

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

А. Н. ГОДЛЕВСКАЯ, В. Г. ШОЛОХ, А. А. ШАМЫНА

**ФИЗИКА АТОМА И ВВЕДЕНИЕ
В КВАНТОВУЮ МЕХАНИКУ:
РАЗВИТИЕ КВАНТОВЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ**

Практическое пособие

для студентов специальностей
6-05-0533-01 «Физика»,
6-05-0533-02 «Прикладная физика»,
6-05-0533-04 «Компьютерная физика»

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2025

УДК 539.18:530.145(076)
ББК 22.314.4я73
Г592

Рецензенты:

доктор технических наук А. А. Бойко,
кандидат физико-математических наук М. В. Буй

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»

Годлевская, А. Н.

Г592 Физика атома и введение в квантовую механику: развитие
квантовых представлений / А. Н. Годлевская, В. Г. Шолох,
А. А. Шамына ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель :
ГГУ им. Ф. Скорины, 2025. – 47 с.
ISBN 978-985-32-0133-8

Практическое пособие подготовлено в целях оказания помощи студентам в овладении базовыми знаниями, а также в подготовке к выполнению лабораторных работ по разделу «Развитие квантовых представлений» курса «Физика атома и введение в квантовую механику».

Адресовано студентам специальностей 6-05-0533-01 «Физика», 6-05-0533-02 «Прикладная физика», 6-05-0533-04 «Компьютерная физика».

УДК 539.18:530.145(076)
ББК 22.314.4я73

ISBN 978-985-32-0133-8

© Годлевская А. Н., Шолох В. Г.,
Шамына А. А., 2025

© Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Тема 1. Удельный заряд электрона и методы его определения.....	5
Лабораторная работа 1. Определение удельного заряда электрона..	18
Тема 2. Квантование энергии атомных систем в теории Бора.....	23
Лабораторная работа 2. Определение резонансного потенциала атома ртути (опыт Франка и Герца).....	33
Лабораторная работа 3. Изучение спектра испускания атомарного водорода, определение постоянной Ридберга и массы электрона...	39
Тема 3. Квантовое описание явления фотоэлектрического эффекта.	41
Лабораторная работа 4. Проверка уравнения Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.....	44
Литература.....	47

ВВЕДЕНИЕ

Физический практикум является одной из главных составляющих университетского образования по физике. В ходе выполнения лабораторных работ студенты осваивают современные методы измерения физических величин, исследуют физические явления, знакомятся с физическими приборами и приобретают навыки экспериментальной работы на натурных установках и в виртуальной лаборатории, получают экспериментальное подтверждение физических закономерностей, применяют на практике теоретические знания, полученные на лекционных и семинарских занятиях.

Для успешного проведения занятий физического практикума требуется не только хорошее оснащение учебной лаборатории современными приборами и оборудованием, но и их соответствующее методическое обеспечение. К сожалению, учебно-методическая литература по экспериментальному изучению основ физики атома в количестве, достаточном для обеспечения учебного процесса в соответствии с действующими учебными планами, отсутствует. Обновление учебно-методической базы необходимо и в связи с постановкой новых лабораторных работ, в том числе таких, выполнение которых связано с использованием компьютерных моделей физических явлений.

В практическом пособии приведены краткие теоретические сведения, необходимые студентам для самостоятельной подготовки к выполнению лабораторных работ, методические указания относительно порядка их выполнения и вопросы, предназначенные для самоконтроля. Дополнительную информацию, необходимую при оформлении отчёта о лабораторной работе и подготовке к его защите, студенты могут найти в литературе, список которой имеется в практическом пособии.

В данное издание включены соответствующие программе курса «Физика атома и введение в квантовую механику» лабораторные работы по разделам, связанным с доквантовым этапом развития науки.

ТЕМА 1. УДЕЛЬНЫЙ ЗАРЯД ЭЛЕКТРОНА И МЕТОДЫ ЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Теоретическое введение

Первые сведения о дискретности электрических зарядов были получены из законов электролиза, сформулированных М. Фарадеем в 1833–1834 годах. В 1897 году британским физиком Дж. Дж. Томсоном при изучении свойств катодных лучей был открыт электрон. В ходе экспериментов учёный оценил массу частиц, составляющих пучок катодных лучей, и сравнил её с массой, найденной на основе измерений отклонения катодного луча в магнитном поле. В результате вычислений было показано, что масса частиц, содержащихся в пучке катодных лучей, должна быть примерно в 1 000 раз меньше массы атома водорода. Кроме этого, было показано, что масса этих частиц была одинаковой вне зависимости от типа атома, в состав которого входит частица. Результаты опытных данных стали основанием для вывода о том, что катодные лучи состоят из очень легких, отрицательно заряженных частиц, которые, в частности, входят в состав атомов различных химических элементов. В результате исследования катодных лучей показано, что они являются потоком частиц с минимальным известным отрицательным зарядом, модуль которого $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Первоначально эти частицы называли «корпускулами», но в 1891 году ирландский физик Г. Стоней предложил называть их «электронами».

В 1897 году английский физик Дж. Дж. Томсон и его ученики при исследовании отклонения катодных лучей во внешних полях (магнитном и электрическом) осуществили более точные эксперименты по доказательству существования электрона и определению его *удельного заряда* $\frac{e}{m}$ (m – масса электрона). В 1909–1913 годах Р. Э. Милликенom в результате использования предложенного им метода экспериментально было получено прямое доказательство дискретности электрических зарядов и произведены первые точные определения величины заряда электрона.

Атомы всех известных химических элементов в первом приближении представляют как системы, состоящие из ядра, в состав которого входят протоны и нейтроны (после открытия этих частиц модель атома Резерфорда была уточнена Д. Д. Иваненко), и электронов, движущихся в поле ядра и образующих так называемые электронные оболочки. С развитием физики атомов и атомных систем было доказано, что электрон

является одним из важнейших элементов в структуре атомов и молекул, и его возможными физическими состояниями определяются оптические (в том числе спектральные) и химические свойства объектов атомной и молекулярной физики, а также физической химии.

Во многих уравнениях и формулах атомной физики содержится отношение модуля заряда электрона к его массе — удельный заряд электрона. Поэтому целесообразно уметь определять удельный заряд этой частицы в условиях одного опыта, что важно для уменьшения погрешностей определения как удельного заряда электрона, так и величин, при определении которых нужно учитывать его значение.

Имеет значение и тот методический аспект, что при экспериментальном изучении свойств элементарных частиц и макроскопических тел реализуются междисциплинарные связи между разделами физики (электричество и магнетизм, физика атома и атомных явлений, ядерная физика и физика элементарных частиц) и математическими дисциплинами. На основе анализа результатов соответствующих опытов имеется возможность:

- углубить знания об элементарных частицах и методах их изучения;
- создать основу для понимания различий в степени проявления физических эффектов для частиц одинакового заряда, но разной массы (например, эффекта Комптона для электрона и протона);
- развить представления о взаимосвязи микро- и макроскопических явлений;
- создать условия для развития умения анализировать, сравнивать и трактовать результаты, полученные экспериментально разными методами.

Наиболее распространёнными методами определения удельного заряда электрона являются основанные на движении электронов в однородных полях (электрическом и магнитном).

Сила, действующая на электрон во внешнем электромагнитном поле (сила Лоренца), определяется по формуле

$$\vec{F} = -e\vec{E} - e[\vec{v} \times \vec{B}], \quad (1.1)$$

где e — модуль заряда электрона;

$\vec{v}$ — его скорость;

$\vec{E}$ — напряженность электрического поля;

$\vec{B}$ — индукция магнитного поля.

При движении электрона во внешнем поле его скорость $\vec{v}$ изменяется под воздействием силы $\vec{F} = -e\vec{E}$ (в электрическом поле), $\vec{F} = -e[\vec{v} \times \vec{B}]$

(в магнитном поле) или силы (1.1) – при одновременном влиянии электрического и магнитного полей. На этом основаны многие экспериментальные методы определения удельного заряда электрона $\frac{e}{m}$.

Не только историческое значение имеют также методы определения удельного заряда электрона, основанные на явлении дисперсии рентгеновского излучения в веществе и на изучении различий в положении спектральных линий изотопов водорода.

Рассмотрим некоторые из методов.

Метод двух конденсаторов основан на отклонении электронов в переменном электрическом поле, создаваемом между обкладками двух конденсаторов, последовательно расположенных в электронно-лучевой трубке. Он подробно описан в учебном пособии Э. В. Шпольского (т. 1). Метод двух конденсаторов характеризуется высокой точностью (относительная погрешность определения значения $\frac{e}{m}$ этим методом порядка $\sim 10^{-3}$),

так как он является «нулевым» методом, при котором не производится измерений отклонения электронного пучка.

Метод Томсона. Удельный заряд электрона $\frac{e}{m}$ впервые был измерен Дж. Томсоном в 1897 году с применением разрядной трубки. Она представляла вакуумированную стеклянную колбу, внутри которой располагались коаксиальные катод K и анод A , зона управления электронным пучком и покрытый люминофором экран (рисунки 1.1, 1.2). Предварительно ускоренный напряжением U_A , электронный пучок выходил из отверстия в аноде, проходил между пластинами плоского конденсатора и попадал на люминофор экрана, обуславливая его свечение.

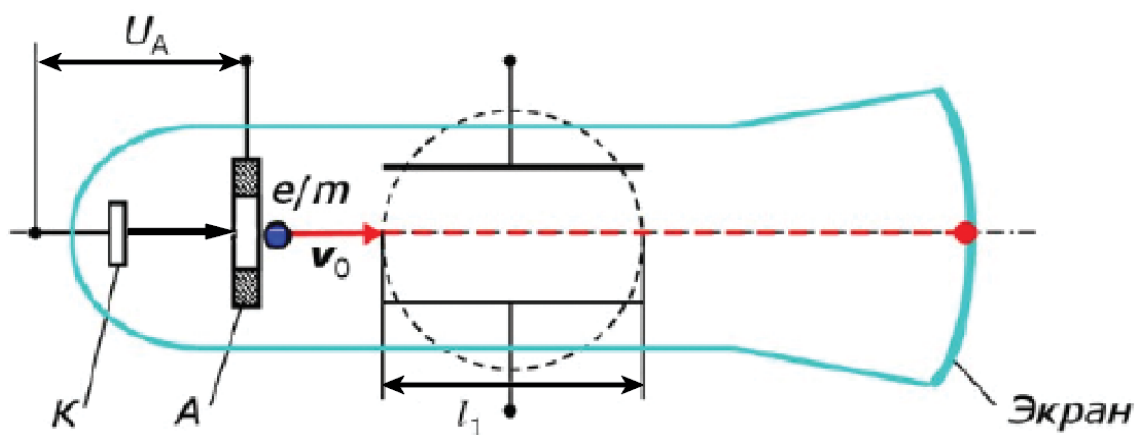


Рисунок 1.1 – Схема опыта Томсона по определению удельного заряда электрона

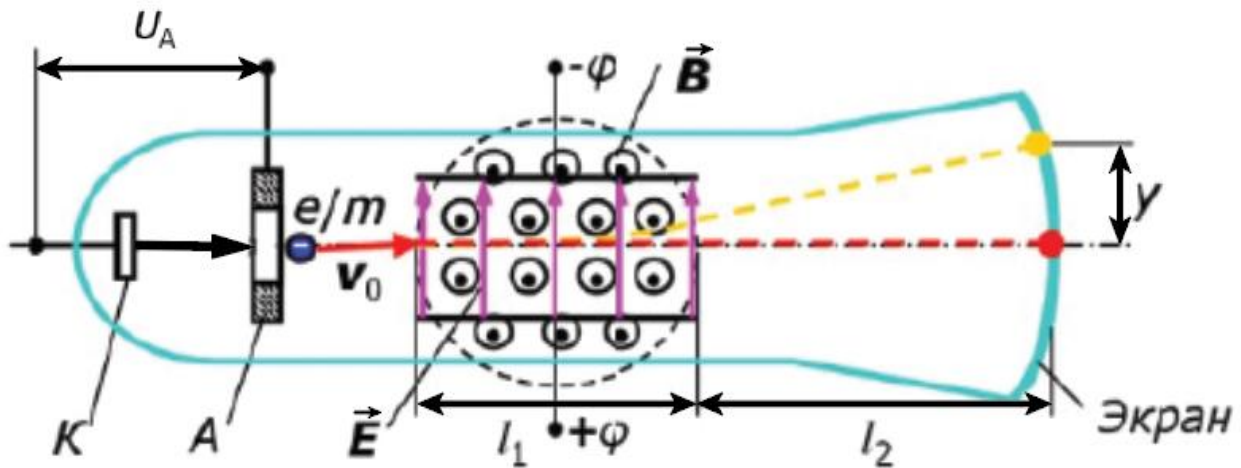


Рисунок 1.2 – Компенсация отклонения электронов при воздействии скрещенных электрического и магнитного полей

Кроме того, трубка помещалась между полюсами электромагнита, посредством которого при необходимости в зоне управления создавалось однородное магнитное поле, индукция которого перпендикулярна напряженности электрического поля в конденсаторе. Каждое из полей в отдельности обуславливало соответствующее смещение пучка электронов в вертикальном направлении.

