

Лабораторная работа №52

Изучение спектра излучения атома водорода

Цель работы: наблюдение и идентификация спектров спонтанного излучения, возбужденного электрическим разрядом в газах при низком давлении; измерение длин волн линий серии Бальмера атомарного водорода и определение постоянной Ридберга для водорода.

Строение атома

Атом состоит из ядра с положительным зарядом $Q_{\text{ядра}} = Ze$, где Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева, e – заряд электрона и распределенных вокруг него электронов. Линейный размер атома определяется размером его электронной оболочки, и составляет порядка 1 ангстрема ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$), тогда как размер ядра атома $10^{-12} - 10^{-13} \text{ см}$.

Состояние электронов в атоме характеризуется пространственным распределением их заряда. При этом электроны как бы «размазаны» в пространстве, формируя электронное облако. В принципе, возможны любые конфигурации этого облака, однако существуют некоторые устойчивые распределения электронов, называемые электронными состояниями. Каждое состояние характеризуется определенным набором квантовых чисел, энергией и временем жизни. Переход между состояниями происходит с выделением или поглощением энергии.

Масса атома определяется, в основном, массой ядра. Атомы одного элемента могут иметь разную массу. Такие атомы называются изотопами. Различие масс изотопов обусловлено, при одном и том же числе протонов, разным количеством нейтронов, содержащихся в ядре атомов. Примером изотопного ряда служат атомы водорода (1 протон), дейтерия (1 протон + 1 нейтрон) и трития (1 протон + 2 нейтрона).

Уровни энергии атома

Простейшая «планетарная» модель атома (модель Резерфорда, 1913 г.) рассматривает его как систему электронов, движущихся вокруг неподвижного ядра. До экспериментов Резерфорда, в начале 1900-х гг. была популярна модель атома, предложенная Дж. Дж. Томсоном, согласно которой атом напоминал кекс с изюмом (внутри положительно заряженного шара находились электроны). При рассеянии α -частиц на таком атоме должно было бы наблюдаться очень малое отклонение этих частиц от первоначальной траектории. Наблюдения Резерфорда и его сотрудников убедительно показали, что часть α -частиц рассеивается под очень большими углами. С точки зрения модели Томсона это было совершенно невероятным событием, однако оно вполне находило объяснение, если предположить, что весь положительный

заряд атома сосредоточен в ядре с линейными размерами порядка 10^{-12} – 10^{-13} см (на 5 порядков меньше размеров атома).

Полная внутренняя энергия такой системы E равна сумме кинетической энергии электронов и потенциальной энергии взаимодействия электронов с ядром и между собой. Для водородоподобных атомов (на орбите один электрон) кинетическая энергия T :

$$T = \frac{mV^2}{2} = \frac{p^2}{2m_e} \quad (1)$$

m_e , V и p – масса, скорость и импульс электрона, а потенциальная энергия U :

$$U(r) = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (2)$$

зависит только от радиуса r орбиты электрона (здесь $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/Н·м²).

Если полная энергия системы $E = T + U < 0$, то электрон находится в потенциальной яме (рис. 1), и его движение в пространстве ограничено некоторым максимальным значением $\max r = r$, определяемым из условия $\max T = 0$, $E = U(r)$.

При $E > 0$ электрон может уйти из атома, т. е. происходит ионизация атома. Для круговой орбиты имеем уравнение движения электрона

$$\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e V^2}{r} \quad (3)$$

Из (1) – (3) получаем выражение для полной энергии водородоподобного атома:

$$E = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (4)$$

В рамках «планетарной» модели атома остается необъясненной его устойчивость. Ведь движение электрона по круговой орбите есть движение с ускорением. А всякий заряд, движущийся с ускорением, должен излучать электромагнитную волну. Следовательно, электрон должен терять энергию и, в конце концов, за время порядка 10^{-8} – 10^{-10} с упасть на ядро.

Чтобы объяснить устойчивость атомов и их линейчатые спектры, наблюдаемые в эксперименте, Н. Бор в 1913 г. сформулировал следующие постулаты, составляющие основу квантовой теории Бора.

