

IV. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ ЯДРА ДЕЙТЕРИЯ ПО РАЗНОСТИ ДЛИН ВОЛН ЛИНИЙ H_α И D_α , ИЗМЕРЯЕМОЙ ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА

Введение

Волновые числа спектральных линий водорода, как известно, могут быть получены из формулы Бальмера:

$$\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right); \quad (10)$$

значения чисел n определяют серии, и числа m — номера линий в серии. Так, например, значению $n = 2$ соответствует серия Бальмера, расположенная в видимой и близкой ультрафиолетовой областях спектра; числа $m = 3, 4, 5$ дают соответственно линии H_α , H_β и H_γ этой серии.

Постоянная Ридберга включает в себя комбинацию известных постоянных, а именно:

$$R = \frac{2\pi^2 e^4 m}{ch^4}, \quad (11)$$

где $m = \frac{m_0}{1 + \frac{m_0}{M}}$ - приведенная масса, m_0 — масса электрона и M — масса ядра.

Приведенная масса m в выражении (11) учитывает влияние движения ядра и электрона вокруг их общего центра тяжести на значение энергии атома, а, следовательно, и на значение R .

Таким образом, атомы, отличающиеся друг от друга лишь массой ядер (изотопы), будут давать спектры, сходные по сериальному расположению линий, но волновые числа, а следовательно и длины волн соответствующих линий будут различны: они будут сдвинуты относительно друг друга. Такой сдвиг наблюдается, например, в спектре изотопа водорода дейтерия. Линии дейтерия сдвинуты относительно линий обычного водорода.

Частоты линий водорода и дейтерия выражаются формулами:

$$\nu_H = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right); \quad \nu_D = R_D \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$$

Для линий водорода и дейтерия, возникающих при одинаковом квантовом переходе (когда n и m одинаковы для обоих атомов), можно написать соотношение:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_H} = \frac{\lambda_H - \lambda_D}{\lambda_H} = \frac{\nu_D - \nu_H}{\nu_D} = \frac{R_D - R_H}{R_D}. \quad (12)$$

R_D и R_H можно выразить через постоянную Ридберга для атома с бесконечной массой R_∞ :

$$R_H = R_\infty \frac{M_H}{M_H + m_0}$$

и

$$R_D = R_\infty \frac{M_D}{M_D + m_0},$$

где M_H и M_D обозначают массы ядер обычного водорода дейтерия, а m_0 - массу электрона. Отсюда получим:

$$\frac{R_D - R_H}{R_D} = \frac{M_D + m_0}{M_D} \left(\frac{M_D}{M_D + m_0} - \frac{M_H}{M_H + m_0} \right) = 1 - \frac{1 + \frac{m_0}{M_D}}{1 + \frac{m_0}{M_H}}$$

Ввиду малости отношения $\frac{m_0}{M_H} = \frac{1}{1836}$ можно приближенно положить

$$\left(1 + \frac{m_0}{M_H} \right)^{-1} = 1 - \frac{m_0}{M_H}.$$

Тогда

$$\frac{R_D - R_H}{R_D} = \frac{m_0}{M_H} - \frac{m_0}{M_D} + \frac{m_0}{M_D} \frac{m_0}{M_H} = \frac{m_0}{M_H} - \frac{m_0}{M_D} \left(1 - \frac{m_0}{M_H} \right). \quad (13)$$

Последнюю скобку можно приближенно считать единицей, и тогда, подставляя выражение (12) в (13), получим:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_H} = \frac{m_0}{M_H} - \frac{m_0}{M_D}. \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что, зная M_D , мы можем определить $\Delta\lambda$, поскольку остальные величины известны; и наоборот: измерив $\Delta\lambda$ можно определить массу ядра дейтерия. Второй случай и составляет задачу настоящей работы. Из формулы (14) имеем:

$$M_D = \frac{m_0}{\frac{m_0}{M_H} - \frac{\Delta\lambda}{\lambda_H}} \quad (15)$$

Для вычисления M_D можно воспользоваться следующими табличными значениями постоянных:

$$\begin{aligned} \text{масса электрона } m_0 &= 9,109 \cdot 10^{-28} \text{ г.} \\ \text{масса протона } M_H &= 1,6723 \cdot 10^{-24} \text{ г.} \end{aligned}$$

Длина волны красной линии (H_α) обычного водорода

$$\lambda_{H_\alpha} = 6562,80 \text{ \AA}.$$

Примечание: Замена значения скобки $\left(1 - \frac{m_0}{M_H} \right)$ единицей даст ошибку, составляющую около 0,05% вычисляемой величины.

