

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

---

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**  
**по дисциплине ФИЗИКА**  
**Разделы «Квантовая оптика», «Атомная физика»**

**Курс 1, 2**

Санкт-Петербург  
РГГМУ  
2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

---

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
по дисциплине ФИЗИКА

Разделы «Квантовая оптика», «Атомная физика»

Курс 1, 2

Санкт-Петербург  
РГГМУ  
2022

*Одобрено методической комиссией Института информационных систем и геотехнологий*

**УДК 539.1**

**ББК 22.38**

**Л12**

*Авторы:* А.П. Бобровский, Н.В. Дьяченко, Е.Ю. Михтеева, И.А. Потапова, А.Л. Скобликова, П.П. Хлябич, Т.Ю. Яковлева.

*Ответственный редактор:* А.П. Бобровский, канд. физ.-мат. наук, доц., РГГМУ

**Лабораторный практикум по дисциплине физика. Разделы «Квантовая оптика», «Атомная физика» / А.П. Бобровский, Н.В. Дьяченко, Е.Ю. Михтеева, И.А. Потапова, А.Л. Скобликова, П.П. Хлябич, Т.Ю. Яковлева. – Санкт-Петербург : РГГМУ, 2022. – 48 с.**

Практикум содержит описание 5 лабораторных работ Учебной лаборатории по разделам «Оптика», «Атомная и ядерная физика». В каждой работе излагаются физические основы изучаемого явления, описание метода исследования и экспериментальных установок, порядок выполнения работы, методика обработки экспериментальных данных и т.д. Особенностью данных лабораторных работ является внедрение в процесс измерения и обработки экспериментальных данных компьютерных технологий, что позволяет приблизить условия проведения измерений к принятым в современной научной лаборатории.

Лабораторный практикум предназначен для студентов первого и второго курсов очной формы обучения по направлениям гидрометеорология, прикладная гидрометеорология, физика, экология и природопользование, корабельное вооружение и по специальности информационная безопасность телекоммуникационных систем.

© Коллектив авторов, 2022

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2022

ISBN 978-5-86813-573-6

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторный практикум содержит описание 5 лабораторных работ по разделам «Квантовая оптика» и «Атомная физика», выполнение которых предусмотрено федеральным государственным образовательным стандартом третьего поколения (ФГОС-3++) для указанных направлений и специальностей. Приводятся описания сущности физических явлений, изучаемых в процессе выполнения лабораторных работ, схемы лабораторных установок, методики проведения физических экспериментов. В заключение каждой работы прилагается перечень контрольных вопросов.

Каждая работа рассчитана на два академических часа. Студент допускается к выполнению лабораторной работы после самостоятельного домашнего изучения необходимых сведений из теории, ознакомления с порядком выполнения эксперимента и только при наличии должным образом оформленного рабочего журнала. После выполнения измерений и необходимых расчетов в рабочем журнале оформляется отчет на отдельных листах, который представляется преподавателю. При этом студент должен показать понимание физического содержания проведенных измерений и дать оценку их достоверности.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 401  
ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ФОТОЭФФЕКТА

*Цель работы*

Целью лабораторной работы является экспериментальное изучение явления фотоэффекта.

*1. Задачи работы*

1. Получение вольтамперной характеристики вакуумного фотоэлемента;
2. Изучение зависимости фототока насыщения фотоэлемента от величины светового потока;
3. Экспериментальное определение постоянной Планка;
4. Определение красной границы фотоэффекта;
5. Рассчёт работы выхода электрона.

*2. Предварительные сведения*

Теория фотоэффекта

Внешним фотоэлектрическим эффектом называется явление испускания электронов поверхностью вещества под действием падающего на нее света, поэтому внешний фотоэффект называют еще фотоэмиссией электронов. Впервые экспериментальное исследование внешнего фотоэффекта было проведено русским ученым А.Г. Столетовым. Позже эти исследования были продолжены П.И. Лукирским, С.С. Прилежаевым и др. В результате экспериментальных исследований были установлены следующие законы внешнего фотоэффекта:

1. Общее количество электронов, вылетающих с поверхности вещества в единицу времени, пропорционально интенсивности света.

2. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов  $\frac{mv_{max}^2}{2}$  пропорциональна частоте световой волны  $\nu$  и не зависит от интенсивности света.

3. Для каждого вещества, существует минимальная частота  $\nu_{\min} = \nu_{\text{кр.гр.}}$ , называемая красной границей фотоэффекта, такая, что свет меньшей частоты  $\nu < \nu_{\text{кр.гр.}}$  фотоэффекта не вызывает.

4. Фотоэффект практически безынерционен.

Попытки объяснить фотоэффект на основе волновых представлений не имели успеха. Поэтому исследование внешнего фотоэффекта, наряду с изучением теплового излучения тел, способствовало развитию квантовых представлений о свете. По квантовой теории свет излучается и поглощается веществом отдельными "порциями" — квантами с энергией  $E = h\nu$  ( $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка). Световые кванты (фотоны) ведут себя как неделимые частицы. При поглощении фотон исчезает, а его энергия переходит к поглощающему объекту. При внешнем фотоэффекте энергия поглощаемого в металле фотона переходит к одному из его свободных электронов. За счет этой энергии электрон может выйти из металла, затратив на это энергию, которая называется работой выхода  $A_{\text{вых}}$ . Разность  $h\nu$  и работы выхода  $A_{\text{вых}}$  остается у электрона в виде кинетической энергии. Исходя из этих представлений, можно записать закон сохранения энергии в виде уравнения (1):

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} \quad (1)$$

Данное уравнение впервые было предложено Эйнштейном, и поэтому называется уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. В уравнении Эйнштейна второе слагаемое правой части является максимальной кинетической энергией фотоэлектронов. Вообще говоря, выходящим из металла электронам соответствуют разные энергии от 0 до  $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$  даже при использовании света строго определенной частоты. Это связано с тем, что при движении электронов к поверхности металла при столкновениях происходят частичные потери энергии. Часть электронов, потеряв энергию при столкновениях, так и не выходят из металла, поэтому число выходящих электронов всегда меньше числа поглощаемых металлом фотонов.

Квантовая теория объясняет все законы фотоэффекта: 1. Интенсивность светового пучка определяется числом фотонов, падающих каждую секунду на металл; 2. Число излучаемых фотоэлектронов пропорционально числу поглощаемых фотонов и, следовательно, интенсивности света; 3. Для данного вещества работа выхода — строго определенная величина, поэтому из уравнения (1) следует, что максимальная кинетическая энергия

фотоэлектронов оказывается пропорциональной частоте падающего света; 4. Частота света  $\nu_{\min}$ , при которой энергия кванта равна работе выхода  $A_{\text{вых}}$ , и есть  $\nu_{\text{кр.гр}}$ , красная граница фотоэффекта:

$$h\nu_{\text{кр.гр}} = A_{\text{вых}} \quad (2)$$

У различных металлов красная граница фотоэффекта различна.

5. Безинерционность фотоэффекта объясняется тем, что электроны выходят из металла практически одновременно с поглощением фотона в приповерхностном слое.

#### Вольтамперная характеристика фотоэлемента

В данной работе исследование явления фотоэффекта осуществляется с помощью вакуумного фотоэлемента (рис.1).

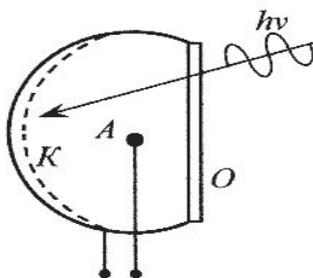


Рис.1. Схема вакуумного фотоэлемента

Он представляет собой небольшой баллон, в котором создан вакуум, и в центре которого находится положительный электрод А (анод). На часть внутренней поверхности баллона нанесен тонкий слой светочувствительного металла, представляющий отрицательный электрод К (катод). Фотокатод К через окно О освещается светом. Испущенные катодом электроны замыкают цепь фотоэлемента через анод А.

Фотоэлемент включен в цепь, изображенную на рисунке 2.

Передвигая движок потенциометра и снимая показания приборов (вольтметра и амперметра), можно получить вольтамперную характеристику фотоэлемента (рис.3).

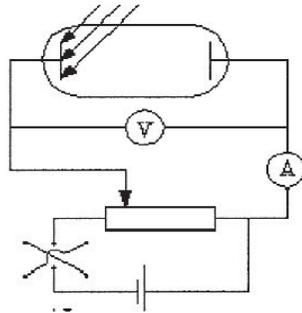


Рис.2 Электрическая цепь для изучения явления фотоэффекта

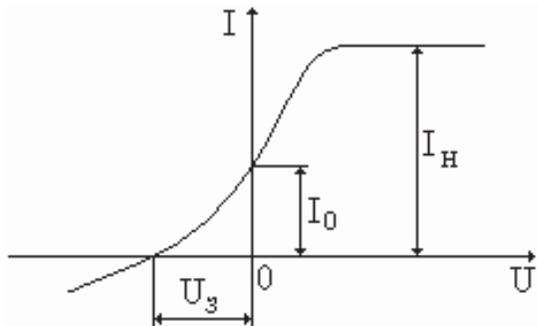


Рис.3. Вольтамперная характеристика фотоэлемента

Под действием света из катода вырываются электроны, и он заряжается положительно. Вырванные электроны вблизи катода создают отрицательно заряженное облако, из которого большая часть электронов попадает обратно на катод (катод при  $U = 0$  притягивает электроны), а часть электронов из облака попадает на анод. Они и создают небольшой ток  $I_0$  при  $U = 0$ . Для прекращения фототока необходимо приложить обратное по знаку напряжение  $U_3$ , которое называют задерживающим напряжением. При напряжении  $U_3$  электрическим полем задерживаются все фотоэлектроны вплоть до тех, которые обладают максимальной кинетической энергией (фотоэлемент «заперт», т.е. ток через него не проходит). Следовательно, задерживающее напряжение определяет максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов, т.е.

$$\frac{mv_{max}^2}{2} = eU_3 \quad (3)$$

С ростом напряжения все большее число электронов за секунду попадут на анод. Облако из электронов вблизи катода редет, а ток через фотоэлемент растет. При достаточно сильном тянущем поле облако из электронов вблизи катода полностью исчезает. Все электроны, вырываемые из металла катода, будут попадать на анод, то есть наступит насыщение. Дальнейшее усиление поля между анодом и катодом не приведет к увеличению тока. Фототок насыщения  $I_{нас}$  определяется тем количеством электронов, которые вырываются в секунду из металла данным световым потоком.

Фототок насыщения  $I_{нас}$  зависит от падающего на фотоэлемент светового потока  $\Phi$  (рис.4).

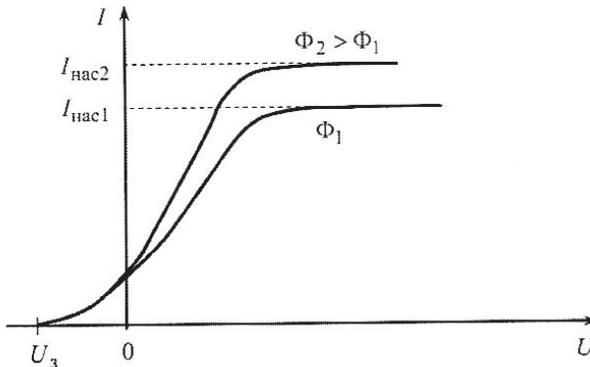


Рис.4. Вольт-амперная характеристика фотоэлемента при различных значениях светового потока  $\Phi$ .

