

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА

Практикум

Рекомендовано методической комиссией радиофизического факультета
для студентов ННГУ, обучающихся по направлению подготовки
03.03.03 «Радиофизика»

Нижний Новгород
2017

УДК 539.1
ББК 22.38
О-624

О-624 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА: Составители:
Бакунов М.И., Бирагов С.Б., Царев М.В. Практикум. – Нижний Новгород:
Нижегородский госуниверситет, 2017. – 10 с.

Рецензент: кандидат физ.-мат. наук, доцент **А.П. Савикин**

В лабораторной работе измеряются длины волн в спектре излучения атомарного водорода и вычисляется постоянная Ридберга.

Практикум предназначен для студентов 3-го курса радиофизического факультета, выполняющих работы в лаборатории атомного практикума кафедры общей физики.

Ответственные за выпуск:
председатель методической комиссии радиофизического факультета ННГУ,
к.ф.-м.н., доцент **Н.Д. Миловский**,
д.ф.-м.н., профессор **Е.З. Грибова**

УДК 531.7
ББК В338

Введение

Атом водорода, состоящий из ядра (протона) и одного электрона, представляет собой одну из наиболее простых квантово-механических систем, для которой удастся точно рассчитать дискретный ряд разрешенных значений (уровней) энергии электрона и соответствующие этим значениям формы орбиталей (вероятностные распределения локализации электрона в атоме). Дискретность энергетических уровней электрона в атоме проявляется в дискретности спектра излучаемого (и поглощаемого) атомом света. Целью работы является измерение длин волн в спектре излучения атомарного водорода и вычисление на основе этих измерений постоянной Ридберга.

Спектральные линии атомарного водорода

Квантовомеханический подход к расчету спектра излучения атома водорода основан на решении задачи о собственных значениях и собственных функциях оператора энергии, т.е. на решении стационарного уравнения Шредингера

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta - \frac{e^2}{r} \right) \psi = E \psi, \quad (1)$$

куда входят записанный в сферических координатах r, θ, φ (начало координат – на ядре атома) оператор Лапласа Δ , волновая функция электрона $\psi(r, \theta, \varphi)$, масса m и заряд e электрона, постоянная Планка \hbar и энергия электрона E . Функция $|\psi(r, \theta, \varphi)|^2$ представляет собой плотность вероятности обнаружения электрона в окрестности точки с координатами r, θ, φ , т.е. дает форму электронного облака. Уравнение (1) допускает нетривиальные решения только при дискретном наборе значений энергии E . Эти значения, называемые собственными, определяются формулой

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}, \quad (2)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – главное квантовое число. Подставляя в формулу (2) значения констант, приведем ее к виду

$$E_n = -A \frac{1}{n^2}, \quad (3)$$

где $A \approx 13,6$ эВ. С ростом n разность соседних значений (уровней) энергии стремится к нулю, и в пределе $n \rightarrow \infty$ дискретный спектр становится практически непрерывным (рис. 1).

Состояние атома, в котором электрон находится на низшем энергетическом уровне $E_1 = -13,6$ эВ, называется основным. Атом может находиться в нем неопределённо долго. Остальные энергетические уровни соответствуют возбужденным состояниям. На эти уровни электрон переходит под действием внешних воздействий и может находиться на них только

ограниченное время. При переходе электрона с более высокого энергетического уровня E_n на более низкий E_k происходит излучение фотона с энергией $\hbar\omega$ (ω – частота фотона), равной разности энергий электрона на этих уровнях: $\hbar\omega = E_n - E_k$. Используя формулу (2), удобно записать выражение для обратной длины волны фотона $1/\lambda$ ($\lambda = 2\pi c/\omega$, c – скорость света):

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (4)$$

В формуле (4) введена постоянная Ридберга

$$R = \frac{me^4}{4\pi c \hbar^3} \approx 109737 \text{ см}^{-1}. \quad (5)$$

Данное выражение для постоянной Ридберга получено в предположении равенства нулю отношения масс m/M (M – масса протона), что позволило считать ядро атома неподвижным. При учете конечности отношения m/M постоянная Ридберга уменьшается в $(1 + m/M)$ раз.

