

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНЕВЕРСИТЕТ «МИФИ»

(НИЯУ МИФИ)

УДК 539

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Моделирование физической установки для изучения сцинтилляций в
жидком гелии.

Руководитель НИР, с.н.с. ОФН,

НИЦ Курчатовский институт _____ И.Н. Мачулин
подпись

Студент гр. Б16-102

_____ Д.С. Голубков
подпись

Москва 2020

Содержание

Введение	2
1. Теоретическое предположение	3
2. Детекторы на основе жидких благородных газов	3
3. Описание эксперимента	5
4. Описание установки для оценки светосбора	7
5. Результаты моделирования	8
6. Заключение	10
6. Список использованных источников	11

Введение

Проблема темной материи является одной из основных проблем современной физики. Астрономические наблюдения последних десятилетий определенно свидетельствуют в пользу того, что, помимо наблюдаемой, во Вселенной имеется подавляющее количество материи, которая не проявляет себя иначе, как через гравитационное взаимодействие, и является, таким образом, «темной» 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.

Тёмная материя – форма материи, которая не испускает электромагнитного излучения и не взаимодействует с ним. Это свойство данной формы материи делает невозможным её прямое наблюдение. Однако возможно обнаружить присутствие тёмной материи по создаваемым ею гравитационным эффектам. Из четырёх фундаментальных типов взаимодействий тёмная материя должна участвовать только в гравитационном, однако, в зависимости от рассматриваемой теории, а, следовательно, и в зависимости от класса предполагаемых частиц тёмной материи, можно ожидать, что гравитационное взаимодействие будет для этих частиц не единственным.

Наиболее убедительными экспериментальными фактами существования темной материи, полученными из астрономических наблюдений, являются: результаты измерения скоростей слоёв гало, для звезд в спиральных галактиках, и обнаружение гравитационного линзирования далеких галактик скоплениями галактик, расположенными перед ними.

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

1. Теоретическое предположение

Наиболее активно рассматриваемой в настоящее время гипотезой является представление большей части небарионной тёмной материи в виде массивных частиц с предсказываемой массой порядка нескольких десятков ГэВ, очень слабо взаимодействующих с обычной материей т.н. частицы WIMP (Weakly Interacting Massive Particles, дословно: слабовзаимодействующие массивные частицы) [1].

Частицы WIMP особенно привлекательны как кандидаты в тёмную материю ввиду ряда очевидных достоинств. Во-первых, появление WIMPов теоретической физике частиц мотивировано проблемой нарушения электрослабой симметрии. Во-вторых, согласно стандартным космологическим предположениям, их тепловая реликтовая распространенность естественным образом совпадает с той, которая требуется для тёмной материи. Вследствие нарушения электрослабой симметрии следует достаточно эффективная аннигиляция WIMP частиц (для обеспечения соответствующей стандартной космологической модели реликтовой плотности) это означает, что их взаимодействие с материей может быть достаточным для того, чтобы они могли быть обнаружены в прямых экспериментах [2].

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

2. Детекторы на основе жидких благородных газов

В настоящее время в мире действуют около 15 детекторов на основе жидких благородных газов [3]. Детекторы отличаются друг от друга геометрической формой, размерами, конструктивными особенностями и типом мишени (детектирующим веществом). В основном, детектирующее вещество – это

жидкие инертные газы: жидкий неон (LNe), жидкий аргон (LAr) и жидкий ксенон (LXe). Мишени представляют собой особое детектирующее вещество – сцинтиллятор. Газовые сцинтилляторы применяются главным образом для регистрации сильно ионизирующих короткопробежных частиц (осколков деления тяжелых ядер). В качестве газовых сцинтилляторов используются в основном чистые благородные газы (гелий, аргон, криптон, ксенон) и их смеси. Время высвечивания сцинтилляторов $\sim 10^{-8}$ с и зависит от давления газа. Длины волн излучаемого света лежат в области «жесткого» (дальнего) ультрафиолета. Поэтому световые вспышки, возникающие в газе при прохождении заряженной частицы, не могут быть непосредственно зарегистрированы при помощи обычных ФЭУ (имеется ввиду ФЭУ серийного производства). Так, например, окно для фотокатода ФЭУ изготавливают из фторида магния (MgF₂), который пропускает диапазон длин волн 112 ÷ 830 нм. Основными характеристиками сцинтилляторов являются конверсионная эффективность, спектр излучения и время высвечивания [4].

Жидкий гелий

В эксперименте в лаборатории нейтринной физики проводятся исследования физических параметров установки с сцинтиллятором в виде жидкого гелия. Гелий имеет лёгкое ядро, в следствии чего будет выделяться большая энергия ядра отдачи, при рассеянии частиц WIMP малой массы порядка 1 ГэВ/c² на мишени. Жидкое состояние гелия имеет большую плотность, чем газообразное, что позволит преобразовывать большее количество энергии влетающих частиц.