Если относительная погрешность экспериментально определяемой величины $\Delta\lambda$ ниже этого значения или даже одного с ним порядка, то описанного упрощения делать не следует. В этом случае в разложении

$$\left(1 + \frac{m_0}{M_H} \right)^{-1} = 1 - \frac{m_0}{M_H} + \frac{m_0^2}{M_H^2} + \dots$$

надо еще квадратичный член. Тогда формулой, дающей большую степень приближения, будет

$$M_D = m_0 \frac{1 - \frac{m_0}{M_H}}{\frac{m_0}{M_H} \left(1 - \frac{m_0}{M_H} \right) - \frac{\Delta\lambda}{\lambda_H}} \quad (16)$$

Измерение длин волн с помощью интерферометра Майкельсона

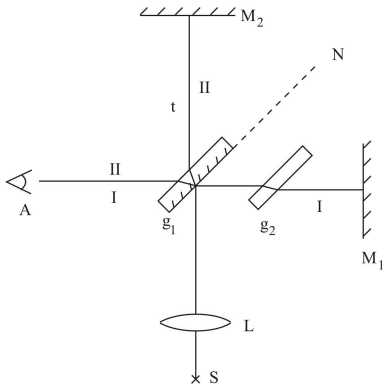


Рис. 19.

Схема интерферометра представлена на Рис. IV. Свет от источника S, проходящий через линзу L, идет далее в виде параллельного пучка. Попадая на плоскопараллельную стеклянную пластинку g , задняя поверхность которой представляет собой полупрозрачное стекло, пучок разделяется на два взаимно перпендикулярных пучка I и II.

Пучок I попадает нормально на плоское зеркало M_1 , отражается обратно и снова разделяется полупрозрачным зеркалом g на два пучка, один из которых идет в направлении A, где помещается глаз наблюдателя, а второй идет обратно по направлению к линзе L и в дальнейшем не представляет интереса. Пучок II падает нормально на плоское зеркало M_2 . С помощью салазок и винта Рис. IV, ручка (3) это зеркало может перемещаться вдоль направления пучка, оставаясь строго параллельным самому себе. Отражаясь от зеркала M_2 , пучок идет обратно и снова разделяется полупрозрачным зеркалом на два пучка, из которых пучок, идущий к линзе, опять не представляет интереса; второй пучок также идет по направлению A. Допустим теперь, что на интерферометр одновременно подаются два монохроматических пучка с длинами волн λ и $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$. Кольца, соответствующие обоим линиям, будут совпадать при выполнении условия:

$$k\lambda = (k + k')\lambda' = 2t, \quad (17)$$

где k и k' - целые числа. При выполнении же условия

$$k\lambda = \left(k + k' + \frac{1}{2}\right)\lambda' = 2t \quad (18)$$

кольца, соответствующие длине волны λ , расположатся посередине между кольцами, соответствующими длине волны λ' , и вся интерференционная картина будет смазана. Таким образом, интерферометр Майкельсона не позволяет наблюдать раздельно интерференционные полосы даже в простейшем случае двух монохроматических линий. Представление о составе падающего на интерферометр света может быть получено лишь при наблюдении измененной картины, происходящих при передвижении зеркала M_2 .

Полагая по-прежнему для простоты, что на интерферометр падают две строго монохроматические волны с длинами волн λ и λ' , поставим зеркало M_2 на таком расстоянии t_0 от плоскости N, чтобы обе системы колец совпадали; при этом t_0 должно удовлетворять условию:

$$2t_0 = k\lambda = (k + k')\lambda \quad (19)$$

При увеличении расстояния t_0 на Δt кольца снова совпадут, если

$$2(t_0 + \Delta t) = (k + k'')\lambda = (k + k' + k'')\lambda', \quad (20)$$

где k'' - целое число.