Фототок насыщения  $I_{нас}$  будет тем больше, чем большее число фотонов в секунду падает на катод. Очевидно, зависимость  $I_{нас} = f(\Phi)$  должна быть прямо пропорциональная. По этой причине вакуумные фотоэлементы могут служить точными фотометрами, позволяющими измерять световые потоки. Следует отметить, что при достаточно больших световых потоках ток насыщения перестаёт увеличиваться пропорционально световому потоку — наступает насыщение фотоэлемента по световому потоку.

Если световой поток  $\Phi$ , падающий на фотоэлемент, создается точечным источником, то его величина обратно пропорциональна квадрату расстояния  $R$  от источника до фотоэлемента:

$$\Phi \sim \frac{1}{R^2} \quad (4)$$

### Определение постоянной Планка

С помощью уравнения Эйнштейна (1) для фотоэффекта можно экспериментально получить значение постоянной Планка. Для этого необходимо измерить величину задерживающего  $U_3$  (запирающего) напряжения при различных частотах падающего на фотоэлемент света. Мы знаем, что при установлении запирающего напряжения отрицательная работа внешнего поля над электронами равна кинетической энергии электрона при вылете из катода (см. уравнение 3). С учетом формулы (3) уравнение (1) можно переписать в виде:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + eU_3 \quad (4)$$

или окончательно:

$$U_3 = h\left(\frac{\nu}{e}\right) - \left(\frac{A_{\text{вых}}}{e}\right) \quad (5)$$

Из последнего уравнения видно, что если строить график зависимости задерживающего напряжения от частоты света  $U_3 = f\left(\frac{\nu}{e}\right)$  по экспериментальным точкам, то должна получиться прямая. Угловым коэффициентом этой прямой равен постоянной Планка  $h$  (рис.5).

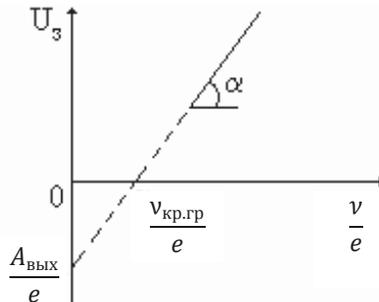


Рис.5. Линейная зависимость задерживающего напряжения от частоты света  $U_3 = f\left(\frac{\nu}{e}\right)$

Экстраполируя график зависимости  $U_{\text{з}} = f\left(\frac{V}{e}\right)$  до пересечения с осью частоты  $\frac{V}{e}$ , получим значение красной границы фотоэффекта  $\frac{V_{\text{кр.гр.}}}{e}$ , а экстраполируя до пересечения с осью  $U_{\text{з}}$ , получим значение работы выхода  $\frac{A_{\text{вых}}}{e}$ .

### 3. Экспериментальное оборудование, приборы и принадлежности

Лабораторная установка (рис.6) состоит из металлического корпуса **1**, на котором установлен объектив **2** фотоэлемента и осветитель **3**. Лампа осветителя установлена на подвижной карете, которая может перемещаться вдоль установки. За счет этого можно изменять расстояние от источника света до линзы фотоприемника. Это расстояние измеряется по линейке **4**. Имеется комплект из 5 светофильтров, которые устанавливаются на фотоприемник. Перед фотоприемником может быть установлена стойка с вращающимися поляроидами, которые служат для ослабления светового потока, падающего на фотоэлемент.

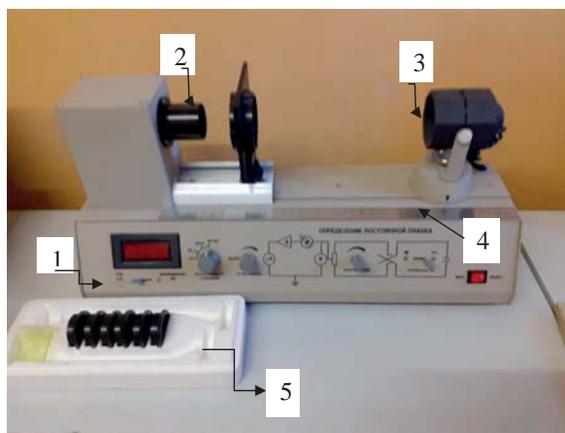


Рис.6. Экспериментальная установка по изучению явления фотоэффекта

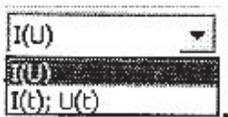
Внутри металлического корпуса **1** расположен вакуумный элемент, блоки питания установки, а также встроенный датчик тока и напряжения, который служит для измерения фототока и катод-анодного напряжения фотоэлемента. Датчик имеет USB-разъем для подключения к компьютеру.

К приборам и принадлежностям относятся также компьютер с необходимым программным обеспечением.

#### 4. Порядок проведения лабораторной работы

##### Задание 1. Получение вольтамперной характеристики фотоэлемента

1. Запустите программу практикума по физике и выберите сценарий "Определение постоянной Планка" (кнопка ).
2. Включите питание установки, дайте ей прогреться в течение 5 минут, передвиньте источник света на отметку 25 см. Поляриды при этом следует извлечь из оправки.
3. Установите максимальную интенсивность света, полярность напряжения переключите на "-". Переключатель "**Коэффициент усиления**" установите в положение "**x 0.01**".
4. Поверните ручку "напряжение" по часовой стрелке до упора. Установите синий светофильтр в объектив фотоприёмника.
5. Для построения вольтамперной характеристики фотоэлемента выберите из выпадающего списка зависимость  $I(U)$



Запустите измерения, нажав кнопку . Плавно вращайте ручку "**напряжение**" против часовой стрелки до упора, уменьшая тем самым задерживающее напряжение до 0. Переключите полярность на "+" и плавно вращайте ручку "**напряжение**" по часовой стрелке до упора увеличивая тем самым ускоряющее напряжение. Остановите измерения,

нажав . По полученному графику вольтамперной характеристики определите значение задерживающего напряжения и максимального тока фотоэлемента. Для этого установите жёлтый вертикальный маркер (левая кнопка мыши) в соответствующие точки графика. Сохраните

полученный график, пользуясь кнопкой 

6. Повторите описанные в пунктах 3-5 действия, устанавливая на объектив фотоэлемента другие светофильтры. Для удобства сравнения характеристик вы можете менять светофильтры, не останавливая

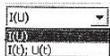
измерений и получая, таким образом, несколько характеристик на одном экране. Замену светофильтров рекомендуется производить при большом отрицательном напряжении на фотоэлементе. Сфотографируйте полученные вольтамперные характеристики и приложите к отчету.

## Задание 2. Изучение зависимости фототока от светового потока

1. Нажмите кнопку  и выберите сценарий "Зависимость фототока от светового потока"
2. Установите источник света на отметку 16 см (наиболее близкое положение к оправке поляридов). Установите максимальную интенсивность света, полярность напряжения переключите на "+". Переключатель "**Коэффициент усиления**" установите в положение "**x0.001**". Обратите внимание, что реальные значения фототока при этом будут в 10 раз ниже тех, которые отображаются на экране.
3. Установите синий светофильтр в объектив фотоприёмника. Повернув ручку "напряжение" по часовой стрелке до упора установите максимальное ускоряющее напряжение (фотоэлемент будет работать при этом в режиме близком к насыщению).
4. Запустите измерения. Ослабьте световой поток, поступающий на фотоэлемент. Для этого установите поляриды в стойку перед фотоприёмником, пододвиньте стойку вплотную к установленному светофильтру и поверните один из поляридов на такой угол, при котором фототок минимален. Остановите измерения. Установите жёлтый маркер (левая кнопка мышки) на участке графика с зарегистрированным минимальным током и с помощью кнопки  добавьте это значение в таблицу обработки. В первый столбец открывшейся таблицы внесите текущую координату осветителя в см. То же значение координаты внесите в пункт таблицы "исходные данные".
5. Передвиньте осветитель в следующую точку (например, на отметку 20 см). Нажмите кнопку запуска измерений и отклоните предложение программы очистить таблицу накопленных данных. Измерьте ток и заполните очередную строку таблицы обработки.
6. Повторите действия, описанные в предыдущем пункте, и получите еще 3 точки в таблице при удалении осветителя вплоть до 38 см.

7. По окончании измерений перейдите на вкладку "график", в которой по экспериментальным точкам строится график зависимости  $I(\Phi)$ . Для аппроксимации этой зависимости функцией вида  $Y=Ax$  выберите эту функцию и нажмите кнопку . Сохраните полученный график, пользуясь кнопкой . Приобщите график к отчету.
8. Теперь снимите аналогичную зависимость фототока от светового потока, но в условиях более сильного светового потока. Для этого выньте поляриды из оправки и установите переключатель "**Коэффициент усиления**" в положение "**x 0.01**". Запустите измерения и согласитесь с предложением программы очистить таблицу накопленных данных. Проведите вновь измерения фототока, устанавливая осветитель последовательно в 4-5 позициях и заполняя таблицу обработки. Наименьшее расстояние между фотоэлементом и осветителем выбирается исходя из максимальной величины тока 20 мкА и вводится в таблицу "исходные данные". В этом случае полученная зависимость  $I=f(\Phi)$  уже не является прямо пропорциональной. Сохраните полученный график, пользуясь кнопкой . Приобщите график к отчету.

### Задание 3. Определение постоянной Планка

1. Выберите из выпадающего списка  строку  $I(t)$ ;  $U(t)$  и запустите измерения, нажав кнопку 

2. Установите максимальную интенсивность света, полярность напряжения переключите на "-". Переключатель "**Коэффициент усиления**" установите в положение "**x 0.001**". Амплитуда сигнала тока на экране при этом увеличится в 10 раз, что позволит более точно определить величину запирающего напряжения.

3. Установите красный светофильтр в объектив фотоприёмника. Выставьте нулевое значение напряжения при отрицательной полярности. Изменяя напряжение, добейтесь падения фототока до нуля и зафиксируйте минимальное значение запирающего напряжения  $U_3$ . Значения фототока могут испытывать некоторые колебания, поэтому обратите внимание на показания цифрового индикатора в левом нижнем углу экрана. Остановите измерения,

как только величина тока периодически начинает принимать нулевые значения. Установите левой кнопкой мыши вертикальный жёлтый маркер в точку графика  $I(t)$ , в которой  $I=0$ , и нажмите кнопку . Откроется таблица "Обработка", в четвёртом столбце которой отображается измеренное запирающее напряжение. Приборную погрешность напряжения  $\Theta(U)$  считайте равной половине разряда последней значащей цифры. Внесите в ячейку первого столбца таблицы значение длины волны света, указанное на светофильтре. Во втором и третьем столбцах таблицы автоматически вычисляются значения частоты света  $\nu$  и отношение  $(\nu/e)$ . Выполните измерения задерживающего напряжения  $U_3$  с этим же светофильтром 5 раз, найдите среднее значение напряжения  $\overline{U_3}$ , среднее квадратичное отклонение  $S(\overline{U_3}) = \sqrt{\frac{\sum_1^5 (U_{3i} - \overline{U_3})^2}{5 \cdot (5-1)}}$ , сравните его с приборной погрешностью  $\Theta(U_3)$  и запишите полную погрешность измерения  $\Delta U_3$ . В дальнейшем считайте, что все измерения  $U_3$  определяются этой величиной погрешности.

4. Повторите действия, описанные в предыдущем пункте, для всех имеющихся в комплекте светофильтров, постепенно уменьшая длину волны излучения. По окончании измерений перейдите на вкладку "график", в которой по экспериментальным точкам строится график зависимости  $U_3 = f(\nu/e)$ . Для аппроксимации этой зависимости линейной функции вида  $Y=Ax+B$  нажмите кнопку . В верхнем левом углу окна появится соответствующее уравнение аппроксимирующей прямой. Угловой коэффициент этой зависимости и есть постоянная Планка. Сохраните полученный график, пользуясь кнопкой .