1. Разрешены только такие круговые орбиты, для которых момент импульса электрона равен целому числу в единицах постоянной Планка h , деленной на 2π ($\hbar = h/2\pi$).

$$m_e V r = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar \quad (5)$$

n – целое число. Электроны не испускают излучения, двигаясь по своим орбитам внутри атома.

2. Излучение возникает только при переходе электрона с одной квантованной орбиты на другую. Частота ν этого излучения определяется изменением полной

энергии, т. е. разностью энергий атома в начальном (верхняя орбита с большей энергией) и конечном состояниях (нижняя орбита с меньшей энергией):

$$h\nu = E_{\text{верх}} - E_{\text{ниж}} \quad (6)$$

Эти условия квантования энергии приводят к дискретным орбитам электронов.

Правило квантования Бора позволяет вычислить радиусы стационарных орбит. Подставляя в уравнение (1) выражение для величины импульса электрона из (2), получаем выражение для радиусов:

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2 Z} n^2 = \frac{\epsilon_0 \hbar^2}{\pi m_e Z e^2} n^2 \quad (7)$$

Тогда уровни энергии атома могут быть записаны в виде

$$E_n = -\frac{m_e e^4 Z^2}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{hcR_\infty Z^2}{n^2} \quad (8)$$

где $n = 1, 2, \dots$ – главное квантовое число, Z – заряд ядра, $R_\infty = 2\pi^2 m_e e^4 / ch^3 = 1.097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга в приближении бесконечной массы ядра, c – скорость света в вакууме.

