

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

*ИНСТИТУТ ФИЗИКИ*

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ  
ПО АТОМНОЙ ФИЗИКЕ**

**Изучение спектра и изотопического сдвига (расщепления)  
линий водорода**

Казань - 2017

**УДК 535.3**

Печатается по решению  
Редакционно-издательского совета Института физики КФУ  
Протокол № 4 от 15.02.2017 г.

**Рецензент:**

Л. А. Нефедьев, д.ф.-м.н., профессор,  
заведующий кафедрой образовательных технологий

**Гайнутдинов Р.Х.**

**Методические указания к выполнению лабораторных работ по атомной физике.** Изучение спектра и изотопического сдвига (расщепления) линий водорода: учеб.-метод. пособие для студентов третьего курса Института физики / Р. Х. Гайнутдинов, О. А. Коновалова, Е. В. Сарандаев, М. А. Хамадеев, М. Х. Салахов. - Казань: Казан. ун-т, 2017. - 28 с.

Учебно-методическое пособие содержит описание и методические указания по выполнению лабораторной работы «Изучение спектра и изотопического сдвига (расщепления) линий водорода» по курсу "Атомная физика" для студентов третьего курса Института физики.

© Институт физики КФУ, 2017

# СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	3
ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ .....	4
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ .....	6
Введение.....	6
Спектральные серии.....	8
Изотопический сдвиг .....	9
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ.....	11
Часть I. Определение длин волн линий водорода $H_{\alpha}$ , $H_{\beta}$ и $H_{\gamma}$ в серии Бальмера..	11
Часть II. Изотопический сдвиг (расщепление) линий водорода .....	16
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	24
ЛИТЕРАТУРА .....	28

## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

**Цель работы:** изучение строения и спектра атомов водорода и дейтерия.

Экспериментальные измерения проводятся на 2-х разных спектральных установках, соответственно, состоят из 2-х частей, в которых решаются следующие задачи:

Часть I (первая экспериментальная установка):

- 1) Визуальное наблюдение при помощи дифракционной решетки высокого разрешения спектральных линий серии Бальмера атома водорода.
- 2) Измерение длин волн линий водорода  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$  и  $H_\gamma$  в серии Бальмера.
- 3) Определение постоянной Ридберга  $R_\infty$ .

Часть II (вторая экспериментальная установка):

- 1) Измерение длин волн видимых водородных и дейтериевых спектральных линий серии Бальмера.
- 2) Наблюдение и оценка изотопического расщепления для этих линий.
- 3) Расчет массы дейтрона (ядро дейтерия) на основании проведенных в пп.1-2 экспериментальных измерений.

**Объект исследования:** атомы водорода и дейтерия

**Причина сдвига:** При  $M_{\text{ядра}} \neq \infty$  ядро смещается в противоположную сторону от электрона, и они оба вращаются вокруг общего центра масс. По сравнению с моделью  $M_{\text{ядра}} = \infty$  расстояние между ядром и электроном увеличится, следовательно, энергия взаимодействия уменьшится, что приводит к сдвигу спектральных линий в сторону меньших частот.

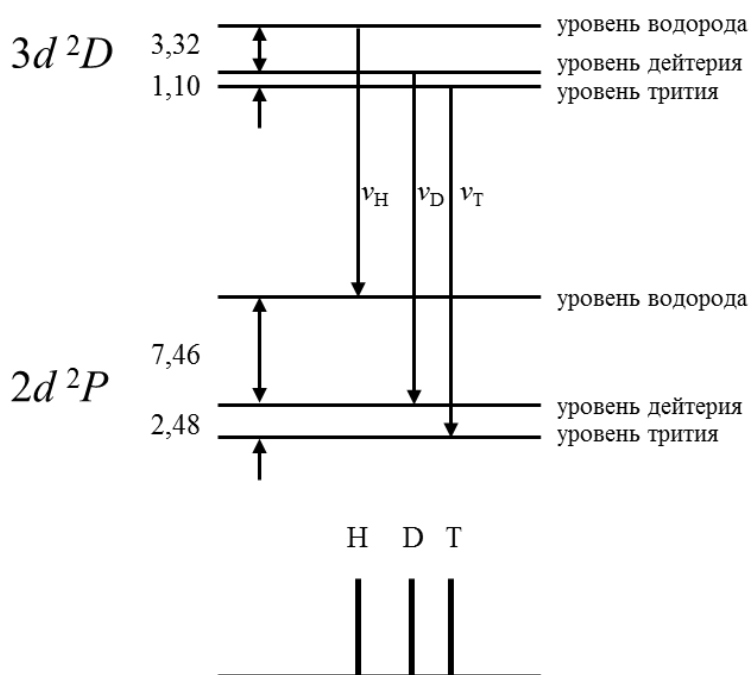


Рис.1. Сдвиг (расщепление) спектральных линий водорода H, дейтерия D и трития T.

**Одно из важных следствий наличия сдвига:** В s-состоянии атома водорода «электронное облако» сферически симметрично. Наличие изотопического сдвига уровня энергии в этом случае означает, что электрон в этом состоянии нельзя считать «размазанным» по области электронного облака в виде непрерывного распределения его массы.

**Особенности физического явления:** Сдвиг спектральных линий пропорционален  $\frac{m_e}{M_{\text{я}}}$ , где  $m_e$  – масса электрона,  $M_{\text{я}}$  – масса ядра. Частота в данном случае

определяется формулой  $\nu = \left(1 - \frac{m_e}{M_{\text{я}}}\right) \nu_{\infty}$ , поэтому сдвиг достаточно мал, т.к.

$\frac{m_e}{M_{\text{я}}} \approx \frac{1}{1836}$ . Отсюда следует, что для экспериментальной регистрации изотопического сдвига требуется спектральный прибор с большой разрешающей силой и большой дисперсией.

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

## Введение

Спектроскопия атома водорода и водородоподобных атомов является очень важным направлением исследований современной физики. На протяжении последних почти 125 лет, начиная с открытия Бальмером в 1885 году серии линий в видимой области спектра, атома водорода, атомная спектроскопия не раз приводила к глобальным переосмыслениям и дополнениям законов физики. Как хорошо известно, попытки объяснения серии Бальмера, а также других спектральных серий, в конечном итоге привели к созданию квантовой механики, которая триумфально описала спектральные серии в спектре атома водорода. Повышение точности измерения частоты переходов в атоме водорода привело к открытию в 1947 году Лэмбом и Резерфордом расщепления  $^2S_{1/2}$  и  $^2P_{1/2}$  уровней, названного лэмбовским сдвигом. Это открытие послужило мощным стимулом для развития квантовой электродинамики (КЭД) и в целом квантовой теории поля. Теория перенормировок, развитая для объяснения этого сдвига, стала ключевым элементом квантовой электродинамики. По аналогии с КЭД были построены квантовая хромодинамика (КХД) и теория электрослабых взаимодействий, и на основе этих теорий была принята концепция Стандартной модели. Поэтому проверке КЭД на простых водородоподобных атомных системах уделяется большое внимание. Благодаря прогрессу в развитии лазерной спектроскопии удалось с 1997 по 2004 годы измерить с высочайшей точностью оптическую частоту  $1S \rightarrow 2S$  двухфотонного резонанса [1, 2] и оптические частоты  $2S \rightarrow nS/nD$  двухфотонных переходов в водороде и дейтерии [3]. В результате для перехода  $1S \rightarrow 2S$  в атоме водорода была достигнута точность измерения с относительной ошибкой порядка  $10^{-14}$ . Благодаря современной прецизионной спектроскопии удалось значительно повысить точность определения постоянной Ридберга и среднеквадратичного зарядового радиуса протона (его часто называют сокращенно радиусом протона). Основоположник современного способа прецизионной лазерной спектроскопии Теодор Хэнш был удостоен Нобелевской премии по физике в 2005 г.

