

07; 12

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОППЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЛИНИЙ ВОДОРОДА НА ПУЧКАХ ИОНОВ H_2^+ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ 150—2000 кэВ

*Л. А. Победоносцев, Я. М. Крамаровский, П. Ф. Паршин,¹ Б. К. Селезнев,
А. Б. Березин²*

Проведено критическое рассмотрение экспериментальных работ по прямой проверке релятивистской формулы для эффекта Допплера. Описывается усовершенствованная методика измерений и обработки полученных результатов. Отмечается систематическое расхождение между экспериментальными и расчетно-теоретическими данными. Рассматриваются причины, которые могли бы привести к этим расхождениям.

Эффект Допплера, как известно, заключается в изменении длины волны λ , воспринимаемой неподвижным наблюдателем от движущегося источника колебаний, сравнительно с точно таким же неподвижным источником колебаний с длиной волны λ_0

$$\lambda = \lambda_0 \frac{1 - \beta_0 \cos \Theta}{\sqrt{1 - \beta_0^2}}, \quad (1)$$

где $\beta_0 = V_0/c$ (V_0 — скорость движения источника колебаний, Θ — угол между направлением скорости и направлением наблюдения).

При $\beta_0 \ll 1$

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 - \beta_0 \cos \Theta + \frac{\beta_0^2}{2} \right). \quad (2)$$

При чисто классическом рассмотрении может быть получен только числитель выражения (1), знаменатель же получается при релятивистском рассмотрении.

Попытки обнаружить эффекты, связанные с множителем $\sqrt{1 - \beta_0^2}$ в знаменателе выражения (1), длительное время оставались безуспешными, так как при $\beta_0 \ll 1$ они чрезвычайно малы.

В 1938 г. Айвсом и Стиллуэлом была предложена и осуществлена удачная схема эксперимента, которая подтвердила выражение (1) [1]. В этом эксперименте ионы H_2^+ , ускоренные в «катодной трубке» до 28 кэВ, при столкновении с неускоренными молекулами водорода «разваливались» на свободные протоны и возбужденные атомы водорода. В результате их же столкновений образовывались неподвижные атомы водорода в возбужденном состоянии. Таким образом, в эксперименте будут наблюдаться две линии: несмещенная (λ_0) и смещенная вследствие эффекта Допплера (λ). Айвс предложил проводить измерения одновременно под двумя симметричными углами Θ° и $180^\circ + \Theta^\circ$. Тогда в направлении движения мы зафиксируем длину волны согласно выражению (2)

$$\lambda_1 = \lambda_0 \left(1 - \beta_0 \cos \Theta + \frac{\beta_0^2}{2} \right).$$

¹ Академия гражданской авиации, Ленинград.

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Ленинград.

Под углом $\Theta^\circ + 180^\circ$ будет фиксироваться длина волны

$$\lambda_2 = \lambda_0 \left(1 + \beta_0 \cos \Theta + \frac{\beta_0^2}{2} \right).$$

Между линиями λ_1 и λ_2 располагается несмещенная линия λ_0 . Соответственно написанным выражениям получаем сдвиг в синюю область

$$\Delta\lambda_c = |\lambda_1 - \lambda_0| = \lambda_0 \left(\beta_0 \cos \Theta - \frac{\beta_0^2}{2} \right)$$

и сдвиг в красную область

$$\Delta\lambda_k = |\lambda_2 - \lambda_0| = \lambda_0 \left(\beta_0 \cos \Theta + \frac{\beta_0^2}{2} \right).$$

Комбинируя написанные выражения, имеем

$$\Delta\lambda_k + \Delta\lambda_c = 2\lambda_0\beta_0 \cos \Theta,$$

$$\Delta\lambda_k - \Delta\lambda_c = \lambda_0\beta_0^2. \quad (3)$$

Таким образом, сложная в экспериментальном отношении задача чрезвычайно точного определения длин волн заменяется более простой — определением асимметрии смещения двух линий относительно центральной. Схема эксперимента Айвса в упрощенном виде показана на рис. 1, а.

