

Научная статья

УДК 378.147.88

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-95-105

**Эмиссионные атомные спектры.
Индивидуализированные компьютерные
симуляции лабораторных работ**

Андрей Дмитриевич Заикин¹

Артем Андреевич Заикин²

¹Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия

²Независимый исследователь
Потсдам, Германия

¹zaikin@pitf.ftf.nstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9096-4599>

²pitf.nstu@yandex.ru

Аннотация

Представлен опыт создания и эксплуатации компьютерных симуляций лабораторных работ по атомной физике. Конкретная предметная область работы – эмиссионные атомные спектры. Базовый компонент каждой лабораторной работы – компьютерный симулятор спектрографа, формирующий на экране монитора линейчатые спектры атомов. В основе симулятора лежит преобразование длины волны излучения в триплет RGB. Набор параметров установки и условий эксперимента уникален для каждого студента, выполняющего лабораторную работу на симуляторе. Индивидуализированные параметры, хранящиеся в Google-таблицах, передаются в html-шаблон лабораторной работы посредством сервиса скриптов приложений Google Apps. Индивидуализация параметров симулятора стимулирует студента к самостоятельной работе.

Ключевые слова

спектрограф, лабораторная работа, симулятор, скрипт Google Apps

Для цитирования

Заикин А. Д., Заикин А. А. Эмиссионные атомные спектры. Индивидуализированные компьютерные симуляции лабораторных работ // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 4. С. 95–105. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-95-105

Emission Atomic Spectra. Customised Computer Modelling of Laboratory Exercises

Andrey D. Zaikin¹, Artem Zaikin²

¹Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation

²Independent researcher
Potsdam, Germany

¹zaikin@pitf.ftf.nstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9096-4599>

²pitf.nstu@yandex.ru

Abstract

This paper presents the experience of developing and utilizing computer simulations for student laboratory assignments in atomic physics, specifically focusing on emission atomic spectra. The fundamental component of each laboratory assignment is a computer simulator of a spectrograph, which displays atomic line spectra on the monitor screen. The simulator operates by converting the wavelength of radiation into an RGB triplet.

The configuration of setup parameters and experimental conditions is unique to each student conducting the laboratory assignment using the simulator. Individualized parameters, stored in Google Sheets, are transferred to the HTML template of the laboratory assignment via the Google Apps Scripts service. This individualization of simulator parameters serves to encourage students to engage in independent work.

Keywords

spectrograph, laboratory work, simulator, Google Apps script

For citation

Zaikin A. D., Zaikin A. A. Emission atomic spectra. Customised computer modelling of laboratory exercises. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 4, pp. 95–105 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-4-95-105

Введение

В рамках университетского лабораторного практикума по физике существует значительное количество работ, которые можно классифицировать как «черный ящик». Исследуемое физическое явление скрыто от непосредственного наблюдения, контроль осуществляется посредством электрических измерительных приборов. Регистрируя показания приборов при выполнении такой работы, отличить физическую реальность от её имитации затруднительно.

В [1] изложен опыт создания и эксплуатации компьютерных симуляций лабораторных работ по механике, электричеству и магнетизму – работы в этих разделах физики удовлетворяют описанным условиям. Используемые в них измерительные приборы – вольтметры и амперметры.

Компьютерные симуляторы таких лабораторных работ не требуют реалистичности экранных изображений. Схематичность представления лабораторной установки существенно упрощает процесс создания симулятора, а контролируемые преподавателем и индивидуальные для каждого студента параметры виртуальной лабораторной установки стимулируют его к самостоятельности при выполнении работы.

В противовес описанной выше ситуации во многих лабораторных работах используется сложное и дорогостоящее оборудование. При этом изучение курса общей физики не предполагает профессионального освоения студентом такого оборудования. Студент должен понять принцип его работы, произвести несложную настройку, освоить рутинную операцию измерения. Решив эти задачи, можно переходить к главному: измерению, обработке результатов измерения, выявлению закономерностей, сравнению результатов измерений с теоретическими моделями.

Трудозатраты на освоение студентом оборудования могут превышать таковые на освоение предметной области. Отсюда стремление использовать в учебном процессе оборудование

с минимальным числом степеней свободы, настроенное и отъюстированное, работу которого можно описать словами «включил-измерил».