В трубке Томсона на люминесцентном экране можно наблюдать вертикальное отклонение пучка электронов, движущихся после выхода из отверстия в аноде в горизонтальном направлении.

Отклонение пучка электронов в вертикальном направлении может быть обеспечено двумя способами:

- при воздействии электрического поля, напряженность которого направлена вдоль вертикали (рисунок 1.3);
- при воздействии магнитного поля, индукция которого направлена горизонтально, в направлении перпендикулярном направлению движения электрона при вхождении его в область электромагнитного воздействия (рисунок 1.4).

Получим формулы для определения удельного заряда электрона каждым из указанных способов.

В трубке Томсона в отсутствие отклоняющего поля электроны, проходящие через щель в аноде, движутся далее в горизонтальном направлении.

Если использовать катушки Гельмгольца, то магнитное поле, возникающее при протекании по ним электрического тока, обуславливает действие на электроны силы Лоренца и отклонение их в вертикальном направлении.

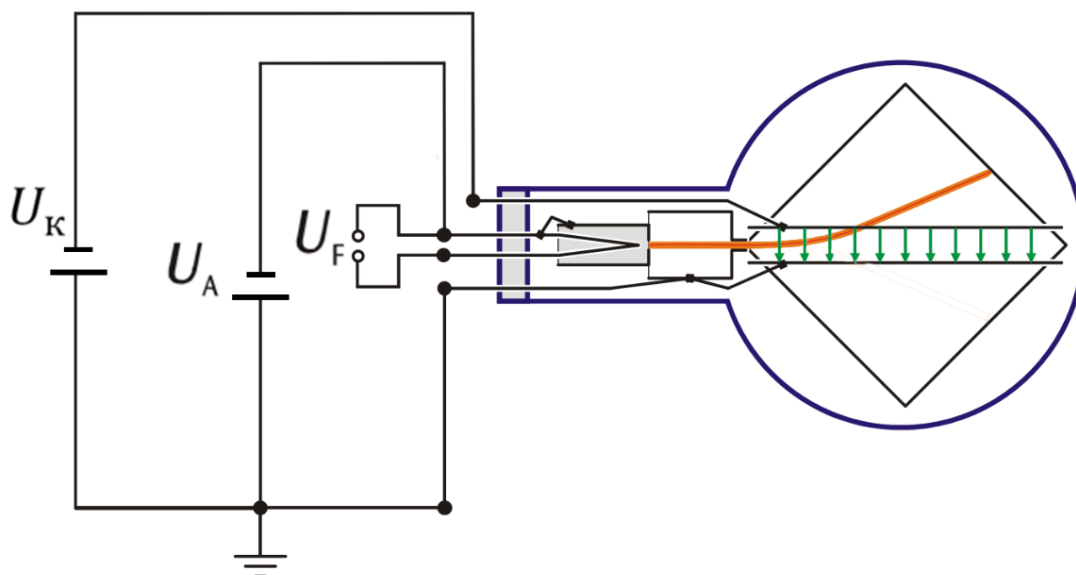


Рисунок 1.3 – Схема отклонения электронов в электрическом поле

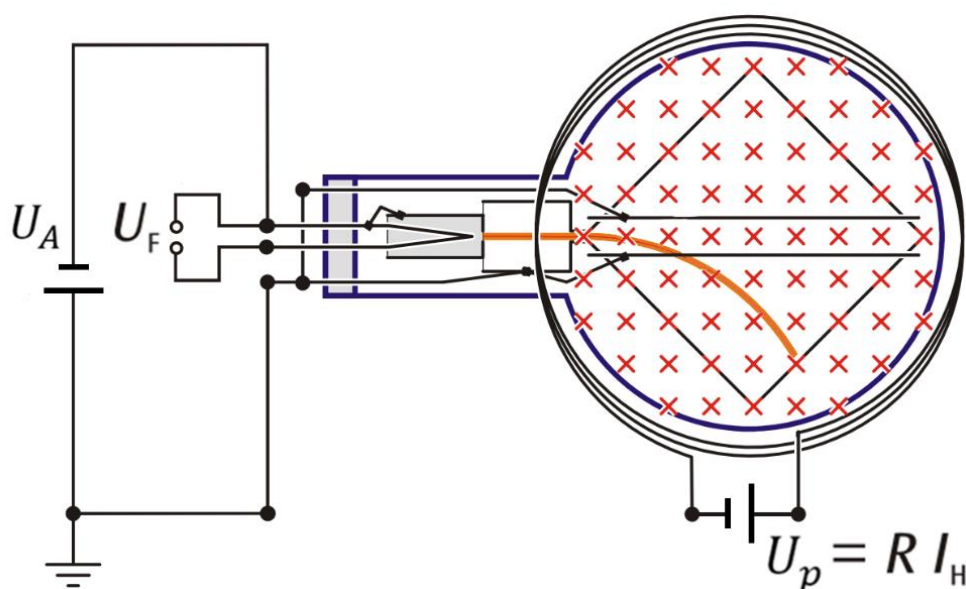


Рисунок 1.4 – Схема отклонения электронов в магнитном поле

Сила Лоренца $\vec{F}$, действующая на электрон, движущийся со скоростью $\vec{v}$ в магнитном поле, характеризуемом индукцией $\vec{B}$, определяется через векторное произведение этих величин (второе слагаемое в формуле (1.1)):

$$\vec{F} = -e \cdot [\vec{v} \times \vec{B}],$$

где e – модуль заряда электрона.

Так как угол между векторами скорости электрона и индукции магнитного поля равен $\frac{\pi}{2}$, то модуль силы Лоренца

$$F = e \cdot v \cdot B, \quad (1.2)$$

где v и B модуль скорости электрона и модуль индукции магнитного поля соответственно.

В описанных условиях сила Лоренца выполняет функции центростремительной силы, под действием которой электроны движутся по дуге окружности, и в соответствии со вторым законом Ньютона можно записать уравнение

$$m \cdot \frac{v^2}{r} = e \cdot v \cdot B, \quad (1.3)$$

где m – масса электрона;

r – радиус кривизны его траектории.

Скорость электронов зависит от величины ускоряющего напряжения U_A , созданного в пространстве между катодом и анодом трубки Томсона. Приравнивая работу электрического поля по перемещению электрона приобретаемой им кинетической энергии и выражая из полученного равенства модуль скорости электрона, получим

$$v = \sqrt{\frac{2eU_A}{m}}. \quad (1.4)$$

Комбинируя выражения (1.3) и (1.4), легко получить выражение для удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_A}{(B \cdot r)^2}. \quad (1.5)$$

Анализируя формулу (1.5), видим, что, измеряя радиус кривизны траектории электрона, можно определить удельный заряд электрона, если известны модуль индукции однородного магнитного поля B и анодное напряжение U_A .

Модуль индукции магнитного поля, создаваемого парой катушек Гельмгольца, прямо пропорционален силе тока I , текущего через каждую из катушек:

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\mu_0 \cdot n}{R} \cdot I_N = k \cdot I, \quad (1.6)$$

где $k = 4,2 \text{ мТ/А}$;

$n = 320$ – число витков в каждой катушке;

$R = 68 \text{ мм}$ – радиус катушки.

Силу тока, текущего в катушках Гельмгольца, можно определить по закону Ома, зная подаваемое на них напряжение U_p и сопротивление катушек ρ :

$$I = \frac{U_p}{\rho}. \quad (1.7)$$

Радиус r кривизны траектории электрона можно определить, зная координаты точки A , в которой электронный луч выходит за пределы экрана, и пользуясь чертежом, построенным на рисунке 1.5.

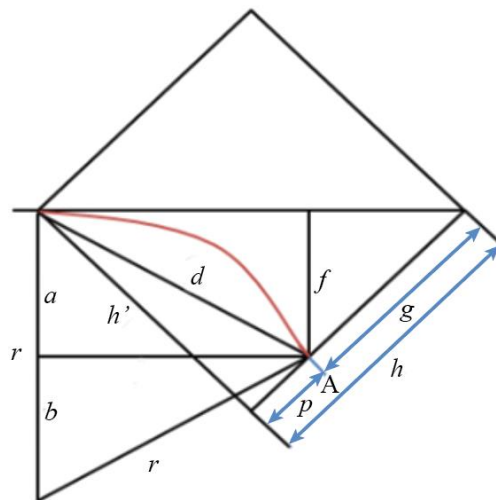


Рисунок 1.5 – Геометрическая схема для определения радиуса кривизны траектории электрона, движущегося в поперечном магнитном поле

В соответствии с теоремой Пифагора

$$r^2 = c^2 + b^2 = c^2 + (r - a)^2 = c^2 + r^2 - 2ra + a^2,$$

откуда получаем соотношение

$$r = \frac{c^2 + a^2}{2a}. \quad (1.8)$$

Применяя теорему Пифагора к другим прямоугольным треугольникам и учитывая их свойства при условии, что $h = h'$, можно записать

$$c^2 + a^2 = d^2 = h'^2 + p^2,$$

$$a^2 = f^2 = \frac{1}{2}g^2 = \frac{1}{2}(h - p)^2.$$

Комбинируя последние два выражения с формулой (1.8), получим выражение для определения радиуса кривизны траектории электрона

$$r = \frac{(h^2 + p^2)}{\sqrt{2}(h - p)}. \quad (1.9)$$

Комбинируя выражения (1.5)–(1.7) и (1.9), получим формулу, по которой следует вычислять значение удельного заряда электрона в предстоящей лабораторной работе:

$$\frac{e}{m} = 4U_A \left(\frac{\rho(h - p)}{kU_p(h^2 + p^2)} \right)^2. \quad (1.10)$$

Таким образом, для определения удельного заряда электрона методом отклонения электронного пучка в магнитном поле нужно измерить ускоряющее напряжение U_A , напряжение U_p , подаваемое на катушки для создания магнитного поля, а также длину отрезка p по шкале экрана, помещенного в трубке Томсона, а также знать параметры катушек и длину h стороны квадрата, очерчивающего экран.

Если причиной отклонения электронного пучка является действие электрического поля плоского конденсатора, расположенного за анодом, то внутри конденсатора на электрон действует сила, модуль которой $F = e \cdot E$ прямо пропорционален модулю напряженности электрического поля E . Это отклонение также происходит в вертикальном направлении (рисунок 1.3). Электрическое поле можно отрегулировать так, чтобы результирующая силы электрического воздействия и силы Лоренца была равна нулю (эти силы должны быть равны по величине и направлены противоположно друг другу):

$$-e \cdot E + e \cdot v \cdot B = 0. \quad (1.11)$$

При выполнении этого условия действие электрического поля компенсируется действием магнитного поля, и электрон не отклоняется от диагонали квадрата (рисунок 1.2). Из уравнения (1.11) легко определить скорость каждого электрона:

$$v = \frac{E}{B}. \quad (1.12)$$

Устройство, в котором реализовано соотношение (1.12) для характеристик электрического и магнитного полей, и отклонения пучка электронов не происходит, иногда называют *фильтром скорости*.

Напряженность электрического поля можно выразить через напряжение U_k и расстояние d между пластинами конденсатора:

$$E = \frac{U_k}{d}. \quad (1.13)$$

Комбинируя теперь формулы (1.4), (1.6), (1.7), (1.12) и (1.13), получим формулу для определения удельного заряда электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{1}{2 \cdot U_A} \cdot \left(\frac{E}{B} \right)^2 = \frac{1}{2U_A} \cdot \left(\frac{U_k \rho}{kU_p d} \right)^2. \quad (1.14)$$

Следовательно, для определения удельного заряда электрона при использовании трубки Томсона в режиме фильтра скорости следует измерить ускоряющее электроны анодное напряжение U_A , напряжение между обкладками конденсатора U_k , напряжение, подаваемое на катушки Гельмгольца U_p , а также знать сопротивление катушек ρ и расстояние между обкладками конденсатора d .