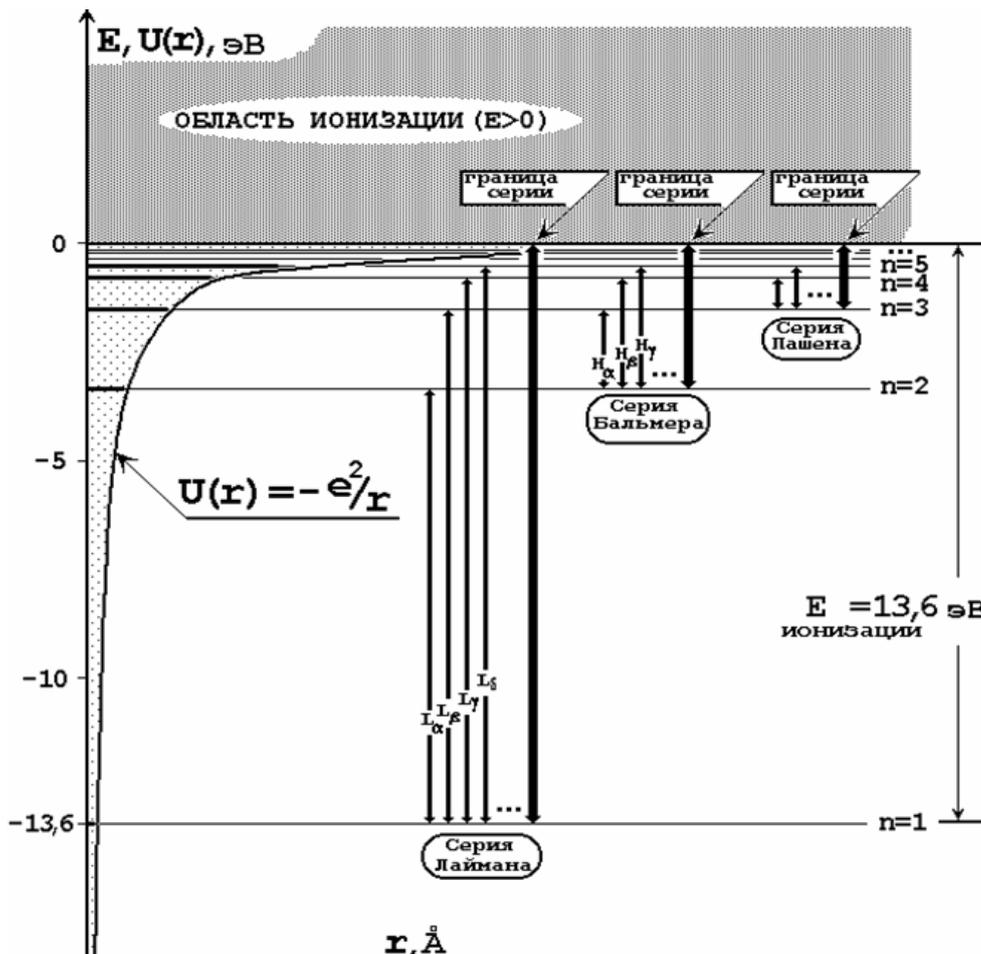


Рис. 1. Схема уровней энергии атома водорода

Значение R_∞ , найденное Бальмером в эксперименте немного отличалось от этого значения. Таким образом, соответствие теории Бора с экспериментом достаточно хорошее. Расхождение в величине R_∞ объясняется неточностью значений фундаментальных констант, которыми пользовался Бор, а также необходимостью учета ряда поправок, главной из которых является поправка на движение ядра.

Возможные значения энергии атома графически можно изобразить в виде схемы энергетических уровней (рис. 1). Самый нижний уровень (главное квантовое число $n = 1$) называется основным, а все вышележащие – возбужденными уровнями, так как для перехода на эти уровни из основного состояния атому необходимо передать извне соответствующую порцию энергии.

При спонтанных переходах с уровня m на уровень n испускается квант света с энергией

$$h\nu = E_m - E_n = hcRZ^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (9)$$

длиной волны соответственно

$$\frac{1}{\lambda} = cRZ^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (10)$$

В спектре атома водорода ($Z=1$) выделяют, в зависимости от номера n (номер нижней орбиты), следующие серии.

Лаймана: $1/\lambda = R(1/1^2 - 1/m^2)$, $\lambda \approx 91 \div 122$ нм, ультрафиолетовая область спектра ($m = 2 - 20$).

Бальмера: $1/\lambda = R(1/2^2 - 1/m^2)$, $\lambda \approx 365 \div 656$ нм, видимая область спектра ($m = 3 - 26$).

Пашена: $1/\lambda = R(1/3^2 - 1/m^2)$, $\lambda \approx 820 \div 1875$ нм, инфракрасная область спектра ($m = 4 \div 26$);

Брэккета: $1/\lambda = R(1/4^2 - 1/m^2)$, $\lambda \approx 1458 \div 4051$ нм, инфракрасная область спектра ($m = 5 \div 13$);

Пфунда: $1/\lambda = R(1/5^2 - 1/m^2)$, $\lambda \approx 2278 \div 7458$ нм, инфракрасная область спектра ($m = 6 \div 11$).

В видимый диапазон попадает только начало серии Бальмера ($m = 3 \div 6$). В далекой ИК и микроволновой области имеются еще четыре серии (табл. 1).

Таблица 1. Длины волн линий в спектральных сериях (λ , Е)

Серия	Водород, λ , нм
Серия	121,57
Лаймана $n = 2 \div 6$	102,57
	97,25
	94,97
	93,78
Серия Бальмера $n = 3 \div 7$	656,28
	486,13
	434,05

	410,17
	397,01
Серия	1875,1
Пашена	1281,8
n = 4÷8	1093,8
	1004,9
	954,6

В 1914 г. Дж.Франк и Г. Герц экспериментально подтвердили правильность представления о квантовании энергетических уровней, бомбардируя атомы паров ртути электронами с известной энергией. Они измеряли энергию, теряемую электронами при рассеянии на атомах ртути.