В дальнейшем эти же авторы повторили свой эксперимент и довели энергию ионов H_2^+ до 40 кэВ [2]. Результаты этих работ совпадают: использовалась линия H_β с $\lambda_0 = 486.2$ нм и $\Theta = 7^\circ$.

В 1962 г. Мандельберг и Виттен, используя усовершенствованную методику, довели энергию ионов H_2^+ до 78 кэВ [3]. В этом эксперименте пучок ионов H_2^+ проходил через отверстия в двух плоских зеркалах, между которыми располагался экран с отверстием для прохождения пучка ионов. Зеркала наклонены к оси пучка под углами 45 и 135°, благодаря этому они отражают свет под углами, близкими к 0 и 180° относительно оси пучка ионов; расстояния между центральными отверстиями в зеркалах 10 см. Давление водорода в камере составляет 400 мкм Hg. Совмещенный световой поток подается на щель спектрографа. Эти авторы также подтвердили выражение (1). Схема их эксперимента показана (упрощенно) на рис. 1, б.

Можно было бы привести еще ряд работ, подтверждающих наличие множителя $1/\sqrt{1-\beta_0^2}$ в выражении (1), однако, по мнению авторов, эти работы содержат лишь косвенные подтверждения. Кроме работ [1, 2, 3], не удалось обнаружить в литературе описание прямых экспериментов, посвященных этому вопросу. И хотя в настоящее время трудно сомневаться в справедливости выражения (1), в экспериментальном отношении работы [1, 2, 3] представляются нам недостаточно убедительными по следующим причинам.

1. Конструкции экспериментальных установок в упомянутых работах таковы, что производится сравнение длин волн, испущенных под углами, близкими к 0 и 180°, относительно пучка ионов из разных областей пространства. Вследствие торможения в атмосфере водорода, напускаемого в рабочую область установки, в разных областях пространства пучку ионов H_2^+ необходимо приписывать разные β_0 , что должно приводить к нежелательным побочным эффектам и возникновению ложной асимметрии в положении линий $\Delta\lambda = \lambda_0\Delta\beta_0$. Например, используя приведенные в работе [3] расстояния между зеркалами

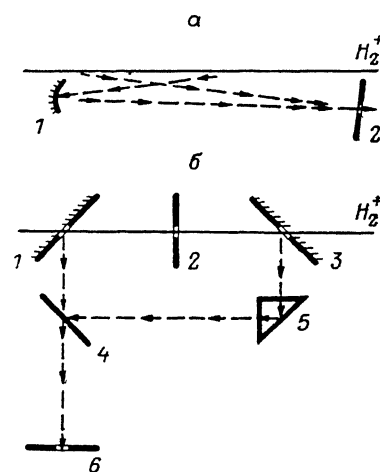


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента Айвса (а) и Мандельберга (б).

а: 1 — зеркало, 2 — щель спектрографа; б: 1, 3 — зеркала, 2 — экран, 4 — полупрозрачное зеркало, 5 — призма, 6 — щель спектрографа.

и давление в камере, нетрудно рассчитать эту ложную асимметрию. Результаты представлены на рис. 2. В этих расчетах использовались тормозные способности водорода по данным работы [4]. Этот пример несколько условен, так как области, из которых собирается излучение, не могут быть точно локализованы. Становится непонятным, каким образом авторы работы [3] получили прекрасное согласие своих экспериментальных результатов с расчетными по формуле (1). К сожалению, в работах [1, 2] не указываются конкретные размеры установки и рабочее давление, что не позволило провести оценки ложной асимметрии.

2. В упомянутых работах используются ионы H_2^+ слишком низких энергий, вследствие чего эффекты, связанные с множителем $1/\sqrt{1-\beta_0^2}$, малы; в то же время конечные результаты этих работ указываются без экспериментальных погрешностей.

Изложенные причины побудили авторов еще раз вернуться к вопросу об экспериментальном подтверждении выражения (4).