Спектроскопический метод определения удельного заряда электрона основан на явлении изотопического смещения положения спектральных линий атома водорода, которое обусловлено зависимостью постоянной Ридберга от массы ядра

$$R = \frac{R_\infty}{1 + \frac{m}{M}}, \quad (1.15)$$

где R_∞ – постоянная Ридберга, вычисляемая в предположении о том, что электрон движется в поле бесконечно тяжелого (неподвижного) ядра;

m – масса покоя электрона;

M – масса ядра.

Различием масс ядер водорода (протия) M_H и тяжелого водорода (дейтерия) M_D обусловлено то, что длины волн λ излучения, сопровождающего переход этих атомов между стационарными состояниями, которые характеризуются одними и теми же квантовыми числами n и m , неодинаковы:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (1.16)$$

Следуя процедуре, подробно описанной в учебном пособии Э. В. Шпольского «Атомная физика» (т. 1), несложно получить формулу для определения удельного заряда электрона

$$\frac{e}{m} = F \cdot \frac{R_H}{(R_D - R_H)H} \cdot \frac{D - H}{D}, \quad (1.17)$$

где $F = 96485,34$ Кл/моль – число Фарадея;

$D = 2$ а.е.м. и $H = 1$ а.е.м. – атомные массы дейтерия и водорода соответственно.

В вышеназванном учебном пособии можно найти и описание метода определения удельного заряда электрона, основанного на дисперсии рентгеновского излучения в веществе.

Вопросы для самоконтроля

1. Какую физическую величину называют удельным зарядом электрона?
2. Чем обусловлена необходимость поиска методов определения удельного заряда в условиях одного опыта?
3. В чем сущность методов определения удельного заряда электрона, реализуемых с использованием:
 - отклонения электронов в магнитном поле;
 - отклонения электронов в электрическом поле;
 - фильтра скорости;
 - изотопического смещения спектральных линий;
 - дисперсии рентгеновского излучения в веществе?

4. Получите формулу для определения удельного заряда электрона с использованием:

- трубки Томсона с отклонением электронного пучка магнитным полем катушек Гельмгольца;
- трубки Томсона и катушек Гельмгольца в режиме фильтра скорости;
- изотопического смещения спектральных линий;
- дисперсии рентгеновского излучения в веществе.

5. Почему полярность напряжения, подаваемого на катушки Гельмгольца и на конденсатор, имеет значение при реализации режима фильтра скорости?

Описание экспериментальной установки для определения удельного заряда электрона с использованием трубки Томсона и катушек Гельмгольца

Лабораторный комплекс содержит следующие элементы:

- трубку Томсона модели S U18555;
- держатель электровакуумных приборов модели S U185002;
- пару катушек Гельмгольца модели S U185051;
- высоковольтный источник питания с напряжением 5кВ (230 В, 50/60 Гц) U33010-230;
- источник питания постоянного тока с напряжением 0–500 В (230 В, 50/60 Гц) U33000-230;
- набор из 15 безопасных соединительных проводов длиной 75 см, U138021.

Трубка Томсона и катушки Гельмгольца установлены в держателях на общем основании так, чтобы векторы напряженности электрического поля, создаваемого между обкладками конденсатора, и индукции магнитного поля, возникающего при протекании электрического тока по катушкам Гельмгольца, были взаимно перпендикулярны (рисунок 1.6). В трубке Томсона установлен также квадратный экран (стороны очерченного квадрата имеют длину $h = 80$ мм). При подаче ускоряющего напряжения на анод электронно-лучевой трубки электроны, эмиттируемые нагретым катодом, в отсутствие электрического тока в катушках и напряжения на конденсаторе летят прямолинейно вдоль диагонали квадрата. При определенных условиях атомы инертного газа, создающего невысокое парциальное давление в трубке, в результате столкновений с электронами переходят в возбужденные состояния, а возвращаясь в нормальное состояние, испускают голубоватый свет. Вследствие этого траектория электронов становится видимой.

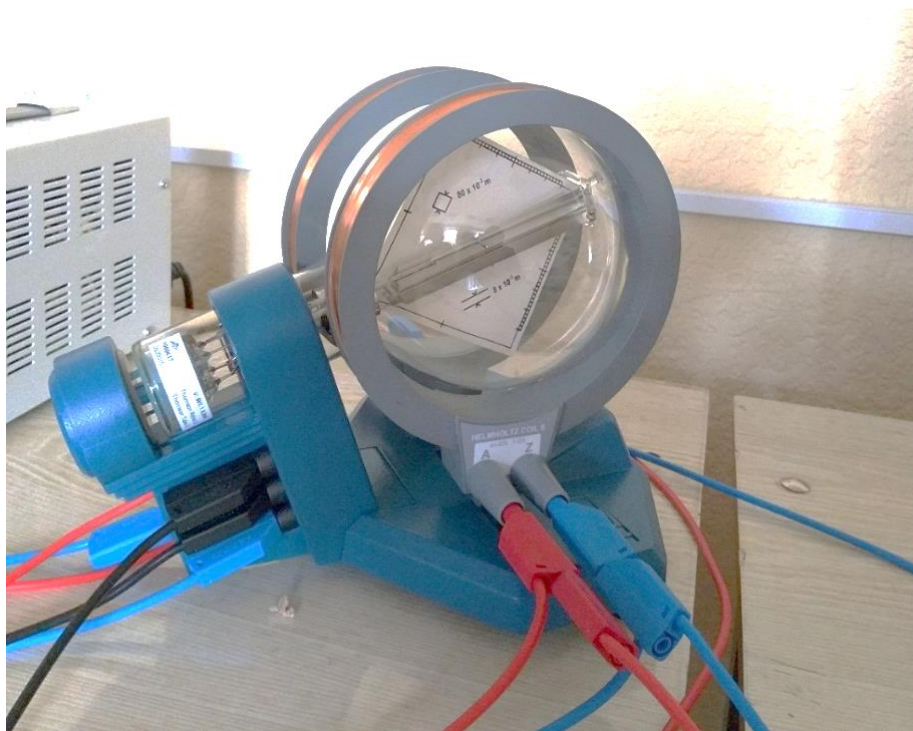


Рисунок 1.6 – Основной узел экспериментальной установки: трубка Томсона, установленная между катушками Гельмгольца

При подаче напряжения на катушки Гельмгольца или на конденсатор электронный пучок отклоняется от диагонали квадрата. При этом направление смещения зависит соответственно от направления тока в катушках и полярности напряжения на конденсаторе.

Две катушки Гельмгольца диаметром 136 мм установлены коаксиально друг другу, симметрично относительно продольной оси симметрии трубки Томсона. Расстояние между центрами катушек равно их радиусу. Толщина катушек значительно меньше их среднего диаметра. При таком расположении катушек индукция магнитного поля во всем пространстве между катушками практически одинакова. Вектор индукции магнитного поля катушек Гельмгольца направлен вдоль их общей оси к наблюдателю или от наблюдателя – в зависимости от направления тока в катушках. Электронно-лучевая трубка располагается в центральной области поля, создаваемого этими катушками.

Ускоряющее напряжение между катодом и анодом электронно-лучевой трубки создается с использованием высоковольтного источника питания (рисунок 1.7), обеспечивающего возможность плавной регулировки напряжения, снимаемого с высоковольтного выхода, в диапазоне $(0 \div 5)$ кВ при максимальной силе тока 2 мА. Регулировка напряжения осуществляется посредством регулятора, расположенного справа на передней панели источника питания.



Рисунок 1.7 – Внешний вид
высоковольтного источника питания U33010-230

При использовании низковольтного выхода источника питания на катод электронной трубки подается напряжение 6,3 В, а максимальная допустимая сила тока накала для катода не должна превышать 3 А.

Высоковольтный источник питания U33010-230 рассчитан на подключение к внешней электрической сети напряжением 230 В ($\pm 10\%$).

Источник питания, предназначенный для создания магнитного поля при протекании тока по катушкам Гельмгольца и для создания электрического поля между обкладками конденсатора, изображен на рисунке 1.8. В зависимости от используемого выхода напряжение, подаваемое к потребителю, можно регулировать в четырех диапазонах: (0–500) В; (0–50) В; (0–8) В; (0–12) В.

В лабораторной работе для питания катушек Гельмгольца напряжение U_p следует подавать с выхода (0–12) В, для создания напряжения U_k между пластинами конденсатора – с выхода (0–500) В. Плавная регулировка и установка требуемого значения напряжения производится посредством регуляторов, расположенных над гнездами выходов, и контролируется по шкалам находящихся над ними вольтметров.

Источник питания постоянного тока U33000-230 с напряжением (0–500) В можно подключать к внешней электрической сети напряжением 230 В ($\pm 10\%$) и частотой 50/60 Гц.

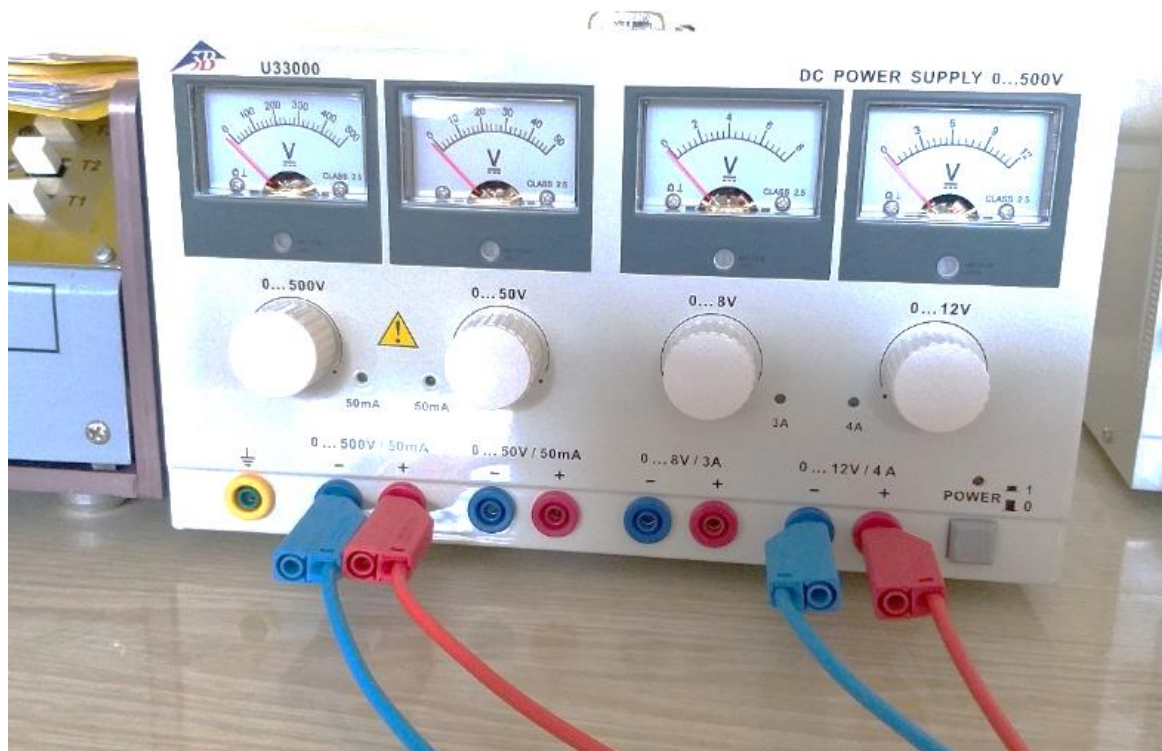


Рисунок 1.8 – Панель управления источника питания постоянного тока U33000-230

На всех узлах экспериментальной установки подлежащие соединению контактные гнезда и соединительные провода окрашены в одинаковый цвет. Полярность напряжения обозначена знаками «плюс» и «минус» над гнездами панели управления источников напряжения и контактных наконечниках (штекерах) соединительных проводов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы: изучить методы определения удельного заряда электрона $\frac{e}{m}$; определить значение $\frac{e}{m}$ методом отклонения электронного луча поперечным магнитным полем, методом фильтра скорости и спектроскопическим методом.