Помимо спектроскопии обычных атомов активно развивается спектроскопия мюонных атомов, т.е. атомов, у которых один или несколько электронов заменены мюоном. Эксперименты по лазерной спектроскопии атомов мюонного водорода начались в 2001 году [4] и, как ожидалось, они должны были уточнить значение радиуса протона, полученное из спектроскопии атома водорода. Однако эксперименты были завершены лишь в 2010 году и привели к неожиданным результатам [5]: радиус протона, определенный из анализа данных спектроскопии мюонного водорода, оказался на 4% меньше радиуса, полученного с помощью спектроскопии обычного водорода. Именно поэтому экспериментаторы не наблюдали резонанс, предсказанный на основе данных по спектроскопии атома водорода, и потребовалось достаточно много времени для выяснения причин возможной ошибки. Это расхождение не укладывается в погрешность экспериментов и является также слишком большим, чтобы его можно было

устранить путем учета еще нерассчитанных КЭД поправок. Эта проблема является чрезвычайно серьезной, и требуется тщательная проверка всех возможных причин, которые могут приводить к расхождению значений для радиуса протона, начиная с перепроверки точности экспериментов до перепроверки методов, которые используются для описания связанных состояний в КЭД. Если предположить, что в резонансных экспериментах все проанализировано правильно, это будет означать, что в теории может быть потеряно примерно 100 кГц для лэмбовского сдвига  $1S$ -состояния атома водорода либо примерно 75 ГГц (0.3 мэВ) для частоты перехода  $2S - 2P$  атома мюонного водорода. В 2013 году были опубликованы результаты эксперимента [6], которые только увеличили расхождение радиусов, полученных в предыдущих экспериментах. Все это говорит о том, что и по сей день спектроскопия атома водорода является полем для фундаментальных открытий.

Спектр атома водорода всегда привлекал внимание исследователей своей относительной простотой. Наиболее удивительным обстоятельством были **целые числа** в эмпирической формуле Бальмера для волновых чисел в спектральных сериях атома водорода. После открытия электрона и ядра атома задача об атоме водорода стала принципиальной задачей физики атома, ибо **атом водорода является единственным в природе атомом, о котором можно сказать точно: в этом атоме один электрон движется в кулоновском поле одного положительного ядра, зависимость потенциала от расстояния  $r$  до ядра точно известна  $\phi = e/r$** . Именно в силу этого обстоятельства спектр излучения атома водорода стал эффективным полигоном для испытания различных физических моделей и теорий, начиная с атома Бора и первых попыток квантовой механики и кончая современной квантовой электродинамикой.

Бор в своей полуклассической теории объяснил формулу Бальмера ценой введения правила квантования момента импульса атома, постулатов о стационарных состояниях атома и частоте излучения при переходах между ними. Учет движения ядра в атоме позволил с большой точностью вычислить постоянную Ридберга в формуле Бальмера и показал, что различные изотопы должны иметь спектральные линии, отличающиеся по длине волны - **изотопический сдвиг**.

Развитие экспериментальной техники позволило обнаружить **тонкую структуру** спектральных линий атома водорода. Она была объяснена учетом релятивистской зависимости массы электрона от его скорости и введением принципиально новой характеристики электрона – собственного **момента импульса** (спина) и собственного (спинового) **магнитного момента**. Теория тонкой структуры вводит в задачу новый вид взаимодействия – **спин-орбитальное взаимодействие** и приводит к одинаковой энергии электрона в состояниях с одинаковыми главным квантовым числом  $n$  и квантовым числом полного момента импульса  $j$ .

Однако У. Ю. Лэмбом (Willis Lamb) и Р. Ризерфордом (англ. *Robert Retherford*) (не путать с **Эрнест Рэзерфорд**, англ. *Ernest Rutherford*) показали, что уровень  $2s_{1/2}$  смещен вверх (имеет более высокую энергию) относительно уровня  $2p_{1/2}$ . Этот **лэмбовский сдвиг** обусловлен взаимодействием электрона с вакуумом. Вакуум, согласно современным представлениям, соответствует такому квантовому состоянию материи, в котором отсутствуют реальные частицы и электромагнитные

кванты. Это состояние описывается таким образом, что пространство оказывается заполненным виртуальными (еще не рожденными) частицами и «нулевыми колебаниями» электромагнитного поля. Взаимодействием с ними и обусловлен лэмбовский сдвиг.

**Сверхтонкая структура спектральных линий** обусловлена взаимодействием полного (сумма спинового и орбитального) магнитного момента электрона с магнитным моментом ядра.

Наконец, **конечный размер протона** и связанное с ним отклонение от закона Кулона приводит к еще более мелкомасштабному сдвигу уровней энергии атома. Перечисленные взаимодействия приводят к расщеплению спектральных линий следующих порядков величин (в порядке перечисления):

$$\lambda : \Delta\lambda_{\text{изотоп.сдв.}} : \Delta\lambda_{\text{тонк.стр.}} : \Delta\lambda_{\text{лэмб}} : \Delta\lambda_{\text{сверх.тонк.}} : \Delta\lambda_{\text{кон.разм.}} \approx \\ \approx 1 : \left(\frac{m_e}{m_p}\right) : \alpha^2 : \alpha^3 : \alpha^2 \left(\frac{m_e}{m_p}\right) : \alpha^2 \left(\frac{m_e}{m_p}\right)^2.$$

здесь  $m_e$  – масса электрона,  $m_p$  – масса протона,  $\alpha = 1/137$  – постоянная тонкой структуры, определяющая иерархию взаимодействий и расщеплений в атоме.

### Спектральные серии.

Спектральная серия возникает при разрешенных излучательных квантовых переходах с различных возбужденных уровней энергии  $k$  на один и тот же конечный уровень  $n$  ( $n < k$ ) и сходится к границе серии при  $k \rightarrow \infty$ . Имеет место следующее выражение для частоты спектральной линии атома водорода:

$$\hbar \omega_{k \rightarrow n} = E_k - E_n = R_\infty Z \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (1)$$

где  $\omega_{k \rightarrow n}$  – циклическая частота излучения;  $E_k$  и  $E_n$  – верхний и нижний уровни энергии. Для каждой спектральной серии число  $n$ , определяющее нижний уровень серии, постоянно, а число  $k$ , определяющее верхний уровень, равно  $k = n + i$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$  – номер линии в серии. Переходам на различные нижние уровни соответствуют различные спектральные серии:

- $n = 1$  - серия Лаймана;
- $n = 2$  - серия Бальмера;
- $n = 3$  - серия Пашена;
- $n = 4$  - серия Брэкетта;
- $n = 5$  - серия Пфунда;
- $n = 6$  - серия Хэмфри;

Как видно из (1), все спектральные серии атома водорода имеют одинаковую структуру – головная линия в серии ( $i = 1$ ) имеет наименьшую (в этой серии) длину волны



$$\frac{1}{\lambda_{\text{ГОЛ}}} = R_{\infty} Z \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n+1)^2} \right);$$

линии сходятся к конечному пределу при  $i \rightarrow \infty$ :  $\frac{1}{\lambda_{\infty}} = \frac{R_{\infty} Z}{n^2}$ .



Рис. 2. Энергетическая структура атома водорода.

Вид спектральной серии изображен на рис. 3.

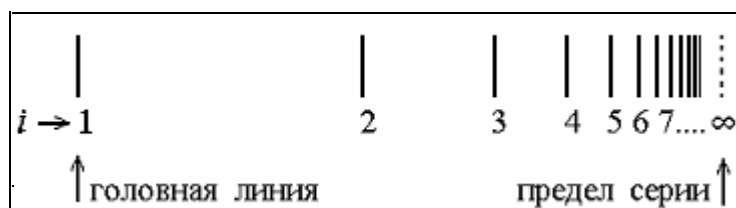


Рис.3. Вид спектральной серии атома водорода.

### Изотопический сдвиг

Различие ядер изотопов проявляется в их спектрах. Самый простой из изотопических эффектов – эффект массы – состоит в учете движения ядра,

проявляющегося в том, что во всех выражениях для энергии уровней (а значит и для длин волн спектральных линий) фигурирует **приведенная масса электрона и ядра**:

$$\mu = \frac{m_e \cdot m_{\text{Я}}}{m_e + m_{\text{Я}}} = \frac{m_e}{1 + \frac{m_e}{m_{\text{Я}}}} \approx m_e \cdot \left(1 - \frac{m_e}{m_{\text{Я}}}\right), \quad (2)$$

где  $m_{\text{Я}} \approx A \cdot m_{\text{H}}$  – масса ядра,  $m_{\text{H}}$  – масса нуклона,  $A$  – массовое число ядра.

