

## 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  $\alpha$ -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  $\alpha$ -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  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/Н·м<sup>2</sup>).

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  $2\pi$  ( $\hbar = h/2\pi$ ).

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

$n$  – 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  $\nu$  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.

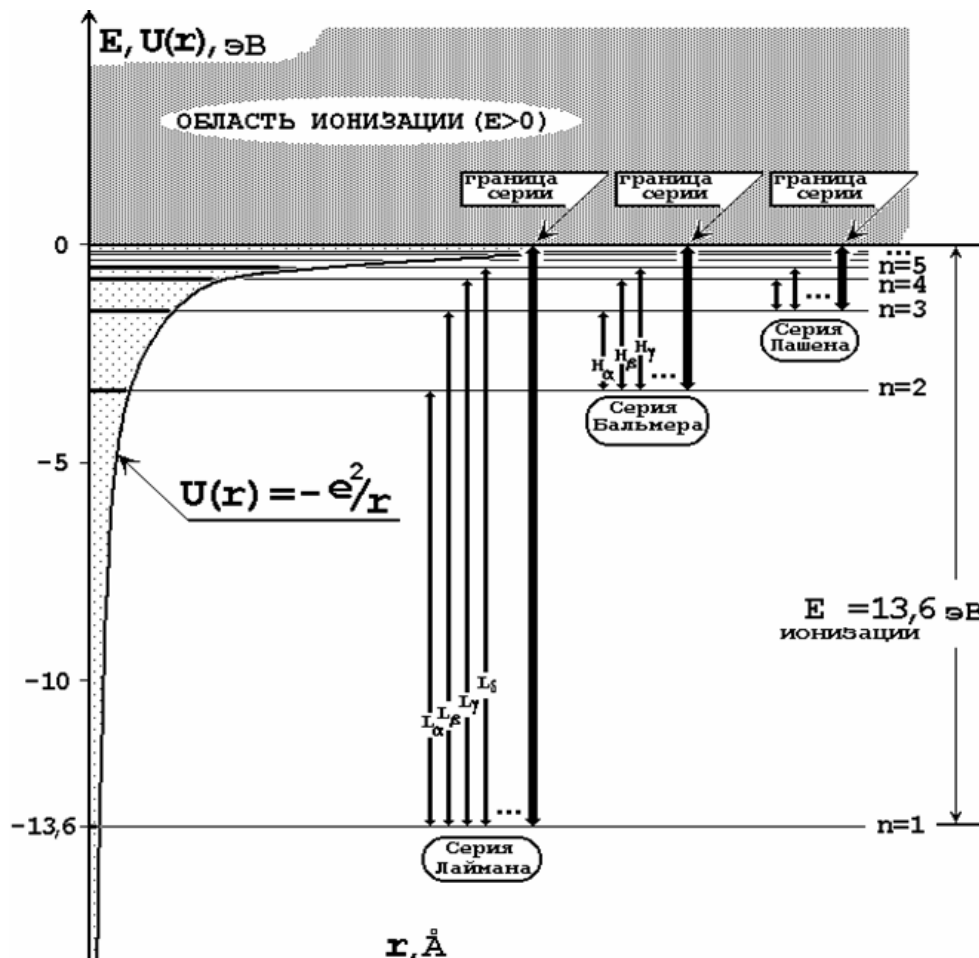


Рис. 1. Схема уровней энергии атома водорода

Значение  $R_\infty$ , найденное Бальмером в эксперименте немного отличалось от этого значения. Таким образом, соответствие теории Бора с экспериментом достаточно хорошее. Расхождение в величине  $R_\infty$  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 ( $\lambda$ , Е)