3. Описание эксперимента

Разработана установка для изучения сцинтилляций в жидком гелии с радиоактивным источником ^{207}Bi ($E_{\beta} = 0.5$ МэВ и 1 МэВ). Схематическое изображение конструкции пробной установки приведено на рис.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. Внутренняя поверхность корпуса покрыта отражающим составом ТРВ (TetraPhenylButadiene) для переизлучения сцинтилляционного света жидкого гелия (80 нм) в область чувствительности ФЭУ.

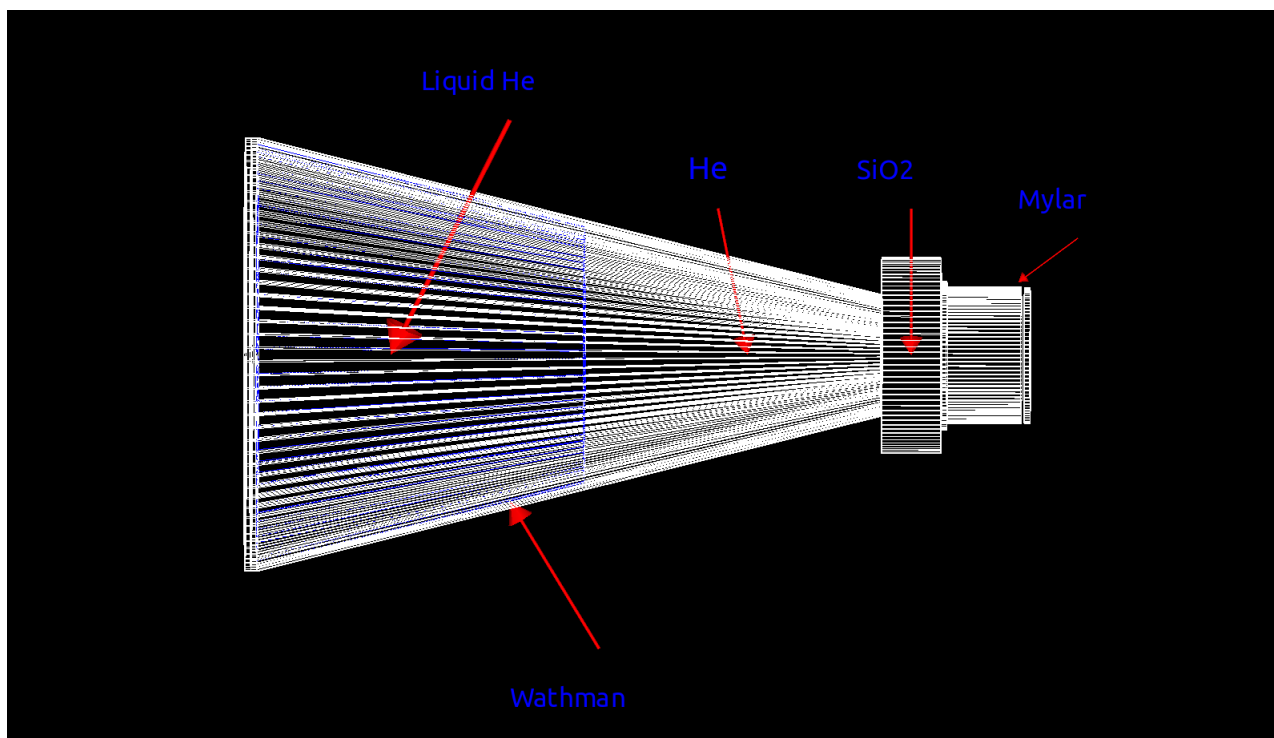


Рисунок 1 – Схема установки в пакете Монте-Карло Geant4 для регистраций сцинтилляций в жидком гелии

В результате моделирования регистрации электронов энергией 1 МэВ были получены распределения числа зарегистрированных фотоэлектронов и фотоэлектронов по времени их регистрации.