Следствием этого являются небольшие отличия параметров, зависящих от массы (энергий, размеров, и т.д.) в атомах различных изотопов одного и того же элемента. Порядок величины относительного изменения любого из этих параметров, например, энергии, очевидно, есть:

$$\frac{\delta E}{E} \approx \frac{m_e}{m_{\text{Я}}} \cdot \frac{\delta m_{\text{Я}}}{m_{\text{Я}}} \approx \frac{m_e}{m_{\text{H}}} \cdot \frac{\delta m_{\text{H}}}{m_{\text{H}}} \cdot \frac{1}{A^2}. \quad (3)$$

Как видно, эффект массы наиболее значителен в легких атомах; для изотопов водорода  $1/A^2 \sim 1$ ; для изотопов элементов конца периодической системы элементов  $1/A^2 \sim 10^{-4}$ ). Для точного расчета постоянная Ридберга должна быть скорректирована с помощью приведенной массы (2). В результате для водорода получаем:

$$R_{\text{H}} = \frac{R_{\infty}}{1 + \frac{m_e}{m_p}}, \quad (4)$$

где  $m_p$  – масса протона. Ядро изотопа водорода – дейтерий – состоит из протона и нейтрона. В результате для постоянной Ридберга дейтерия мы можем записать:

$$R_{\text{D}} = \frac{R_{\infty}}{1 + \frac{m_e}{m_p + m_n}}, \quad (5)$$

где  $m_n$  – масса нейтрона. Таким образом, спектральные линии серии Бальмера для дейтерия смещаются в сторону более коротких длин волн по сравнению с водородными линиями.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

### Часть I. Определение длин волн линий водорода $H_\alpha$ , $H_\beta$ и $H_\gamma$ в серии Бальмера.

В эксперименте эмиссионный спектр создается посредством лампы Бальмера, заполненной водяными парами. В электрическом разряде молекулы воды диссоциируют на возбужденные атомы водорода и гидроксильные группы. Длины волн линий  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$  и  $H_\gamma$  водорода измеряются при помощи дифракционной решетки высокого разрешения. В первом порядке дифракции между длиной волны и углом дифракции устанавливается следующее соотношение:

$$\lambda = d \cdot \sin \theta, \quad (6)$$

где  $d$  – период решетки.

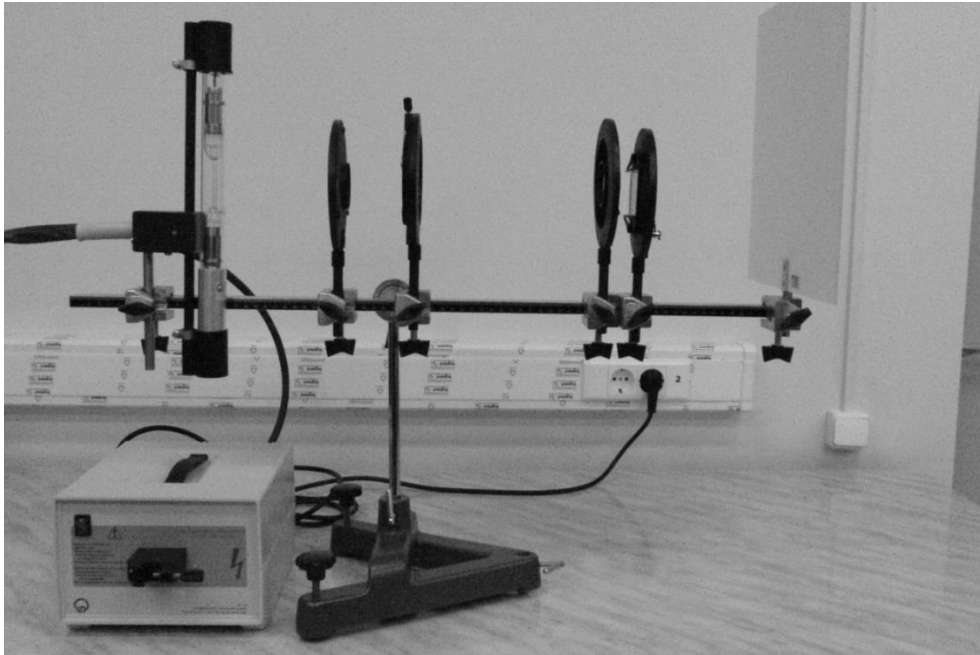
#### Приборы и материалы (с каталожными номерами):

Лампа Бальмера с источником питания (45114); реплика решетки Роуланда (47123); держатель для решетки с пружинными зажимами (46022); линза с фокусным расстоянием +50 мм (46002); линза с фокусным расстоянием +100 мм (46003); оптическая щель с регулируемой шириной (46014); полупрозрачный экран (44153); малая оптическая скамья (46043); стандартная V-образная опора со стойкой высотой 28 см (30001); 6 универсальных зажимов (30101); рулетка 2 м (31177).

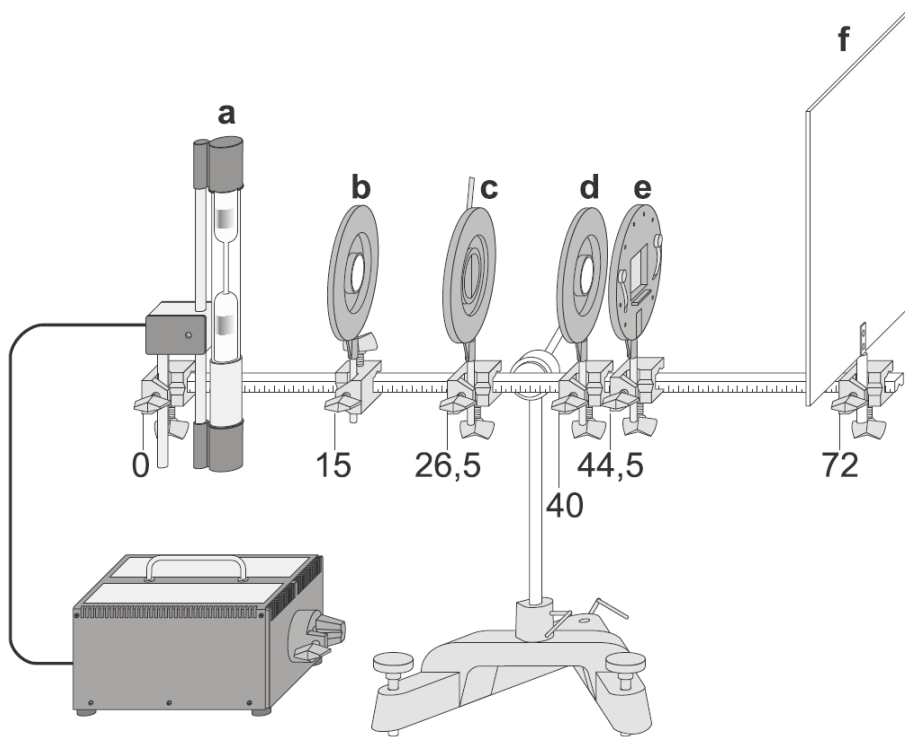
#### Экспериментальная установка

1. Спектральные линии могут наблюдаться только в *полностью затемненном* помещении;
2. Источник питания лампы Бальмера вырабатывает *опасное для жизни высокое напряжение* и без лампы имеется доступ к высоковольтным контактам. *Поэтому никогда не включайте источник питания в сеть без установленной в держатель лампы Бальмера.*

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 4 и 5.



а)



б)

Рис.4. Экспериментальная установка для изучения серии Бальмера в спектре водорода. а) общий вид, б) схематическое изображение. Цифрами на рисунке показаны расстояния от левого края соответствующего универсального зажима до левого края оптической скамьи. Обозначения на схеме: а – лампа Бальмера; б – линза осветителя с фокусным расстоянием 50 мм; с – регулируемая оптическая щель; d – камерная линза с фокусным расстоянием 100 мм; e – дифракционная решетка; f – полупрозрачный экран.

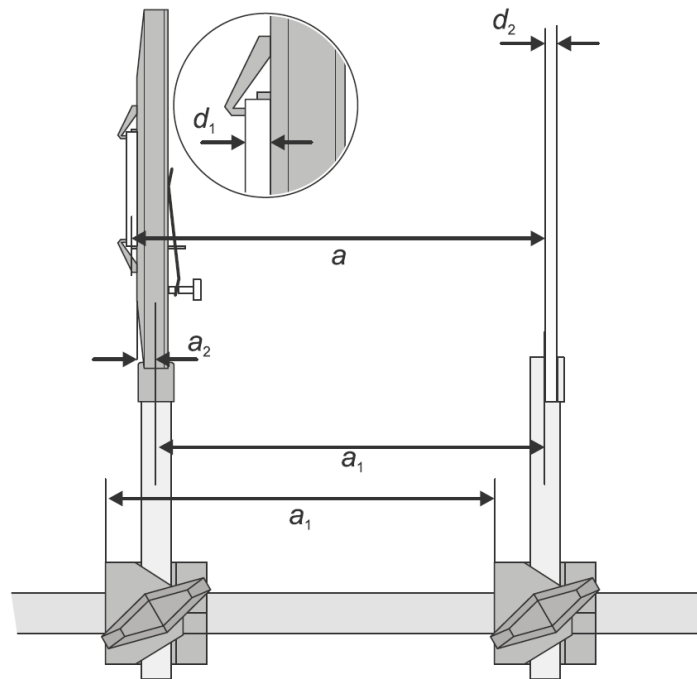


Рис.5. Взаимное расположение решетки Роуланда и полупрозрачного экрана.