Приборы и принадлежности: лабораторный комплекс, содержащий трубку Томсона и катушки Гельмгольца, компьютерная модель спектра изотопов атома водорода.

Задания для экспериментальных исследований

Задание 1. Подготовка к проведению исследований

1. Ознакомьтесь со структурной схемой и натурными элементами лабораторного комплекса.

2. Определите пределы измерения и цену деления вольтметров, используемых для измерения напряжения между катодом и анодом трубки Томсона U_A ; напряжения, подаваемого на катушки Гельмгольца, U_p ; напряжения, создаваемого между обкладками конденсатора, U_k , а также цену деления шкалы, нанесенной на экран, расположенный в трубке Томсона.

3. Перед подключением приборов в сеть убедитесь, что все рукоятки регулирования находятся в крайнем левом положении.

4. Включите все компоненты установки в сеть.

5. Выждите 5 минут, которые необходимы для нагрева катода трубки Томсона.

6. Установите одно из рекомендуемых значений анодного напряжения (рекомендуемый диапазон для его выбора $U_A = 1,6\text{--}2,4$ кВ); в трубке Томсона, в пространстве между пластинами конденсатора наблюдайте след испускаемого пучка электронов.

Задание 2. Исследование отклонения электронного пучка магнитным полем

1. Задайте одно из рекомендуемых значений напряжения на катушках Гельмгольца (рекомендуемый диапазон для выбора $U_p = 1,6\text{--}3,0$ В). Произведите необходимые измерения, записывая их в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты измерений при определении удельного заряда электрона методом отклонения электронного пучка в магнитном поле

Значения постоянных параметров: $\rho = 6$ Ом, $k = 4,2 \cdot 10^{-3}$ Тл/А, $h = 80$ мм					
U_A , кВ	U_p , В	I , А	B , Тл	ρ , м	$\frac{e}{m} \cdot 10^{11}$, Кл/кг
и т. д.					

2. Используя различные комбинации рекомендуемых значений анодного напряжения и силы тока в катушках, исследуйте отклонение электронного пучка магнитным полем. Произведите необходимые измерения, заполните таблицу 1.1.

3. С использованием результатов измерений определите значения удельного заряда электрона по формуле (1.10), найдите его среднее значение. Оцените погрешности измерений. Сравните найденное значение удельного заряда электрона с табличным значением этой величины. Сформулируйте вывод.

Задание 3. Определение удельного заряда электрона при работе установки в режиме фильтра скорости

1. Отключите от источника питания катушки Гельмгольца (для этого достаточно установить на «ноль» напряжение на соответствующем вольтметре). Исследуйте отклонение электронного пучка электрическим полем. Убедитесь в правильной полярности подключения конденсатора к источнику напряжения, необходимой для реализации режима фильтра скорости.

2. Реализуйте работу установки в режиме фильтра скорости. Запишите значения измеряемых величин в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты измерения при определении удельного заряда электрона в режиме фильтра скорости

Значения постоянных параметров: $\rho = 6 \text{ Ом}$, $k = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ Тл/А}$, $d = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$				
U_A , кВ	U_p , В	I , А	U_k , В	$\frac{e}{m} \cdot 10^{11}$, Кл/кг
и т. д.				

3. Определите значение удельного заряда электрона в этих условиях по формуле (1.14). Вычислите среднее значение удельного заряда электрона. Оцените погрешности измерений. Сравните полученные результаты с табличным значением удельного заряда электрона.

Задание 4. Определение удельного заряда электрона спектроскопическим методом

Воспользуйтесь компьютерной программой, посредством которой реализуется моделирование спектра излучения смеси, состоящей из трёх изотопов атомарного водорода: протия, дейтерия и трития. В программе предполагается соотношение их концентраций 4:2:1 соответственно. На рисунке 1.9 показан общий вид окон, отображаемых на мониторе при работе с программой. В черном окне виден фрагмент спектра, визуально наблюдаемого посредством окуляра виртуального спектрометра. Этот участок содержит 4 первые спектральные линии атомарного водорода, соответствующие серии Бальмера: линии α , β , γ и δ .

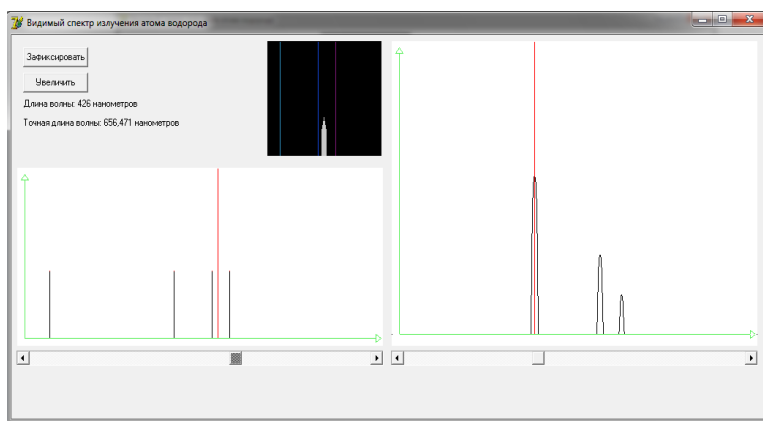


Рисунок 1.9 – Общий вид окон, отображаемых на мониторе при выполнении виртуальной лабораторной работы

Порядок выполнения работы

1. Линию α выведите к указателю в поле зрения спектрометра (в темном квадрате), нажмите кнопку «Зафиксировать». Повторите эти действия относительно линий β , γ и δ . В результате схематическое изображение этого участка спектра отобразится в промежуточном окне, расположенном слева внизу.

2. Перейдите к измерениям в условиях высокой разрешающей способности виртуального спектрального прибора. Для просмотра изотопического смещения каждой спектральной линии в режиме высокого спектрального разрешения поместите указатель в промежуточном окне на нужную линию и нажмите кнопку «Увеличить». При этом узкий участок спектра, содержащий одну из линий (α , β , γ или δ), отобразится в правом окне с разрешением в тысячную долю нанометра, при котором различены спектральные линии протия, дейтерия и трития.

3. С точностью до 0,001 нм измерьте длины волны компонентов α -линии, соответствующих протию и дейтерию. Для этого установите указатель на максимум интенсивности в изображении нужной линии. При этом «точная длина волны» отобразится в верхней части левого окна. Результаты измерений внесите в таблицу 1.3.

4. Пользуясь формулой Бальмера $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$, где $n = 3$, вычислите значения постоянной Ридберга для протия $(R_H)_1$ и дейтерия $(R_D)_1$ и погрешности их определения $(\Delta R_H)_1$ и $(\Delta R_D)_1$. Внесите в таблицу 1.3 полученные значения $(R_H)_1$ и $(R_D)_1$.

Таблица 1.3 – Результаты виртуального спектрального эксперимента

Квантовое число n	Обозначение линии	Длина волны в спектре атома λ , нм		Постоянная Ридберга		$\frac{e}{m}$, Кл/кг	$\left(\overline{\frac{e}{m}} \right)$, Кл/кг	$\Delta \left(\frac{e}{m} \right)_i$ Кл/кг
		водорода	дейтерия	R_H , м^{-1}	R_D , м^{-1}			
3	α							
4	β							
5	γ							
6	δ							

5. По формуле (1.17) вычислите удельный заряд электрона $\left(\frac{e}{m} \right)_1$ и погрешность найденного значения $\Delta \left(\frac{e}{m} \right)_1$. Результаты вычислений внесите в таблицу 1.3.

6. Выполните действия, описанные в пп. 3–5, в отношении линий β , γ и δ . Внесите полученные результаты в таблицу 1.3.

7. Вычислите среднее значение $\left(\overline{\frac{e}{m}} \right) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \left(\frac{e}{m} \right)_i$ и запишите его в таблицу 1.3.

8. Представьте результаты в форме $\frac{e}{m} = \left(\overline{\frac{e}{m}} \right) \pm \left| \Delta \left(\frac{e}{m} \right) \right|_{i_{\max}}$. Сравните результаты, полученные в задании 3, с табличными значениями удельного заряда электрона. Сформулируйте выводы.

9. Составьте отчет о работе.

ТЕМА 2. КВАНТОВАНИЕ ЭНЕРГИИ АТОМНЫХ СИСТЕМ В ТЕОРИИ БОРА

Теоретическое введение

В результате изучения явлений микромира на рубеже XIX и XX столетий было предложено несколько моделей строения атома. Одной из первых в 1904 году была предложена модель атома Дж. Дж. Томсона (*капельная модель*). В соответствии с этой моделью положительное электричество равномерно распределено по объему шара, диаметр которого $\sim 10^{-10}$ м, а электроны внедрены в него. Испускание электромагнитного излучения атомами происходит в результате колебаний электронов около их положений равновесия.

На основе результатов, полученных Э. Резерфордом в экспериментах по рассеянию α -частиц, им предложена *ядерная модель* атома (модель Резерфорда), в соответствии с которой атом состоит из положительно заряженного ядра диаметром $\sim 10^{-15}$ м, в котором сосредоточена почти вся масса атома ($\sim 99,95$ %), и электронов, движущихся относительно ядра.

Попытки объяснить процесс испускания электромагнитного излучения атомами в рамках классической электродинамики оказались безуспешными. В соответствии с классической теорией электроны движутся в атоме с ускорением и поэтому излучают энергию в виде электромагнитных волн. При этом частота вращения электронов относительно ядра непрерывно увеличивается, и электрон приближается к ядру. В итоге испускаемое излучение должно характеризоваться непрерывным спектром, электроны – «падать» на ядро, и атом как мельчайшая частица вещества не должен быть стабильным.

Однако экспериментально показано, что атомы являются стабильными системами, а их спектры испускания и поглощения имеют линейчатый характер, что противоречит выводам классической теории.

Для объяснения экспериментальных закономерностей потребовалась новая теория, которая впоследствии была разработана в квантовой механике. Промежуточным этапом моделирования внутриатомных явлений стала теория Н. Бора для водородоподобных атомных систем. В основу теоретического описания свойств атомных систем Н. Бор положил квантовые представления, сформулированные в 1913 году в виде квантовых постулатов (*постулаты Бора*):

1. Атомные системы могут длительно пребывать только в стационарных состояниях. Находясь в стационарных состояниях, атом не испускает и не поглощает энергии, несмотря на происходящее в нем движение заряженных частиц. Значения энергии, соответствующие этим состояниям, образуют дискретный ряд $E_1, E_2, \dots, E_n, \dots$.

2. При переходе из одного стационарного состояния в другое атомы испускают или поглощают излучение только строго определенной частоты. Частота ν излучения, испускаемого или поглощаемого при переходе атома из состояния с энергией E_k в состояние с энергией E_n , определяется из условия частот Бора:

$$\nu = \frac{|E_k - E_n|}{h}, \quad (2.1)$$

где h – постоянная Планка.

Стационарное состояние, в котором атом характеризуется наименьшей энергией, называют *основным* (нормальным) состоянием. В результате поглощения энергии атом может перейти в стационарное состояние с большей энергией – в *возбужденное* состояние. Возбуждение атомов можно произвести различными способами, например, в результате поглощения излучения или неупругих столкновений с другими частицами.

Используя постулаты Бора, противоречащие положениям классической теории, можно объяснить экспериментальные факты: стабильность атомных систем и линейчатый характер их спектров.

Квантовые постулаты Бора экспериментально подтверждены, в частности, в опытах Франка и Герца (1913 г.).

Основной частью установки является газоразрядная лампа (рисунок 2.1), давление в которой ~ 15 гПа (в опытах Франка и Герца лампа была заполнена парами ртути). В лампе размещены подогреваемый катод, являющийся эмиттером электронов, сетка C и анод A . По существу, эта часть установки является ламповым триодом. Для нагрева катода K на него подают напряжение U_f . Между сеткой C и катодом K создается ускоряющая разность потенциалов $U_{\max}$, а между анодом A и сеткой C – задерживающая разность потенциалов U_e .

Величина напряжений $U_{\max}$ и U_e может плавно меняться. Кроме того, в стеклянном баллоне лампы имеется отводок с небольшим количеством ртути, которая при нагревании испаряется. Условия испарения таковы, чтобы обеспечить давление паров ~ 15 гПа.