Почленно вычитая равенства (19) и (20) друг из друга и замечая, что $\lambda' = \lambda - \Delta\lambda$, получим:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{k'' + 1}; k'' = \frac{2\Delta t}{\lambda}.$$

Пренебрегая 1 по сравнению с k'' , найдем:

$$\Delta t = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda} \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{s\Delta\lambda} \quad (21)$$

При увеличении расстояния между зеркалами на $2\Delta t$, $3\Delta t$ и т.д., кольца снова будут совпадать.

Также легко видеть, что при увеличении расстояния t_0 на $\frac{1}{2}\Delta t$, $\frac{3}{2}\Delta t$ и т.д., одна система колец будет располагаться между другой.

Разность расстояний между двумя соседними положениями зеркала M_2 , при которых интерференционная картина размывается, выражается также формулой (21); доказательство этого предлагается сделать самостоятельно.

Таким образом, при постепенном отодвигании зеркала M_2 , интерференционная картина периодически будет то делаться резкой, то размываться, причем период определяется отрезком Δt , даваемым формулой (21). Экспериментально определяя значение Δt , можно определить $\Delta\lambda$ по формуле (21).

Установка интерферометра и практические указания к работе

1. В рабочем положении зеркала интерферометра должны быть установлены так, чтобы зеркало M_2 и получающееся после отражения от пластинки мнимое изображение зеркала M_1 (обозначим его M), были строго параллельны друг другу.

Для того, чтобы интерференционная картина легко находилась, необходимо также сделать расстояние между зеркалами M_1 и M_2 достаточно малым.

Предварительная установка интерферометра в это положение производится следующим образом: интерферометр освещают каким-либо источником света с резкими очертаниями. Для этого можно воспользоваться простой неоновой лампой, можно также, для большей точности, поставить перед лампой диафрагму с крестообразной прорезью. При положении глаза, указанном на Рис. IV, будут видны два изображения источника отражения в зеркалах M_1 и M_2 . Вращая установочные винты зеркала M_2 , добиваются совмещения этих изображений. Очевидно, что добиться совмещения можно только тогда, когда зеркала находятся на одинаковом расстоянии от источника света (и от глаза). Если это не так, то изображения источника находятся в разных плоскостях, и тогда при перемещении глаза в поперечном направлении Рис. IV, относительное расположение изображений меняется (параллакс). Для уничтожения параллакса надо при помощи микрометрического винта (рычаг 5 должен быть поставлен в нижнее положение!) установить зеркало M_1 так, чтобы расстояния M_2g_1 и M_1g_2 были примерно равны.

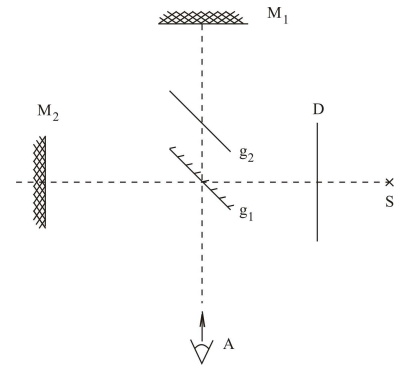


Рис. 20.

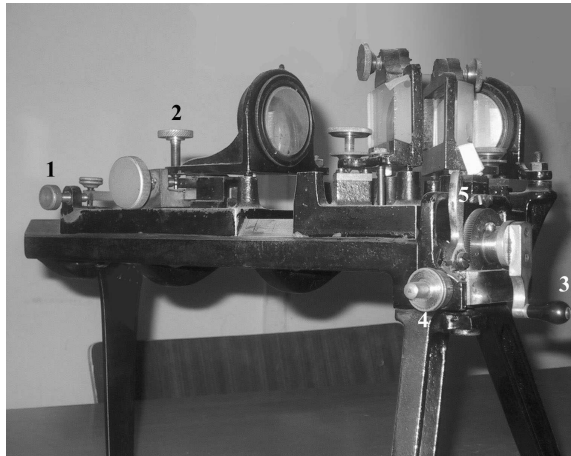


Рис. 21. Внешний вид прибора. 1, 2 — установочные винты зеркала M_2 ; 3 — маховичок; 4 — барабанчик; 5 — рычаг, включающий барабанчик.