В ином случае возникает глубокая вовлеченность учебного персонала в процесс выполнения студентом лабораторной работы. Данный факт находит отражение в учебных материалах. Так, учебное пособие [2] содержит такой пассаж: «Внимание! Любые операции по включению или выключению компьютера, запуску и настройке программы, устранению технических неполадок при работе установки или компьютера выполняет сотрудник лаборатории!».

Все это напрямую относится к лабораторным работам по изучению эмиссионных и адсорбционных оптических спектров. Сложное и дорогое оптическое оборудование нуждается в точной настройке. При этом в настоящее время визуальные наблюдения спектральной картины практически вытеснены регистрацией спектра с помощью электронно-оптических преобразователей, а использование компьютерной техники для управления экспериментальной установкой, хранения, обработки и визуализации результатов, скорее, правило, чем исключение.

Поэтому с методической точки зрения кажется вполне допустимым и разумным использование компьютерных симуляторов спектральных работ в лабораторном практикуме по общей физике. Наглядность эксперимента от такой подмены сильно не пострадает.

С учетом вышесказанного, была сформулирована задача – оставаясь в рамках подхода изложенного в [1], разработать индивидуализированные компьютерные эмуляторы лабораторных работ по теме «Оптические эмиссионные спектры». Достигнутые результаты представлены в данной работе.

Технологические аспекты разработки симуляторов

Компьютерные симуляторы лабораторных работ реализованы в виде кроссплатформенного web-приложения. Приложение включает в себя следующие компоненты: стартовая web-страница, html-шаблоны лабораторных работ и соответствующие им электронные таблицы Google Sheets.

Стартовая web-страница предназначена для формирования запроса на выполнение конкретной лабораторной работы. Идентификационная информация: учебная группа, фамилия и пароль, полученный у преподавателя, вводится студентом в соответствующие поля. Нажатие кнопки «Выполнить» запускает PHP-скрипт, который загружает html-шаблон соответствующей лабораторной работы, содержащий схемы, рисунки, управляющие элементы и Java-скрипты, реализующие математическую модель исследуемого физического процесса.

Наряду с общими элементами шаблон содержит персональные данные студента (фамилию и номер группы) и индивидуализированные для него параметры лабораторной установки. Индивидуализированные данные содержатся в Google-таблице. В ней же ведется протоколирование работы студента. Такая таблица создается для каждой лабораторной работы.

Доступ к Google-таблице осуществляется посредством сценария на платформе Google Apps Script, опубликованного как web-приложение и имеющего уникальный URL. Сценарий Google Apps Script проводит верификацию введенных персональных данных. Если верификация успешна, то формируется строка индивидуальных параметров, возвращаемая в зашифрованном виде в шаблон лабораторной работы.

Некоторые индивидуализированные параметры являются скрытыми, они предназначены для функционирования математической модели физического процесса. Часть из них определяется студентом в процессе выполнения лабораторной работы.

Открытые параметры отображаются на экране, включаются в протокол лабораторной работы и являются дополнительными идентификаторами студента. Обычно это известные параметры лабораторной установки.

Разработку компьютерных симуляторов лабораторных работ в области спектрального анализа предварим анализом работы соответствующих приборов.

Монохроматор УМ-2

Принципиальную схему значительной части спектральных приборов воплощает монохроматор УМ-2. На оптической скамье располагается рейтор с источником света. Свет от источника последовательно проходит фокусирующую линзу, щель коллиматора, объектив коллиматора, дисперсионную призму, установленную на поворотном столике, и выходную трубу, состоящую из проекционного объектива, щели и окуляра.

Вращая барабан поворота призмы, можно последовательно наблюдать в окуляре монохроматора отдельные спектральные линии. Указатель поворота барабана смещается по винтовой дорожке с нанесенными на нее делениями – это шкала поворотного механизма.

Градусные деления, нанесенные на винтовую дорожку барабана монохроматора, носят относительный характер. Для того чтобы связать их с длинами волн эмиссионного спектра, используется излучение с известными характеристиками. Чаще всего для градуировки спектрального прибора используется ртутная лампа низкого давления (например, дуговая ртутная спектральная кварцевая лампа типа ДРСк-125), являющаяся своего рода стандартом, с которым сравниваются все другие источники.