Серия	Водород, $\lambda$ , 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

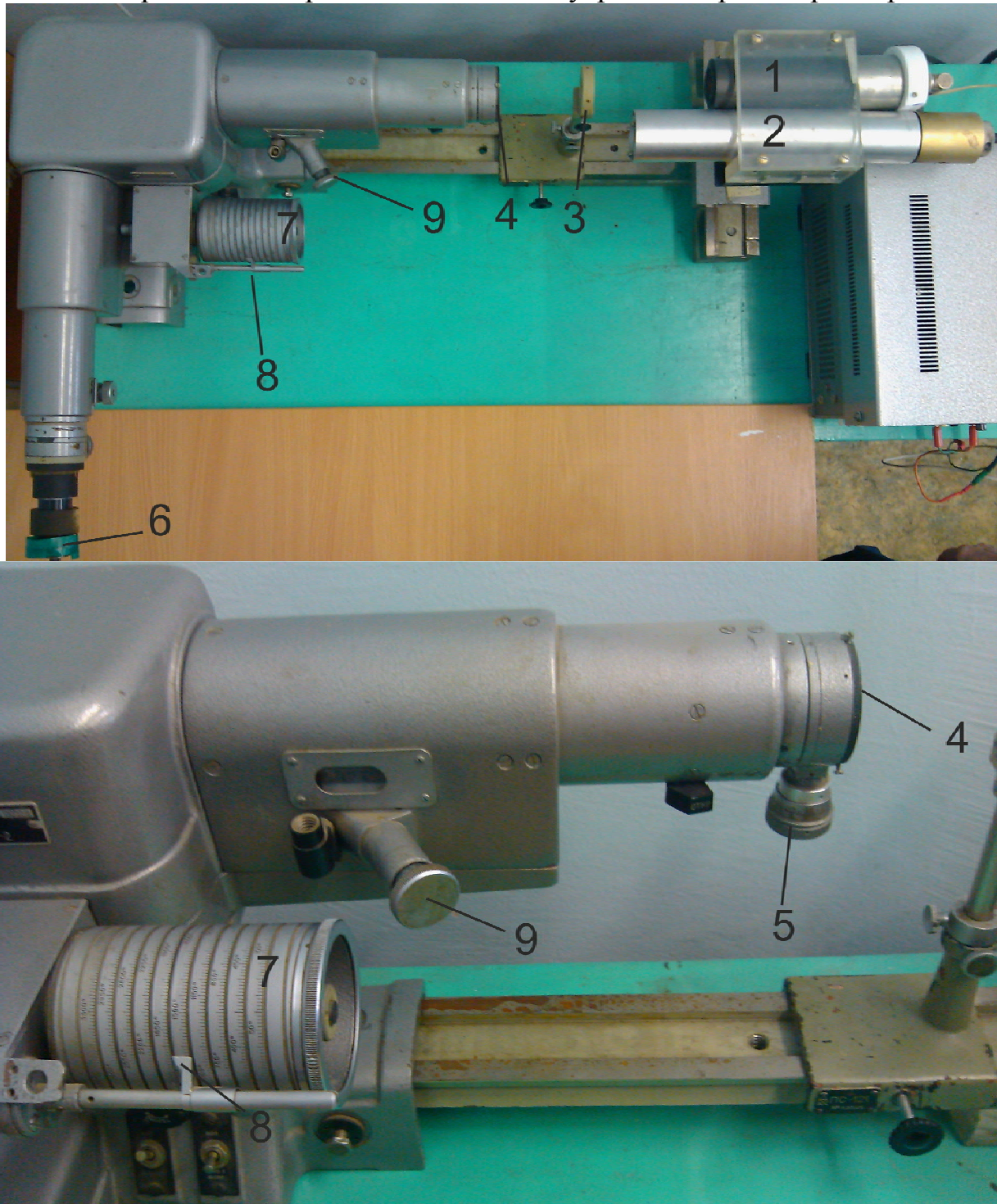


Рис. 2. Схема установки.