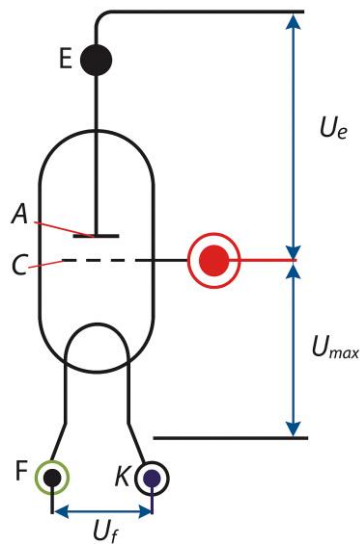


Рисунок 2.1 – Схематическое изображение устройства газоразрядной лампы, используемой в опыте Франка и Герца

В опыте изучались:

– зависимость силы тока в анодной цепи I_A от ускоряющего потенциала $\frac{U_{\max}}{e}$ при постоянном значении U_e – *анодная характеристика*,

$$I_A = f\left(\frac{U_{\max}}{e}\right);$$

– зависимость силы тока от задерживающего потенциала $\frac{U_e}{e}$ при постоянном значении $U_{\max}$ – *характеристика задержки* $I_A = f\left(\frac{U_e}{e}\right)$.

Вид анодной характеристики изображен на рисунке 2.2.

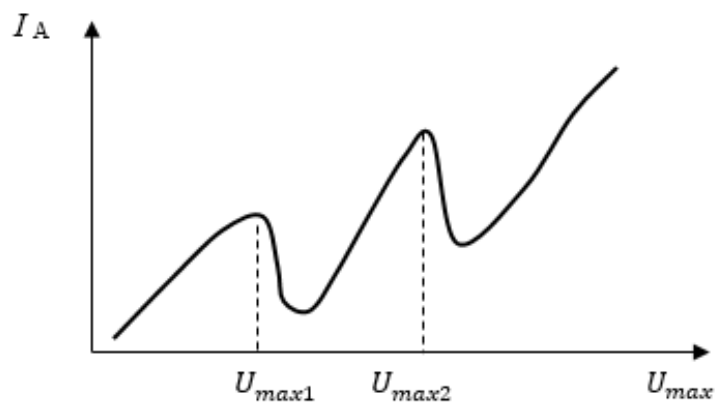


Рисунок 2.2 – Зависимость силы анодного тока от ускоряющего потенциала

При увеличении ускоряющего напряжения $U_{\max}$ до значения $U_{\max1}$ сила тока растёт. При этом электроны испытывают упругие соударения с атомами газа, заполняющего лампу. Для паров ртути при разности потенциалов между анодом и катодом равной $U_{\max1}$ наблюдается резкое уменьшение силы тока, а при дальнейшем увеличении напряжения до $U_{\max2}$ сила тока снова растёт. При напряжении $U_{\max2}$ опять происходит резкое падение силы тока и т. д. Таким образом, на графике зависимости $I_A = f(U_{\max})$ от ускоряющего напряжения имеется несколько максимумов, отстоящих друг от друга на 4,9 В. Так как в цепи имеется контактная разность потенциалов, то первый максимум обнаруживается при напряжении, отличном от 4,9 В.

Описанный характер зависимости $I_A = f(U_{\max})$ обусловлен тем, что вследствие дискретности спектра энергии атомы могут поглощать энергию только определенными порциями $E_2 - E_1$, $E_3 - E_2$ и т. д., где $E_1, E_2, E_3, \dots$ – энергия атома в первом, втором, третьем и последующих стационарных состояниях. Пока энергия электронов остается меньше энергии, необходимой для перевода атома из основного состояния (с энергией E_1) в первое возбужденное состояние (с энергией E_2), их соударения носят упругий характер. Когда же энергия электронов удовлетворяет условию $eU_{\max} > E_2 - E_1$, их соударения с атомами сопровождаются передачей энергии атомам (неупругие соударения). Если энергии, оставшейся у электрона после столкновения с атомом, недостаточно для преодоления тормозящего поля U_e , электрон задерживается сеткой, и сила тока в анодной цепи резко уменьшается. Следовательно, энергия 4,9 эВ для атомов ртути равна разности энергий атома в первом возбужденном и основном состояниях: $E_2 - E_1$. Отношение $\phi_1 = \frac{E_2 - E_1}{e}$ называют *первым потенциалом возбуждения (резонансным потенциалом)*.

Значение первого потенциала возбуждения различно у разных атомов. Например, у атома ртути $\phi_1 = 4,9$ В, у атома неона $\phi_1 = 16,6$ В, у атома гелия $\phi_1 = 21,6$ В.

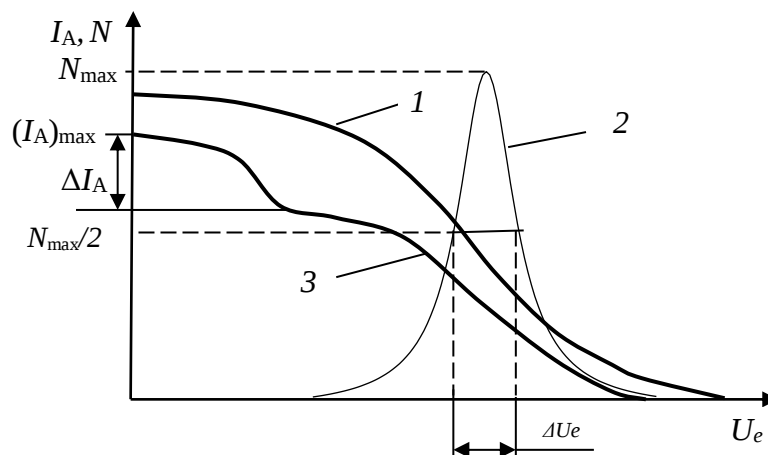
Проанализируем характеристику задержки $I_A = f(U_e)$. При фиксированном значении $U_{\max} < U_{\max1}$ в лампе происходят только упругие соударения электронов с атомами ртути, и характеристика задержки имеет вид, представленный на рисунке 2.3 (график 1). Так как электроны характеризуются некоторым распределением по скоростям, то при увеличении тормозящего потенциала U_e уменьшается число электронов, достигающих

анода, поэтому сила анодного тока I_A плавно уменьшается. Так как функция распределения характеризует число частиц ΔN , энергии которых заключены в интервале ΔE (от E до $E + \Delta E$), то для нахождения функции распределения электронов по энергии необходимо произвести дифференцирование характеристики задержки:

$$f(E) = \frac{dN}{dE} = \left| \frac{dI_A}{dU_e} \right|. \quad (2.2)$$

Здесь учтено, что $dI_A \sim dN$ и $dU_e \sim dE$.

Для характеристики функции распределения $N(U_e)$ используют величину ΔU_e , называемую шириной функции распределения и определяемую как ширина контура кривой $N(U_e)$ на уровне $N(U_e) = \frac{1}{2} [N(U_e)]_{\max}$ (рисунок 2.3, график 2).



$$I_A = f(U_e) \text{ при } U_e < U_{\max 1}; \quad 2 - I_A = f(U_e) \text{ при } U_e > U_{\max 1}; \quad 3 - N(V_3)$$

Рисунок 2.3 – Характеристика задержки газонаполненной электронной лампы и функция $N(V_3)$ распределения электронов по энергиям при $U_e < U_{\max 1}$

При $U_e \geq U_{\max 1}$ на графике зависимости $I_A(U_e)$ появляется ступенька (рисунок 2.3, график 3), так как часть электронов, испытывая неупругие соударения с атомами, теряет некоторую долю энергии и не достигает анода. Изменение силы тока ΔI_A прямо пропорционально доле электронов, испытывающих неупругие соударения с атомами.

В результате опытов Франка и Герца стало известно, что:

1. При скорости электронов, меньшей некоторого критического значения, соударения электронов с атомами происходят упруго: электрон не передает атому энергии, в результате взаимодействия изменяется только направление движения взаимодействующих частиц.

2. При значениях скорости электрона равных или превышающих критическую, происходит неупругий удар: электрон теряет часть своей энергии и передает её атому, вследствие чего атом переходит в возбужденное состояние – на энергетический уровень E_2 .

Таким образом, при взаимодействии с ускоренными электронами атом или вообще не воспринимает энергии (упругий удар), или воспринимает ее только в количествах, равных разности энергий в двух стационарных состояниях.

По характеристике, изображенной на рисунке 2.2, можно определить только первый потенциал возбуждения атома. При напряжении $U_{\max 2}$ энергии электрона достаточно для последовательного перевода в возбужденное состояние двух атомов ртути. Определить относительное расположение других энергетических уровней удалось в опытах Бибермана, Сушкина и Фабриканта, описанных в учебном пособии Э. В. Шпольского «Атомная физика» (т. 1).

На основе анализа результатов опытов Франка и Герца имеется возможность:

- убедиться в квантовании энергии атомов;
- глубже понять следствия, возникающие при упругих и неупругих столкновениях атомов с ускоренно движущимися электронами, и условия, при которых они наблюдаются;
- развить представления о взаимосвязи микро- и макроскопических явлений;
- создать условия для развития умения анализировать и трактовать графические зависимости, полученные экспериментально;
- сформировать начальную базу для понимания спектральных закономерностей в спектрах атомов.

В формировании квантовых представлений о свойствах микрочастиц большое значение имеет теория Бора для водородоподобных атомных систем. Водородоподобной атомной системой называют систему, состоящую из ядра с зарядом $+Ze$ и одного электрона (здесь Z – зарядовое число химического элемента в периодической системе элементов, e – заряд протона). Такими системами являются атом водорода H ($Z = 1$), однократно ионизированный атом гелия He^+ ($Z = 2$), двукратно ионизированный атом лития Li^{2+} ($Z = 3$) и др.

В результате экспериментальных исследований в спектрах водородоподобных систем обнаружены сериальные закономерности, описываемые обобщённой формулой Бальмера

$$\tilde{\nu}_{kn} = RZ^2 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (2.3)$$

где $\tilde{\nu} = 1/\lambda$ – волновое число, сопоставляемое спектральной линии;
 R – постоянная Ридберга.

В соответствии с формулой (2.3) весь спектр водородоподобной системы может быть разделен на серии. *Спектральной серией* называют совокупность спектральных линий, в последовательности расположения в спектре и в распределении интенсивностей которых обнаруживается определенная закономерность. Определенная спектральная серия описывается обобщенной формулой Бальмера при $k = \text{const}$ (число n принимает значения $k+1; k+2; \dots$).

В спектре атомарного водорода обнаружен ряд серий, в каждой из которых волновые числа определяются по формуле (2.3). Так, серия Лаймана ($k=1$) наблюдается в ближней ультрафиолетовой (УФ) области; серия Бальмера ($k=2$) расположена в видимой и ближней УФ области спектра; в ИК диапазоне локализованы серии Пашена ($k=3$), Брэкета ($k=4$) и Пфунда ($k=5$) и т. д.

При $n \rightarrow \infty$ волновое число в пределах каждой спектральной серии стремится к значению, определяемому выражением $\tilde{\nu}_{\text{пр}} = RZ^2 \frac{1}{k^2}$ и называемому *границей серии*. Волновое число *головной линии* спектральной серии определяется по формуле

$$\tilde{\nu} = RZ^2 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{(k+1)^2} \right).$$

Итогом анализа экспериментальных результатов и их обобщения стала формулировка *комбинационного принципа Ритца*: волновое число каждой спектральной линии в спектре любого атома можно представить в виде разности двух *спектральных термов*,

$$\tilde{\nu} = T_k - T_n. \quad (2.4)$$

Для атома водорода $Z = 1$, и спектральный терм имеет вид $T_n = \frac{R}{n^2}$.

Из комбинационного принципа Ритца вытекает следствие: разность волновых чисел двух спектральных линий одной серии есть не что иное, как волновое число спектральной линии, принадлежащей другой серии того же атома. Глубокий смысл комбинационного принципа был понят только после введения квантовых постулатов Бора.

Сериальные закономерности, проявляющиеся в спектрах водородоподобных атомных систем, были объяснены на основе теории Н. Бора. Так как состояние единственного электрона определяет состояние всего атома, то в данной теории рассматривалось только движение электрона. В теории Бора описывалось движение электрона вокруг ядра по круговым орбитам.