Из графика вычислите угловой коэффициент  $a$  (постоянную Планка  $h$ ) и его абсолютную погрешность с учетом полученной выше погрешности задерживающего напряжения  $\Delta U_3$ .

#### Задание 4. Определение работы выхода электрона

1. По окончании измерений (см. п.1-4) из графика зависимости  $U_3 = f(\nu/e)$  вида  $Y=Ax+B$  рассчитайте коэффициент  $B$  и его абсолютную погрешность в соответствии с рекомендациями методики определения параметров прямой линии.

2. Из уравнения (5) видно, что коэффициент  $B = -(A_{\text{вых}}/e)$ , следовательно, работу выхода можно определить из уравнения

$$A_{\text{вых}} = -B \cdot e, \quad (6)$$

где  $B$ - числовое значение параметра, рассчитанное в п.п.1, а  $e$  - заряд электрона  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Работа выхода в данном случае будет выражена в Джоулях.

Рассчитать по формуле (6) работу выхода электрона  $A_{\text{вых}}$ .

3. Рассчитать абсолютную погрешность работы выхода электрона  $\Delta A_{\text{вых}}$ .

### Задание 5 Определение красной границы фотоэффекта

1. Из уравнения (2) следует, что красную границу фотоэффекта можно определить по формуле:

$$\nu_{\text{кр.гр}} = A_{\text{вых}} / h \quad (7)$$

Рассчитать по формуле (7) красную границу фотоэффекта.

2. Рассчитать её абсолютную погрешность.

3. Экстраполируя график зависимости  $U_s = f(\nu/e)$  до пересечения с осью  $\nu/e$ , рассчитать значение красной границы фотоэффекта  $\nu_{\text{кр.гр}}$ . Сравнить полученное из графика значение  $\nu_{\text{кр.гр}}$  с расчетным значением  $\nu_{\text{кр.гр}}$ , полученным по формуле (7).

### *6. Контрольные вопросы.*

1. В чем заключается явление фотоэффекта?
2. Какие обнаружены закономерности фотоэффекта?
3. Как объясняется явление фотоэффекта с квантовой точки зрения?
4. Каково устройство фотоэлементов и их характеристики?
5. Как формулируются законы фотоэффекта?
6. Изобразите вольтамперную характеристику вакуумного фотоэлемента при различных световых потоках и различных энергиях падающих фотонов.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 402

### ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА

#### *Цель работы*

Экспериментальное подтверждение постулатов Бора

#### 1. Задачи работы

1. Экспериментальное определение первого потенциала возбуждения атомов аргона;

#### 2. Предварительные сведения

В конце XIX века и начале XX столетия в физике были проведены эксперименты, которые сыграли решающую роль в переходе от классических представлений к идеям современной физики и легли в основу квантовой механики и атомной теории.

Наиболее прямым и поразительным экспериментальным подтверждением существования дискретных уровней энергии изолированных атомов, постулированных теорией Бора, явились опыты Франка и Герца (1912-1914 гг.).

Бор сформулировал предположения, которые были названы **постулатами Бора**.

1. Атом может длительное время находиться в определённых стационарных состояниях. В этом состоянии электроны атома движутся по стационарным орбитам, не излучая при этом энергию в виде электромагнитной волны. Эти орбиты соответствуют следующему соотношению:

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi} \quad (1),$$

где  $n$  – номер стационарной орбиты (главное квантовое число),  $n=1,2,3$

$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг – масса электрона,  $v_n$  – скорость электрона на  $n$ -й орбите радиуса  $r_n$ ,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка.

2. При переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую излучается или поглощается 1 фотон (квант электромагнитного излучения) с энергией

$$h\nu = E_{n2} - E_{n1}, \quad (2)$$

где  $E_{n2}, E_{n1}$  – энергии стационарных состояний атомов до и после поглощения (излучения),  $\nu$  – набор возможных дискретных частот квантовых переходов; определяющий линейчатый спектр атомов

**Опыт Франка и Герца** — опыт, явившийся экспериментальным доказательством дискретности внутренней энергии атома.

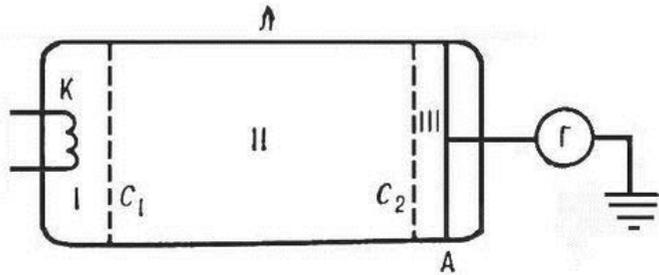


Рисунок 1. Схема опытной установки

На рисунке приведена схема опыта. К катоду  $K$  и сетке  $C_1$  электровакуумной трубки, наполненной парами Hg (ртути), прикладывается разность потенциалов  $V$ , ускоряющая электроны, и снимается вольтамперная характеристика. К сетке  $C_2$  и аноду  $A$  прикладывается замедляющая разность потенциалов. Ускоренные в области I электроны испытывают соударения с атомами Hg в области II. Если энергия электронов после соударения достаточна для преодоления замедляющего потенциала в области III, то они попадут на анод. Следовательно, показания гальванометра  $\Gamma$  зависят от потери электронами энергии при ударе.

В опыте наблюдался монотонный рост тока  $I$  при увеличении ускоряющего напряжения вплоть до 4,9 В, то есть электроны с энергией  $E < 4,9$  эВ испытывали упругие соударения с атомами Hg, и внутренняя энергия атомов не менялась. При значении  $U = 4,9$  В (и кратных ему значениях 9,8 В, 14,7 В) появлялись резкие спады тока. Это определённым образом указывало на то, что при этих значениях  $U$  соударения электронов с атомами носят неупругий характер, то есть энергия электронов достаточна для возбуждения атомов Hg.

При кратных 4,9 эВ значениях энергии электроны могут испытывать неупругие столкновения несколько раз. Таким образом, на кривой зависимости тока коллектора от напряжения между катодом и анодом наблюдается ряд максимумов и минимумов, отстоящих друг от друга на равные расстояния  $\Delta U$ . Эти расстояния определяют значения энергии перехода атома из основного состояния в ближайшее возбуждённое состояние. Эта характерная разность  $\Delta U$  носит название **первый потенциал возбуждения**. В таблице 1 представлены величины первых потенциалов возбуждения инертных газов.

Таблица 1

Газ	H2	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Hg	Cs
$U_{\text{возб}},$ В	11,2	20,9	16,6	11,6	10,0	8,5	4,9	1,4

На рис. 1 показана вольтамперная характеристика (ВАХ), полученная в опытах Франка и Герца для атомов ртути. Анализ результатов опыта Франка и Герца показал, что спектр поглощаемой атомом энергии не непрерывен, а дискретен, минимальная порция (квант электромагнитного поля), которую может поглотить атом Hg, равна 4,9 эВ. Значение длины волны  $\lambda = 253,7$  нм свечения паров Hg, возникавшее при  $U > 4,9$  В, оказалось в соответствии со вторым постулатом Бора

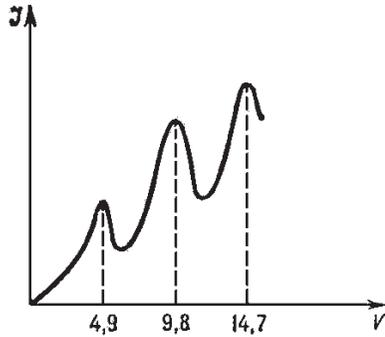


Рис.1 Вольтамперная характеристика для атомов ртути

$$h \frac{c}{\lambda} = E_0 - E_1 \quad (3)$$

где  $E_0$  и  $E_1$  — энергии основного и возбужденного уровней энергии.

В опыте Франка и Герца  $E_0 - E_1 = 4,9$  эВ.

### 3. Метод исследования и описание установки

В предлагаемой для проведения опыта установке в вакуумной лампе находится разреженный аргон. На лицевую панель выведены переключатель датчика напряжений, ручки напряжений  $U_{КК1}$  (Сетка 1),  $U_{AC2}$  (Сетка 2) и  $U_{КА}$  (Анод), переключатель напряжения накала катода, а также переключатель выбора коэффициента усиления тока коллектора.



Рис. 2 Установка для проведения опыта Франка-Герца.

Диапазоны допустимых значений сеточных напряжений указаны на лицевой стороне прибора. На правой боковой стороне имеется таблица с рекомендованными для данной установки параметрами.

#### *4. Порядок выполнения работы*

4. 1. Подключите с помощью кабеля измерительный канал установки к USB-входу компьютера.

4. 2. Включите установку и дайте прогреться вакуумной лампе в течение 5 минут, установив напряжение питания нити накала, рекомендованное в таблице на правой боковой поверхности корпуса.

4.3. Включите компьютер и запустите программу «Практикум по физике». На панели устройств выберите соответствующий сценарий проведения эксперимента.

4.5. Установите величины сеточных напряжений и множители тока в соответствии с рекомендациями таблицы, находящейся на крышке отсека лампы.

4.6. Запустите измерения, выбрав на панели инструментов кнопку «Запустить измерения». На экране появится соответствующее окно для вольтамперной характеристики.

4.7. Изменяя напряжение  $U_{КА}$  от 0 до 100 В постройте ВАХ. Повышение напряжения следует немедленно прекратить, если значение тока резко возросло и вышло за рамки экрана.

4.8. По окончании эксперимента остановите измерения, нажав на кнопку «Стоп» и верните напряжение на промежутке «анод-катод» к нулевому значению.

#### *5. Обработка результатов измерений*

5. 1. Подведите указатель мыши к первому максимуму ВАХ. Установите в этом месте жёлтый вертикальный маркер, нажав левую кнопку мыши. Зафиксируйте значение напряжения, появившееся в нижней части окна с

графиком. Так же поступите с остальными максимумами. Результаты занесите в таблицу 1.

Таблица 1

№ $i$	$U(i)$ , В	$\Delta U$ , В
1		
...		
5		
		$\Delta U_{\text{ср}} =$

5.2. Подсчитайте первый потенциал возбуждения атомов аргона по формуле

$$\Delta U = U(i + 1) - U(i) \quad (4)$$

Сосчитайте по этой формуле первый потенциал возбуждения атомов аргона для пяти последовательных максимумов, найдите среднее значение и случайную погрешность измерения.

Рассчитайте систематическую величину абсолютной погрешности для  $\Delta U$  по формуле (4), приняв приборную погрешность  $\Theta(U) = 0,2$  В.

Соотнесите случайную и систематическую погрешности и запишите окончательный результат.

*6. Контрольные вопросы*

6. 1. Сформулируйте квантовые постулаты Бора.
6. 2. В чём суть опыта Франка и Герца?
6. 3. Какие основные выводы можно сделать на основании опытов Франка и Герца?
6. 4. Какие столкновения электронов называются упругими, а какие – неупругими? На каких участках ВАХ они проявляются?
6. 5. Что такое первый потенциал возбуждения? Какое состояние атома называется основным, а какое – возбуждённым?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 403

### ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА ВОДОРОДА В ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ

#### *Цель работы*

Целью лабораторной работы является измерение длин волн спектра атомарного водорода и сопоставление полученного спектра с предсказаниями полуклассической и квантовой теории строения атома водорода.