Формула (4) определяет спектральные линии в излучении атома водорода. Эти линии принято группировать в серии, которые различаются значением энергии нижнего уровня (значением квантового числа k). Серия – совокупность линий, соответствующих переходам со всех более высоких уровней на определенный нижний. В видимой области спектра лежит только серия Бальмера, где $k = 2$. Серия Лаймана, для которой $k = 1$, лежит в ультрафиолетовой области спектра. Линии остальных серий ($k > 2$) лежат в инфракрасной области спектра. Шесть первых серий показаны на рис. 1.

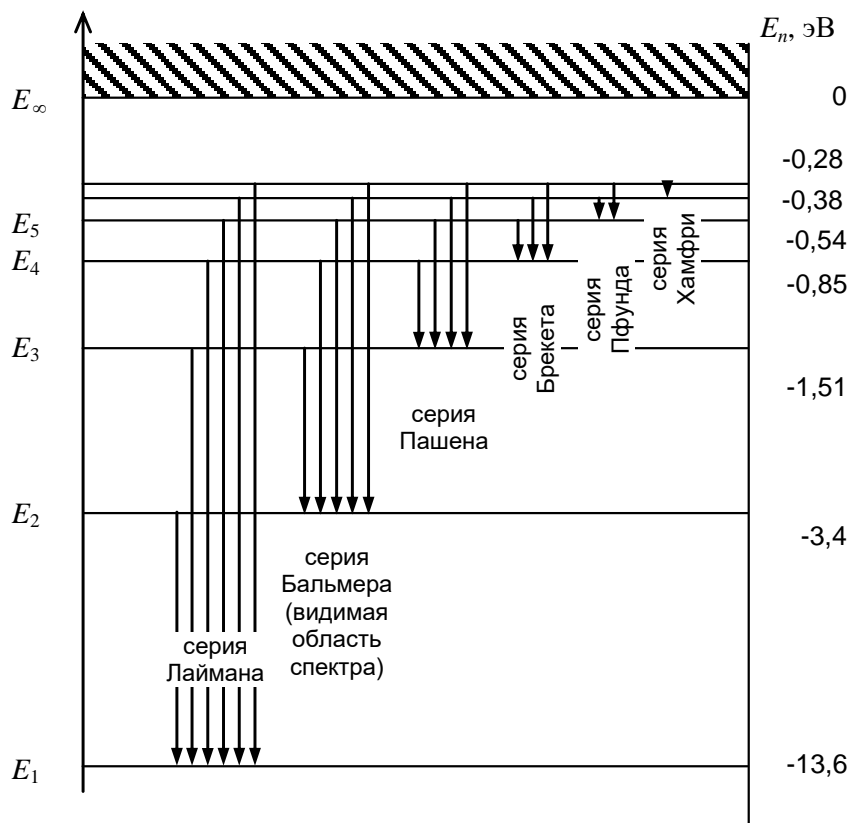


Рис. 1. Энергетическая диаграмма атома водорода

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Установка содержит осветительное устройство 1, монохроматор 2 и пульт управления 3. Блок осветителя содержит водородную и ртутную лампы, питание которых осуществляется от источника высокого напряжения.

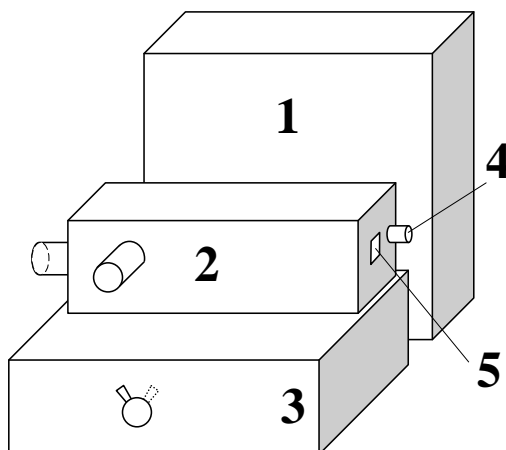


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

В ходе электрического разряда в водородной лампе происходят неупругие соударения разогнанных электрическим полем свободных электронов с молекулами водорода. В результате соударений электроны в атомах водорода переходят на высшие энергетические уровни. При обратных переходах на более низкие уровни (через время $\sim 10^{-8}$ с) происходит излучение квантов света с длиной волны, определяемой формулой (4). Поскольку в разрядном промежутке содержится огромное число атомов и соударения происходят случайным образом, то каждую секунду электроны в атомах забрасываются на различные высшие уровни и, как следствие, в спектре излучения атомов присутствуют все спектральные линии.