Электроны с энергией ниже определенного порогового значения вообще не передавали энергию атомам ртути; но как только энергия электронов оказывалась достаточной для возбуждения перехода атома ртути на ближайший уровень с более высокой энергией, электроны интенсивно передавали свою энергию. Это было убедительным доказательством существования квантованных энергетических уровней. Теория Бора позволила объяснить и происхождение рентгеновского излучения в многоэлектронных атомах: это излучение испускается в результате выбивания электрона с внутренней оболочки атома – на освободившееся место переходят электроны с внешних оболочек атома. Поскольку энергия при этом изменяется значительно больше, чем при оптическом переходе, рентгеновское излучение оказывается более коротковолновым, чем видимый свет. Теория Бора объяснила не только линии Бальмера, наблюдаемые в видимой части спектра, но и другие серии линий в ультрафиолетовой и инфракрасной области, которые были обнаружены с помощью фотографических методов.

Экспериментальная часть.

Экспериментальное определение постоянной Ридберга R.

Для определения постоянной Ридберга используется серия Бальмера спектра излучения

атомарного водорода:

$$\frac{1}{\lambda} = cR\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right), (Z=1) \quad (11)$$

где n = 3, 4, 5, 6.

Схема установки приведена на рис.2. Для получения спектра используется призмный монохроматор «УМ-2». Излучение источников света: лампы (1) и лазера (2) с помощью линзы (3) фокусируется на входную щель монохроматора (4). Ширину входной щели можно изменять, вращая винт (5), расположенный снизу щели. **Вращать этот винт нужно медленно, смотреть при этом на экран, следить, чтобы яркость линий на экране не**

была слишком сильной. Иначе можно ослепить камеру. После выходной щели монохроматора установлена телекамера (6), сигнал с которой поступает на компьютер. На монохроматоре установлен барабан с делениями (7) и отсчетным движком (8), по которому производится отсчет показаний. При вращении барабана поворачивается линза внутри монохроматора и происходит