#### 1. Задачи работы

1.1. Подбор условий регистрации линий водорода различной интенсивности с использованием решеточного спектрометра с фиксацией спектра на ПЗС-матрице;

1.2. Измерение длин волн линий водорода в видимой части спектра;

1.3. Сопоставление полученных данных с теоретическими моделями, в которых рассчитывается энергетический спектр атома водорода.

#### 2. Предварительные сведения

Сочетание законов классической и квантовой механики называют полуклассическим приближением. В полуклассической модели атома Нильса Бора электрон в атоме водорода движется по круговым орбитам вокруг протона. На это движение накладывается ряд ограничений, называемых постулатами Бора:

1. Существуют такие стационарные состояния атома, в которых он обладает определенной энергией  $E_n$  и не излучает электромагнитных волн.
2. Атом может переходить из одного стационарного состояния в другое, излучая или поглощая квант электромагнитного излучения  $h\nu$ , равный по модулю разности энергий этих двух состояний  $n$  и  $k$

$$h\nu = E_n - E_k \quad (1)$$

3. При движении по стационарной орбите реализуется такое движение, при котором между линейной скоростью электрона на  $n$ -й орбите  $v_n$  и радиусом орбиты  $r_n$  выполняется соотношение

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi} = \hbar n, \quad (2)$$

где  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг – масса электрона,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $n$  – главное квантовое число.

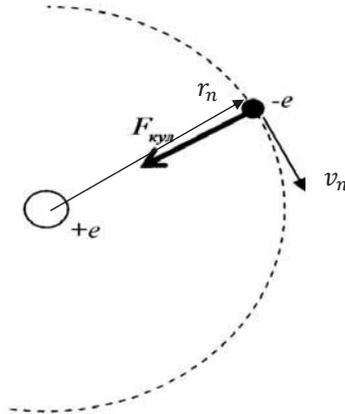


Рис.1 Схема атома водорода по Бору

Если электрон в атоме, находящемся в состоянии с энергией  $E_n$ , вращается на орбите радиусом  $r_n$  со скоростью  $v_n$ , то согласно второму закону Ньютона, он движется по круговой орбите с центростремительным ускорением

$$a_{\text{ц.стр.}} = \frac{v_n^2}{r_n} \quad (3)$$

под действием сил кулоновского притяжения, рис.1,

$$F_{\text{кул}} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} \quad (4)$$

тогда

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{mv_n^2}{r_n} \quad (5)$$

Выразив из формулы (2)  $v_n$

$$v_n = \frac{nh}{2\pi mr_n} \quad (6)$$

получим

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{mn^2h^2}{4\pi^2 m^2 r_n^3} \quad (7)$$

Откуда

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} n^2 \quad (8)$$

Значения  $n = 1, 2, 3, \dots$ , минимальное значение радиуса орбиты электрона при  $n = 1$  называется *боровским радиусом атома водорода*

$$a_0 = r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} \approx 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м} \quad (9)$$

Полная энергия состояния под номером  $n$  атома водорода складывается из кинетической энергии движения электрона

$$E_{\text{кин}} = \frac{mv_n^2}{2} \quad (10)$$

и потенциальной энергии взаимодействия протона и электрона на орбите

$$E_{\text{пот}} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \quad (11)$$

Сложив эти энергии и подставив значения  $v_n$  и  $r_n$  в выражения для кинетической и потенциальной энергии, получим значение полной энергии

$$E_n = E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{e^4 m}{8\pi\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{2,18 \cdot 10^{-18}}{n^2} \text{ Дж} \quad (12)$$

Отрицательный знак энергии атома водорода обусловлен тем, что состояние системы электрон-протон на бесконечном удалении друг от друга и покоящихся друг относительно друга, характеризуют энергией равной нулю.

Для удобства оперирования численными значениями энергий атомов вводится единица энергии  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ , тогда

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ эВ} \quad (13)$$

Таким образом, в модели Н. Бора каждой разрешенной орбите электрона соответствует определенная энергия. Состояние атома, при котором электрон вращается по орбите минимального радиуса, обладает минимальной энергией, равной  $E_1 = -13,6 \text{ эВ}$ , называют *основным состоянием*.

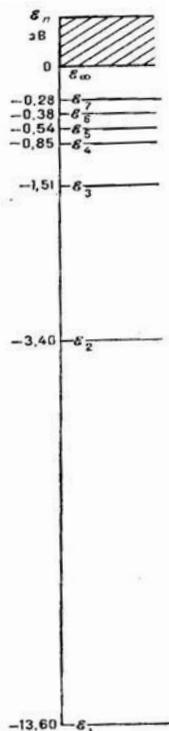


Рис.2 Схема энергетических уровней атома водорода

Положение уровней энергии остальных состояний относительно свободного уровня электрона, при  $n \rightarrow \infty$  показаны на рис. 2.

Аппарат современной квантовой механики не рассматривает электрон как точечный объект, двигающийся по определенной кривой. Рассматривается волновая  $\psi$ -функция электрона, позволяющая вычислить лишь вероятность пребывания электрона в той или иной области пространства вокруг протона. Для атома водорода оказывается возможным получить точные решения волнового уравнения Шредингера для электрона в поле протона

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \psi = 0 \quad (14)$$

где  $m$  – масса электрона,  $e$  – заряд электрона,  $E$  – полная энергия электрона.

Эти решения дают дискретный набор энергетических состояний, в которых может находиться система. Этот набор может совпадать со значениями энергий, полученных в полуклассической модели Бора. Распределение вероятности пребывания электрона в пространстве вокруг протона оказывается сферически симметричным только для  $n = 1$ . В остальных случаях оно имеет сложное угловое распределение и это принципиально отличает полуклассическое и квантовомеханическое описание атома водорода. Зная энергии состояний  $n$  и  $k$ , можно установить частоту излучения при переходе из состояния с номером  $n$  в состояние с номером  $k$

$$\nu_{nk} = \frac{|E_n - E_k|}{h} = \frac{e^4 m}{8\epsilon^2 h^3} \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ Гц} \quad (15)$$

Константу  $R = 3,29 \cdot 10^{15}$  Гц, позволяющую рассчитать частоты фотонов, излучаемых или поглощаемых атомом водорода, называют *постоянной Ридберга*.

Признание полуклассической модели Н. Бора было связано с тем, что полученное соотношение очень точно описывает экспериментальные значения частот излучения атома водорода в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной области спектра. В видимой области спектра излучения атома водорода наблюдается 4 линии (рис. 3).



Рис.3 Пример спектральных линий атома водорода

Таким образом, из выражения (15) можно получить формулу, с помощью которой определяется энергетический уровень, с которого

происходит переход при излучении энергии (16), а также длину волны  $\lambda_{kn}$  этого перехода (17)

$$k = \sqrt{\frac{Rn^2}{R-vn^2}} \quad (16)$$

$$\lambda_{kn} = \frac{c}{\nu} = \frac{c}{R\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right)} \quad (17)$$

### 3. Метод исследования и описание установки

Для создания возбужденных атомов в газах используют электронный удар и инициирование тлеющего электрического разряда, возникающего при создании высокого напряжения на концах трубки с газом.

Установка (рис. 4) состоит из источника питания (1), на корпусе которого находится держатель газоразрядной трубки (2), и спектрометра (3) с оптоволоконным кабелем, подводящим излучение к спектральному прибору (4).

Газоразрядная трубка имеет защитный кожух из оргстекла (5), который должен быть закрыт при включении газоразрядной трубки. Система блокировки отключает подаваемое на электроды трубки высокое напряжение в случае открывания защитного экрана.

Источник питания газоразрядной трубки выполнен на основе повышающего трансформатора и работает от сети переменного тока 220В. Помимо тумблера подачи входного напряжения (7) на корпусе установлена зеленая кнопка (6), нажатие которой включает газоразрядную трубку и запускает реле времени, выключающее источник питания через 30 секунд горения трубки. Газоразрядную трубку следует включать только на время регистрации спектра.

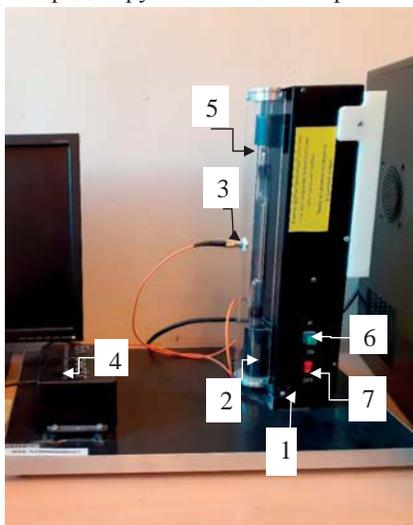


Рис.4 Схема установки для исследования спектра атома водорода

Спектрометр подключается к USB – порту компьютера, через который получает необходимое для работы постоянное напряжение и отправляет данные о регистрируемом спектре на компьютер.

Регистрация и обработка спектра осуществляется с помощью сопровождающей спектрометр программы *Enhanced Spectrometry Educational*.

#### 4. Порядок выполнения работы

4.1 Включите газоразрядную лампу, заполненную водородом. Рассмотрите через дифракционную решетку узкую часть спектральной трубки. Занесите в таблицу цвет четырех ярких линий, которые видны при наблюдении. Лампа через 30 с отключится автоматически.

4.2 Запустите на компьютере программу *Enhanced Spectrometry Educational* (иконка ). Ознакомьтесь с интерфейсом в открывшемся окне программы, (рис. 5). Функции элементов управления даны на всплывающих подсказках, появляющихся при наведении курсора на элемент. Используемые в работе функции показаны на выносках, см. рис. 5.

4.3 Установите число усреднений равное 1, время экспозиции равное 38. При регистрации спектра следите, чтобы интенсивность самой яркой линии была максимальна, но не превышала 64000 счетов в секунду.

4.4 Включите газоразрядную лампу, и пока она горит, произведите измерение, нажав кнопку «Старт». Учитывая требования пункта 4.3, выполните измерение линии спектра 6 раз.

4.5 Сохраните каждый спектр в указанной преподавателем директории (кнопка «Сохранить» на интерфейсе, (рис. 5), вставив в названия спектров свою фамилию и информацию о времени экспозиции в мс и числе усредненных при записи спектров, а также номер спектра (например, Иванов-38-1-1.esp).

4.6 Загружая поочередно сохраненные спектры в программу (кнопка «Загрузить» на интерфейсе, (рис. 5), измерьте: длины волн  $\lambda$  всех четырех линий, интенсивность относительно наиболее яркой линии в счетах в секунду.