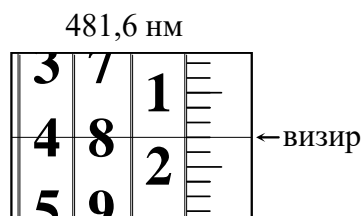


Рис. 3. Шкала монохроматора

Монохроматор МУМ-01 предназначен для исследования спектрального состава излучения в диапазоне от 200 нм до 800 нм. Сканирование спектра осуществляется вращением ручки 4 рядом с индикатором цифрового счетчика длин волн 5. Первые три цифры счетчика 5 соответствуют длине волны в нм, по барабану с рисками отсчитываются десятые доли нм в том же окне (см. рис. 3).

Для получения более точных результатов рекомендуется провести дополнительную калибровку монохроматора с помощью ртутной лампы. Параметры ртутной лампы ДРСк-125 стабилизируются через 3-5 минут после включения. В процессе разгорания, запрещается выключать лампу от сети. Горевшую лампу возможно зажечь повторно лишь после 10-минутного перерыва.

Ртутная лампа является мощным источником ультрафиолетового излучения, поэтому следует избегать прямого попадания светового потока от лампы в глаза и длительного облучения кожи.

В установке используется опасное для жизни высокое (~ 6000 В) напряжение, поэтому необходимо проверить целостность всех проводов перед включением.

Порядок выполнения работы

1. Расположить осветитель так, чтобы ртутная лампа находилась напротив приемного окна монохроматора. Подключить входы осветителя к соответствующим выходам блока питания проводами из комплекта.
2. Включить установку в сеть напряжением ~ 220 В. Переключатель «СЕТЬ» на пульте управления должен находиться в положении «ВЫКЛ», переключатель «ЛАМПА» в положении «РТУТНАЯ». Ручка «ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ» должна быть повернута до упора против часовой стрелки!
3. Перевести переключатель «СЕТЬ» в положение «ВКЛ». При этом должен начаться процесс розжига дугового разряда в ртутной лампе. Дать лампе прогреться 3-5 минут. Во время разгорания запрещается отключать лампу от сети!
4. На входе и выходе зрительной трубы монохроматора поставить щели 0,05 мм в положение II.
5. Наблюдение спектра ртути рекомендуется начинать с фиолетовой области. Для этого, медленно вращая ручку поворота решетки монохроматора, добиться изображения первой фиолетовой линии ртути в центре окуляра монохроматора. (Вращение ручки против часовой стрелки соответствует движению в область меньших длин волн, по часовой – больших.)
6. Занести показания измерительной шкалы монохроматора $\lambda_{шкалы}$ в таблицу 1.
7. Провести аналогичные измерения для всех остальных видимых в монохроматоре линий спектра ртути, записывая измеренные значения длины волны $\lambda_{шкалы}$ в таблицу 1.
8. Найти ошибку определения длины волны для каждой спектральной линии $\Delta\lambda = \lambda_{табл} - \lambda_{шкалы}$ и среднюю ошибку определения длины волны $\langle\Delta\lambda\rangle$.

9. При измерении длин волн излучения водорода истинное значение длины волны находится по формуле:

$$\lambda_{\text{истинная}} = \lambda_{\text{шкалы}} + \langle \Delta \lambda \rangle. \quad (6)$$

10. Проверить положение ручки регулировки высокого напряжения «ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ»: ручка должна быть повернута до упора против часовой стрелки. Поставить переключатель «ЛАМПА» в положение «ВОДОРОДНАЯ» и расположить осветитель так, чтобы водородная лампа находилась напротив приемного окна монохроматора. Медленно вращая ручки «ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ» «ГРУБО» и «ПЛАВНО» по часовой стрелке, добиться возникновения устойчивого разряда в трубке и приемлемой яркости свечения. При подаче на трубку чрезмерного напряжения возможен выход ее из строя. При включении трубки, особенно после интенсивного использования, возможна задержка в развитии разряда, поэтому, если трубка не засветилась сразу, ручку регулировки высокого напряжения рекомендуется поставить в максимальное положение, вращая ее по часовой стрелке, и ожидать развития разряда в течение примерно 1 минуты, после чего сразу убавить напряжение до значения, обеспечивающего устойчивое свечение и приемлемую яркость излучения.