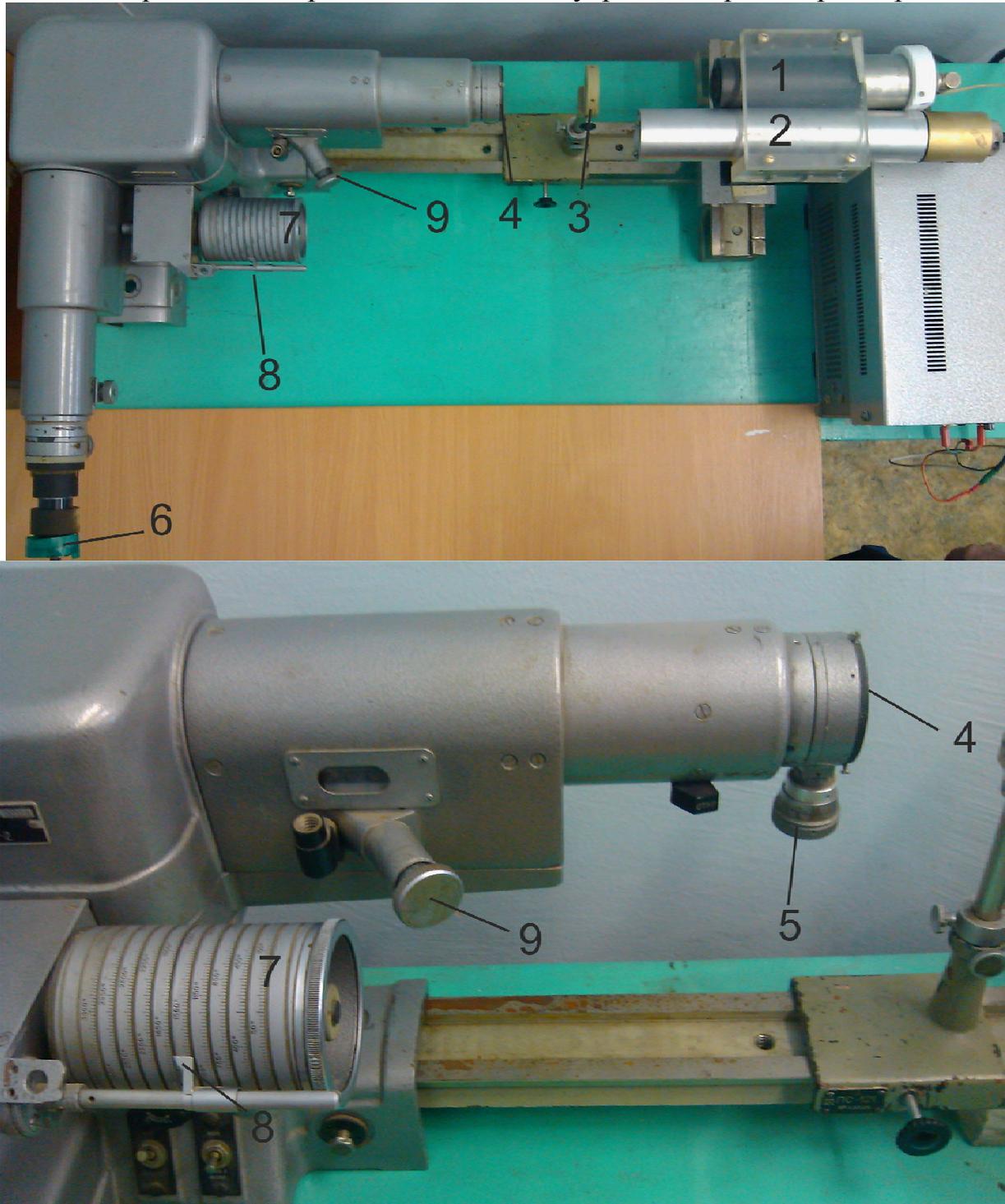


Рис. 2. Схема установки.

перемещение спектра относительно выходной щели. На боку монохроматора установлен винт (9), помощью которого производится настройка резкости изображения на экране дисплея.

Порядок выполнения упражнения

Вначале производится градуировка барабана монохроматора по известному спектру излучения лампы с полым катодом из кальция (Ca), т.е. необходимо получить график зависимости длины волны излучения от показаний барабана монохроматора. В лампе, наполненной неоном, загорается разряд, ионы неона выбивают из катода, находящегося под отрицательным напряжением -300 В атомы кальция. Таким образом в спектре излучения присутствуют спектральные линии атомов неона (Ne) и кальция (Ca). Для проведения градуировки необходимо:

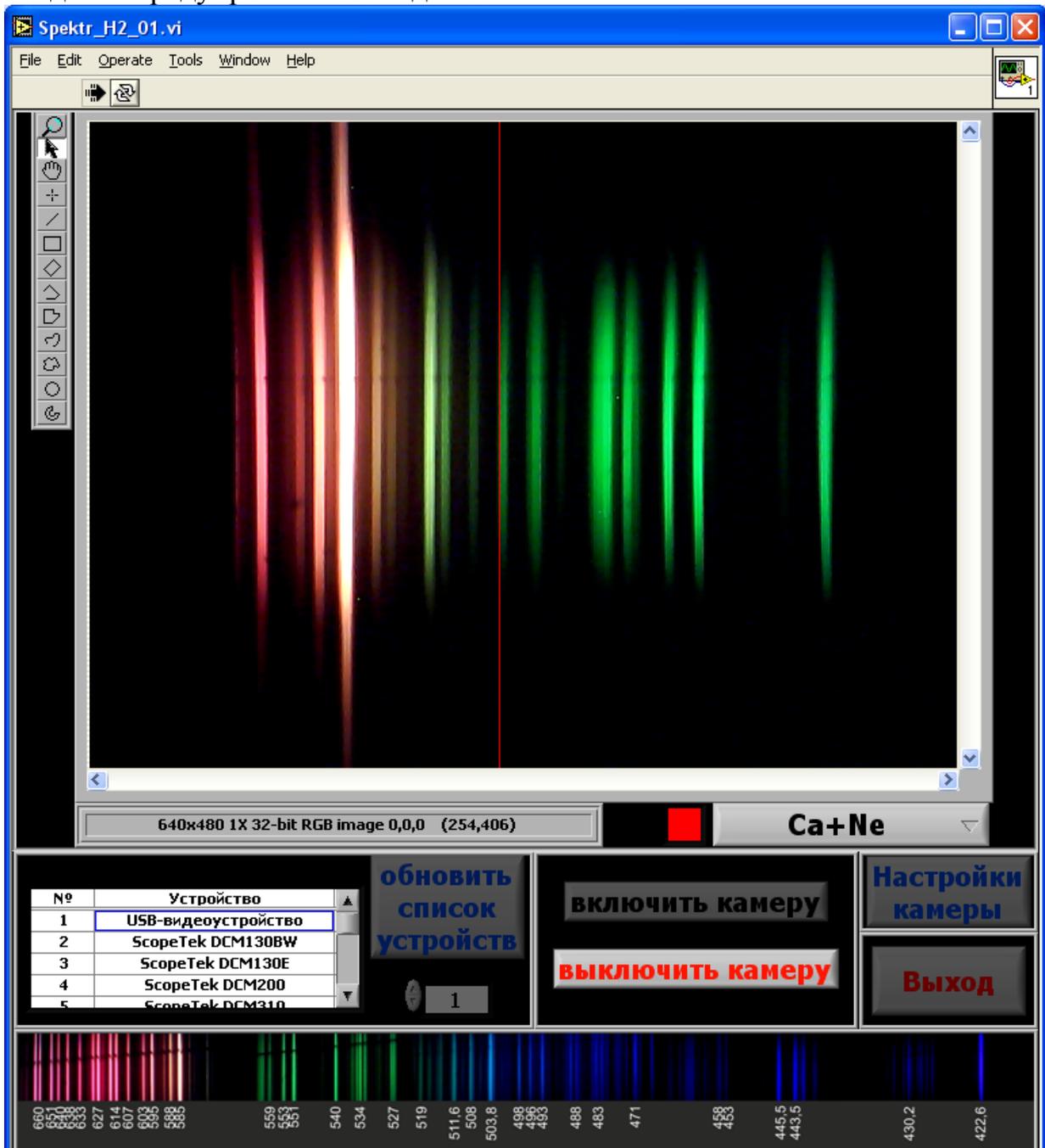


Рис.3. Скриншот программы.

- включить компьютер и вызвать программу «водород.exe», появится изображение, представленное на рис.3.

- нажать кнопку «обновить список устройств» и выбрать «1» - «USB-видеоустройство»
- нажать кнопку «настройки камеры». В появившейся таблице убрать галочку в строке баланс белого и установить движки как показано на рисунке 4.
- включить камеру, нажав кнопку «включить камеру»,
- вращать барабан призмы (позиция 7 на рис.2) так, чтобы движок 8 на барабане должен быть в области 2200;
- **входную щель монохроматора закрыть, выворачивая винт 5.**
- зажечь лампу, включив последовательно тумблеры «Сеть» на блоке питания лампы Б5-50. **Напряжение на источнике должно быть 299 В, ток 10-13 мА;**