Возможности монохроматора, наглядно демонстрирующего принцип работы спектрального прибора, путем конструктивных изменений могут быть существенно расширены. Использование в качестве диспергирующего элемента дифракционной решетки значительно повышает разрешающую способность прибора.

Выходная щель монохроматора, располагающаяся в фокальной плоскости проекционного объектива, выделяет излучение, принадлежащее узкому интервалу длин волн. Заменяв щель протяженным приемником (например, фотопластинкой), можно сформировать спектрограмму – набор цветных линий, располагающихся в соответствии с длиной волны. Не являясь единственным, такой способ визуализации спектра кажется наиболее естественным.

Получившийся спектральный прибор называется спектрографом. Для регистрации спектра в спектрографах применяются различные фотоэлектрические преобразователи, которые преобразуют энергию излучения в электрический сигнал. График зависимости энергии выходного излучения от длины волны также называют спектром.

Цифровая эмуляция спектрографа

В [3] описана цифровая эмуляция спектрографа, реализованная в информационной системе «Электронная структура атомов». Как указывают авторы, эта система, воссоздавая спектрограммы путем их эмуляции по базе спектральных данных атомных систем, позволяет решать задачи накопления и сравнения спектрограмм, определения методами спектрального анализа состава образцов, обучения специалистов и в целом ряде других случаев.

Базовый функционал любого эмулятора спектрографа – алгоритм преобразования длины волны излучения в триплет RGB, определяющий цвет спектральной линии на экране компьютерного монитора. Возможность представления цвета смесью красного, зеленого и синего (RGB – цветовая модель) обусловлена особенностями строения глаза человека. Поскольку цвет – субъективное понятие, то такое преобразование не может не быть вариативным.

Commission Internationale Eclairage (Международная комиссия по освещению) разработала цветовое пространство CIE1931-RGB, в котором были определены количественные связи между чистыми цветами и физиологическим восприятием цветов человеком [4]. Являясь по сути стандартом, CIE1931-RGB не практичен в расчетах, что стимулирует использование альтернативных подходов.

Так, в [5] задаются семь опорных цветов: фиолетовый (380 нм), голубой (440 нм), бирюзовый (490 нм), зеленый (510 нм), желтый (580 нм), оранжевый (645 нм), красный (780 нм), а остальные цвета вычисляются методом линейной интерполяции.

Свой алгоритм преобразования предложил Дэн Брутон¹. В этом алгоритме, а именно он использован в данной работе, вклад каждой компоненты триплета RGB определяется весовыми функциями, графики которых приведены на рис. 1.

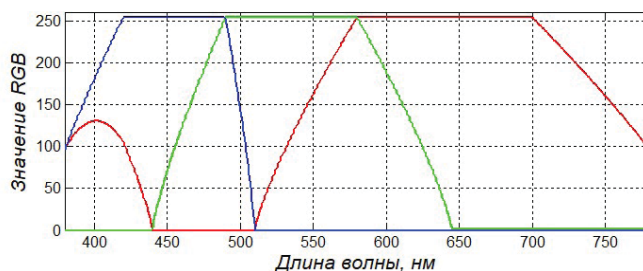


Рис. 1. Значения RGB для длин волн видимого света

Fig. 1. RGB values for visible light wavelengths

Эмулируя спектральный прибор, будем иметь в виду устройство и характеристики реального прибора – монохроматора УМ-2. На рис. 2 приведен фрагмент web-страницы, эмулирующей основные функции спектрографа

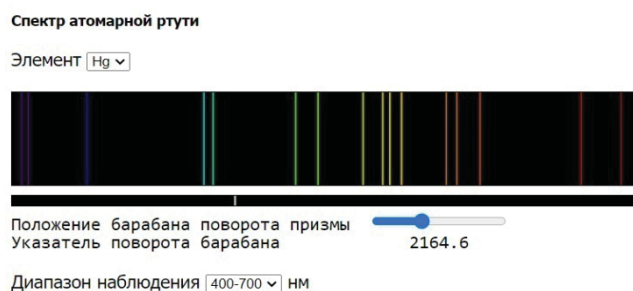


Рис. 2. Экран симулятора спектрографа

Fig. 2. Spectrograph simulator screen

На экран выводятся спектральные линии оптического диапазона спектра выбранного химического элемента. Выбор осуществляется посредством выпадающего списка «Элемент».