### **Юстировка экспериментальной установки и выполнение измерений**

(Примечание: как правило, установка уже готова к работе и не требует юстировки. О необходимости выполнения настройки аппаратуры спросить у преподавателя или лаборанта)

#### **Предупреждение!**

- 1) Строго запрещается касаться рабочей поверхности голографической решетки.
- 2) Все оптические детали установки (объективы, линзы, лампа) также требуют бережного и аккуратного обращения.

**Задание 1.** Наблюдение при помощи дифракционной решетки высокого разрешения спектральных линий атома водорода;

1. Включите прибор в сеть
2. Полностью затемните комнату и наблюдайте «на просвет» на полупрозрачном экране спектр атомов водорода.
3. Выставьте лампу Бальмера на оптической оси системы путем поворота универсального зажима и его перемещения по вертикали.
4. Установите линзу осветителя перпендикулярно оптической оси и перемещайте ее вдоль оптической скамьи до тех пор, пока не получите четкое изображение тела разряда в плоскости оптической щели.
5. Камерная линза должна отображать на полупрозрачном экране четкое изображение щели.
6. Сужайте ширину щели до тех пор, пока не будут видны на экране отдельные линии спектра.
7. При необходимости используйте ширму из черной бумаги или материи для устранения прямой засветки экрана излучением от лампы Бальмера.
8. Отметьте на экране положение спектральных линий и нулевого порядка спектра.

Для наглядности на рис. 6 приведен общий вид части эмиссионного спектра водорода (линии Бальмера  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$  и  $H_\gamma$ ).

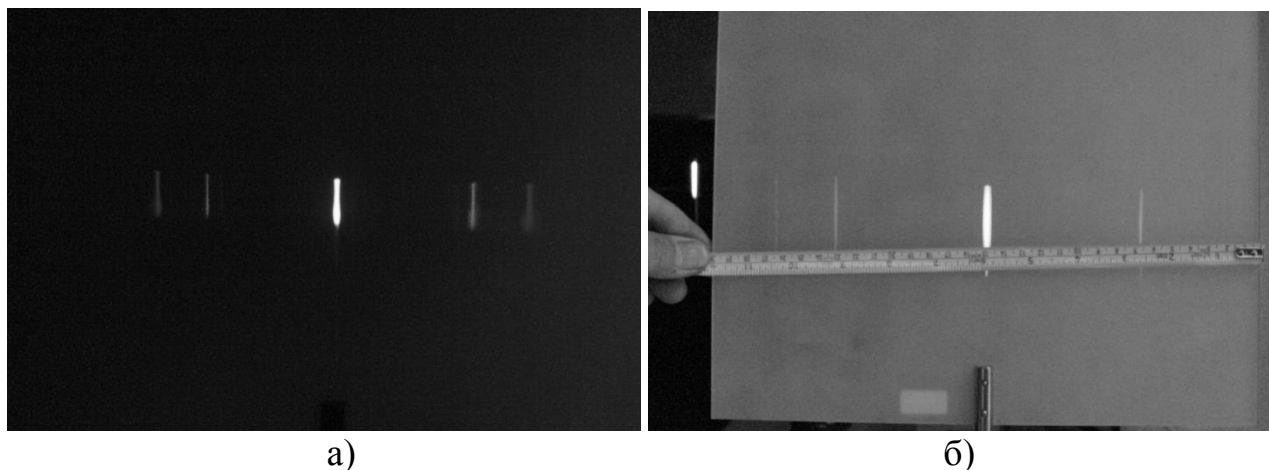


Рис.6. Общий вид части эмиссионного спектра водорода (линии Бальмера  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$  и  $H_\gamma$ ) а) наблюдаемые линии Бальмера, б) процесс измерения расстояния  $b$  между положением нулевого порядка (центральная самая яркая линия) и спектральными линиями.

**Задание 2.** Измерение длин волн водорода  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$  и  $H_\gamma$  в серии Бальмера.

- Рассчитайте расстояние  $a$  между решеткой Роуланда и полупрозрачным экраном (см. рис.5) по формуле  $a = a_1 + a_2 + \frac{d_1}{2} + d_2$ .
- Расстояние между левыми краями зажимов решетки и экрана  $a_1 = 275$  мм;
- Расстояние от оси держателя решетки до плоскости крепления решетки  $a_2 = 5$  мм;
- Толщина решетки Роуланда  $d_1 = 2.5$  мм;
- Толщина полупрозрачного экрана  $d_2 = 3$  мм.
- Измерьте на экране расстояние  $b$  между положением нулевого порядка и спектральными линиями и занесите их в таблицу 1.

Таблица 1: Значения  $b$  – расстояния между линиями и нулевым порядком для решетки  $g = 600$  штр/мм ( $g$  – постоянная решетки). Левый порядок – линии, расположенные слева от линии нулевого порядка, правый порядок – линии, расположенные справа от линии нулевого порядка.

Цвет линии	b, мм	
	левый порядок	правый порядок
красный		
бирюзовый		
голубой		

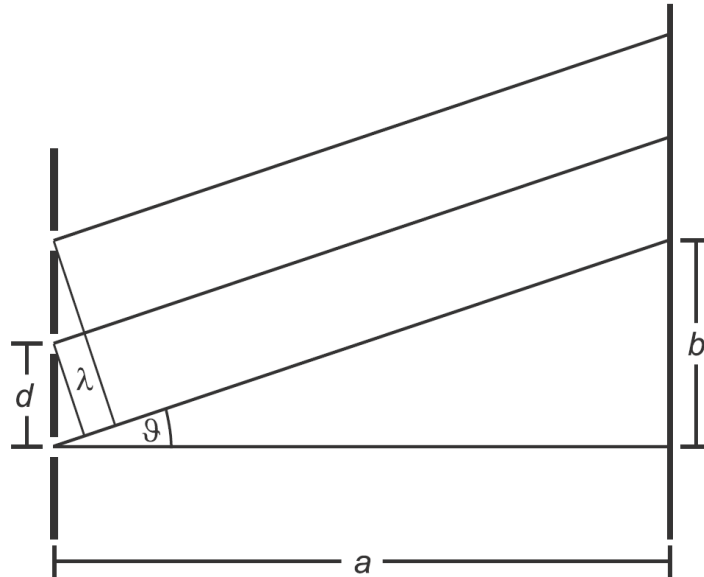


Рис.7 Ход лучей в первом порядке дифракции на дифракционной решетке

Согласно рис. 7

$$\sin \theta = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}.$$

Тогда с учетом (6) получим длину волны:  $\lambda = d \cdot \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}$ , где  $d = \frac{1}{g}$  - период

решетки, или частоту  $\nu = \frac{c}{d} \cdot \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{b}$ , где  $c$  – скорость света в вакууме.

Результаты расчетов заносим в таблицу 2:

Цвет	Линия	$\lambda$ , нм	$\nu$ , ТГц	$\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2}$
красный	$H_\alpha$			
бирюзовый	$H_\beta$			
голубой	$H_\gamma$			

**Задание 3.** Определение постоянной Ридберга  $R_\infty$ .

Используя значения из таблицы 2, построить график в координатах  $\nu$  (ТГц) от  $\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2}\right)$  для трех спектральных линий ( $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ ). Наклон прямой даст значение

постоянной Ридберга  $R_{ЭКСП}$  (см. формулу (1)). Прямую проводить методом наименьших квадратов (МНК), используя математические пакеты (MatLab, MathCAD и др.) или графические пакеты (SigmaPlot, Origin и др.).

Сравнить  $R_{ЭКСП}$  с табличным значением  $R_\infty$  и оценить погрешность измерения.

**Задание 4.** Измеренные значения частот спектральных линий Бальмера необходимо сравнить с рассчитанными по формуле (7) значениями.

$$\nu = R_{\infty} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right), m=3, 4, 5. \quad (7)$$

## Часть II. Изотопический сдвиг (расщепление) линий водорода

### Краткая теория дифракционной решетки

Во 2-ой части работы линии серии Бальмера исследуются с помощью экспериментальной установки, которая представляет собой спектрометр высокого разрешения. Основным элементом – отражательная голографическая решетка с числом штрихов 2400 шт/мм.