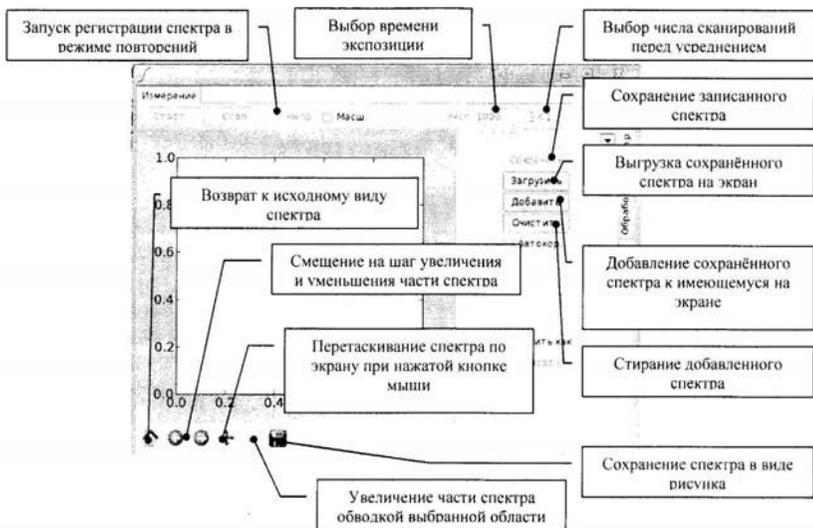


Рис. 5 Интерфейс программы Enhanced Spectrometry Educational

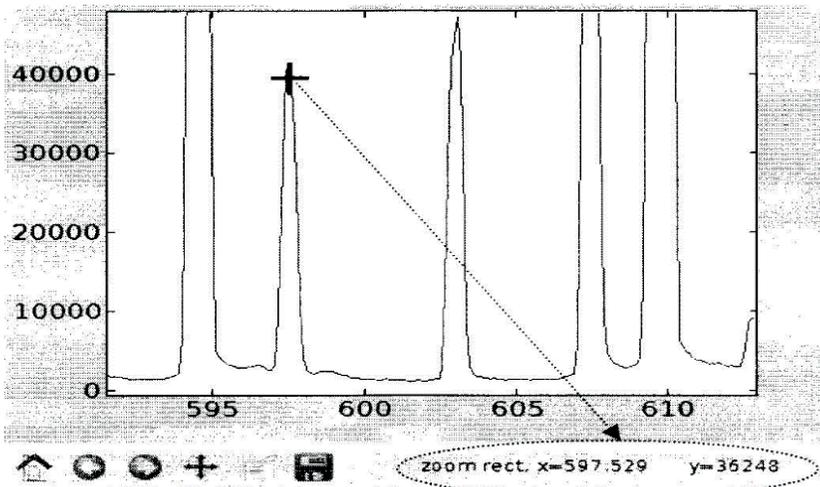


Рис. 6 Пример спектра на экране компьютера

Часть спектра можно увеличить, нажав кнопку под спектром (рис. 6). Длина волны в нанометрах и интенсивность в числе счетов в секунду указывается в правом нижнем углу окна со спектром при наведении курсора, принимающего форму перекрестия «+» (рис. 6,  $x = \langle \lambda \rangle$  и  $y = \langle \text{интенсивность} \rangle$ ). Занесите информацию о всех линиях в соответствующие строки таблицы.

Таблица 1

Линия №	1	2	3	4
Цвет	Красная			
Длина волны $\lambda$ , нм	1. 2. ⋮	1. 2. ⋮	1. 2. ⋮	1. 2. ⋮
Средняя длина волны $\bar{\lambda}$ , нм				
Интенсивность линии, счета в секунду	1. 2. ⋮	1. 2. ⋮	1. 2. ⋮	1. 2. ⋮
Среднее значение интенсивности линии, счета в секунду				
Относительная интенсивность линии, %	100			
Частота $\nu$ , Гц				
$E_{kn}$ , эВ				
Номера состояний, соответствующих излучению фотона $k \rightarrow n$				
Теоретическое значение $\lambda_{kn}$ , нм				

### Указания по технике безопасности

1. Перед выполнением работы получите инструктаж у лаборанта.
2. Соблюдайте общие правила техники безопасности в лаборатории кафедры Физики.

3. Запрещается производить замену газоразрядных трубок при включенном источнике питания.

4. Запрещается включать газоразрядную трубку ранее, чем через 1 минуту с момента ее выключения.

5. Запрещается нарушать работу системы блокировки включения газоразрядной трубки при открытом защитном кожухе.

## 5. Обработка результатов измерений

5.1 Определите  $\bar{\lambda}$  и среднюю интенсивность линий  $\bar{I}$ . Рассчитайте их погрешности. Систематическую составляющую погрешности  $\Theta(\lambda)$  и  $\Theta(I)$  считайте равной половине разряда последней значащей цифры, которую показывает экран компьютера при наведении на линию.

5.2 Рассчитайте частоты переходов  $\nu$  по формуле (18),

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{Гц} \quad (18)$$

и их погрешности как погрешности косвенного измерения. Запишите значения в таблицу.

5.3 Используя результаты предыдущего пункта, рассчитайте значения энергий квантов, соответствующих частотам перехода по формуле (19)

$$E_{kn} = \frac{h\nu}{e} \quad \text{эВ} \quad (19)$$

так же их погрешности и внесите их в таблицу.

5.4 Используя формулу (16), покажите расчетами в результате переходов между какими уровнями  $k$  и  $n$  в спектрах атома водорода появляются четыре наблюдаемых линий видимого диапазона (400 – 700 нм). Для определения номера  $k$  по формуле (16) по известному значению частоты  $\nu$  перехода, необходимо задать значение уровня  $n$ , равное 2, т.к. спектральные линии видимой области спектра (серия Бальмера) появляются в результате перехода с вышестоящих уровней на уровень  $n=2$ . Значения  $k$  должны быть близки к целым числам, большим  $n$ . Данные, полученные таким образом, внесите в таблицу, в строку « $k \rightarrow n$ » (например  $3 \rightarrow 2$ ).

5.5 Занесите в таблицу расчетные данные длин волн, соответствующие переходам между установленными в предыдущем пункте уровнями с округленными до целых значений номерами, по формуле (17).

5.6 Рассчитайте на сколько процентов отличаются измеренные вами длины волн спектральных линий от рассчитанных по формуле (17).

## 6. Контрольные вопросы

- 6.1 Сформулируйте постулаты Бора и механизм излучения и поглощения энергии атомами. Какой тип спектров предсказывает теория Бора?
- 6.2 Чем представления полуклассического рассмотрения строения атома водорода отличаются от квантово-механических?
- 6.3 В каких диапазонах энергий, частот и длин волн должны лежать характеристики фотонов, излучаемых атомами водорода при переходе атома из состояний, соответствующим уровням энергии, в основное состояние; в состояние с  $n = 1$ ; с  $n = 3$ ?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 404

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГАЗОВ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

#### *Цель работы*

Целью лабораторной работы является измерение длин волн спектра инертных газов для дальнейшей их идентификации.

#### *1. Задачи работы*

- 1.4. Подбор условий регистрации линий водорода различной интенсивности с использованием решеточного спектрометра с фиксацией спектра на ПЗС-матрице;
- 1.5. Измерение длин волн спектральных линий газов в видимой части спектра;
- 1.6. Сопоставление измерительных данных с результатами, полученными теоретически;
- 1.7. Определение вида газов по полученным спектрам.

Спектральный анализ используется для идентификации веществ в естественнонаучных исследованиях, промышленности, астрономии и т.д. Для перевода вещества в состояние, когда их строение становится атомарным, и они начинают излучать индивидуальный набор линий, регистрируемых спектрометром, используются термический разогрев в пламени, дуговой разряд и другие методы. Для создания возбужденных атомов в газах используют электронный удар и инициирование тлеющего электрического разряда, возникающего при создании высокого напряжения на концах трубки с газом. В данной работе предлагается идентифицировать ряд газов, снимая спектры газоразрядных трубок, заполненных этими газами.

Примечание: п.2. *Предварительные сведения*, п.3 *Методика измерений и описание установки* и п. 4 (п.п.4.1-4.5) *Порядок выполнения работы* смотрите в работе №403.

#### *4. Порядок выполнения работы*

(п.п.4.1-4.5) –выполнять аналогично описанному в работе №403.

4.6 Загружая поочередно сохраненные спектры в программу (кнопка «Загрузить» на интерфейсе, (рис. 5), измерьте: длины волн  $\lambda$  всех четырех

линий, интенсивность относительно наиболее яркой линии в счетах в секунду. Занесите информацию о всех линиях в соответствующие строки таблицы.

4.7 Замените газоразрядную трубку на другую (№2, №3 и т.д.). Для этого откройте защитный кожух из оргстекла. Чтобы вынуть трубку из установки, ее следует взять за верхнюю широкую часть и, слегка нажав вниз, потянуть на себя. При вставлении новой лампы нужно, держа ее за верхнюю широкую часть, нижним концом ввести в паз с пружинящим электрическим контактом, и слегка нажав вниз подвести верхний конец лампы к верхнему контакту источника питания. При отпуске пружинящий нижний контакт прижмет лампу к верхнему контакту. После этого закройте защитный кожух из оргстекла.

Для замененной трубки повторите действия, описанные в пунктах 4.1 – 4.6.

Таблица 1

Трубка №	$\lambda_{1ij}, \text{нм}$	$\lambda_{2ij}, \text{нм}$	$\lambda_{3ij}, \text{нм}$	$\lambda_{4ij}, \text{нм}$	$\lambda_{5ij}, \text{нм}$	Газ
1	$\lambda_{111} =$	$\lambda_{211} =$	$\lambda_{311} =$	$\lambda_{411} =$	$\lambda_{511} =$	
	$\lambda_{112} =$	$\lambda_{212} =$	$\lambda_{312} =$	$\lambda_{412} =$	$\lambda_{512} =$	
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
	$\lambda_{11} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{21} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{31} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{41} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{51} \pm \Delta\lambda$	
2	$\lambda_{121} =$	$\lambda_{221} =$	$\lambda_{321} =$	$\lambda_{421} =$	$\lambda_{521} =$	
	$\lambda_{122} =$	$\lambda_{222} =$	$\lambda_{322} =$	$\lambda_{422} =$	$\lambda_{522} =$	
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
	$\lambda_{21} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{22} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{32} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{42} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{52} \pm \Delta\lambda$	
3	$\lambda_{131} =$	$\lambda_{231} =$	$\lambda_{331} =$	$\lambda_{431} =$	$\lambda_{531} =$	
	$\lambda_{132} =$	$\lambda_{232} =$	$\lambda_{332} =$	$\lambda_{432} =$	$\lambda_{532} =$	
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
	$\lambda_{13} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{23} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{33} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{43} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{53} \pm \Delta\lambda$	
4	$\lambda_{141} =$	$\lambda_{241} =$	$\lambda_{341} =$	$\lambda_{441} =$	$\lambda_{541} =$	
	$\lambda_{142} =$	$\lambda_{242} =$	$\lambda_{342} =$	$\lambda_{442} =$	$\lambda_{542} =$	
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
	$\lambda_{14} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{24} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{34} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{44} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{54} \pm \Delta\lambda$	
5	$\lambda_{151} =$	$\lambda_{251} =$	$\lambda_{351} =$	$\lambda_{451} =$	$\lambda_{551} =$	
	$\lambda_{152} =$	$\lambda_{252} =$	$\lambda_{352} =$	$\lambda_{452} =$	$\lambda_{552} =$	
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
	$\lambda_{15} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{25} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{35} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{45} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{55} \pm \Delta\lambda$	

6	$\lambda_{161} =$	$\lambda_{261} =$	$\lambda_{361} =$	$\lambda_{461} =$	$\lambda_{561} =$	
	$\lambda_{162} =$	$\lambda_{262} =$	$\lambda_{362} =$	$\lambda_{462} =$	$\lambda_{562} =$	
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
	$\lambda_{16} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{26} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{36} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{46} \pm \Delta\lambda$	$\lambda_{56} \pm \Delta\lambda$	

## 5. Обработка результатов измерений

5.1 Определите средние длины волн  $\bar{\lambda}$  и рассчитайте их погрешности. Систематическую составляющую погрешности  $\Theta(\lambda)$  считайте равной половине разряда последней значащей цифры, которую показывает экран компьютера при наведении на линию.

5.2 Сравните полученные значения длин волн с табличными и определите вид газа в трубке. Запишите названия газов в соответствующие строки таблицы.