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:

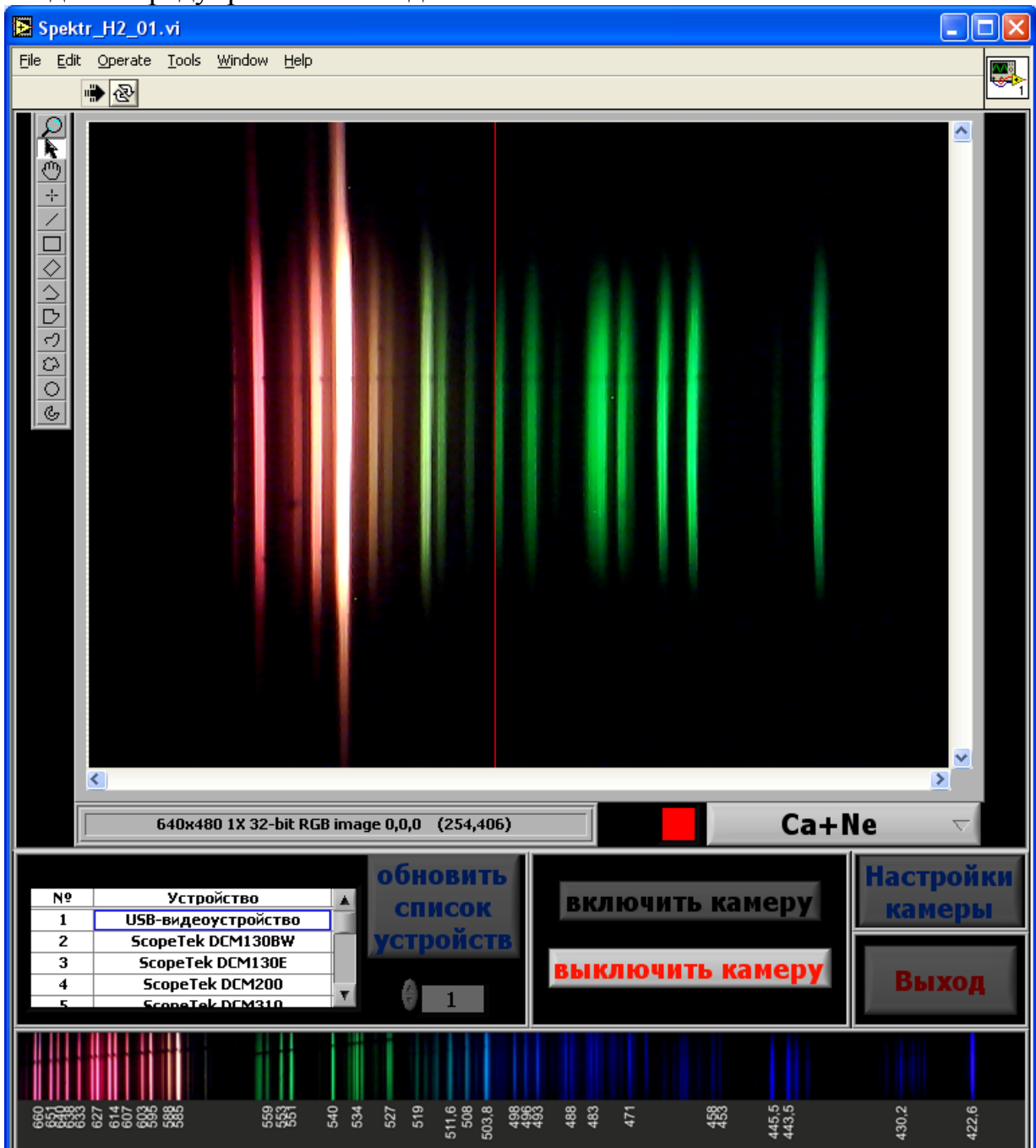


Рис.3. Скриншот программы.