Чтобы рассчитать спектр водородоподобной атомной системы по формуле (2.1), необходимо получить явное выражение для полной энергии электрона в n -ом стационарном состоянии:

$$E_n = T_n + U_n, \quad (2.5)$$

где $T_n = \frac{m v_n^2}{2}$ – кинетическая энергия электрона;

$U_n = -\gamma \frac{Ze^2}{r_n}$ – его потенциальная энергия, обусловленная кулоновским взаимодействием;

m – масса электрона;

v_n – модуль линейной скорости движения электрона;

r_n – радиус его орбиты;

$\gamma = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ (в СИ).

Следовательно,

$$E_n = \frac{m v_n^2}{2} - \gamma \frac{Ze^2}{r_n}. \quad (2.6)$$

Величины v_n и r_n в рассматриваемой теории определены на основе второго закона Ньютона

$$\gamma \frac{Ze^2}{r_n^2} = \frac{m v_n^2}{r_n} \quad (2.7)$$

и предложенного Бором условия квантования момента импульса электрона

$$m\upsilon_n r_n = n\hbar, \quad (2.8)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$.

Решая систему уравнений (2.7), (2.8), можно получить следующие выражения для радиуса r_n орбиты и скорости υ_n электрона в n -ом стационарном состоянии:

$$r_n = \frac{\hbar^2 n^2}{\gamma m Z e^2}, \quad (2.9)$$

$$\upsilon_n = \frac{\gamma Z e^2}{n\hbar}. \quad (2.10)$$

После учёта (2.9) и (2.10) в формуле (2.6) получим следующее выражение для полной энергии электрона:

$$E_n = -\gamma \frac{Z e^2}{2r_n} = -\gamma^2 \frac{m Z^2 e^4}{2\hbar^2 n^2}. \quad (2.11)$$

В соответствии с правилом частот Бора (2.1) частоту излучения, испускаемого или поглощаемого атомом при переходе электрона из n -го состояния в k -е, можно определить следующим образом:

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = \gamma^2 \frac{m Z^2 e^4}{4\pi\hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right). \quad (2.12)$$

Соответствующее этому излучению волновое число

$$\tilde{\nu}_{kn} = \frac{1}{\lambda_{kn}} = \frac{\nu_{kn}}{c} = \gamma^2 \frac{m Z^2 e^4}{4\pi c \hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (2.13)$$

где c – скорость света в вакууме.

Сравнивая формулы (2.4) и (2.13), получим выражение постоянной Ридберга

$$R_\infty = \gamma^2 \frac{m e^4}{4\pi c \hbar^3}. \quad (2.14)$$

Экспериментально найденное значение постоянной Ридберга несколько отличается от теоретического значения. Этот факт объясняется тем, что при выводе формулы (2.13) ядро считали неподвижным, так как его масса во много раз (~ 1840) превышает массу электрона. Более точное решение задачи можно получить при учёте движения обеих частиц (электрона и ядра) относительно их общего центра инерции. При этом в формулах (2.5)–(2.14) вместо массы электрона будет содержаться приведённая масса системы «электрон + ядро» $\mu = \frac{m \cdot M}{m + M}$, где M – масса

ядра. Значение постоянной Ридберга, вычисленное в таком приближении, хорошо согласуется с полученным экспериментально.

Зависимостью постоянной Ридберга от массы ядра обусловлено явление изотопического сдвига, которое состоит в том, что спектральные линии различных изотопов элемента, обусловленные идентичными квантовыми переходами, характеризуются различными длинами волн, и соответствующие линии изотопов смещены в спектре друг относительно друга.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие модели строения атома были предложены в доквантовой физике? В чем суть этих моделей?
2. Какими фактами подтверждается несостоятельность классической электродинамики при описании испускания электромагнитного излучения атомами?
3. Сформулируйте постулаты Бора.
4. Какова основная цель опыта Франка Герца? Благодаря каким физическим явлениям достижение этой цели возможно в опыте Франка Герца?
5. Какие участки вольтамперной характеристики газонаполненного триода соответствуют упругим и неупругим столкновениям атомов с электронами?
6. Почему значения силы тока в минимумах вольтамперной характеристики не равны нулю и увеличиваются при увеличении напряжения между катодом и сеткой?
7. Какие физические величины называют потенциалом возбуждения, потенциалом ионизации, резонансным потенциалом? Каков их физический смысл?
8. Можно ли в опыте Франка и Герца определить резонансные потенциалы для атомов других газов?

9. Ознакомьтесь по учебному пособию Э. В. Шпольского (Атомная физика : в 2 т. Т. 1) с опытами Бибермана, Сушкина, Фабриканта по определению всех ступеней возбуждения атома. Сравните экспериментальные возможности этих опытов и опыта Франка – Герца.

10. Какие спектральные серии наблюдаются в спектре атома водорода?

11. Проанализируйте обобщенную формулу Бальмера.

12. В чем состоит комбинационный принцип Ритца?

13. Сформулируйте основные положения теории Бора для водородоподобных систем.

14. Изобразите и поясните схему энергетических уровней атома водорода и переходов между ними.

15. В чём сущность и каково описание изотопического сдвига?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНОГО ПОТЕНЦИАЛА АТОМА РТУТИ (ОПЫТ ФРАНКА И ГЕРЦА)

Цель работы: изучение дискретной структуры энергетического спектра атома; экспериментальное определение резонансного потенциала атома ртути; изучение функции распределения электронов по скоростям.

Приборы и оборудование: лабораторный комплекс UE5020300, смартфон.

Описание экспериментальной установки

В состав лабораторного комплекса UE5020300, изображенного на рисунке 2.4, входят:

– электрический нагреватель и держатель трубки Франка – Герца, установленные в общем блоке, расположенном на рисунке 2.4 слева;

– лабораторный блок питания, посредством которого производится подача, регулировка и измерение напряжения на всех значимых участках установки (средний блок на рисунке 2.4);

– электронный осциллограф, предназначенный для наблюдения вольтамперной характеристики и выполнения измерений, необходимых при определении первого потенциала возбуждения (правый блок на рисунке 2.4).

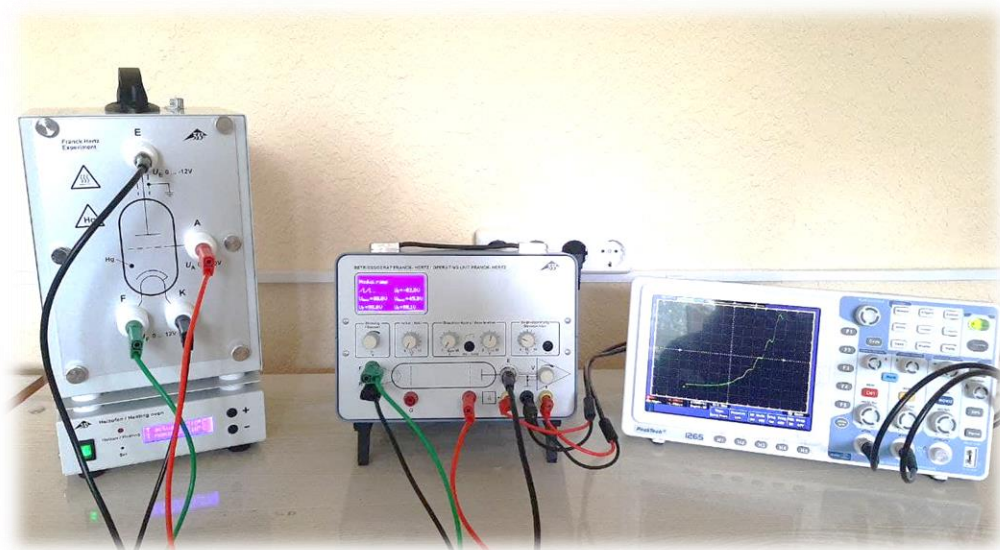
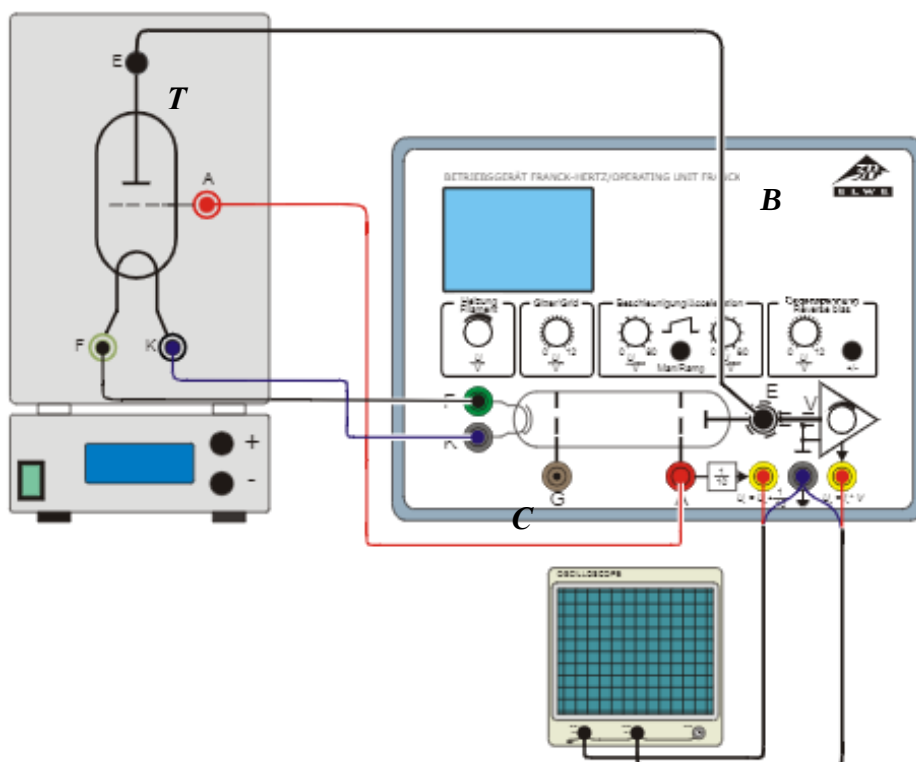


Рисунок 2.4 – Внешний вид лабораторной установки
в ее рабочем состоянии

В комплексе оборудования, предназначенного для воспроизведения опыта Франка и Герца, обеспечена подача всех напряжений, необходимых для питания трубки и управления движением электронов в ней, а также усиление измеряемого тока коллектора посредством встроенного чувствительного усилителя постоянного тока. Ускоряющее напряжение можно либо регулировать вручную или подать от блока питания в виде постоянно меняющегося (пилообразного) напряжения. На передней панели блока питания имеются дополнительные входы для подключения измерительных приборов, предназначенных для измерения силы анодного тока и ускоряющего напряжения. Пользуясь терминологией специалистов-компьютерщиков, можно сказать, что лабораторный комплекс имеет «дружественный интерфейс»: работу пользователя облегчает дублирование принципиальной электрической схемы установки на панелях блока питания и блока управления, а также одинаковая окраска клемм для соединения элементов схемы и соединительных проводов.

Основной частью комплекса является стеклянная трубка Франка – Герца, установленная в блоке *T* (рисунок 2.5). Трубка Франка – Герца, в которой содержится небольшое количество ртути, помещена в нагревательную камеру и предназначена для демонстрации квантования энергии, передаваемой атомам ртути при их столкновениях с электронами, а также для определения энергии, необходимой для возбуждения резонансной линии ртути. Трубку Франка – Герца нужно нагреть в камере, чтобы получить давление паров ртути, необходимое для достижения достаточно высокой вероятности столкновений электронов с атомами ртути.



T – блок, в котором установлена трубка Франка – Герца, заполненная парами ртути; B – лабораторный блок питания; C – лабораторный осциллограф

Рисунок 2.5 – Схема лабораторной установки

Для фотографирования анодной характеристики и характеристики задержки газонаполненной электронной лампы используется смартфон.

Задание 1. Подготовка лабораторной установки к работе

При подготовке лабораторной установки к работе выполните следующие операции.

1. Соберите установку в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 2.5.
2. Проверьте исходное положение рукояток управления, расположенных на передней панели лабораторного блока питания (они должны быть выведены в крайнее левое положение).
3. Включите все компоненты установки в сеть.
4. Включите трубку, заполненную парами ртути, установите меньшее из рекомендованных преподавателем значение рабочей температуры (например, 160 °C), пользуясь кнопками «+», «-», установленными на корпусе нагревателя.