11. Поиск линий в спектре водородной лампы нужно начинать с наиболее интенсивной красной линии H_{α} , которая располагается на самой границе красного спектра (линии спектра далее практически отсутствуют). Для наблюдения водородного спектра из-за слабой интенсивности излучения рекомендуется увеличить размер щелей на входе и выходе монохроматора МУМ-01, установив щели 0,25 мм в положение II. Для поиска линии следует медленно вращать ручку монохроматора в пределах 640–670 нм, дожидаясь появления в окуляре монохроматора соответствующей яркой линии, контролируя значение длины волны по индикатору цифрового счетчика длин волн. Записать измеренное значение λ с учетом поправки $\langle \Delta \lambda \rangle$ в таблицу 2.

12. Вторая линия в спектра атома водорода H_{β} – это яркая интенсивная зелено-голубая линия. В промежутке между H_{α} и H_{β} располагается множество красно-желтых и зеленых сравнительно слабых размытых молекулярных полос. Для поиска этой линии необходимо медленно вращать ручку 2.9 монохроматора в области длин волн 470–500 нм.

13. Уточнив длину волны H_{β} , записать ее значение в таблицу 2.

14. Третья линия атомарного водорода H_{γ} – фиолетово-синяя. В спектре излучения трубки она видна плохо и не во всех экземплярах ламп, поэтому измерение рекомендуется проводить при минимальной внешней освещенности (в затемненной комнате). Перед этой линией также могут располагаться слабые размытые молекулярные полосы синего цвета. Вращая ручку монохроматора, провести измерения как можно более тщательно в

области длин волн 430-440 нм. Уточнив положение линии H_γ , записать соответствующее значение длины волны в таблицу 2.

15. По окончании измерений перевести переключатель «СЕТЬ» на панели ПУЛЬТА УПРАВЛЕНИЯ в положение «ВЫКЛ».

16. Сравнить измеренные вами значения длин волн серии Бальмера с табличными значениями, приведенными в приложении.

17. Для серии Бальмера формула (4) переписывается в виде:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (7)$$

С помощью формулы (7) вычислите для каждой линии постоянную Ридберга R . Вычислите среднее значение $\langle R \rangle$.

18. Оцените относительную ошибку в определении постоянной Ридберга. Сравнить полученное значение постоянной Ридберга с табличным значением.

Цвет линии	Относительная яркость	Длина волны (табличная) $\lambda_{табл}$, нм	Длина волны (измеренная) $\lambda_{шкалы}$, нм	Ошибка определения длины волны $\Delta\lambda$, нм
Фиолетовая 1	2	404,66		
Фиолетовая 2	1	407,78		
Синяя	8	435,83		
Голубая	1	491,60		
Зеленая	10	546,07		
Желтая 1	8	576,96		
Желтая 2	10	579,07		

$$\langle \Delta\lambda \rangle = \dots$$

Номер орбиты, с которой осуществлен переход $n_2 \rightarrow 2$	Обозначение линии	Длина волны измеренная, нм	Длина волны с учетом поправки, нм	Постоянная Ридберга, R_i , m^{-1}
	H_α			
	H_β			
	H_γ			

$$\langle R \rangle = \dots \text{ см}^{-1}$$

Контрольные вопросы

1. Воспользовавшись квазиклассической теорией Бора, получить формулу для энергии электрона E_n в однократно ионизированном атоме гелия.
2. Почему спектр водорода и других газов – линейчатый, а спектр лампы накаливания – сплошной?
3. Определить энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на основной.
4. Во сколько раз минимальная длина волны в серии Пашена спектра водорода больше максимальной длины волны в серии Бальмера?
5. Вычислить наибольшие длины волн в сериях Лаймана, Бальмера и Пашена в спектре водорода.
6. Объясните причины размытия энергетических уровней электрона в атоме. Какой уровень будет «размыт» в наименьшей степени? Почему?
7. Какой метод возбуждения атомов используется в данной установке?
8. Объясните необходимость монохроматора и принцип его работы.
9. Как меняется после включения высокого напряжения сопротивление газоразрядного промежутка в лампах? Почему происходит резкое изменение сопротивления лампы? С какими физическими явлениями, происходящими в газе, это связано?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ РИДБЕРГА

Составители:

Михаил Иванович Бакунов
Сергей Борисович Бирагов
Максим Владимирович Царев

Практикум

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.