Под экраном спектрографа располагается черное прямоугольное поле с вертикальным белым отрезком. Это указатель поворота барабана диспергирующей призмы. Его можно перемещать, добиваясь совпадения с определенной линией спектра, двигая ползунок (слайдер) положения барабана поворота.

Текстовое поле под ползунком отражает значение текущего градусного деления шкалы поворотного механизма. Выпадающий список «Диапазон наблюдения» позволяет масштабировать спектрограмму, наблюдая ее в разных разрешениях.

Градуировка спектрального прибора

Измерительным прибором монохроматор становится после градуировки. Обычно для градуировки используется спектр атомарной ртути.

Реальный спектр ртутной лампы носит сложный характер. В лампе наряду с атомами ртути могут присутствовать ее ионы и примеси. Технологически в трубку для облегчения зажига-

¹ <http://web.archive.org/web/20020802012056/http://www.physics.sfasu.edu/astro/color.html>

ния вводится газ неон или аргон. Интенсивность линий спектра значительно различается, она определяется заселенностью соответствующих энергетических уровней. В силу ряда причин спектральные линии уширяются.

На рис. 2 приведен линейчатый спектр атома ртути в оптической части спектра. Спектр идеализирован, убраны частные особенности, всегда присущие конкретному эксперименту. Отобраны самые яркие линии, их интенсивность нормализована. Соответствующие им длины волн полагаются известными. Такой спектр можно использовать в качестве эталонного. Далее под оптическим диапазоном будем понимать излучение с длинами волн 400–700 нм.

Градуировка монохроматора заключается в последовательном сопоставлении каждой спектральной линии и отсчета по шкале поворотного механизма (барабана).

Аналитическую форму градуировочной кривой можно получить, аппроксимируя методом наименьших квадратов результаты такого сопоставления полиномом второго порядка. Если φ – отсчет по шкале барабана, то

$$\lambda = a + b\varphi + c\varphi^2. \quad (1)$$

В дальнейшем, определив отсчет барабана, при котором наблюдается неизвестная спектральная линия, по градуировочной кривой можно определить соответствующую ей длину волны. Монохроматор становится измерительным прибором.

Параметры диспергирующей призмы являются уникальными характеристиками прибора. В рамках компьютерного эмулятора уникальность призмы, по сути, сводится к значениям трех коэффициентов полинома a , b , c .

Все представленные здесь лабораторные работы предполагают в качестве первого этапа градуировку монохроматора. Задав коэффициенты полинома в Google-таблице и сделав их уникальными для каждого студента, выполним поставленную задачу – индивидуализируем выполняемую лабораторную работу. Разумеется, коэффициенты a , b , c являются скрытыми параметрами, определяемыми в процессе выполнения работы.

Ознакомиться с работой эмулятора спектрографа в «гостевом» режиме можно, перейдя по ссылке². Такой режим ограниченной функциональности, не предполагающий индивидуализации характеристик монохроматора, достигается тем, что параметры диспергирующей призмы задаются следующими значениями $a = c = 0$, $b = 1$. Это приводит к тому, что градуировочная зависимость становится линейной, т. е. $\lambda = \varphi$. Фактически положение барабана поворота призмы в «гостевом» режиме градуировано в нанометрах.

В эмуляторе доступны следующие спектры: Hg – спектр атомарной ртути, H – спектр атомарного водорода, D – спектр атомарного дейтерия, He⁺ – спектр однократно ионизированного атома гелия, H₂ – полосатый спектр молекулярного водорода, XY – спектр смеси атомов трех химических элементов, Sun – сплошной спектр солнечного света. Источником данных о спектрах послужили работы [6–8].

Определение постоянной Ридберга по эмиссионному спектру атомарного водорода

Эмиссионный спектр атома водорода имеет линейчатый вид и распадается на серии. Спектральные линии видимой части спектра называются серией Бальмера. В нее входят четыре линии. Красная линия – длина волны 656,3 нм, обозначается как H_α. H_β – голубая, длина волны 486,1 нм. H_γ – синяя, длина волны 434,1 нм. H_δ – фиолетовая, длина волны 410,2 нм.