5. Выдержите ртутную лампу включенной около 10 минут, чтобы стабилизировать рабочую температуру и давление ртутных паров. *Корпус нагревателя и держателя трубки Франка – Герца при работе сильно нагревается. Не прикасайтесь к нему в ходе работы.*

Задание 2. Определение резонансного потенциала атома ртути

Резонансный потенциал определяется на основе анодной характеристики лампы $I_A = f(U_{\max})$. Переменными параметрами являются плотность паров ртути и задерживающая разность потенциалов U_e .

1. Установите рекомендованные преподавателем значения напряжений на блоке питания: $U_f = 8$ В, $U_{\max} = 45\text{--}48$ В, $U_e = -(2,4\text{--}2,8)$ В.

2. Варьируя цену деления сетки на экране осциллографа, пользуясь переключателями, расположенными над контактными гнездами, на которые подается анализируемый сигнал от лабораторного блока питания В, отрегулируйте изображение вольтамперной характеристики на экране осциллографа для получения наглядной картины. Зафиксируйте изображение, нажимая кнопку, расположенную на панели управления осциллографа в верхнем правом углу. Сфотографируйте полученную вольтамперную характеристику, чтобы поместить ее в отчет о выполненной работе. При фотографировании следите, чтобы экран смартфона был параллелен плоскости экрана осциллографа.

3. Определите масштаб шкалы напряжений по горизонтальной координатной оси на экране осциллографа.

4. Определите положение не менее четырех максимумов на вольтамперной характеристике и занесите результаты в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры используемого режима работы установки и результаты измерений

Номер максимума	$U_{\max}^i$, В	$U_{\max}^{i+1} - U_{\max}^i$, В	U_f , В	$U_{\max}$, В	U_e , В	T , °С
1						
2						
3						
4						
5						

5. Произведите обработку результатов измерений. Определите среднее значение первого потенциала возбуждения атома ртути.

6. Установите следующее из рекомендованных преподавателем значение температуры нагревателя (например, 190 °C), подождите 10 минут для стабилизации режима работы нагревателя и давления паров ртути. Самостоятельно выберите из рекомендованного диапазона значения параметров $U_{\max}$ и U_e , получите на экране осциллографа наиболее качественное изображение, зафиксируйте и сфотографируйте его. Запишите в таблицу, аналогичную таблице 2.1, параметры установки, произведите необходимые измерения и обработку результатов.

8. Повторите действия, описанные в п. 7 при других рекомендованных преподавателем значениях температуры нагревателя и различных значениях параметров $U_{\max}$ и U_e , выбирая их так, чтобы обеспечить построение характеристик задержки и выполнение задания 3.

9. По завершении измерений ручки управления напряжением выведите в крайнее левое положение и выключите приборы в последовательности, обратной порядку их включения.

10. Объясните причины различий, наблюдаемых в вольтамперных характеристиках при увеличении температуры нагревателя.

11. Определите среднее значение первого потенциала возбуждения атома ртути, сравните его с указанным в справочной литературе. Сформулируйте выводы.

Задание 3. Определение эффективного сечения неупругих соударений электронов с атомами ртути

Эффективное сечение неупругих соударений определяется на основе характеристики задержки лампы $I_A = f(U_e)$.

1. Из полученных при выполнении задания 2 фотографий вольтамперных характеристик выберите те, которые получены при неизменных значениях температуры нагревателя и напряжения $U_{\max}$, но при разных значениях параметра U_e .

2. Определите по вольтамперным характеристикам значения силы тока при постоянном значении $U_{\max}$, удовлетворяющем условию $U_{\max} < U_{\max 1}$, и соответствующие различным значениям параметра U_e . Заполните таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Сведения для построения характеристик задержки газонаполненной электронной лампы при условии $U_{\max} < U_{\max 1}$

Значения постоянных параметров: $T =$, $U_{\max} =$	
Значение задерживающего напряжения U_e , В	Значение силы тока I_A , А
и т. д.	

3. Определите по вольтамперным характеристикам значения силы тока при постоянном значении $U_{\max}$, удовлетворяющем условию $U_{\max} > U_{\max 1}$, и соответствующие различным значениям параметра U_e . Заполните таблицу, аналогичную таблице 2.2.

4. Пользуясь табулированными сведениями, постройте характеристики задержки, соответствующие соблюдению условий $U_{\max} < U_{\max 1}$ и $U_{\max} > U_{\max 1}$.

5. Методом графического дифференцирования построенных вами зависимостей $I_A = f(U_e)$ получите функции распределения электронов по скоростям и постройте соответствующие графики. Определите ширину функции распределения $f(U_e)$.

6. Определите эффективное сечение неупругих соударений электронов с атомами ртути по формуле

$$\sigma = \frac{\Delta I_A \cdot kT}{(I_A)_{\max} \cdot l \cdot p},$$

где k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура паров ртути;

$p = 1,1837 \cdot 10^3$ Па – давление паров ртути при температуре 80 °С,

$l = 3$ мм – расстояние между катодом и сеткой.

Обратите внимание: при вычислениях по этой формуле давление паров p должно соответствовать температуре T , при которой построена используемая характеристика задержки. Для его определения считайте нагревание газа изохорным процессом.

7. Полагая, что эффективное сечение атома имеет форму круга, определите «прицельное» расстояние r и сравните его значение с радиусом первой боровской орбиты для атома водорода $a_0 = 0,529 \cdot 10^{-10}$ м.

8. Сформулируйте выводы. Оформите отчет о работе.

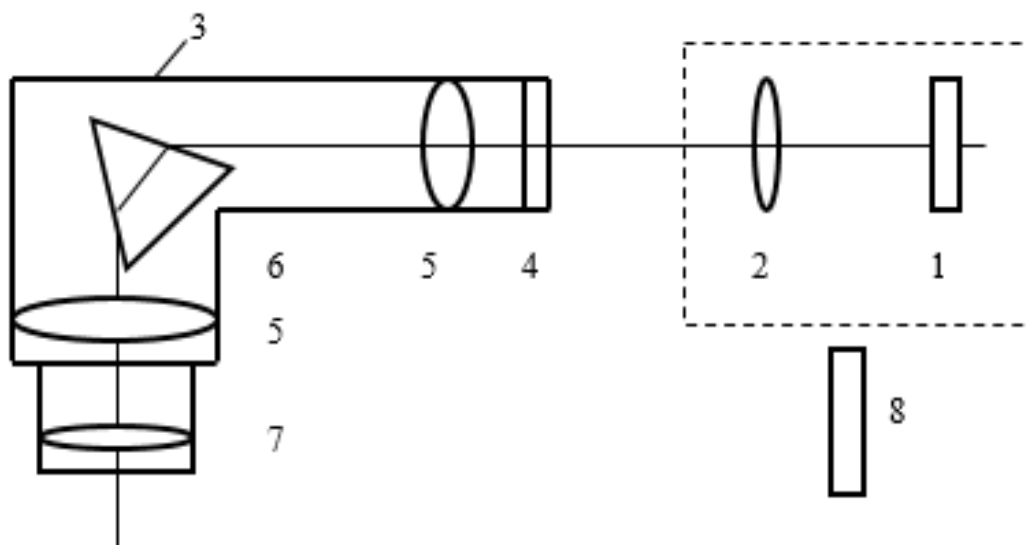
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРА ИСПУСКАНИЯ АТОМАРНОГО ВОДОРОДА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА И МАССЫ ЭЛЕКТРОНА

Цель работы: экспериментально изучить спектры испускания атомов ртути и водорода в видимой области; на основе спектроскопических измерений для водорода рассчитать значения постоянной Ридберга, массы электрона и радиуса первой боровской орбиты.

Приборы и оборудование: монохроматор УМ-2, ртутная лампа ДРШ-250 с блоком питания, газоразрядная водородная трубка с блоком питания, атлас спектральных линий ртути.

Порядок выполнения работы

1. Соберите экспериментальную установку в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 2.6.



- 1 – ртутная лампа ДРШ-250; 2 – конденсор;
3 – монохроматор УМ-2; 4 – входная щель прибора;
5 – объективы коллиматора и зрительной трубы;
6 – диспергирующая призма; 7 – окуляр; 8 – газоразрядная водородная трубка

Рисунок 2.6 – Схема экспериментальной установки
для изучения атомарных спектров

2. Через блок питания включите в сеть лампу ДРШ-250 и произведите юстировку осветительной системы, в ходе которой добейтесь равномерной и максимальной освещённости входной щели монохроматора, перемещая относительно него лампу 1 и конденсор 2.

3. Получите качественное изображение спектра ртути на выходе монохроматора, изменяя для этого ширину его входной щели 4 и фокусировку окуляра 7. Отметьте характерные особенности полученного спектра.

4. Используя атлас спектра ртути, установите соответствие между длинами волн λ , сопоставляемыми спектральным линиям ртути, и делениями n шкалы монохроматора. Составьте градуировочную таблицу и постройте градуировочный график $\lambda = \lambda(n)$.

5. Выключите и снимите с рельса лампу ДРШ-250. Установите непосредственно перед входной щелью монохроматора водородную разрядную трубку. Включите её в сеть через блок питания. Получите качественное изображение спектра.

6. Определите значения шкалы, при которых к окулярному указателю выведены соответствующие линии серии Бальмера: H_α (в красной области спектра), H_β (в зелено-голубой области), H_γ (в сине-фиолетовой), H_δ (в фиолетовой). Результаты измерений сведите в таблицу.

7. По градуировочному графику определите длины волн λ_i наблюдаемых спектральных линий атома водорода. Определите соответствующие им волновые числа $\tilde{\nu}_i = \frac{1}{\lambda_i}$.

8. Полагая в формуле (2.3) $k=2$ и n равным 3 (для линии H_α), 4 (для линии H_β), 5 (для линии H_γ), 6 (для линии H_δ), вычислите значения постоянной Ридберга R_i , используя полученные в опыте значения $\tilde{\nu}_i$.

9. Используя формулу (2.14), по найденным значениям R_i определите значения массы электрона m_i .

10. По формуле (2.9) при $n=1$, $Z=1$ определите значения радиуса первой боровской орбиты r_{1i} с использованием экспериментально найденных значений m_i массы электрона.

11. Вычислите средние значения величин R , m , r_1 и погрешности их определения ΔR , Δm , Δr_1 . Результаты представьте в виде $A = \bar{A} \pm \Delta A$, где $A = R$, m , r_1 . Сопоставьте значения величин R , m , r_1 , полученные в результате выполнения работы, с табличными значениями этих величин. Сформулируйте выводы.

ТЕМА 3. КВАНТОВОЕ ОПИСАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Теоретическое введение

При воздействии электромагнитного излучения на вещество возможны: а) внутренний фотоэффект, сопровождающийся изменением концентрации свободных носителей зарядов внутри материала (изменением электрической проводимости); б) внешний фотоэффект, заключающийся в выходе свободных электронов за пределы поверхности, а также другие физические явления.

Эксперименты А. Г. Столетова по изучению фотоэффекта обусловили выяснение природы этого явления и изобретение первого в мире фотоэлемента. Без этих открытий и изобретений сложно представить современную жизнь. Благодаря фотоэффекту появилось телевидение, звуковое кино, стала возможна широкая автоматизация производственных процессов. В начале XX века сразу несколько компаний начали продажу охраняемых систем на основе инфракрасных лучевых систем. В дальнейшем, на протяжении всего двадцатого столетия, явление фотоэффекта находит своё применение во все новых и новых сферах: охране, медицине, торговле, транспорте и многих других направлениях деятельности человека. И работа солнечных электростанций, построенных во многих странах, в том числе и в Республике Беларусь, тоже основана на явлении фотоэффекта и его законах, открытых российским ученым А. Г. Столетовым.

На основе экспериментальных исследований внешнего фотоэффекта (1888–1890 годы) А. Г. Столетовым были установлены следующие основные законы (*законы Столетова*):

1. Сила фототока насыщения, протекающего в цепи вакуумного фотоэлемента, прямо пропорциональна падающему световому потоку. (При этом, однако, нужно иметь в виду, что фотоэффект обусловлен поглощенным излучением.)

2. Фотоэффект наблюдается только при освещении фотокатода излучением, частота ν которого не менее частоты ν_0 красной границы фотоэффекта ($\lambda \leq \lambda_0$).

3. Распределение фотоэлектронов по начальным кинетическим энергиям не зависит от величины светового потока.

4. Максимальная начальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты излучения:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = a + bv, \quad (3.1)$$

где a и b для заданного фотоэлемента являются константами.

5. Фотоэффект – явление практически безынерционное.