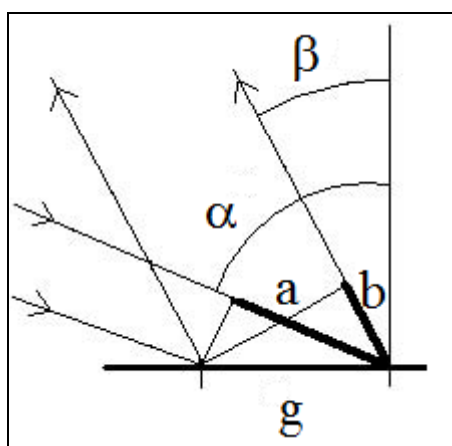


Рис.8. Ход лучей при отражении от дифракционной решетки.

При интерференции отраженных от решетки лучей разность хода между двумя лучами в максимуме 1-го порядка:  $\Delta s = a + b = \lambda$ . Используя выражения для углов падения и отражения ( $a/g = \sin \alpha$  и  $b/g = \sin \beta$ ), можно найти длину волны:

$$\lambda = g(\sin \alpha + \sin \beta), \quad (8)$$

где  $g$  – постоянная решетки. Линейное расстояние  $\Delta \lambda$  между близко расположенными линиями рассчитывается из (8):

$$\Delta \lambda = g \cdot \cos \beta \cdot \Delta \beta. \quad (9)$$

Измерение производится с помощью системы VideoCom. Это система фотоэлектрической регистрации на основе ПЗС-линейки. Для определения углового расстояния  $\Delta \beta$  используется программа «VideoCom Intensities» (её краткое описание приведено в Приложении; можно также использовать функцию подсказки **F1**, встроенную в эту программу).



## Описание экспериментальной установки

Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 9. Излучение от лампы Бальмера с помощью осветительной системы (линза 2) проецируется на входную щель 3 спектрометра. Щель расположена в фокусе объектива 4, который создает параллельный пучок света, падающий на дифракционную решетку 5. Дифракционная решетка разлагает излучение в спектр и объектив 6 фокусирует его в фокальной плоскости, где установлен приемник излучения (ПЗС-линейка) 7. Электрический сигнал от приемника подается на персональный компьютер, на мониторе которого отображается зависимость относительной интенсивности излучения от длины волны (выраженной в пикселях или угловых единицах).

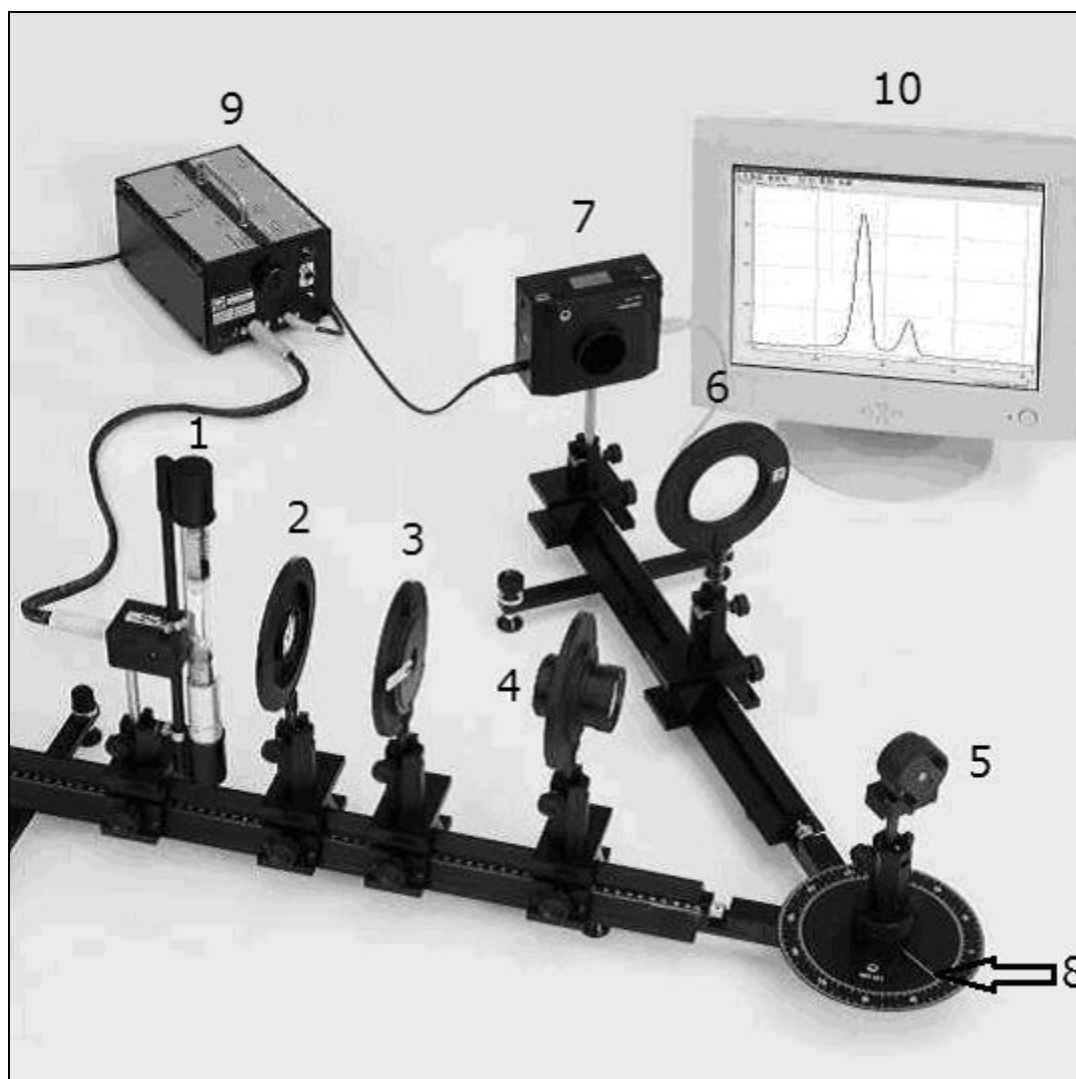


Рис.9. Общий вид экспериментальной установки.

1 – лампа Бальмера (газовая смесь водорода и дейтерия), 2 – линза в оправе с  $f = 50$  мм, 3 – регулируемая щель, 4 – проекционный объектив (коллиматор), 5 – голографическая решетка 2400 шт/мм, 6 – объектив в оправе (камерный объектив) с  $f = 300$  мм, 7 – VideoCom USB, 8 – указатель-стрелка, 9 – блок питания лампы Бальмера, 10 – персональный компьютер.

## Настройка и юстировка экспериментальной установки


(Примечание: как правило, установка уже готова к работе и не требует юстировки. О необходимости выполнения настройки аппаратуры спросить у преподавателя или лаборанта)

### Предупреждение!

- 1) Строго запрещается касаться рабочей поверхности голографической решетки.
- 2) Все оптические детали установки (объективы, линзы) также требуют бережного и аккуратного обращения.
- 3) Необходимо беречь приемник излучения (VideoCom USB) от сильной засветки, от которой он может выйти из строя.

### Затемнить комнату

- 1) Включить компьютер
- 2) Подключить VideoCom к компьютеру с помощью кабеля с USB- разъемом.
- 3) Включить блок питания VideoCom в сеть.
- 4) Нажимая на VideoCom кнопку «**MODE**», установить на дисплее режим «**Intensity \*\* 2048, 100%**». Другие кнопки VideoCom для этой работы не требуются.
- 5) Запустить на компьютере программу «VideoCom Intensities». Откроется графическое окно с соответствующими опциями, причем ось OX будет проградуирована в пикселях от 0 до 2048.

- 6) С помощью кнопки  или клавиши **F5** вызвать меню «**Calibration/Comparison with Theory**» (см.рис.10.) и в «**Diffraction Angle**» ввести фокусное расстояние камерной линзы, т.е 300 мм. Закрывать меню, нажав "ОК". После этого ось OX будет проградуирована в угловых единицах – в градусах.