² http://pitf.ftf.nstu.ru/resources/VirtLab2020/LabSp/labSp_Ob.html?group=Main&student=Pin&password=BWV565

Эмпирическая формула Ридберга определяет в спектре водорода двумя целыми числами наблюдаемые длины волн, как в видимой области спектра, так и в инфракрасной и ультрафиолетовой:

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad n = m + 1, m + 2, \dots, \quad (2)$$

где R_{∞} – постоянная Ридберга.

Бор установил [9], что целые числа в формуле Ридберга (2) – это номера дискретных энергетических уровней электрона в атоме водорода или же главные квантовые числа. Излучение серии Бальмера реализуется при переходе электрона на второй энергетический уровень с вышележащих уровней. Для наблюдаемых четырех линий серии Бальмера главные квантовые числа равны 3, 4, 5, 6 в порядке убывания длины волны, а постоянная Ридберга определяется

через фундаментальные константы $R_{\infty} = \frac{e^4 m_e}{8ch^3 \epsilon_0^2}$.

С учетом вышесказанного экспериментальную проверку теории Бора и измерение постоянной Ридберга можно провести следующим образом. Измерив длины волн эмиссионного спектра атома водорода в видимой области и сопоставив их с главными квантовыми числами, построить график вида $\lambda^{-1} = f(n^{-2})$. Если теория Бора верна, то график должен иметь вид прямой.

Аппроксимировав результаты измерений линейной функцией, получим выражение вида $\lambda^{-1} = a - b n^{-2}$, но по теории Бора значения коэффициента $a = R_{\infty}/4$, а $b = R_{\infty}$.

Угловой коэффициент прямой, величина которого равняется постоянной Ридберга, можно оценить и непосредственно по графику, поскольку $b = \left| \Delta \lambda^{-1} \right| / \Delta n^{-2}$.

Лабораторная работа выполняется в два этапа. Первый этап – градуировка монохроматора. Зайдя на web-страницу симулятора и выбрав в выпадающем списке «Элемент» – Hg, студент формирует на экране линейчатый спектр ртути. Перемещая указатель, определяет для каждой спектральной линии значение деления шкалы поворотного механизма. Строит градуировочный график и аппроксимирует результаты измерений полиномом второго порядка (1).

Второй этап. Выбрав в списке «Элемент» – H, студент формирует на экране линейчатый спектр атомарного водорода. Перемещая указатель, определяет для каждой спектральной линии значение деления шкалы поворотного механизма. Используя аппроксимационный полином (1), рассчитывает длину волны каждой спектральной линии. Результаты измерений представляет в виде графика $\lambda^{-1} = f(n^{-2})$, и, рассчитав угловой коэффициент, получает постоянную Ридберга.

Измерение изотопического сдвига линий спектров водорода и дейтерия

Разрабатывая теорию атома, Бор исходил из предположения о том, что электрон вращается по круговой орбите вокруг бесконечно тяжелого, а значит, неподвижного ядра. Допущение вполне оправданное, о чем свидетельствует согласие теории и эксперимента. Индекс постоянной Ридберга R_{∞} показывает, что масса ядра полагается бесконечно большой.

Вместе с тем в системе двух тел конечной массы каждое из них будет двигаться вокруг центра масс системы. Такое уточнение модели отразится на эмиссионном спектре. Наибольший интерес представляют различия, которые обнаруживаются в спектрах различных изотопов химических веществ. Значим этот эффект прежде всего для легких атомов.

Ограничимся самым легким из них. Известны три изотопа водорода: протий, дейтерий и тритий, различающиеся количеством нейтронов в ядре. Под водородом обычно подразуме-

вается именно протий. Ядро протия состоит из протона, дейтерия – из протона и нейтрона, трития – из протона и двух нейтронов.