Попытка объяснить механизм фотоэффекта в рамках волновой теории электромагнитного излучения оказалась несостоятельной, так как полученные на её основе выводы противоречили экспериментальным результатам. Объяснение наблюдаемых при внешнем фотоэффекте закономерностей было дано Эйнштейном на основе сформулированной им *гипотезы квантов света*: электромагнитное излучение, взаимодействующее с веществом, следует рассматривать как поток корпускул энергии (квантов, или фотонов); энергия кванта излучения зависит от частоты излучения ν и определяется по формуле $\varepsilon = h\nu$.

В соответствии с квантовой гипотезой энергия фотона $h\nu$, поглощённого электроном в веществе фотокатода, расходуется электроном на совершение им работы A_1 по отрыву от атома (в полупроводниках и диэлектриках; для металлов $A_1 = 0$), работы выхода за пределы поверхности фотокатода A_2 и на сообщение фотоэлектрону кинетической энергии:

$$h\nu = A_1 + A_2 + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (3.2)$$

Выражение (3.2) называют уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. По сути оно представляет закон сохранения энергии применительно к этому явлению. Если $h\nu < A_1 + A_2 = A$, то энергии, полученной электроном в результате поглощения фотона в веществе, недостаточно для выхода электрона за пределы поверхности, и внешний фотоэффект не наблюдается. Красная граница фотоэффекта определяется из условия $h\nu_0 = A$. Так как в веществе существует некоторое распределение электронов по энергии, то их работа выхода различна, чем обусловлено распределение фотоэлектронов по скоростям. Характер этого распределения можно определить, графически дифференцируя вольтамперную характеристику фотоэлемента $I = I(U)$ в области тормозящих напряжений (рисунок 3.1).

При некотором напряжении U_3 , называемом запирающим, для фотоэлектронов выполняется условие

$$eU_3 = \frac{mv_{\max}^2}{2}, \quad (3.3)$$

и фототок прекращается.

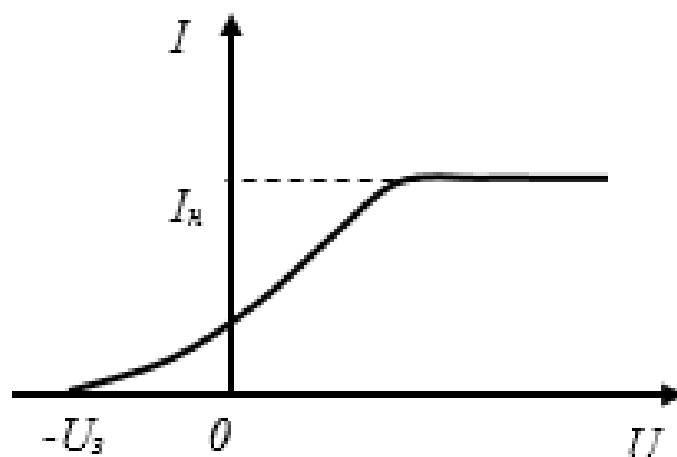


Рисунок 3.1 Вольтамперная характеристика вакуумного фотоэлемента

Подставляя формулу (3.3) в уравнение (3.2), получим выражение

$$h\nu = A_1 + A_2 + eU_з, \quad (3.4)$$

из которого видно, что $U_з$ линейно зависит от частоты (рисунок 3.2). Линейный характер зависимости $U_з(\nu)$, полученной экспериментально, является подтверждением правильности уравнения Эйнштейна.

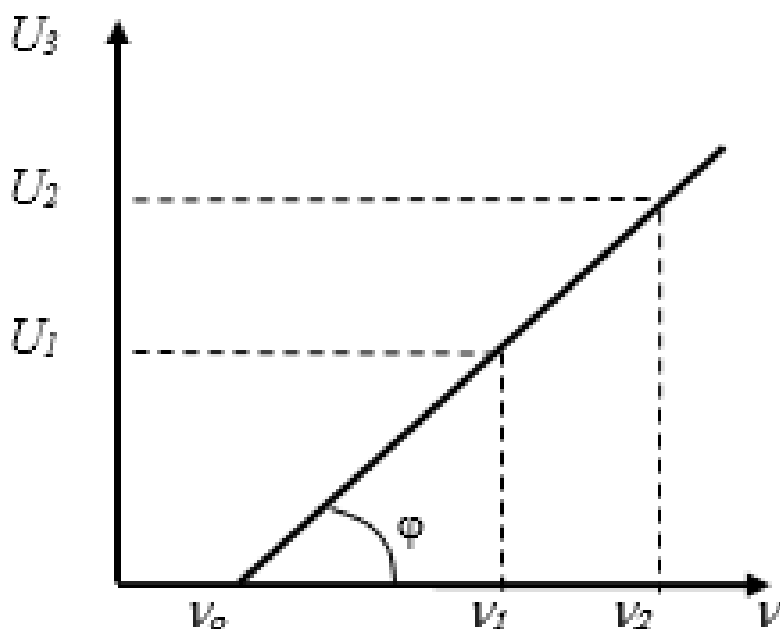


Рисунок 3.2 – Зависимость запирающего потенциала вакуумного фотоэлемента от частоты излучения

Учитывая графический смысл производной и линейность функции $U_3(\nu)$, формулу (3.5) представим в форме

$$h = e \frac{\Delta U_3}{\Delta \nu}, \quad (3.6)$$

удобной для экспериментального определения постоянной Планка.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем состоят явления внешнего и внутреннего фотоэффекта?
2. Каково содержание эмпирических законов Столетова?
3. Объясните принцип работы экспериментальной установки.
4. Какие действия следует выполнить в целях экспериментальной проверки законов Столетова?
5. Какие противоречия выявились при попытках объяснить законы фотоэффекта на основе классической физики?
6. В чём состоит гипотеза Эйнштейна о квантах света?
7. Какой физический смысл имеет уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта?
8. Объясните законы фотоэффекта на основе представлений о световых квантах.
9. Какой вид имеет вольтамперная характеристика вакуумного фотоэлемента?
10. Поясните метод задерживающего потенциала для определения значения постоянной Планка.

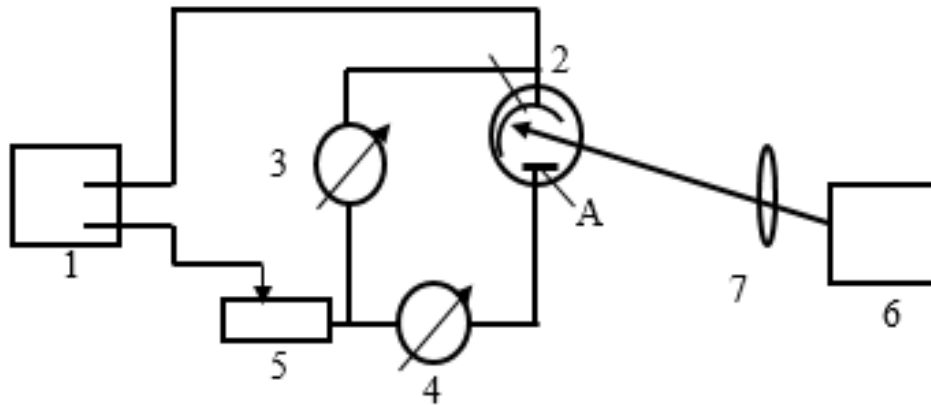
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. ПРОВЕРКА УРАВНЕНИЯ ЭЙНШТЕЙНА ДЛЯ ВНЕШНЕГО ФОТОЭФФЕКТА

Цель работы: экспериментально проверить уравнение Эйнштейна для фотоэффекта, определить постоянную Планка методом задерживающего потенциала.

Приборы и принадлежности: экспериментальная установка, вакуумный фотоэлектрический прибор (фотоэлемент или фотоэлектронный умножитель), источник излучения, набор светофильтров.

Порядок выполнения работы

1. Соберите установку в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 3.3.



- 1 – стабилизированный источник напряжения;
 2 – вакуумный фотоэлемент; 3 – вольтметр;
 4 – микроамперметр; 5 – резистор;
 6 – монохроматор; 7 – конденсор

Рисунок 3.3 – Схема установки для проверки уравнения Эйнштейна для фотоэффекта

2. Используя монохроматическое излучение частоты ν_1 , пятикратно произведите измерения, необходимые для построения вольтамперной характеристики фотоэлемента $I = I(U)$ в области тормозящих напряжений. Результаты измерений сведите в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерений для построения вольтамперной характеристики фотоэлемента

Напряжение U , В	Сила тока, $I \cdot 10^{-8}$ А						Абсолютная погрешность, ΔI , $\cdot 10^{-8}$ А
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	$\langle I \rangle$	
U_1							
U_2							
...							

3. Определите среднее значение силы тока, измеренное при каждом значении напряжения, и погрешность его определения ΔI .

4. Постройте график вольтамперной характеристики. Укажите на графике доверительные интервалы ΔI для каждой экспериментально полученной точки.

5. Последовательно, используя монохроматическое излучение нескольких других частот ν_i ($i=2, 3, 4, 5$), выполните действия, указанные в пп. 3, 4. Результаты измерений внесите в таблицы, аналогичные таблице 3.1. Постройте вольтамперные характеристики, соответствующие каждому значению ν_i . По вольтамперным характеристикам определите значения запирающего потенциала $(U_3)_i$ и постройте график зависимости $U_3 = f(\nu)$.

6. Рассчитайте значения постоянной Планка по формуле (3.6), определяя предварительно необходимые величины по графику зависимости $U_3 = f(\nu)$. Сравните полученный результат с табличным значением постоянной Планка. Объясните причины их отличия.

7. Сформулируйте аргументированные выводы относительно достижения целей работы. Оформите отчет о работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахиезер, А. И. Атомная физика : справочное пособие / А. И. Ахиезер. – Киев : Наукова думка, 1988. – 268 с.
2. Годлевская, А. Н. Физика атома и атомных явлений : учебное пособие / А. Н. Годлевская, В. Г. Шолох ; под ред. А. А. Сокольского. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2017. – 307 с.
3. Граков, В. Е. Физика атома : лабораторный практикум для студентов физического факультета / В. Е. Граков, А. А. Сокольский, Г. Ф. Стельмах ; под ред. А. П. Клищенко. – Минск : БГУ, 2006. – 200 с.
4. Емельянов, В. А. Методы обработки результатов измерений в лаборатории физпрактикума : учебное пособие / В. А. Емельянов, Д. Г. Лин, В. Ф. Шолох. – Минск : Бестпринт, 1997. – 90 с.
5. Зайдель, А. Н. Ошибки измерений физических величин / А. Н. Зайдель. – Ленинград : Наука, 1985. – 112 с.
6. Кондиленко, И. И. Введение в атомную физику / И. И. Кондиленко, П. А. Коротков. – Киев : Вища школа, 1976. – 302 с.
7. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. – М. : Наука, 1976. – 928 с.
8. Линднер, Г. Картины современной физики / Г. Линднер. – М. : Мир, 1977. – 272 с.
9. Матвеев, А. Н. Атомная физика : учебное пособие для студентов вузов / А. Н. Матвеев. – М. : Высш. шк., 1989. – 439 с.
10. Практикум по атомной физике / под ред. Л. И. Киселевского. – Минск : Университетское, 1989. – 176 с.
11. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: атомная и ядерная физика : в 5 т. Т. 5. Ч. I. Атомная физика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1986. – 416 с.
12. Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров ; редкол. : Д. М. Бонч-Бруевич [и др.]. – М. : Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.
13. Шпольский, Э. В. Атомная физика : в 2 т. Т. 1. Введение в атомную физику / Э. В. Шпольский. – 6-е изд., испр. – М. : Наука, 1974. – 575 с.
14. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. – 8-е изд. – М. : Оникс, Мир и образование, 2006. – 1056 с.

Производственно-практическое издание

**Годлевская Анна Николаевна,
Шолох Валентина Григорьевна,
Шамына Антон Александрович**

**ФИЗИКА АТОМА И ВВЕДЕНИЕ
В КВАНТОВУЮ МЕХАНИКУ:
РАЗВИТИЕ КВАНТОВЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ**

Практическое пособие

Редактор Е. С. Балашова
Корректор В. В. Калугина

Подписано в печать 20.10.2025. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 3,05.

Тираж 25 экз. Заказ 548.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования

«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».

Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий в качестве:

издателя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013 г.;

распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017 г.

Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.