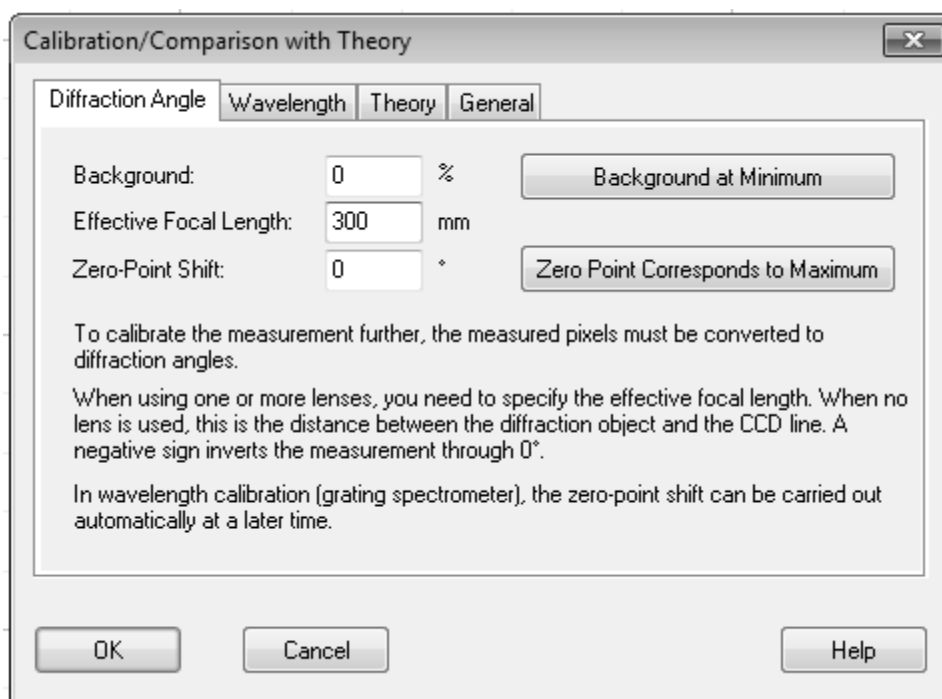



Рис.10. меню «Calibration/Comparison with Theory»

7) По оси OY задается относительная шкала интенсивностей «**Intensity I1**».

8) С помощью кнопок , т.е. (-) и (+), задается время экспозиции в относительных единицах от 1 до 8. (обычно 3 бывает достаточно)

9) Начало измерений запускается с помощью кнопки  или клавиши **F9**.

## Ход эксперимента

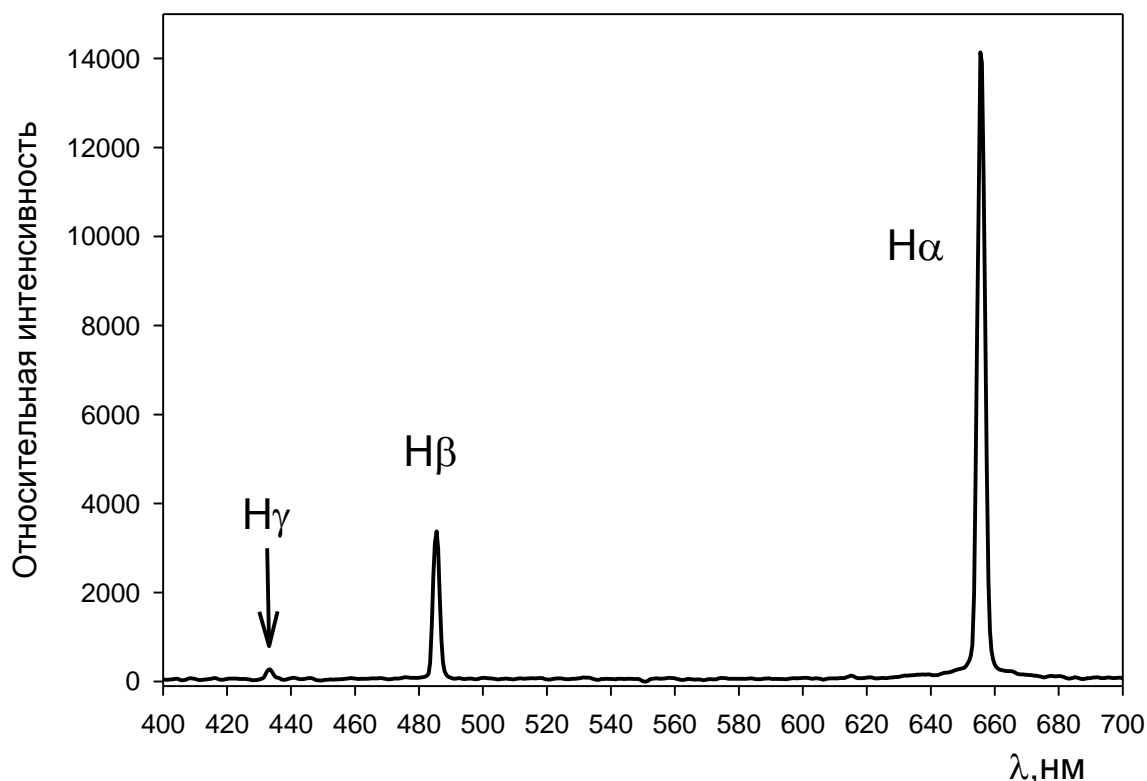



Рис. 11. Общий вид спектра водородно-дейтериевой лампы.

Для наглядности на рисунке 8 приведен общий вид спектра водородно-дейтериевой лампы, полученный на другом спектрометре (Спектрометр EPP2000 UVN-SR фирмы StellarNet). Как видно, интенсивность спектральных линий серии сильно падает с уменьшением длины волны линии (с увеличением энергии возбуждения верхнего уровня). Этот факт надо учитывать в дальнейшей работе при выборе оптимальной экспозиции и ширины входной щели.



**Задание 1:** Для первой (красной) линии серии Бальмера определить изотопический сдвиг:  $\Delta\lambda = \lambda_{H\alpha} - \lambda_{D\alpha}$ . Сравнить с табличным значением, оценить погрешность измерения.

- Ослабить винт на рейтере с голографической решеткой и вращать рейтер до появления красной линии Бальмера, которая выставляется на середину фотолинейки (ось OX) VideoCom. Для улучшения визуальной идентификации

линии первоначальную ширину щели делать более широкой, а затем установить ее примерно равной 0.1 мм.

- Передвигая объектив  $F = 300$  мм и наблюдая на экране монитора красную линию, добиться, чтобы она четко расщепилась на 2 составляющие (линии). При необходимости увеличить/уменьшить экспозицию (кнопки ) или уменьшить размер щели. На мониторе недалеко от  $0^\circ$  должны наблюдаться два узких максимума различной высоты. Можно более точно выставить линии на  $0^\circ$  с помощью **F5** => (Calibration/Comparison with Theory) => ( Diffraction Angle) => ( Zero Point Corresponds to Maximum).

- Увеличить эту область (Zoom, Alt+Z). Если необходимо, можно уменьшить уровень фона с помощью **F5** => (Calibration/Comparison with Theory) => ( Diffraction Angle) => «Background at Minimum».

- Чтобы улучшить разрешение спектральных линий и уменьшить шум, можно использовать кнопку , с помощью которой происходит усреднение регистрируемых интенсивностей. Когда два максимума можно будет четко различить, то с помощью кнопки  или клавиши **F9** измерение останавливается.

- Сохранить полученный спектр можно с помощью кнопки «Save As»

- Определить разницу в углах между максимумами спектральных линий.

- Записать угол между оптическими скамьями и угол голографической решетки.

## Пример измерения

### Исследование красной линии Бальмера

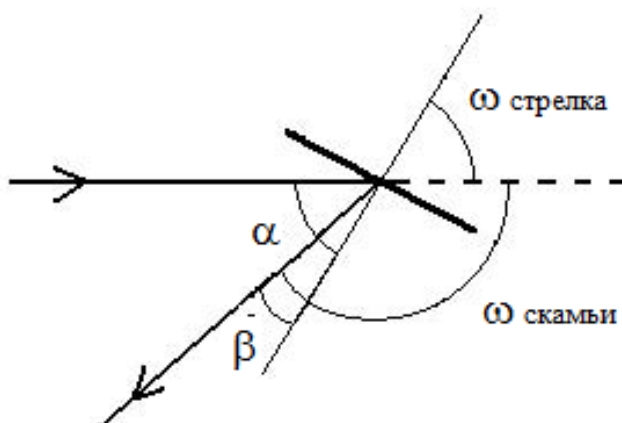


Рис. 12. Геометрическая схема.