В качестве источника ионов H_2^+ нами использовались ускорители Радиевого института им. В. Г. Хлопина НГ-400 (до 300 кэВ) и ЭГ-5 (до 2000 кэВ). Магнитный анализатор выделял из «прямого» пучка ионов необходимую нам компоненту ионов H_2^+ . Токи пучка ионов H_2^+ составляли ~ 50 мкА при энергиях ионов до 300 кэВ и $\sim 10-12$ мкА при более высоких энергиях. Так как свечение, вызываемое пучком с такими токами, малоинтенсивно, то для увеличения светосбора нам представляло целесообразным использовать многощелевой коллиматор света жалюзийного типа. Такой коллиматор несложно реализовать, если углы наблюдения близки к 90° относительно пучка ионов. В нашем случае эти углы составляют 77° и 257° . Коллиматор состоит из 29 параллельных пластин длиной 116 мм, шириной 20 мм и толщиной 0.2 мм. Расстояние между пластинами 0.5 мм. В центре коллиматора имеется отверстие, через которое проходит пучок ионов H_2^+ .

Таким образом, реализуется геометрия, при которой производится наблюдение излучения, образовавшегося в одной и той же области пространства «по» и «против» направления движения пучка ионов.

Проверка параллельности пластин коллиматора показала, что она лучше чем 10^{-3} рад. В рабочей объем подается водород до давлений $(4-6) \cdot 10^{-2}$ мм Hg. Для поддержания высокого вакуума в объеме ускорителя ($3 \cdot 10^{-6}$ мм Hg) используется система дифференциальной откачки: между диафрагмами, коллимирующими пучок ионов (диаметр отверстия 5 мм, расстояние между диафрагмами 250 мм), поставлен диффузионный насос. На рис. 3 приведена схема используемой нами установки.

В оптической схеме нашего эксперимента (рис. 4) первоначально использовался дифракционный спектрограф с дисперсией ~ 4.3 нм/мм, калибровка которого осуществлялась независимо по линиям спектра неона. Данные, относящиеся к энергиям ионов H_2^+ (2000, 1750, 1500, 300, 250, 200 и 150 кэВ), получены с этим спектрографом и приводятся в работе [5].

В последующих измерениях использовался спектрограф с дисперсией ~ 2.4 нм/мм, в процессе измерений осуществлялась подсветка спектром неона. Благодаря этому на деловой фотографии получается система реперных линий. Таким образом, выполнены измерения при энергиях ионов H_2^+ : 175, 180, 210, 225, 260 и 275 кэВ.

Излучение под углом 257° с помощью системы из цилиндрической и сферической линз фокусировалось на щель спектрографа. Излучение под углом 77° с помощью такой же системы линз фокусировалось в торец гибкого световода. Второй конец световода соединялся с боковой гранью установленного непосредственно перед щелью спектрографа кубика Люммера, в котором совмещались световые потоки. В полученных фотографиях наблюдается несмещенная H_2^+

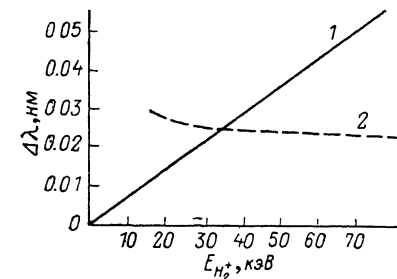


Рис. 2. Расчетная асимметрия $\Delta\lambda = \lambda_0 \beta_0^2$ по формуле (3) и ложная $\Delta\lambda = \lambda_0 \Delta\beta$. $\lambda_0 = 656.28$ нм; 1 — $\Delta\lambda = \lambda_0 \beta_0^2$, 2 — $\Delta\lambda = \lambda_0 \Delta\beta$.