**Таблица длин волн некоторых ярких линий, наблюдающихся в спектрах газов**

Газ	$\lambda_1, \text{нм}$	$\lambda_2, \text{нм}$	$\lambda_3, \text{нм}$	$\lambda_4, \text{нм}$	$\lambda_5, \text{нм}$	$\lambda_6, \text{нм}$
Гелий	447,1	492,2	501,6	587,6	667,8	706,6
Аргон	420,0	696,5	706,7	738,4	750,4	751,5
Неон	585,2	607,4	614,3	640,2	650,6	703,2
Криптон	427,4	432,0	437,6	446,4	557,0	587,1
Пары ртути	404,7	435,8	546,6	576,9	607,8	618,8
Водород	397,0	410,2	434,0	486,1	656,27	656,29
Кислород	436,7	441,5	459,1	464,9	664,1	672,1
Азот	399,5	463,0	500,5	568,0	648,2	661,0

## 6. Контрольные вопросы

6.1 Для чего используется спектроскопия.

6.2 Сформулируйте постулаты Бора и механизм излучения и поглощения энергии атомами. Какой тип спектров предсказывает теория Бора?

6.3 Чем представления полуклассического рассмотрения строения атома водорода отличаются от квантово-механических?

6.4 Как можно объяснить, что каждое химическое вещество характеризуется своим спектром поглощения и выделения энергии?

6.5 Почему полученные спектры нельзя рассчитать по формуле Бальмера?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 405

### ИЗУЧЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СЧЕТЧИКА ГЕЙГЕРА-МЮЛЛЕРА

#### Цель работы

#### 1. Задача работы

1.1. Экспериментальное изучение интенсивности космического излучения, как составляющей радиационного фона в лаборатории.

1.2. Статистическая обработка результатов измерений.

#### 2. Предварительные сведения

##### 2.1 Космическое излучение

Космическое излучение – это элементарные частицы, фотоны и ядра атомов, движущиеся с высокими энергиями и приходящие на Землю практически изотропно со всех направлений космического пространства.

Впервые указание на возможность существования ионизирующего излучения внеземного происхождения было получено в начале XX века в опытах по изучению проводимости газов. В 1911—1912 годах в экспериментах по изучению ионизации газов в ионизационных камерах на различных высотах над уровнем моря немецкий физик В. Гесс, поднимаясь на воздушном шаре, обнаружил, что излучение растет с высотой, в то время как ионизация газа, вызванная радиоактивностью Земли, должна была бы падать с высотой. Позднее в опытах В. Кольхёрстера было доказано, что это излучение направлено сверху вниз. Измерения интенсивности космического излучения приводят к выводу, что эта интенсивность быстро растет с высотой, достигает максимума, а затем уменьшается и на высоте около 50 км остается практически постоянной, рис.1.

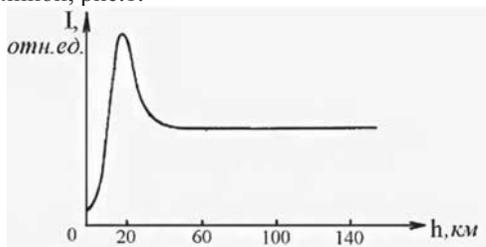


Рис.1 Зависимость интенсивности космического излучения от высоты

Различают *первичное* и *вторичное* космическое излучение. Излучение, приходящее непосредственно из космоса, называют *первичным*. Оно представляет собой поток элементарных частиц высоких энергий, причем более 90% из них составляют протоны ( $p^+$ ) с энергией  $10^9 \div 10^{13}$  эВ, около 7%

- это  $\alpha$  – частицы и только 1% приходится на ядра более тяжелых элементов ( $Z > 20$ ). По современным представлениям первичное космическое излучение имеет в основном галактическое происхождение. На высоте более 50 км интенсивность космического излучения постоянна; на этих высотах наблюдается лишь первичное излучение.

С приближением к Земле интенсивность космического излучения возрастает, что свидетельствует о появлении *вторичного* космического излучения, которое образуется в результате взаимодействия первичного излучения с ядрами атомов земной атмосферы. Во вторичном космическом излучении встречаются практически все известные элементарные частицы. При высоте  $< 20$  км космическое излучение является вторичным, с уменьшением высоты его интенсивность уменьшается, поскольку вторичные частицы по мере приближения к поверхности Земли поглощаются.

В составе вторичного космического излучения можно выделить два компонента: *мягкий* (сильно поглощается свинцом) и *жесткий* (обладает в свинце большой проникающей способностью). Происхождение мягкого компонента объясняется следующим образом. В космическом пространстве всегда имеются  $\gamma$ -кванты с энергией  $E > 2m_e c^2$ , которые в поле атомных ядер превращаются в электрон-позитронные пары. Образовавшиеся таким образом электроны и позитроны, тормозясь, в свою очередь, создают новые  $\gamma$ -кванты, энергия которых еще достаточна для образования новых электрон-позитронных пар и т.д. до тех пор, пока энергия  $\gamma$ -квантов не станет  $< 2m_e c^2$ . Описанный процесс называется *каскадным* ливнем, открыт он был Д. В. Скобельцыным, рис.2. Несмотря на большую энергию, ливневые частицы являются мягким компонентом вторичного космического излучения и сильно поглощаются свинцом.

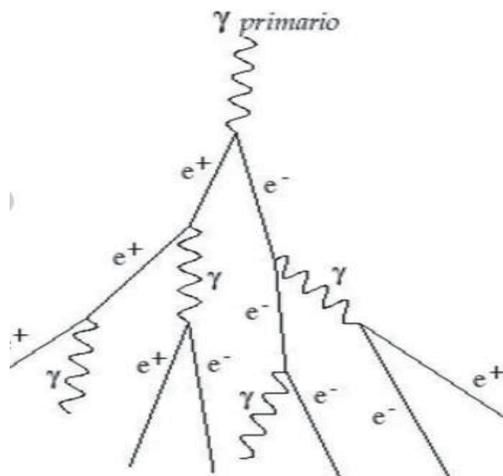


Рис. 2 Схема развития электронно-позитронно-фотонного каскадного ливня.

В 1936 году К. Андерсоном и С. Неддермейером при изучении поглощения *жесткого* вторичного излучения в свинцовых фильтрах с помощью камеры Вильсона, помещенной в магнитное поле, были открыты частицы с массой  $\approx 207m_e$ . Они были названы *мюонами*. Было доказано, что жесткий компонент космического излучения состоит в основном из мюонов, которые образуются в результате распада более тяжелых частиц ( $\pi$ - и  $K$ -мезонов). Так как масса мюонов большая, то радиационные потери для них пренебрежимо малы, поэтому жесткий компонент космического излучения обладает большой проникающей способностью.

Существуют положительный ( $\mu^+$ ) и отрицательный ( $\mu^-$ ) мюоны. Заряд мюонов равен элементарному заряду  $e$ . Время жизни  $\mu^+$  и  $\mu^-$  одинаково и равно  $2,2 \cdot 10^{-6}$  с. Исследования изменения интенсивности жесткого компонента вторичного космического излучения с высотой показали, что на меньших высотах потоки мюонов менее интенсивны, что означает, что мюоны претерпевают самопроизвольный распад, являясь нестабильными частицами.

Распад мюонов происходит по следующим схемам:

$$\mu^+ \rightarrow {}^0_{+1}e + {}^0_0\nu_e + {}^0_0\tilde{\nu}_\mu ,$$

$$\mu^- \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^0_0\tilde{\nu}_e + {}^0_0\nu_\mu ,$$

где  ${}^0_0\nu_\mu$ ,  ${}^0_0\tilde{\nu}_\mu$  соответственно «мюонные» нейтрино и антинейтрино, а  ${}^0_0\nu_e$ ,  ${}^0_0\tilde{\nu}_e$  – электронные нейтрино и антинейтрино.

Дальнейшие исследования показали, что мюоны не являются ядерно-активными частицами, т.е. практически не взаимодействуют с ядрами атомов и, следовательно, должны быть другие частицы, ядерно-активные, в процессе распада которых и образуются мюоны. Такие частицы были обнаружены С. Пауэллом в 1947 г. и получили название  $\pi$ -мезонов (пионов).

Существуют положительный ( $\pi^+$ ), отрицательный ( $\pi^-$ ) (их заряд равен элементарному заряду  $e$ ) и нейтральный ( $\pi^0$ ) мезоны. Массы  $\pi^+$  и  $\pi^-$  - мезонов одинаковы и равны  $273,1 m_e$ , масса  $\pi^0$ - мезона равна  $264,1 m_e$ . Все мезоны нестабильны, времена жизни для заряженных и нейтрального мезона соответственно равны  $2,6 \cdot 10^{-8}$  с и  $0,8 \cdot 10^{-16}$  с. Распад мезонов осуществляется по схемам

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + {}^0_0\nu_\mu ,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + {}^0_0\tilde{\nu}_\mu ,$$

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

Нейтральные пионы за время  $\sim 10^{-16}$  с, распадаются на два  $\gamma$ - кванта, давая, тем самым, начало электронно-фотонной компоненте.

Электроны, в свою очередь, за счет тормозного излучения на ядрах атомов воздуха, дают опять высокоэнергичные  $\gamma$ -кванты, т. е. опять электрон-позитронную пару и т. д. Таким образом, в воздухе появляется электронно-фотонный каскад, рис.2.

Интенсивность заряженных частиц на уровне моря имеет следующие значения (для вертикального потока):

$$J_{\text{ж}} = 0,82 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{см}^2 \text{ср} \cdot \text{с}}$$

$$J_{\text{м}} = 0,31 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{см}^2 \text{ср} \cdot \text{с}}$$

## 2.2. Радиационный фон

Радиационный фон складывается из двух составляющих: естественного и техногенного фона. При облучении человека на долю естественных источников радиации приходится 80 %, техногенных — 20 % дозы облучения. Естественный фон распределяется следующим образом: 83 % — вклад источников земного происхождения (67 % - внутреннее облучение организма, т.е. поступление нуклидов в организм с пищей, водой и при дыхании; 16 % - внешнее облучение), остальные 17 % дает космическое излучение.

С помощью счетчика Гейгера-Мюллера можно измерять часть радиационного фона, создаваемую источниками земного происхождения (внешнее облучение) и космическим излучением, примерно в равных долях. Соотношение может значительно меняться в периоды повышенной солнечной активности и „зависит от концентрации радиоактивных изотопов в объектах (и субъектах), окружающих измерительный стенд.

## 3. Метод исследования и описание установки

### 3.1 Основы статистической обработки результатов измерений

При любом физическом измерении результат, получаемый на опыте, несколько отличается от действительного значения измеряемой величины. Погрешности измерений складываются из ошибок, связанных с несовершенством методики измерений и неточностью калибровки приборов (эти ошибки принято называть систематическими), и из случайных ошибок эксперимента, изменяющих свою величину и знак от опыта к опыту. Частным случаем случайных ошибок являются так называемые **статистические ошибки**. Эти ошибки вызываются флуктуациями самой измеряемой величины. К числу флуктуирующих величин относится и интенсивность (под интенсивностью излучения понимается число частиц, проходящих через единичную площадку в единицу времени) космического излучения.