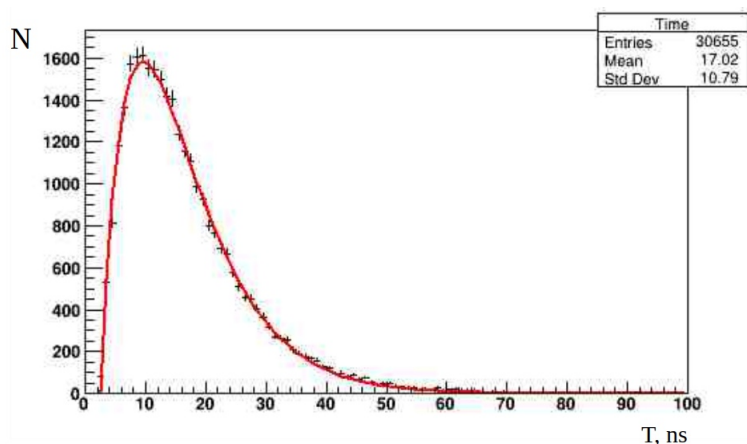


Рисунок 2 – число зарегистрированных фотонов (фотоэлектронов) в установке при регистрации электрона с энергией 1 МэВ

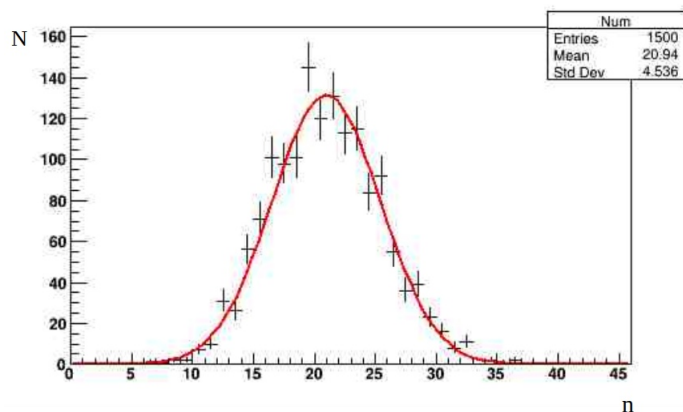


Рисунок 3 – Распределение фотоэлектронов по времени, момент времени $t=0$ соответствует времени вылета электрона

4. Описание установки для оценки светосбора

Для оценки светосбора установки была изменена конструкция, схематическое изображение которой приведено на рис.2. В качестве источника света использовалась "сцинтилляционная лампочка", представляющая собой сферу диаметром 10мм, заполненную сцинтиллятором на основе толуола с точечным источником конверсионных электронов, находящимся в центре сферы. Радиус лампочки достаточен для поглощения электронов (~ 1 МэВ). Источник света перемещался по оси рабочего конуса от его дна по направлению к входному окну ФЭУ. Жидкий и газообразный гелий были заменены на воздух.