Изложенный в [9] расчет, учитывающий движение ядра, приводит к тому, что в постоянную Ридберга вместо массы электрона войдет приведенная масса системы ядро – электрон, а скорректированная постоянная Ридберга будет различной для разных изотопов:

$$\mu = \frac{m_e}{1 + m_e/M_j}, \quad R_H = \frac{R_\infty}{1 + m_e/M_H}, \quad R_D = \frac{R_\infty}{1 + m_e/M_D}.$$

Различия масс ядер изотопов приводят к тому, что спектральные линии их эмиссионного спектра сдвигаются. Это явление называется изотопическим сдвигом. При этом относительный изотопический сдвиг оказывается одинаков для всех спектральных линий:

$$\frac{\lambda_H - \lambda_D}{\lambda_H} = \frac{m_e(M_D - M_H)}{M_D(M_H - m_e)} \frac{\lambda_D R_\infty}{(1 + m_e/M_D)} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{m_e(M_D - M_H)}{M_D(M_H - m_e)}. \quad (3)$$

Пусть m_p – масса протона, m_n – масса нейтрона. Тогда массы ядер изотопов $M_H = m_p$, $M_D = m_p + m_n$. Если не учитывать различий в массах протона и нейтрона, $m_p \approx m_n$, и пренебречь вторым порядком малости $m_e/m_p \ll 1$, то (3) можно преобразовать к виду

$$\frac{m_p}{m_e} \approx \frac{\lambda_H}{2(\lambda_H - \lambda_D)}. \quad (4)$$

Таким образом, экспериментальное определение изотопического сдвига излучения водорода и дейтерия позволяет рассчитать отношение масс протона и электрона.

Приступив к выполнению лабораторной работы, студент по спектру атомарной ртути выполняет градуировку монохроматора. Затем проводит измерение значения деления шкалы поворотного механизма для спектральных линий α , β , γ , δ атома водорода и дейтерия, и, используя аналитическую зависимость градуировочной кривой (1), определяет их длины волн, а по изотопическому сдвигу, согласно (4), рассчитывает соотношение масс протона и электрона.

Эмиссионный спектр водородоподобного иона

Теория атома Бора применима не только непосредственно к атому водорода, но и к водородоподобным ионам. Под водородоподобным ионом понимают ион, состоящий из ядра с зарядом $+Z|e|$ (Z – зарядовое число) и одного электрона. Например: He^+ , Li^{2+} , Be^{3+} , B^{4+} и т. п.

В 1897 году в спектре излучения звезды Дзета Кормы была обнаружена спектральная серия, очень похожая на серию Бальмера эмиссионного спектра водорода. Серия получила название в честь астронома Пикеринга. В ней выделяются две группы чередующихся спектральных линий. Одна из них практически совпадает с линиями серии Бальмера водорода. Малые различия вполне объяснялись изотопическим эффектом.

Формула Бальмера, допускающая как целые, так и полуцелые значения главного квантового числа, удовлетворительно описывала серию Пикеринга. Целые значения соответствовали линиям Бальмера, полуцелые – линиям, располагающимся между ними. Была высказана гипотеза об особом состоянии водорода в звездах. Однако Бор предложил альтернативную гипотезу о том, что эта серия соответствует водородоподобному иону.

Пренебрегая изотопическим эффектом, модифицируем формулу Ридберга (2) для такого объекта. Для этого достаточно заменить R_∞ на $Z^2 R_\infty$.

Приравняем длину волны красной H_α и голубой линии H_β серии Бальмера и соответствующих линий спектра иона:

$$Z^2 R_\infty \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R_\infty \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right), \quad Z^2 R_\infty \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{(n+2)^2} \right) = R_\infty \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2} \right).$$

Из чего следует, что $2Z = m$, $3Z = n$, а $4Z = n + 2$, но тогда $Z = 2$, $m = 4$, $n = 6, 7, 8, \dots$.

Таким образом, Бор доказал, что серия Пикеринга – это излучение однократно ионизированного атома гелия, возникающее при переходе электрона на четвертый энергетический уровень с вышележащих, начиная с шестого. Излучение при переходе с пятого уровня на четвертый лежит в инфракрасной области и не попадает в оптический диапазон.

С учетом изотопического эффекта серия Пикеринга описывается формулой

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{4R_\infty}{1 + m_e/M_y} \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 6, 7, 8, \dots$$

Подтверждением правоты Бора стали лабораторные исследования искровых спектров гелия, в которых обнаружили спектральные линии серии Пикеринга.