Пусть при некотором измерении за 10 секунд зарегистрировано  $n$  космических частиц, из этого отнюдь не следует, что в любые следующие 10 секунд будет регистрироваться именно  $n$  частиц. В силу случайных причин при этом можно получить  $n-1$ ,  $n+2$  или любое другое, вообще говоря, не слишком сильно отличающееся от  $n$  число. В этом случае, как и всегда при измерении флуктуирующих величин, физический смысл имеет не столько результат отдельного измерения, сколько средний результат опыта, в нашем примере - среднее количество частиц, проходящих через установку за 10 секунд (или в 1 секунду). Чтобы определить среднюю интенсивность космических частиц, следует измерить число частиц, прошедших через установку за большое время, и разделить полученное число на время измерения и площадь счётчика. Строго говоря, средняя интенсивность равна пределу, к которому стремятся получаемые таким образом числа при беспредельном увеличении времени измерения. Отдельные измерения, проводимые в течение некоторого конечного и, как правило, не слишком большого отрезка времени, позволяют определить искомую среднюю интенсивность излучения не вполне точно, а с некоторой ошибкой, величина которой тем меньше, чем больше время измерения.

Рассмотрим более внимательно опыт по определению интенсивности космических лучей. При небольших размерах установки и не очень большом времени, которое можно использовать для опыта, все ошибки оказываются пренебрежимо малыми по сравнению со статистическими флуктуациями. Поэтому никакие других отклонения, кроме статистических, мы рассматривать не будем. Проведём ряд опытов по измерению числа частиц, падающих в счётчик за фиксированное время  $T$ . Сравнив полученные результаты, мы увидим, что найденные числа заметно отличаются друг от друга, хотя среди них и встречаются одинаковые.

Построим гистограмму, откладывая по оси абсцисс число частиц, зарегистрированных при измерениях, а по оси ординат - долю случаев (по отношению к общему числу измерений), в которых было зарегистрировано данное количество частиц рис.3. Прямоугольник, расположенный между 0 и 1, характеризует случаи, в которых регистрировалось 0 отсчётов; прямоугольник, расположенный между 1 и 2, - случаи с одним отсчётом и т.д. Высота прямоугольника определяет долю наблюдаемых случаев  $W_n$ . Построенная гистограмма характеризует распределение вероятности зарегистрировать  $n$  частиц за время  $t$  в зависимости от величины  $n$ . Обозначим среднюю (вообще говоря, нам неизвестную) интенсивность космических лучей буквой  $\nu$ . Среднее количество  $n_0$  частиц, проходящих через счётчик за время  $t$ , равно, очевидно,  $\nu t = n_0$ . Хотя число отсчётов счётчика, измеренное за любое время, представляется целым числом, среднее значение не обязательно должно быть целым.

На рис. 3 представлена зависимость  $W_n$  от  $n$  при различных значениях  $n_0$ . По мере роста  $n_0$  максимум графика сдвигается вправо и размывается, а

сам график становится более симметричным относительно точки  $n = n_0$ . При малых  $n_0$  график резко асимметричен. Из рисунка видно, что при всяком  $n_0$

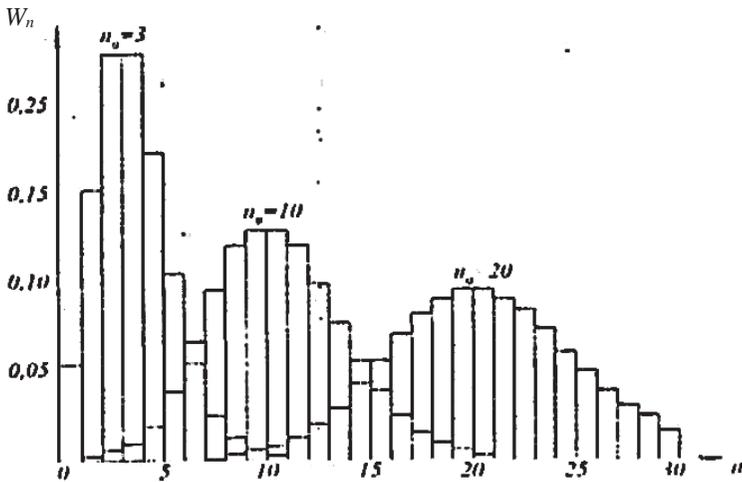


Рис.3 Зависимость вероятности наблюдаемых случаев  $W_n$  от числа случаев

можно получить в результате измерений самые разные значения  $n$ , но не все эти значения встречаются одинаково часто. Если величина  $n$  близка к  $n_0$ , то вероятность  $W_n$  велика, а при удалении от  $n_0$  она быстро падает. Интерес представляет ожидаемое отличие результата, полученного при однократном измерении от истинного значения.

При однократном измерении отклонение результата от истинного значения можно оценить по полуширине кривой распределения  $W_n$  на половине высоты. Для сравнения различных распределений по ширине нужно выбирать такие масштабы по оси абсцисс, чтобы положения максимумов у всех гистограмм совпадали (рис. 4). Чем уже распределение, тем с большим основанием можно утверждать, что найденное на опыте значение может быть отождествлено с искомым средним.

Для оценки точности измерений применяют величину, называемую *дисперсией*. Дисперсией  $\sigma^2$  случайной величины называется среднее значение квадрата отклонения этой величины от её среднего значения:

$$\sigma^2 = \overline{(n - n_0)^2}.$$

Сама величина  $\sigma$  (корень квадратный из дисперсии) называется *среднеквадратичной ошибкой* или *стандартным отклонением*.

В теории вероятностей показывается, что с вероятностью 68% истинное среднее значение отличается от результатов измерения не более чем на одну среднеквадратичную ошибку ( $\pm\sigma$ ); с вероятностью 95% - не более чем на две

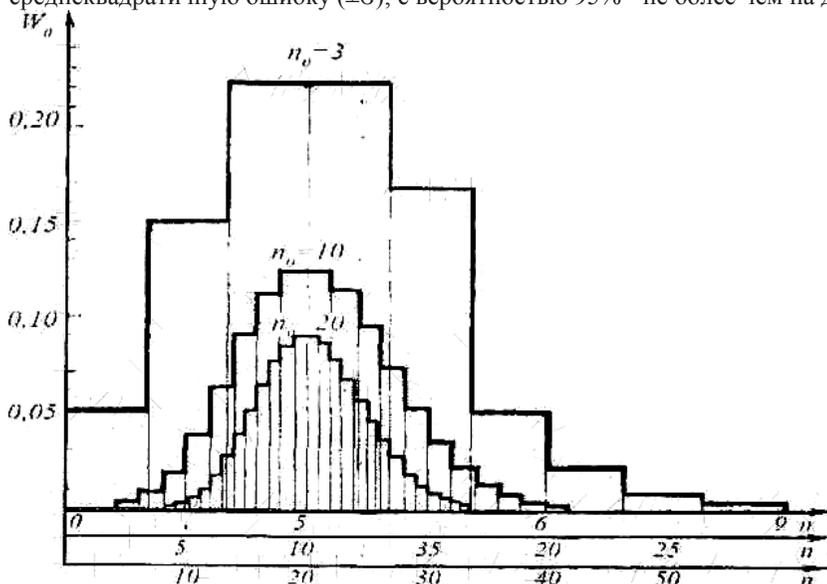


Рис. 4 Сравнение различных распределений по ширине

среднеквадратичные ошибки ( $\pm 2\sigma$ ) и с вероятностью 99,7% — не больше чем на три среднеквадратичные ошибки ( $\pm 3\sigma$ ). Из теории следует также, что среднеквадратичная ошибка числа отсчетов счетчика за некоторый интервал времени равна корню из среднего числа отсчетов за тот же интервал:  $\sigma = \sqrt{\bar{n}_0}$ . Однако поскольку истинное среднее значение измеряемой величины неизвестно, в формулу для определения стандартной ошибки отдельного измерения приходится подставлять не истинное среднее значение  $n_0$ , а измеренное значение  $n$ :

$$\sigma = \sqrt{n}. \quad (1)$$

Формула (1) показывает, что, с вероятностью 68%, измеренное число частиц  $n$  отличается от искомого среднего не более чем на  $\sqrt{n}$ . Результат измерений записывается так:

$$n_0 = n \pm \sqrt{n}. \quad (2)$$

Обратимся теперь к следующему важному вопросу. Пусть мы провели серию из  $N$  измерений по  $t$  секунд, в результате которой получены числа

частиц  $n_1, n_2, n_3, \dots, n_N$ . Эти результаты мы до сих пор использовали для того, чтобы определить, как отличаются друг от друга значения, полученные в разных измерениях. Как уже отмечалось, этот вопрос важен главным образом для выяснения того, насколько достоверен результат, полученный в одном измерении. Но если было проведено несколько измерений, их результаты могут быть использованы и с другой целью: они позволяют определить среднее значение измеряемой величины лучше, чем это можно сделать, если произведено всего одно измерение. Пусть  $t = 10$  с. При  $N$  измерениях среднее значение числа сосчитанных за 10 секунд частиц равно

$$\bar{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i, \quad (3)$$

а стандартная ошибка отдельного измерения, по определению, равна

$$\sigma_{\text{отд}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2} \quad (4)$$

В соответствии с формулой (1) следует ожидать, что эта ошибка будет близка к  $\sqrt{\bar{n}}$ , т. е.

$$\sigma_{\text{отд}} \approx \sqrt{\bar{n}} \quad (5)$$

Величина  $\bar{n}$  из формулы (3), полученная путем усреднения результатов по серии из  $N$  опытов, конечно, тоже не вполне точно совпадает с истинным средним значением  $n_0$  и сама является случайной величиной, но отклонение величины  $n$  от  $n_0$ , существенно меньше, чем  $\sigma_{\text{отд}}$ .

Теория вероятностей показывает, что стандартная ошибка отклонения  $\bar{n}$  от  $n_0$  может быть определена по формуле

$$\sigma_{\bar{n}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2} = \frac{\sigma_{\text{отд}}}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

При написании второй части равенства была использована формула (4). Для рассмотренной серии из  $N$  измерений по 10 секунд относительная ошибка отдельного измерения (т. е. ожидаемое отличие любого из  $n_i$  от  $n_0$ ) равна

$$E_{\text{отд}} = \frac{\sigma_{\text{отд}}}{\bar{n}} \cdot 100\% \approx \frac{100\%}{\sqrt{\bar{n}}}.$$

Аналогичным образом относительная ошибка в определении среднего по всем измерениям значения  $\bar{n}$  равна

$$E_{\bar{n}} = \frac{\sigma_{\bar{n}}}{\bar{n}} \cdot 100\% = \frac{\sigma_{\text{отд}}}{\bar{n}\sqrt{N}} \cdot 100\% = \frac{E_{\text{отд}}}{\sqrt{N}} = \frac{100\%}{\sqrt{nN}}. \quad (7)$$

Таким образом, относительная точность измерения  $\bar{n}$  определяется только **полным** числом отсчетов  $\bar{n}N$  и не зависит от интервалов разбиения серии (по 10, 40 или 100 секунд). Этого, конечно, и следовало ожидать, так как все измерения вместе составляют одно более продолжительное измерение, в котором всего зарегистрировано

$$\sum_{i=1}^N n_i = \bar{n}N$$

отсчетов. Как мы видим, относительная точность измерения постепенно улучшается с увеличением числа отсчетов (а значит, и с увеличением полного времени измерений). С помощью формулы (7) найдем, что для измерения интенсивности космического излучения с точностью до 1% нужно получить по крайней мере  $100^2 = 10000$  отсчетов, для точности 3% достаточно 1000 отсчетов, при точности 10% нужно всего 100 отсчетов и т. д. При этом точность измерения не зависит от того, получены ли все 1000 или 10000 отсчетов в одном или нескольких независимых опытах.

