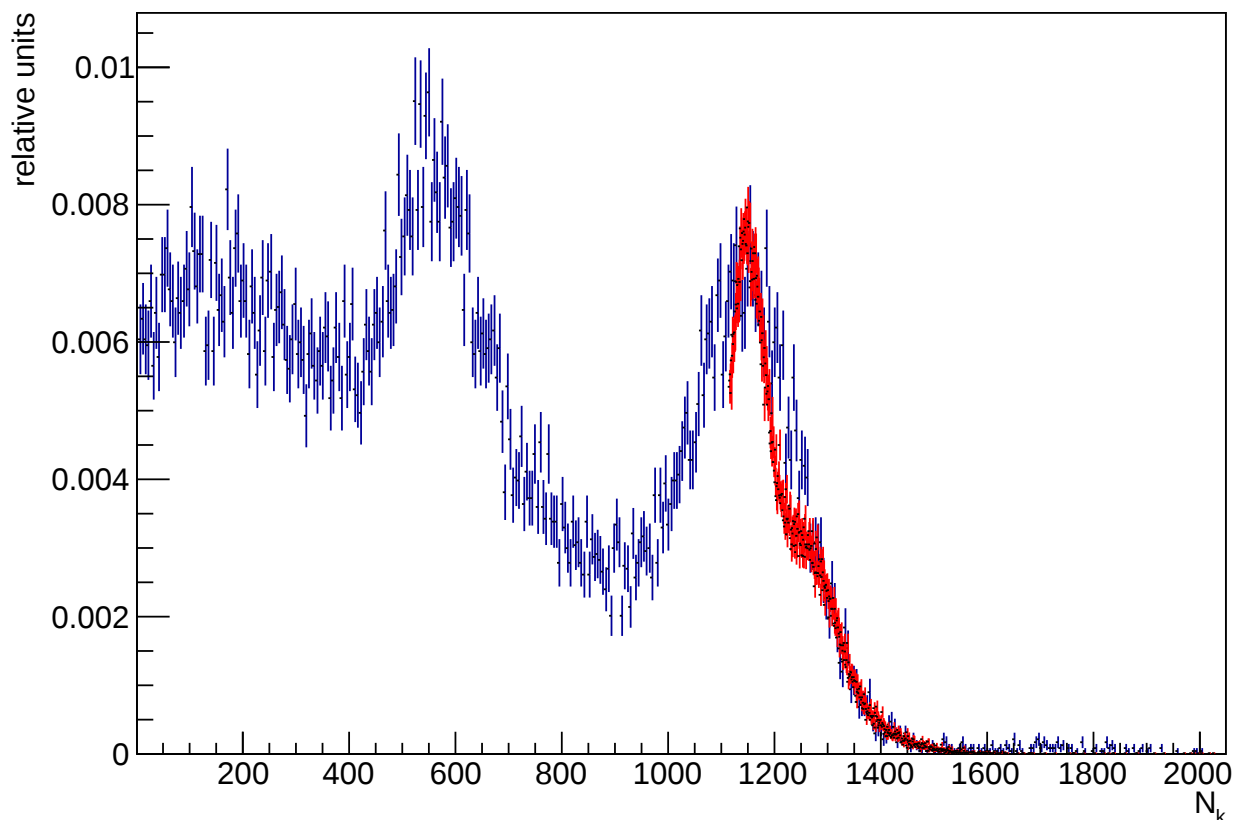


Рисунок 8.4 — Распределения числа зарегистрированных фотоэлетронов в точке 1. Синим цветом показан смоделированный спектр, красным цветом - экспериментальный.

Результаты моделирования в пакете Монте-Карло Geant4 установки с жидким гелием хорошо согласуются с данными экспериментальных измерений.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Жидкий гелий является перспективной мишенью для будущих установок по поиску частиц Тёмной материи с малой массой ~ 1 ГэВ.

В ходе работы было проведено моделирование работы установки для изучения сцинтилляций в жидком гелии и выполнены расчёты светосбора в детекторе. По итогу сравнения экспериментальных измерений с результатами моделирования можно сделать вывод, что разработанная модель хорошо согласуется с экспериментальными данными.

В будущем планируется усовершенствование программ моделирования, сравнение с результатами новых измерений на установке и корректировка физических параметров конструкции установки на основе результатов моделирования.

Разработанное программное обеспечение позволяет провести расчёты физических параметров для будущих установок по поиску частиц Тёмной материи с гелиевой мишенью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Akimov D.* Experimental methods for detecting corpuscular dark matter (review). Instrumentation and experimental technique. — 2001.
2. *V.A. Ryabov V.A. Tsarev A. T.* Search for dark matter particles. Advances in the physical sciences (reviews of current problems). — 2008.
3. *Akimov. D.* Overview of WIMP Search Experiments // INRseminar2011. —.
4. A Global Analysis of Light and Charge Yields in Liquid Xenon / B. Lenardo [и др.] // IEEE Trans. Nucl. Sci. — 2015. — т. 62, № 6. — с. 3387—3396. — arXiv: [1412.4417 \[astro-ph.IM\]](#).
5. *Guo W., McKinsey D. N.* Concept for a dark matter detector using liquid helium-4 // Phys. Rev. D. — 2013. — т. 87, № 11. — с. 115001. — arXiv: [1302.0534 \[astro-ph.IM\]](#).
6. <https://geant4.web.cern.ch/>.