С учетом вышесказанного экспериментальные исследования эмиссионного спектра ионизированного гелия позволяют определить массу атома. Для этого следует измерить длины волн серии Пикеринга, и, сопоставив их с главными квантовыми числами, построить график вида $\lambda^{-1} = f(n^2)$. Согласно теории атома Бора, этот график должен быть линейным и количественно соответствовать выражению

$$\lambda^{-1} = a - b n^{-2}, \quad a = \frac{R_\infty}{4(1 + m_e/M_y)}, \quad b = \frac{4R_\infty}{1 + m_e/M_y}.$$

Угловой коэффициент прямой b можно оценить непосредственно по графику либо построив аппроксимационное уравнение. Тогда для массы атома справедливо $M_y = \frac{b m_e}{4R_\infty - b}$.

Если пренебречь разницей масс протона и нейтрона и малой массой электрона, то масса атома равняется массе ядра. Пусть химический элемент X имеет N нуклонов, тогда $M_x \approx N m_p$. Зная массу атома, можно определить количество нуклонов, содержащихся в его ядре.

Лабораторная работа начинается с градуировки монохроматора. Затем, выбрав в списке «Элемент» – He^+ , студент формирует на экране линейчатый спектр однократно ионизированного атома гелия. Перемещая указатель, определяет для каждой спектральной линии значение деления шкалы поворотного механизма, затем рассчитывает длину волны всех спектральных линий. Результаты измерений представляет в виде графика $\lambda^{-1} = f(n^2)$ и, рассчитав угловой коэффициент, определяет массу атома гелия и количество нуклонов в ядре.

Дополнительные задания

Лабораторные работы могут, по усмотрению преподавателя, содержать факультативные задания. Приведем доступные варианты.

Спектральные исследования позволяют определить химический состав пробы. Смесь атомов, маркированная в выпадающем списке «Элемент» символами XU , состоит из атомов трех химических элементов. Выбрав этот вариант, студент получает на экране спектрограмму смеси. Определив длины волн этих линий, он идентифицирует элементы, входящие в состав смеси, по таблице, в которой представлены аналитические (последние) спектральные линии 27 элементов. Разумеется, набор химических элементов, входящих в состав смеси, индивидуализирован.

Атомарный и молекулярный спектры излучения принципиально различаются. Колоссальное количество спектральных линий молекулярного спектра, располагаясь весьма плотно, сливаются в полосы. Поэтому молекулярный спектр называется полосатым. Полосы разделяются

узкими темными промежутками. Различить отдельные спектральные линии можно, лишь используя прибор с высоким спектральным разрешением.

В ознакомительных целях студент может сформировать на экране спектрографа полосатый спектр молекулярного водорода. Посмотреть его в диапазоне 400–700 нм, а затем в высоком разрешении, используя доступные поддиапазоны.

Заключение

Разработан компьютерный эмулятор спектрографа, формирующий на экране монитора эмиссионные атомные спектры. Спектрограммы дополняются механизмом измерения относительного положения спектральных линий, а процедура градуировки по спектру атомарной ртути превращает спектрограф в измерительный прибор. Эмулятор лежит в основе виртуальных лабораторных работ по атомной физике.

Измерив длины волн серии Бальмера атомарного водорода, можно провести экспериментальную проверку теории атома Бора и рассчитать постоянную Ридберга. Измерение изотопического сдвига спектральных линий водорода и дейтерия дает возможность сопоставить массы протона и электрона. По спектральным линиям серии Пикеринга (излучению однократно ионизированного атома гелия) можно определить массу ядра атома гелия и количество нуклонов в нем. Поэтому работа со спектрами даже в режиме компьютерного симулятора – важное звено в процессе изучения физики.

Технологически лабораторные работы выстроены так, что параметры лабораторной установки, используемой студентом, индивидуализированы. Это достигается прежде всего вариабельностью параметров диспергирующей призмы монохроматора.