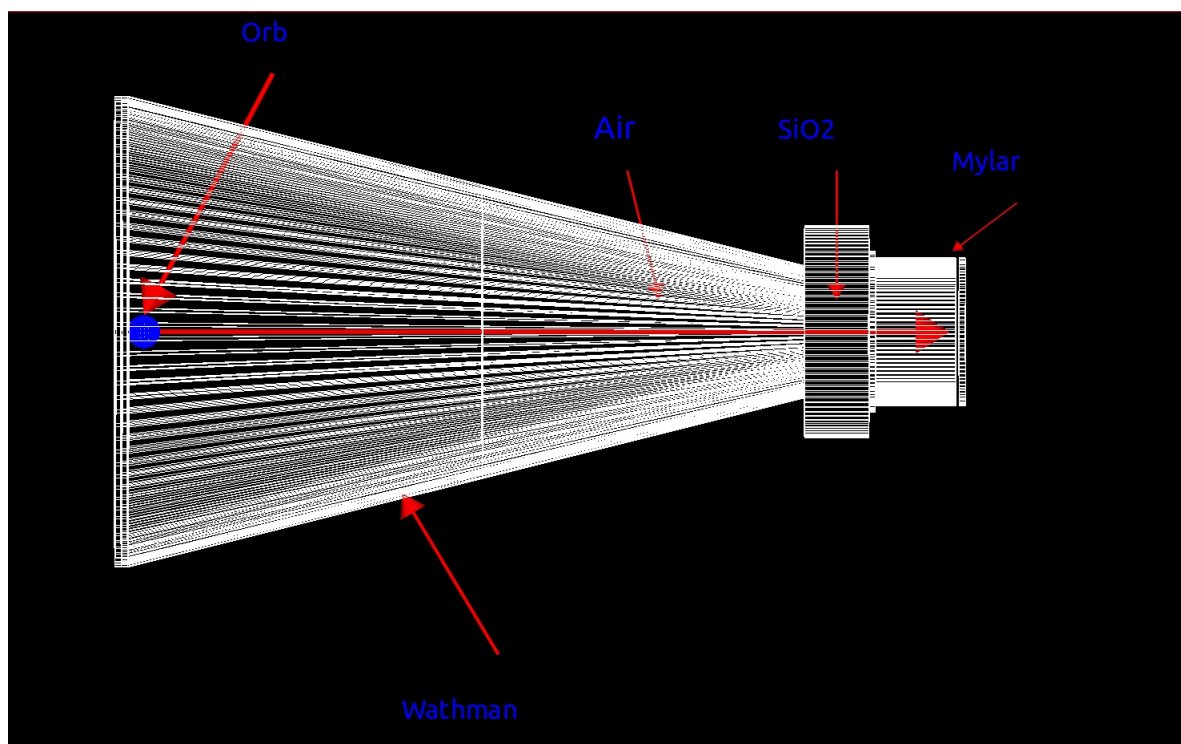


Рисунок 4 – Схема установки в пакете Монте-Карло Geant4 для оценки светосбора

5. Результаты моделирования

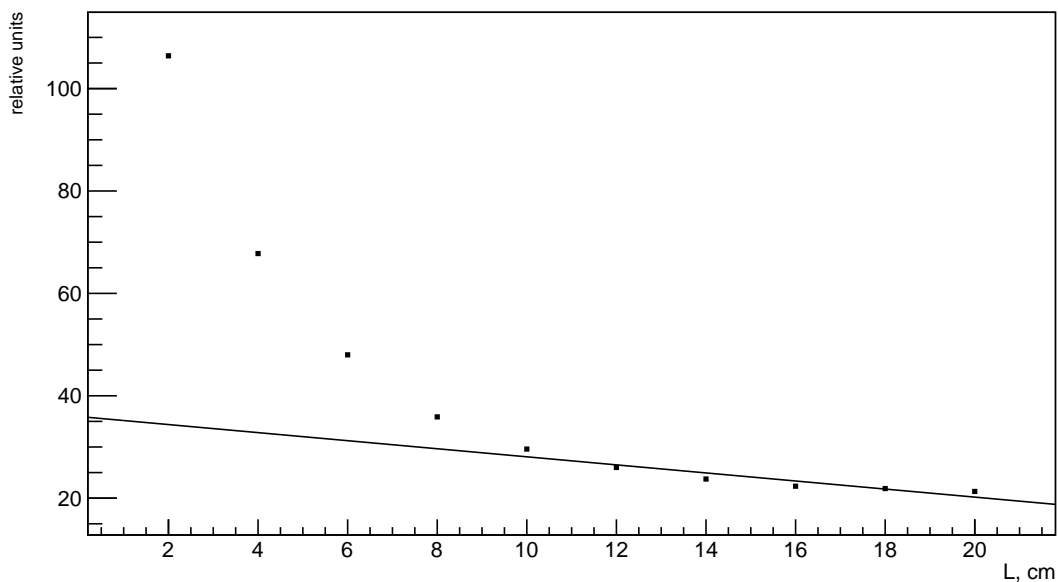


Рисунок 5 – Зависимость светосбора от положения источника

Как следует из полученного графика, изображённого на рис.3, 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.

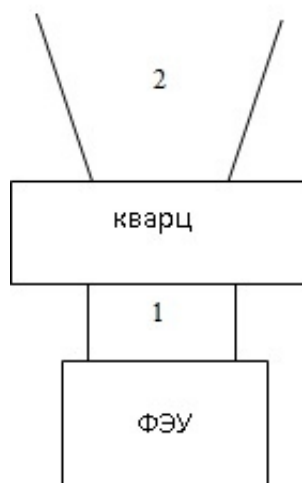


Рисунок 6 – Схематическое изображение установки вблизи ФЭУ

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

Доля света, полученная для точки 1, определяется исключительно прямым пучком (все отражения поглощаются черным бархатом) и составляет 0,28 от полного количества. 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 ≈ 0.47 от полного количества.

6. Заключение

В ходе работы было проведено моделирование работы установки для изучения сцинтилляций в жидком гелии и установки для оценки светосбора. Были получены ожидаемые результаты работы детектора. В будущем планируется усовершенствование программ моделирования, сравнение с результатами измерений на установке и корректировка физических параметров конструкции для улучшения точности физической модели.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Akimov D.Y. Experimental methods for detecting corpuscular dark matter (review). Instrumentation and experimental technique. — 2001. — no. 5. — P. 6–50.
2. V.A. Ryabov V.A. Tsarev A.M. Tshovrebov. Search for dark matter particles. Advances in the physical sciences (reviews of current problems). — 2008. — no. 11.
3. Akimov. D.Yu. Overview of WIMP Search Experiments // INRseminar2011.
4. Ilina NP Kuznetsova G.P. Silaev A.A. Somikov A.V. Scintillation method (Characteristics of a scintillation detector and its use as a gamma spectrometer). Special workshop on modern methods of physical research. — no. 1.