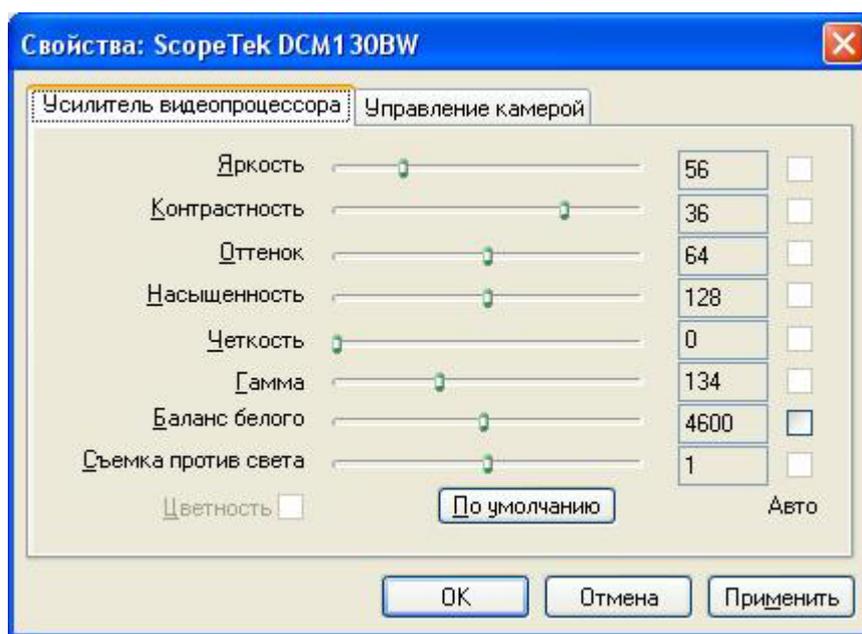


Рис.4. Настройка свойств телекамеры.

- установить лампу напротив монохроматора и с помощью линзы, установленной между лампой и монохроматором, направить излучение лампы на входную щель монохроматора;
- медленно вращая винт входной щели (рис.2, позиция 5), увеличить ширину входной щели 4 монохроматора и получить изображения линий на экране. **Следить чтобы яркость линий была не очень сильной, иначе матрица в телекамере может выйти из строя;**
- с помощью винта (9) настроить изображение на резкость, чтобы на экране были четко видны линии спектра;
- на экране имеется линия, она будет являться маркером, по которому будет производиться отсчет барабана; мышкой передвиньте ее в левую половину экрана. Вращая телекамеру 6, установить маркер вертикально, параллельно линиям. Цвет маркера можно менять (квадратик под экраном). **В дальнейшем положение маркера не смещать;**
- под изображением экрана справа имеется табло, нажать и выбрать спектр Ca+Ne;

- вращая барабан поворота призмы (рис. 2, 7), последовательно совместите изображение линий в красной, желтой, зеленой, темно-зеленой, голубой и фиолетовой областях спектра

(табл. 2) и запишите показания барабана для каждой из этих линий в таблицу 2, сравнивая изображение спектра на экране со спектром, представленным под экраном;

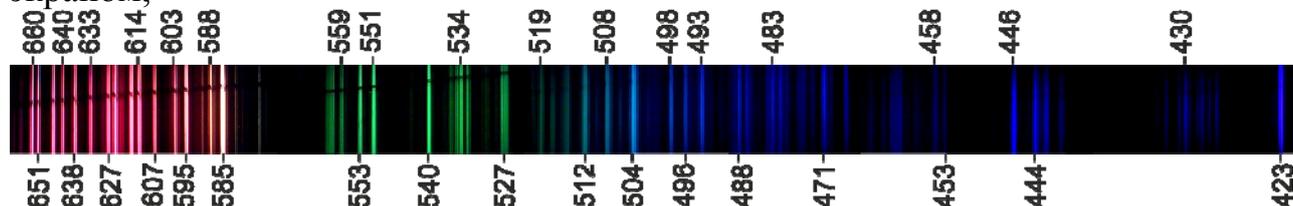


Рис.5. Спектр лампы с полым катодом из кальция (Ca).

Лампа Ca

Таблица 2

бараба H														
λ , нм	42	43	44	44	45	47	48	49	50	51	52	53	54	55
	3	0	3	5	3	1	8	3	3	1	7	4	0	1

бараба H														
λ , нм	55	55	58	58	59	60	60	61	62	63	64	65	66	
	3	9	5	8	5	3	7	4	7	3	0	1	0	

- используя результаты измерений, постройте градуировочную кривую $\lambda(n)$, откладывая по оси Y значения длины волны, а по оси X показания барабана.

- установить перед монохроматором лазер, передвинув рейтер, на котором установлены излучатели. В качестве источника водорода используется газоразрядная трубка He-Ne лазера, таким образом, в ее спектре присутствуют спектральные линии гелия, неона и водорода. Особенностью данного источника состоит в том, что синяя и фиолетовая линии водорода яркие и хорошо наблюдаются в спектре.