Список литературы

1. **Зайкин А. Д., Суханов И. И.** Индивидуализированные компьютерные симуляции лабораторных работ по физике // Сибирский физический журнал. 2021. Т. 16, № 2. С. 94–104. DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-2-94-104
2. **Иванова Н. А., Киврина Н. К., Клячин Н. А., Маркун Ф. Н.** Лабораторный практикум «Спектры атомов и молекул». М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 124 с.
3. **Казаков В. В., Яценко А. С., Ковалев В. С., Казаков В. Г.** Цифровая эмуляция спектрографа // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2011. Т. 9, № 3. С. 30–36.
4. **Smith T., Guild J.** The C.I.E. colorimetric standards and their use // Transactions of the Optical Society, Volume 33, Issue 3, pp. 73–134 (1931). DOI:10.1088/1475-4878/33/3/301
5. **Казаков В. В., Казаков В. Г., Мешков О. И., Жумадилов К. Б.** Научная и когнитивная графика в информационных системах по атомной спектроскопии // International Journal of Open Information Technologies. 2017. Т. 5, № 11. С. 6–14.
6. **Kazakov V. V., Kazakov V. G., Kovalev V. S., Meshkov O. I., Yatsenko A. S.** Electronic structure of atoms: atomic spectroscopy information system // Physica Scripta. 2017. Vol. 92, no. 10. DOI: 10.1088/1402-4896/aa822e
7. **Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М., Славный В. А., Шрейдер Е. Я.** Таблицы спектральных линий. М.: Наука, 1977. 798 с.
8. **Силькис Э. Г., Станкевич А. С., Шоненков А. В.** Атлас спектров газоразрядной лампы ДВС-25 в диапазоне 320–1100 нм // Аналитика и контроль. 2017. Т. 21, № 2. С. 103–115. DOI 10.15826/analitika.2017.21.2.003
9. DOI 10.15826/analitika.2017.21.2.003
10. **Шпольский Э. В.** Атомная физика: Учебник в 2 т. СПб.: Лань. 2022. Т. 1: Введение в атомную физику. 560 с.

References

1. **Zaikin A. D., Suhanov I. I.** The Physics Laboratory Works – Individualized Computer Simulations. *Siberian Journal of Physics*, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 94–104. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2021-16-2-94-104
2. **Ivanova N. A., Kivrina N. K., Klyachin N. A., Markun F. N.** Laboratornyi praktikum «Spektry atomov i molekul» [Laboratory workshop “Spectra of atoms and molecules”]. Moscow, NRNU MEPhI, 2012, 124 p. (in Russ.)
3. **Kazakov V. V., Yatsenko A. S., Kovalev V. S., Kazakov V. G.** Digital spectrograph emulation. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2011, vol. 9 (3), pp. 30–36.
4. **Smith T., Guild J.** The C.I.E. colorimetric standards and their use. *Transactions of the Optical Society*, 1931, vol. 33, iss. 3, pp. 73–134 (1931). DOI:10.1088/1475-4878/33/3/301
5. **Kazakov V. V., Kazakov V. G., Meshkov O. I., Zhumadilov K. B.** Scientific and cognitive graphics in information systems on atomic spectroscopy. *International Journal of Open Information Technologies*, 2017, vol. 5, no. 11, pp. 6–14.
6. **Kazakov V. V., Kazakov V. G., Kovalev V. S., Meshkov O. I., Yatsenko A. S.** Electronic structure of atoms: atomic spectroscopy information system. *Physica Scripta*, 2017, vol. 92, no. 10. DOI: 10.1088/1402-4896/aa822e
7. **Zaidel' A. N., Prokof'ev V. K., Raiskii S. M., Slavnyi V. A., Shreider E. Ya.** Tablitsy spektral'nykh linii [Tables of Spectral Lines]. Moscow, Nauka publ., 1977, 798 p. (in Russ.).
8. **Silkis E. G., Stankevich A. S., Shonenkov A. V.** Atlas spectrum of gas discharge DVS-25 lamp in the range of 320–1100 nm. *Analytics and Control*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 103–115 (in Russ.). DOI 10.15826/analitika.2017.21.2.003
9. **Shpolsky E. V.** Atomic Physics: textbook. St. Petersburg, Lan publ., 2022, vol. 1: Introduction to Atomic Physics, 560 p. (in Russ.)

Сведения об авторах

Заикин Андрей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент

Заикин Артем Андреевич, независимый исследователь

Information about the Authors

Andrey D. Zaikin, Candidate of Science (Technical), Associate Professor

Artem Zaikin, Independent Researcher

*Статья поступила в редакцию 22.04.2024; одобрена после рецензирования 06.09.2024;
принята к публикации 27.09.2024*

*The article was submitted 22.04.2024; approved after reviewing 06.09.2024;
accepted for publication 27.09.2024*