$E, \text{кэВ}$	$\beta \cdot 10^2$	$\Delta\lambda_k, \text{нм}$	$\Delta\lambda_c, \text{нм}$	$\cos \theta$	$n \equiv \Delta\lambda_k - \Delta\lambda_c$	$\frac{n_{\text{расч}} - n_{\text{экс}}}{n_{\text{расч}}}, \%$
2000	4.618	7.34 ± 0.015	5.95 ± 0.02	0.219	1.39 ± 0.02	0.7 ± 1.4
1750	4.315	6.87 ± 0.01	5.75 ± 0.02	0.222	1.12 ± 0.02	10 ± 1.5
1500	4.00	6.24 ± 0.01	5.40 ± 0.02	0.222	0.83 ± 0.02	22 ± 2
300*	1.788	2.40 ± 0.01	2.29 ± 0.01	0.200	0.10 ± 0.01	50 ± 5
275*	1.712	2.37 ± 0.02	2.28 ± 0.02	0.207	0.09 ± 0.02	54 ± 7
260	1.665	2.30 ± 0.02	2.20 ± 0.02	0.206	0.1 ± 0.02	45 ± 10
250	1.632	2.16 ± 0.01	2.09 ± 0.01	0.198	0.07 ± 0.01	59 ± 6
225	1.549	2.11 ± 0.01	2.05 ± 0.01	0.206	0.07 ± 0.02	58 ± 9
210	1.496	2.05 ± 0.01	1.96 ± 0.02	0.204	0.09 ± 0.02	40 ± 14
200*	1.460	1.97 ± 0.01	1.90 ± 0.01	0.201	0.07 ± 0.02	49 ± 12
180	1.385	1.87 ± 0.016	1.81 ± 0.02	0.202	0.06 ± 0.02	50 ± 15
175*	1.366	1.91 ± 0.01	1.86 ± 0.01	0.210	0.046 ± 0.015	46 ± 15
150*	1.264	1.72 ± 0.01	1.68 ± 0.01	0.204	0.034 ± 0.01	66 ± 10

линия водорода с $\lambda_0 = 656.28 \text{ нм}$ и две смещенные за счет эффекта Доплера линии, которые несколько расширены по сравнению с несмещенной.

Линии, соответствующие углу наблюдения 77° , менее интенсивны, так как использование гибкого световода связано с дополнительными потерями света. Время экспозиции при энергиях ионов 2000, 1750 и 1500 кэВ составляло ~ 48 и 6—8 ч в остальных случаях.

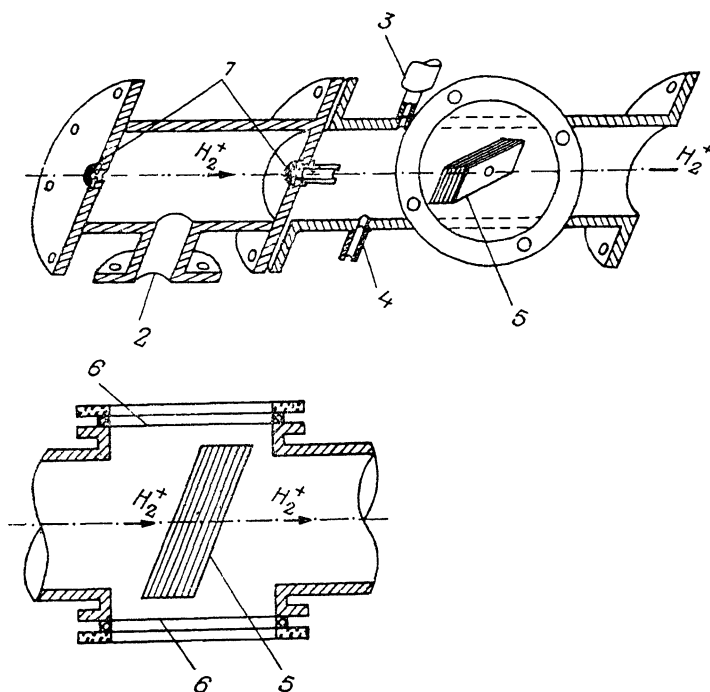


Рис. 3. Схема установки.

1 — коллиматор пучка ионов, 2 — выход к насосу, 3 — термодатчик, 4 — пуск водорода, 5 — коллиматор светового потока, 6 — смотровые окна.