### 3.2. Экспериментальное оборудование, приборы и принадлежности

Лабораторная установка показана на рис. 5. На основании 1, установлен счётчик Гейгера-Мюллера 2. На электроды счётчика подаётся напряжение 400 В от высоковольтного источника 3. На основании 1 укреплены стальные поглотители 4.

К приборам и принадлежностям относятся также компьютер с необходимым программным обеспечением для регистрации и обработки данных. Счётчик Гейгера, (Гейгера-Мюллера) - газоразрядный прибор для регистрации ионизирующих частиц. Счётчик изобретён в 1908 году Гейгером и усовершенствован Мюллером. Широкое применение счётчика Гейгера-Мюллера объясняется высокой чувствительностью, возможностью регистрировать разного рода излучения, сравнительной простотой и дешёвизной установки.

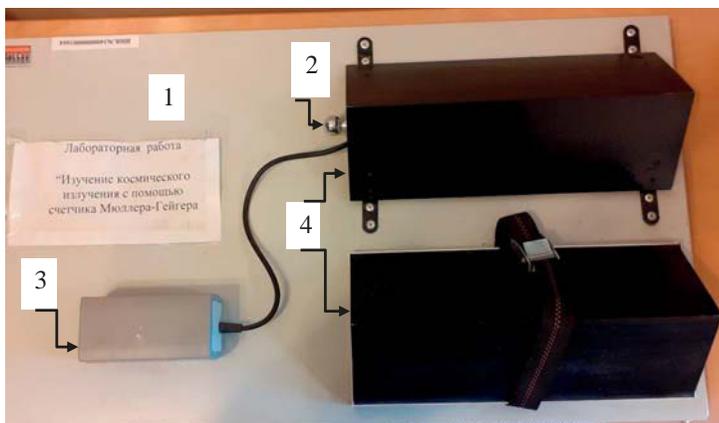


Рис. 5 Общий вид лабораторной установки для изучения космического излучения

Цилиндрический счётчик Гейгера- Мюллера (рис.6) состоит из металлической трубки или металлизированной изнутри стеклянной трубки - катода, и тонкой металлической нити - анода.

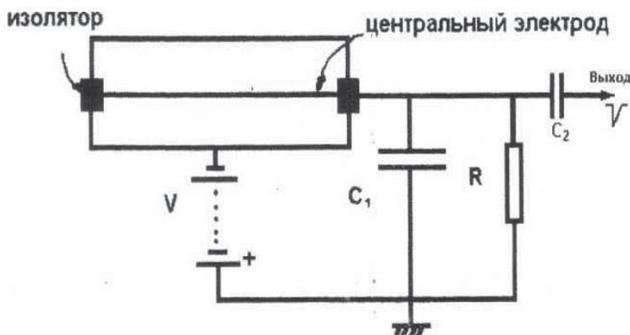


Рис.6 Принципиальная схема включения счетчика Гейгера-Мюллера

Трубка заполняется разреженным газом, в большинстве случаев используют благородные газы — аргон и неон. Между катодом и анодом создается напряжение порядка 400 В. Для большинства счетчиков, существует так называемое плато, которое лежит приблизительно от 360 до 460 В. В этом диапазоне небольшие колебания напряжения не влияют на скорость счета. Работа счетчика основана на ударной ионизации: частицы, попадая в счетчик, создают первичную ионизацию в его объёме. Электрическое поле между

катодом и анодом ускоряет электроны до энергий, при которых начинается ударная ионизация. Возникает электронно-фотонная лавина, и ток через счетчик резко возрастает. При этом образуется импульс напряжения, который подается в регистрирующее устройство. Чтобы счётчик смог регистрировать следующую попавшую в него частицу, лавинный разряд необходимо погасить. Гашение разряда обеспечивается электронной схемой, либо введением в рабочий объём специальных добавок (самогасящиеся счётчики).

Счетчики широко применяются для регистрации различного рода частиц. При этом эффективность регистрации, т.е. отношение числа зарегистрированных частиц к числу частиц, попавших в объем счетчика, сильно зависит от природы регистрируемого излучения. Для развития разряда в счетчике достаточно образования одной пары ионов. Заряженные частицы регистрируются с вероятностью, близкой к единице, т.е. эффективность близка к ста процентам.

Регистрация незаряженных частиц происходит по вторичным заряженным частицам, возникающим вследствие взаимодействия незаряженных первичных частиц с рабочим веществом детектора. Так например, при взаимодействии  $\gamma$ - кванта с рабочим веществом детектора (в основном с веществом катода), появляется заряженная частица - электрон (либо фотоэлектрон, либо комптоновский электрон, либо электрон-позитронная пара), который, попадая в рабочий объем детектора, заполненный газом, производит там ионизацию.

Вероятность появления свободного электрона и его попадание в рабочий объем счетчика зависят от толщины и материала катода, энергии  $\gamma$ - кванта. Поэтому в отличие от эффективности регистрации заряженных частиц эффективность регистрации  $\gamma$ - квантов в диапазоне энергий  $\varepsilon_\gamma \sim 0,1 - 3$  МэВ составляет всего от нескольких десятых до единиц процентов.

Конструкция установки позволяет проводить измерения с открытым счетчиком Гейгера-Мюллера (для этого он выдвигается из-под стального поглотителя), с использованием одного поглотителя (счетчик убран под стальной уголок) и с двумя поглотителями. Для этого закрепленный отдельно на стенде стальной уголок ставится на поглотитель, под которым расположен счетчик Гейгера-Мюллера.

#### 4. Порядок выполнения работы

4.1 Подключите экспериментальную установку к компьютеру с помощью USB-кабеля.

4.2 Запустите программу «Практикум по физике». Дождитесь появления

на экране окна сбора данных от датчика. Используя кнопки , произведите в полях «Период», «Множитель» и «Кол-во измерений» следующие настройки:

- «Период» = 10 с.
- «Множитель» = 1.
- «Кол-во измерений» = 400.

Для запуска измерений нажмите кнопку . В верхней части окна будут выводиться импульсы срабатывания счётчика при регистрации частицы космического излучения. В нижней части окна строится график числа отсчётов  $n$  (число частиц зарегистрированных за период  $t = 10$  с) от времени. Дождитесь окончания измерений.

4.3 По окончании измерений нажмите кнопку  - откроется окно обработки, в котором по результатам измерений строится гистограмма  $W_n=f(n)$ , где по оси абсцисс откладываются последовательные целые числа  $n$ , а по оси ординат - доля измерений, когда число отсчётов датчика равнялось  $n$ . Доля случаев  $W_n$ , характеризующая вероятность получить  $n$  отсчётов, вычисляется программой обработки по очевидной формуле:

$$W_n = \frac{\text{число измерений с отсчетом } n}{\text{полное число измерений } N}.$$

4.4 Откройте окно с таблицей собранных данных, нажав кнопку . В жёлтых ячейках в нижней части таблицы по формулам (3) и (4) автоматически вычисляется  $\bar{n}$  - среднее число импульсов счётчика за 10 секунд и  $\sigma_{\text{отд}}$  - среднеквадратичную ошибку отдельного измерения.

4.5 Убедитесь в справедливости формулы (5).

4.6 Определите процент случаев, когда отклонения от среднего значения превышают  $\sigma_{\text{отд}}$ ,  $2\sigma_{\text{отд}}$ ,  $3\sigma_{\text{отд}}$  и сравните найденную из опыта долю таких случаев с теоретическими оценками. При сравнении теоретических оценок с экспериментальными данными следует помнить, что при конечном, а тем более при небольшом числе опытов точного согласия между ними быть не может. Экспериментальные данные содержат в себе элемент случайности, которого нет в теоретических оценках. Согласия экспериментальных данных с теоретическими оценками следует ожидать лишь по порядку величины.

4.7 Постройте гистограмму распределения среднего числа отсчётов за 40 секунд. Для этого не нужно проводить новые измерения - можно разбить результаты уже проделанных измерений в порядке их получения на группы по 4. Для этого в окне регистрации в поле «множитель периода» введите цифру 4 (поле становится активным для редактирования при

нажатии кнопки  ). После этого откройте окно сбора данных (кнопка  ) - число строк таблицы здесь должно уменьшиться в 4 раза. Определите среднее число импульсов и среднеквадратичное отклонение для нового распределения.

4.8 Перейдите в окно обработки (кнопка  ), где для наглядности гистограммы распределения числа отсчётов за 10 и 40 секунд построены на одном графике. При этом для второго распределения цена деления по оси абсцисс увеличена в 4 раза, чтобы положения максимумов распределения совпадали.

4.9 Определите стандартное отклонение величины  $\bar{n}$ , используя всю совокупность измерений (по формуле (6)). Найдите относительную ошибку этого результата по первому равенству (7) и по последнему равенству (7). С какой точностью совпадают эти результаты? Насколько точно они должны совпадать?

4.10 Повторите пункты 2-9, находясь на расстоянии более 2-х метров от установки.

4.11 Повторите пункты 2-9, поместив счётчик Гейгера под стальной поглотитель.

4.12 Повторите пункты 2-9, со счётчиком Гейгера, установленным под двумя стальными поглотителями. Для этого освободите крепление съёмного поглотителя (стального уголка) и поместите его на поглотитель, установленный на стенде стационарно.

4.13 Сравните результаты четырёх серий измерений.

4.14 Объясните различие результатов.

### *5. Указания по технике безопасности*

5.1 Перед выполнением работы получите инструктаж у лаборанта.

5.2 Соблюдайте общие правила техники безопасности работы в лаборатории "Физика".

5.3 К работе с установкой допускаются лица, ознакомленные с её устройством и принципом действия.

5.4 Не допускайте попадания металлических предметов и воды на элементы высоковольтного источника во избежание его выхода из строя.

5.5 Запрещается вскрывать установку, а также подвергать её элементы установки ударным и силовым нагрузкам.

## *6. Контрольные вопросы*

- 6.1 Из чего состоит первичное космическое излучение?
- 6.2 Из чего состоит вторичное космическое излучение?
- 6.3 Как устроен счётчик Гейгера?
- 6.4 Как формируется сигнал в счётчике Гейгера?
- 6.5 Что такое радиационный фон?
- 6.6 Каковы пропорции техногенного и естественного радиационного фона?
- 6.7 Какова доля космического излучения в естественном радиационном фоне?
- 6.8 Что такое стандартное отклонение измеренной величины от истинного значения?

### Список литературы

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Книги 1-5. – М.: Наука. Физматлит. 2009.
2. Трофимова Т.И. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – 7-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2008.
3. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. Книги 1-3. – М.: Лань-Трейд. 2006.
4. Волькенштейн В.С. «Сборник задач по общему курсу физики» – 2005.
5. К.Б. Канн. Курс общей физики: Учебное пособие - М.: КУРС: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 360 с. Учебное пособие ЭБС Znanium.com (<http://znanium.com>).
6. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М: Энергоатомиздат, 1985.
7. Ляпидевский В.К. Методы детектирования излучений. М.: Энергоатомиздат, 1987.
8. Савельев И.В. Курс общей физики, т. 3.
9. С. В. Мурзин. Введение в физику космических лучей. Москва, М.: Атомиздат, 1979.
10. Сквайре Дж. Практическая физика. М.: Мир, 1970.

*Учебное издание*

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
по дисциплине ФИЗИКА

Разделы «Квантовая оптика», «Атомная физика»  
Курс 1, 2

*Печатается в авторской редакции.*

Подписано в печать 30.12.2022. Формат 60×90 1/16.

Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 3. Тираж 30 экз. Заказ № 1338.

РГГМУ, 192007, Санкт-Петербург, Воронежская ул., д. 79.