яние M_2g_1 , вращая маховичок микрометрического винта (не более 2,5 оборотов в ту и в другую сторону). Затем между линзой и трубкой ставят красный фильтр, и, осторожно действуя установочными винтами зеркала, добиваются, чтобы в поле зрения был бы виден центр интерференционной картины, и кольца вблизи центра были бы достаточно крупными.

Δt определяется следующим образом. Устанавливают интерферометр в положение наибольшей резкости колец или наибольшего смазывания их. Записывают показания на маховичке микрометрического винта и показания добавочного барабанчика. Затем вращают микрометрический винт и отмечают положение, когда картина повторяется, т.е. имеет место либо наибольшая резкость, либо наибольшая размытость. Разность двух соседних положений зеркала M_2 и даст период Δt .

При измерении Δt следует отсчитывать полные обороты маховичка, показания шкалы на нем (цена деления 0,01 оборота) и показания добавочного барабанчика (цена деления 0,0002 оборота). Шаг винта - 0,5 мм. Слева от маховичка (3) имеется рычаг (5), включающий барабанчик (4). Включать барабанчик нужно только при измерениях.

Положение максимального смазывания картины устанавливается точнее, чем положение максимальной резкости, поэтому следует определять Δt по смазыванию картины.

5. Для наблюдения интерференционной картины, даваемой линиями H_α и D_α , следует употреблять красный фильтр, позволяющий отделить эти линии от других линий спектра. При вычислении $\Delta \lambda$ из выражения (21), за λ следует принимать длину волны H_α , которую рекомендуется вычислять по формуле (10).

Примечание:

- При установке интерферометра ни в коем случае не следует пользоваться винтами пластинок g_1 и g_2 и зеркала M_1 , т.к. пластинки g_1 и g_2 и зеркало M_1 уже установлены
- Следует помнить, что посеребрены наружные поверхности зеркал и пластинки g_1 ; всякое прикосновение к их поверхности выводит прибор из строя

2. Если предварительная установка зеркала M_2 выполнена достаточно тщательно, что в направлении A (см. Рис. IV) на фоне изображения светящегося пятка лампы должна быть видна интерференционная картина, но полосы будут, вероятно, очень мелкими. Пользуясь линзой, добиваются, чтобы все поле зрения было заполнено светом (освещают интерферометр параллельным пучком).

Осторожным вращением винтов тонкой настройки зеркала M_2 и вращением микрометрического винта добиваются, чтобы в поле зрения был виден центр интерференционной картины (зеркала M_1 и M_2 параллельны), и чтобы полосы были крупными (расстояние между зеркалами мало).

3. Заменяют неоновую лампу разрядной трубкой, которая заполнена смесью водорода и дейтерия. Без фильтра должны быть видны голубые кольца на розовом фоне; если колец не видно, то следует несколько изменить расстояние

Литература

1. Фриш С.Э., Техника спектроскопии, Л., 1936.
2. Фриш С.Э., Оптические спектры атомов, М., 1963

Задание

1. Пользуясь неоновой лампочкой, установить интерферометр и получить четкую интерференционную картину.
2. Осветив интерферометр газоразрядной трубкой, определить разности длин волн H_α и D_α , H_γ и D_γ ; для выделения нужных линий надо использовать светофильтры.

Перед включением трубки необходимо включить охлаждающий трубку вентилятор. Трубка питается от высокочастотного генератора. Включив генератор, надо дать прогреться лампам 3–5 минут, после чего трубка зажигается с помощью трансформатора Тесла. При этом ни в коем случае нельзя подавать разряд на электроды высокочастотного генератора - будет пробит конденсатор!!

3. По найденным разностям $\Delta\lambda_\alpha$ и $\Delta\lambda_\gamma$ вычислить массу ядра дейтерия.

$$\lambda(H_\alpha) = 6562,85\text{Å} \quad \lambda(H_\gamma) = 4340,47\text{Å}$$

Задание

1. Дать оптическую схему установки с указанием хода лучей.
2. Привести таблицу измерений Δt .
3. Привести результаты вычисления $\Delta\lambda$ с оценкой погрешностей их определения.
4. Привести полученное значение M_D с оценкой погрешности.