На рис. 5 представлен обработанный на микрофотометре спектр, относящийся к энергии ионов H_2^+ 175 кэВ.

При обработке полученных фотографий высота щели микрофотометра устанавливалась меньше высоты полученных линий. Для каждой фотографии производилось 10 фотометрирований в разных по высоте участках спектра. Определялось в каждом случае положение центра тяжести линий. Затем результаты усреднялись и определялись погрешности (среднеквадратичные). Расстояния между линиями также измерялись под микроскопом, а часть фото-

графий независимым образом была обработана на компараторе. Результаты оказались близкими друг к другу. В конечном виде результаты представлены в таблице.

В течение всех измерений установка несколько раз разбиралась, при каждой энергии пучка заново осуществлялась его проводка в рабочую область. Показателем неизменности условий проведения измерений может служить значение $\cos \Theta$, рассчитанное по формуле (3). Отклонения значений $\cos \Theta$ лежат в пределах $\sim 10^{-2}$, величины, определяемой размерами диафрагм, коллимирующих пучок ионов. Определенным геометрическим путем $\cos \Theta = 0.21$. Близкое совпадение определенных разными путями $\cos \Theta$ может служить доказательством того, что ионы H_2^+ имели действительно ту скорость, которая получается расчетным путем по формуле $V = \sqrt{2E/m}$, значения β_0 для которой приведены в таблице.

Обращает на себя внимание систематическое отклонение экспериментально измеренной величины $n_{\text{экс}} \equiv \Delta\lambda_k - \Delta\lambda_c$ от ее расчетно-теоретического значения $n_{\text{расч}} \equiv \lambda_0 \beta_0^2$. Эти отклонения представлены в таблице величиной $n_{\text{расч}} - n_{\text{экс}}/n_{\text{расч}}$. На рис. 6 представлены $n_{\text{экс}}$ и $n_{\text{расч}}$.

В связи с вышеуказанным целесообразно рассмотреть эффекты, которые могли бы привести к подобным отклонениям.

1. Асимметрия в углах наблюдения, т. е. $\Theta_{\text{назад}} \neq \Theta_{\text{вперед}} + 180^\circ$, тогда $\Delta\lambda_c = \lambda_0 (\beta_0 \cos \Theta - \beta_0^2/2)$ и $\Delta\lambda_k = \lambda_0 [\beta_0 \cos (\Theta + \Delta\Theta) + \beta_0^2/2]$. Это влечет за собой появление ложной асимметрии в длинах волн $(\Delta\lambda_k - \Delta\lambda_c)_{\text{ложн}} = -2\lambda_0 \beta_0 \times \sin (\Theta + \Delta\Theta/2) \times \sin \Delta\Theta/2$.

Если перевернуть коллиматор на 180° таким образом, чтобы то его плечо, которое выделяло направление «назад», стало бы выделять направление «вперед», то ложная асимметрия изменит знак. При этом наблюдаемый эффект станет

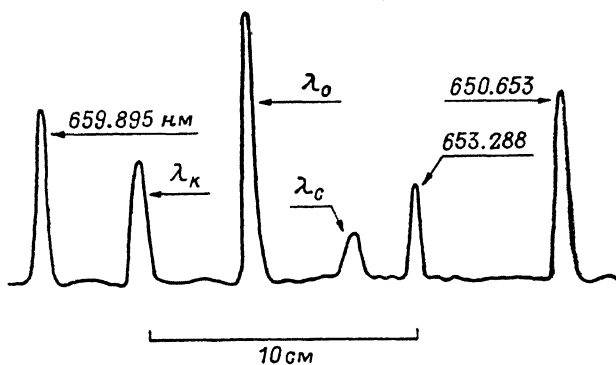


Рис. 5. Микрофотограмма полученного спектра при энергии пучка ионов H_2^+ 175 кэВ (увеличение 50).

больше теоретического. В таблице звездочка соответствует измерениям с перевернутым коллиматором, когда превышение измеряемого эффекта над теоретическим не наблюдается.