- Угол падения соответствует углу поворота указателя-стрелки (курсора) с голографической решеткой (см. рис. 12):

$$\alpha = \omega_{\text{УКАЗАТЕЛЬ-СТРЕЛКА}}$$

Угол отражения  $\beta$  находится как:

$$\beta = \omega_{\text{УКАЗАТЕЛЬ-СТРЕЛКА}} + \omega_{\text{ОПРИЧЕСКИЕ СКАМЬИ}} - 180^\circ.$$

Угол между оптическими скамьями	Угол голографической решетки	Угол падения	Угол отражения (дифракции)
$\omega_{\text{ОПРИЧЕСКИЕ СКАМЬИ}}$	$\omega_{\text{УКАЗАТЕЛЬ-СТРЕЛКА}}$	$\alpha$	$\beta$
150 °	70.5 °	70.5 °	40.5 °

Учитывая (8) и постоянную решетки, равную  $g = 1/(2.4 \cdot 10^6) \text{ м} \approx 417 \text{ нм}$ , найдем среднюю длину волны линий:  $\lambda = 417 \text{ нм} \cdot (\sin 70.5^\circ + \sin 40.5^\circ) = 664 \text{ нм}$ .

Значения литературных данных:  $\lambda_{\text{H}\alpha} = 656.28 \text{ нм}$  и  $\lambda_{\text{D}\alpha} = 656.11 \text{ нм}$ .

Погрешность измерения  $\sim 1\%$ .

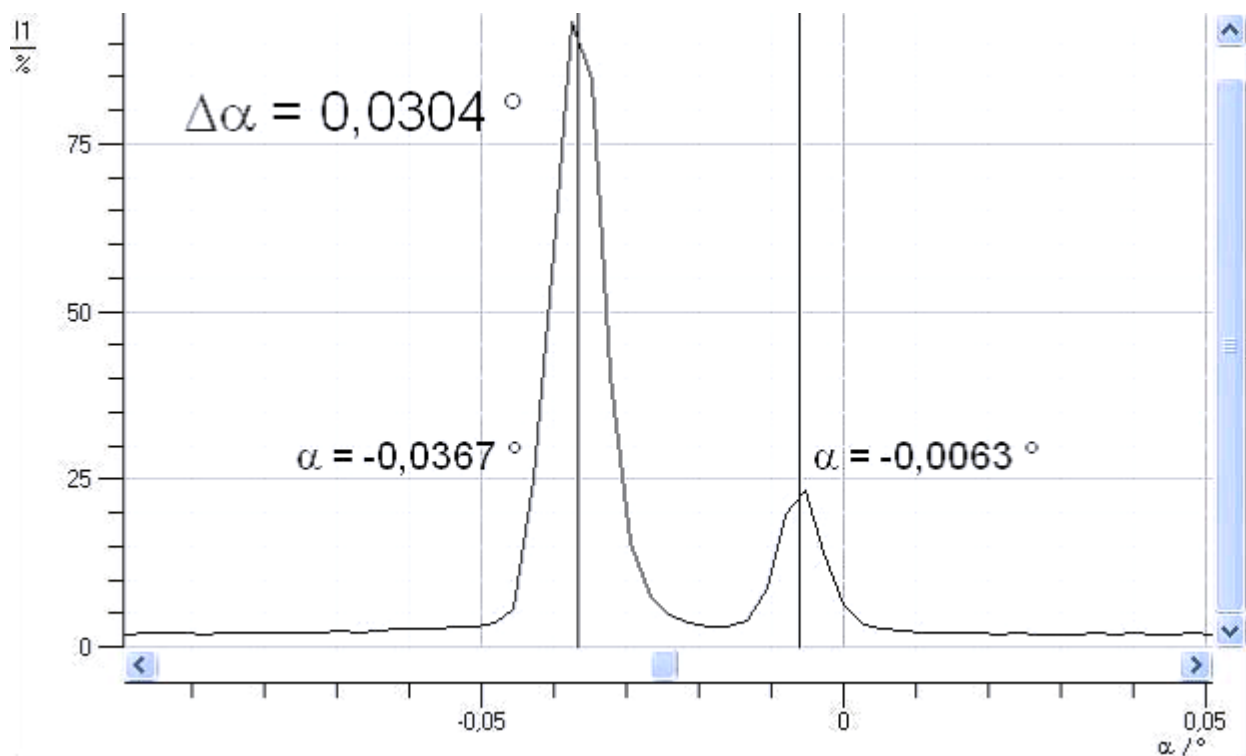


Рис. 13. Пример определения углового расстояния.

- Угловая разница  $\Delta\beta = \Delta\alpha = 0.0304^\circ = 0.000531$ .

- Учитывая (9), можно найти изотопическое расщепление:

$$\Delta\lambda = 417 \text{ нм} \times \cos 40.5^\circ \times 0.000531 = 0.168 \text{ нм}.$$

Литературное значение:  $\Delta\lambda = \lambda_{\text{H}\alpha} - \lambda_{\text{D}\alpha} = 0.179 \text{ нм}$ .

Погрешность измерения  $\sim 6\%$ .

**Задание 2:** Определить длины волн (усредненные значения для водорода и дейтерия) трех первых линий серии Бальмера:  $H_\alpha (D_\alpha)$ ,  $H_\beta (D_\beta)$  и  $H_\gamma (D_\gamma)$ .

- Ослабить винт на рейтере с голографической решеткой и вращать рейтер до появления линий серии Бальмера  $H_\beta$  и  $D_\beta$ . По вышеописанной методике определить среднюю длину волны этих линий. На данной установке эти линии практически не разрешаются, поэтому изотопический сдвиг измерять не нужно. - То же самое проделать для линий  $H_\gamma$  и  $D_\gamma$ .
- Сравнить измеренные значения длин волн с табличными. Оценить погрешность.

**Задание 3:** Используя формулу (1), определить постоянную Ридберга.

- построить график зависимости  $\nu$  от  $\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right)$  для трех спектральных линий ( $k = 3, 4, 5 \dots$ ). Наклон прямой даст значение постоянной Ридберга  $R_{ЭКСП}$ . Прямую проводить методом наименьших квадратов (МНК), используя математические пакеты (MatLab, MathCAD и др.) или графические пакеты (SigmaPlot, Origin и др.).
- сравнить  $R_{ЭКСП}$  с табличным значением  $R_\infty$  и оценить погрешность измерения.

**Задание 4:** Используя найденное значение  $\Delta\lambda$  и формулу (1), рассчитать массу дейтрона (ядро дейтерия).

- Частоты линий для водорода определяются по формуле:

$$\nu_H = \frac{c}{\lambda_H} = R_H \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Для дейтерия имеем:

$$\nu_D = \frac{c}{\lambda_D} = R_D \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Для красных линий водорода и дейтерия  $k=3$  и  $\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right) = \frac{5}{36}$ .

В частотной шкале изотопический сдвиг:

$$\Delta\nu = \nu_D - \nu_H = \frac{c}{\lambda_D} - \frac{c}{\lambda_H} = (R_D - R_H) \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2}\right) = (R_D - R_H) \cdot \frac{5}{36},$$

а в длинах волн, соответственно:

$$\Delta\lambda = \lambda_H - \lambda_D = \frac{\lambda_D \lambda_H}{c} (R_D - R_H) \cdot \frac{5}{36}.$$

Используя выражения для  $R_D$  и  $R_H$ , получим формулу для нахождения массы дейтрона:

$$m_D = \frac{1}{\frac{1}{m_H} - \frac{36}{5} \cdot \frac{c \cdot \Delta\lambda}{R_{\text{ЭКСП}} \cdot \lambda_{\text{CP}}^2 \cdot m_e}}.$$

Здесь  $\lambda_{\text{CP}} = (\lambda_H + \lambda_D)/2$  – среднее значение длины волны,  $m_H$  – масса ядра водорода (протона),  $m_e$  – масса электрона. При выводе этой формулы предполагалось, что значение произведения  $\left(1 + \frac{m_e}{m_D}\right) \cdot \left(1 + \frac{m_e}{m_H}\right) \approx 1$ , что соответствует точности расчета лучше, чем 0.1%.

- измеренное значение  $m_D$  сравнить с табличным и оценить погрешность.

### **Некоторые табличные значения:**

Скорость света  $c = 2.9979 \cdot 10^8$  м.

Масса электрона  $m_e = 9.1095 \cdot 10^{-31}$  кг.

Масса протона  $m_p = m_H = 1.67265 \cdot 10^{-27}$  кг.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Описание программы «VideoCom Intensities»

VideoCom регистрирует интенсивность с помощью светочувствительной фотодиодной линейки (прибор с зарядовой связью-ПЗС), состоящей из 2048 пикселей.

F4 F3 F2                      F8 F9                      F5 F6 F1  
|   |   |                      |   |                      |   |   |



Кнопки в верхней части окна позволяют быстро получить доступ к основным функциям программного обеспечения, что делает его удобным в использовании.