- под изображением экрана на табло справа, нажать и выбрать спектр лазер;

- вращая барабан монохроматора, совместить яркую желтую линию неона (Ne 585,2 нм) с маркером на экране. Проверить показание движка на барабане. Это показание должно совпадать с показанием, записанным ранее с лампой с полым катодом.

- вращая барабан поворота призмы (рис. 2, б), последовательно совместите изображение линий водорода: красной (n=3), голубой (n=4), синей (n=5) и фиолетовой (n=6) линий спектра

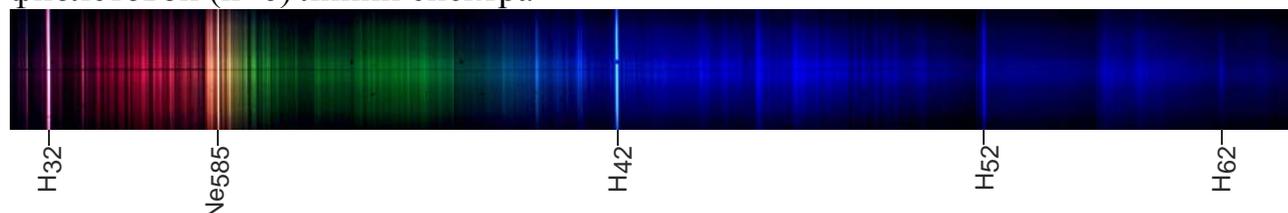


Рис. 6. Спектр трубки He-Ne лазера

(табл. 2) и запишите показания барабана n для каждой из этих линий в таблицу 3.

Спектр лазера

Таблица 3

показания барабана					
	Фиолет. H ₆₂ (n=6)	Синяя H ₅₂ (n=5)	Голубая H ₄₂ (n=4)	Желтая Ne	Красная H ₃₂ (n=3)
λ , нм = *10 ⁻⁹ м				585	
$X = 1/n^2$					
$Y = 1/\lambda$, м ⁻¹					

- нанести показания барабана на построенный ранее график и определить длину волны красной, голубой, синей и фиолетовой линий водорода. Длины волн из графика выражены в нанометрах. Чтобы перевести в метры, нужно умножить на 10⁻⁹. Например, $\lambda = 400$ нм = $400 \cdot 10^{-9}$ м = $0.4 \cdot 10^{-6}$ м. Заполните также строки $X = 1/n^2$ $Y = 1/\lambda$. Пример вычисления $1/\lambda$ показан ниже.

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.4 \cdot 10^{-6}} = 2.5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1} \quad (12)$$

Для нахождения постоянной Ридберга используем графический метод. Преобразуем уравнение (10) к виду:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{cR}{2^2} - cR \frac{1}{n^2} \quad (13)$$

Обозначим $Y = \frac{1}{\lambda}$, $X = \frac{1}{n^2}$, $A = \frac{cR}{4}$, $k = cR$. Тогда (13) записывается в виде уравнения прямой: $Y = A + kX$, где k – тангенс угла наклона прямой.

Необходимо построить график зависимости $Y = \frac{1}{\lambda}$ от $X = \frac{1}{n^2}$, аппроксимировать его линейной зависимостью и найти значение k . Среднее значение постоянной Ридберга равно $\langle R \rangle = k/c$. Сравнить полученное значение постоянной с табличным значением, и объяснить причины расхождения.

Контрольные вопросы

1. Строение атома и размеры атома и ядра.
2. Силы, действующие на электрон в атоме. Кинетическая, потенциальная и полная энергия электрона в атоме водорода.
3. Постулаты Бора.
4. Серии в спектре атома водорода.

Литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики т.5, ч.1. Атомная физика. М. «Наука», 1980 г. и др. издания.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. 11-е изд., стер. - М.: 2006.— 560 с. Учебное пособие
3. Детлаф А.А и Яворский Б.М. Курс физики. М. Высшая школа. 2002.