2. Сдвиг величины λ_0 может произойти, если та молекула водорода, которую мы считали неподвижной и с которой связывали излучение с длиной волны λ_0 , в акте рассеяния приобретает некоторую скорость. Среднее значение этой ско-

ности можно определить из условия, что импульс пучка передается среде водорода на длине свободного пробега. Так, например, при $E_{H\frac{1}{2}}=200$ кэВ и токе ионного пучка 100 мкА мы получим $V_{cp}=3 \cdot 10^4$ см/с (длина пробега в водороде принята $3 \cdot 10^{-5}$ г). Эта величина меньше скорости теплового движения при комнатной температуре $\sim 2 \cdot 10^5$ см/с. В фотографиях, полученных на спектрографе с дисперсией 2.4 нм/мм, калибровочная шкала строится по линиям спектра неона, имеющимся на фотографиях, что дает возможность определять длину волны λ_0 . Так, для микрофотографии на рис. 5 $\lambda_0=656.279$ нм, среднее значение по всем фотографиям $\lambda_0=656.2792 \pm 0.003$ нм, табличное значение $\lambda_0=656.28$ нм.

Таким образом, ни в рамках предположения о несимметрии углов наблюдения, ни перераспределением скоростей в акте взаимодействия наблюдаемые отклонения экспериментальных величин от расчетно-теоретических объяснены быть не могут. Авторам не удалось найти разумного объяснения полученной ими аномалии. Не исключено, что механизм образования атома водорода в возбужденном состоянии не такой, как принимается нами и в работах [1-3]. В этом направлении была бы желательной постановка независимых экспериментов другой группой исследователей.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Ю. И. Островского за участие в постановке измерений, В. И. Вавилкина за участие в измерениях, А. И. Таразевича за изготовление установки. Мы так же признательны М. В. Блинову, Ю. А. Немилону и С. С. Коваленко за поддержку, без которой выполнение данной работы было бы невозможным.

Литература

- [1] Ives U. E., Stilwell G. R. // J. Opt. Soc. Amer. 1938. Vol. 28. N 7. P. 215—224.
- [2] Ives U. E., Stilwell G. R. // J. Opt. Soc. Amer. 1941. Vol. 31. N 5. P. 369—374.
- [3] Mandelberg U. I., Witten L. // J. Opt. Soc. Amer. 1962. Vol. 52. N 5. P. 529—536.
- [4] Nucl. Data Tables. Sect. A. 1970. Vol. 7. N 3—4. 233 p.
- [5] Победоносцев Л. А., Крамаровский Я. М., Селезнев Б. К. и др. Препринт Радиового института им. В. Г. Хлопина. № РИ-199. Л., 1986. 18 с.

Поступило в Редакцию
11 февраля 1988 г.

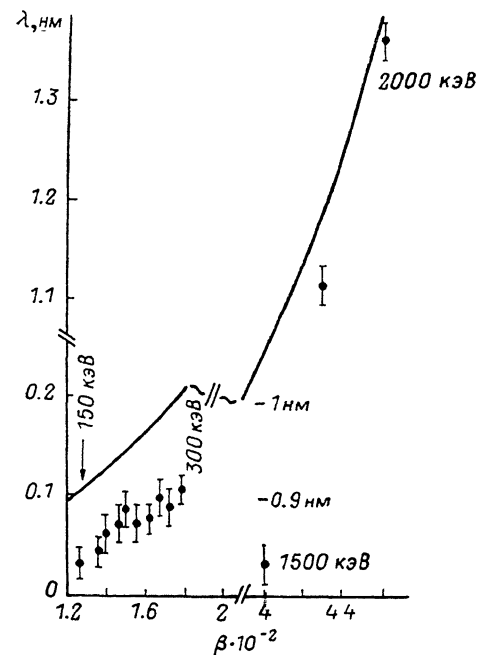


Рис. 6. Экспериментальные результаты в сравнении с их расчетными значениями $\lambda_0 \beta_0^2$.