**I1** - интенсивность измеряется с помощью ПЗС и отображаются на дисплее.

**I2** - то же самое, но интенсивность заносится в таблицу I2.

**T = I1/I2** - измеряется и отображается пропускание.



**F4** - Очищает окно дисплея. Нажатие этой кнопки два раза очищает текущее измерение всех параметров.



**F3** - Открывает серию измерений и одновременно удаляет все ранее существующие серии измерений.



**F2** - Сохранение текущей серии измерений.



- Печатает активные в данный момент таблицы или диаграммы.



**F8, F9** - Запуск и остановка измерений, соответственно, с разрешением 256 или 2048 пикселей.



- Изменение времени экспозиции, и, следовательно, чувствительности ПЗС-матрицы, дискретно от 1 (= 1,25 мс) до 8 (= 20 мс).



**F5** - В данной работе эта опция (**Calibration/Comparison with Theory + Diffraction Angle**) используется для следующих операций:

1) Задание фокусного расстояния камерного объектива (**Effective Focal Length**) - 300 мм.



2) При сильной внешней засветке (большой фон) можно автоматически учесть (вычесть) этот фон, нажав на кнопку **Background at Minimum**.

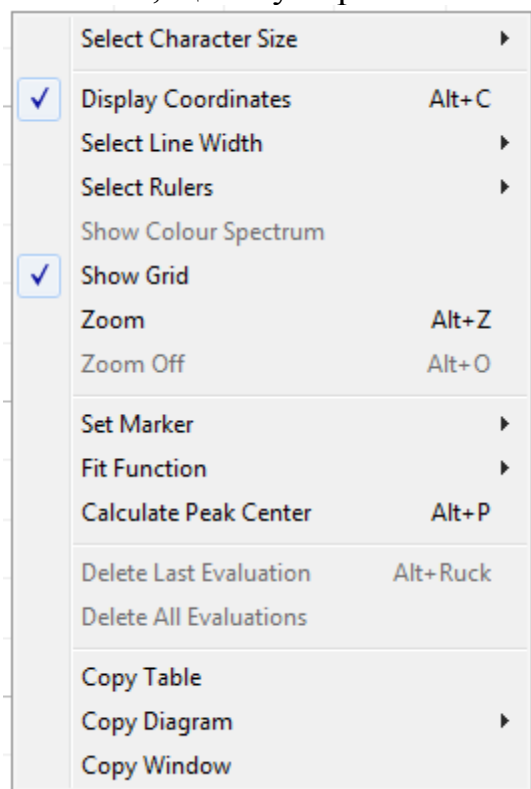
3) При большом смещении спектральных линий от центра дисплея (по оси OX) можно нажав на кнопку **Zero Point Corresponds to Maximum** и сместить таким образом максимум линии на точку  $\alpha = 0^\circ$ .

**F6** - Включает и выключает большой дисплей (**Status Line**) с данными о текущем положении курсора или другой текущей информацией.

**F1** - Открывает файл справки.

### Работа с графическим окном и зарегистрированным спектром

Вы можете получить список меню, щелкнув правой кнопкой мыши.



#### **Select Character Size (Выбрать размер цифр)**

Вы можете изменить размер цифр в таблице. Цифры 3-х размеров – малые, средние и большие.

#### **Display Coordinates (Показать координаты) => Alt + C**

При активации этой функции в левом нижнем углу дисплея и в строке состояния (при нажатой **F6**) отображаются текущие координаты указателя мыши, пока он находится в пределах графического окна. Вы также можете просмотреть текущие координаты на диаграмме, а также сохранить текущие настройки в качестве параметра для дальнейшего запуска программы.

### **Select Line Width (Выбрать ширину линии)**

Вы можете изменить ширину линий для отображения диаграмм и оценок, которые вы проводите в них. Вы можете выбрать тонкие, средние и толстые линии.

### **Select Rulers (Выбрать линейки разметки) - положение координат**

Эта функция устанавливает линейки разметки (координатную сетку) на дисплее сверху и слева, внизу и слева или без координатной сетки.

### **Show Grid (Показать сетку)**

Позволяет включать или выключать на графике координатную сетку.

### **Zoom (Увеличить) =>Alt + Z**

После активации функции масштабирования этим пунктом меню необходимо отметить диапазон, который вы хотите увеличить, удерживая левую кнопку мыши и перетаскивая указатель мыши. Увеличенный диапазон можно увеличить еще больше, или сбросить с помощью **Zoom Off**.

### **Zoom Off (Выкл. увеличение) =>Alt + O**

Возвращает выбранный (увеличенный ранее) участок диаграммы к своему первоначальному размеру.

### **Set Marker (Комплект маркеров)**

Это программное обеспечение предоставляет четыре различных меню. Вы можете 1) редактировать маркеры, 2) переместить их или 3) удалить их из диаграммы, дважды щелкнув по ним левой кнопкой мыши.

### **Alt + T: текст**

Эта текст-функция позволяет поместить любой текст в любой части диаграммы. После того, как вы ввели текст, просто переместите его в нужное положение и закрепите с помощью левой кнопки мыши.

Все числовые оценки, которые появятся в строке состояния (**Status Line – F6**), тоже можно разместить на экране.

### **Vertical Line (Вертикальная линия) Alt + V:**

Эта функция позволяет рисовать вертикальные линии в любой позиции на диаграмме. Соответствующее положение содержится в строке состояния.

### **Horizontal Line (Горизонтальная линия) Alt + H:**

Эта функция позволяет рисовать горизонтальные линии в любой позиции на диаграмме. Соответствующее положение содержится в строке состояния.

### **Measure Difference (Измерение разницы) Alt + D:**

После нажатия на точку отсчета можно провести линию в любую точку на диаграмме. В строке состояния будет указана разница в координатах между начальной и конечной точками этой линии.

## **Fit Functions (Подгонка функции)**

Программа предлагает выбор из 2-х операций:

- 1) Best-Fit Straight Line** (Наилучшая подгонка прямой)  $y = Ax + B$
- 2) Line through Origin** (Линия проходит через начало координат)  $y = Ax$

После выбора соответствующей операции, с помощью левой кнопки мышки выберите участок кривой, к которому вы хотите применить операцию подгонки. Для этого надо щелкнуть на начале участка кривой и потом на его конце. После этого выделенный участок окрашивается в зеленый цвет.

Во время подгонки текущие параметры операции (A, B) появятся в строке состояния. Вы также можете вставить эти значения на схеме в виде текста.

Операция может быть удалена из графика (диаграммы), двойным щелчком на прямой.

## **Calculate Peak Center (Рассчитать центр пика)**

Эта функция вычисляет центр отмеченного пика и вставляет его значение в строку состояния. Линия центра пика может быть удалена из графика (диаграммы), если дважды щелкнуть на ней.

## **Delete Last Evaluation (Удаление последней операции (вычисления)) Alt + Backspace**

Отменяет последнюю операцию. Это возможно для следующих функций:

- 1) Set Marker (Комплект маркеров)**
- 2) Fit Functions (Подгонка функции)**
- 3) Calculate Peak Center (Рассчитать центр пика)**

## **Delete All Evaluations (Удалить все операции)**

Отменяет все операции. Это касается следующих функций:

- 1) Set Marker (Комплект маркеров)**
- 2) Fit Functions (Подгонка функции)**
- 3) Calculate Peak Center (Рассчитать центр пика)**

## ЛИТЕРАТУРА

1. Udem, Th. Phase-Coherent Measurement of the Hydrogen 1S–2S Transition Frequency with an Optical Frequency Interval Divider Chain / Th. Udem, et. al. // Phys. Rev. Lett. -1997. -V. 79. -P. 2646-2649.
2. Mohr, P.J. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2006 / J.P. Mohr, B.N. Taylor, D.B. Newell // Rev. of Mod. Phys. -2008. -V. 80. -P. 633-730.
3. de Beauvoir, B. Absolute Frequency Measurement of the 2S–8S=D Transitions in Hydrogen and Deuterium: New Determination of the Rydberg Constant / B. de Beauvoir, et. al. // Phys. Rev. Lett. -1997. -V. 78. -P. 440-443.
4. Kottmann, F. The Muonic Hydrogen Lamb Shift Experiment at PSI / F. Kottmann, et. al. // Hyper. Interac. -2001. -V. 138. -P. 55-60. 17
5. Pohl, R. The Size of the Proton / R. Pohl, et. al. // Nature. -2010. -V. 466. -P. 213-217.
6. Antognini, A. Proton Structure from the Measurement of 2S-2P Transition Frequencies of Muonic Hydrogen / A. Antognini et al. // Science. – 2013. – V. 339. – P. 417