- 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;**

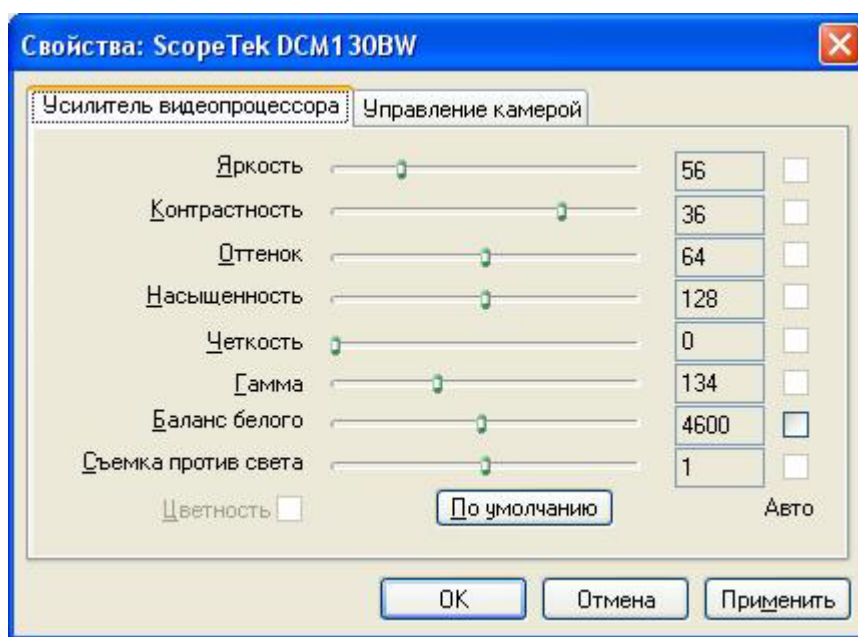


Рис.4. Настройка свойств телекамеры.

- 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;

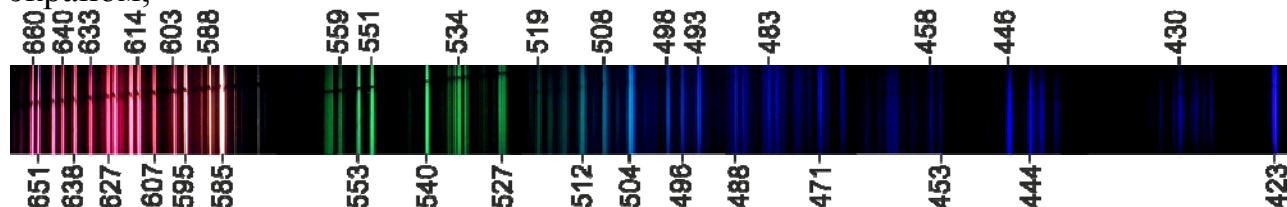


Рис.5. Спектр лампы с полым катодом из кальция (Ca).

Лампа Ca

Таблица 2

бараба H														
$\lambda$ , 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														
$\lambda$ , 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

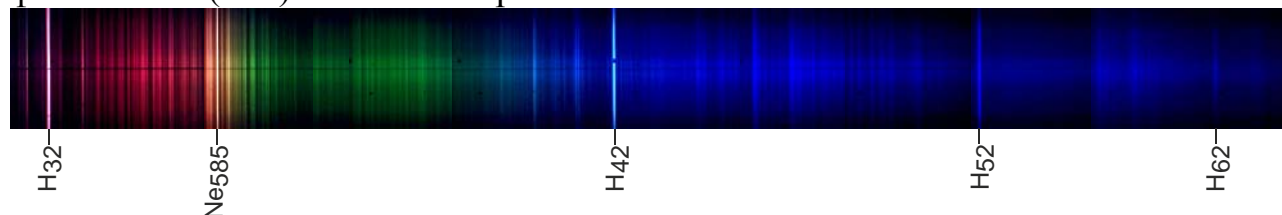


Рис. 6. Спектр трубки He-Ne лазера

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

Спектр лазера			Таблица 3		
показания барабана					
	Фиолет. H <sub>62</sub> (n=6)	Синяя H <sub>52</sub> (n=5)	Голубая H <sub>42</sub> (n=4)	Желтая Ne	Красная H <sub>32</sub> (n=3)
$\lambda$ , нм = *10 <sup>-9</sup> м				585	
$X = 1/n^2$					
$Y = 1/\lambda$ , м <sup>-1</sup>					

- 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<sup>-9</sup>. 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.