

СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЕ УШИРЕНИЕ D_1 ЛИНИИ НАТРИЯ $\lambda=589.6$ нм

К. Г. Попов и В. П. Рузов

Исследовано уширение резонансной линии $\lambda=589.6$ нм Na I при столкновениях атомов натрия с инертными, молекулярными газами и атомами натрия. Значения эффективных сечений уширения равны He — 97, H_2 — 112, Ar — 276, NO — 282, CO — 252, N_2O — 305 Å², сечение резонансного уширения $164 \cdot 10^{-14}$ см². Исследования показали, что компоненты резонансного дублета по-разному уширяются инертными и молекулярными газами. Обсуждается вклад различных типов взаимодействия в сечения уширения.

Исследование уширения спектральных линий давлением посторонними газами позволяет получать информацию о потенциалах взаимодействия частиц. Особенно большой прогресс достигнут в изучении уширения резонансных линий атомов элементов первой группы при столкновениях с инертными газами, поскольку такие взаимодействующие пары наиболее удобны в экспериментальных исследованиях и доступны для теоретических расчетов. Гораздо менее изучено влияние давления молекулярных газов на ширину спектральных линий, поэтому представляет интерес провести сравнительное изучение уширения спектральных линий при столкновениях с инертными и молекулярными газами. В настоящей работе измерены сечения уширения D_1 линии натрия при столкновениях с Na, инертными (He, Ar) и молекулярными (H_2 , N_2 , NO, CO, N_2O) газами. Выбор перечисленных объектов обусловлен прежде всего тем, что в настоящее время получены надежные теоретические и экспериментальные данные [1-5] по уширению резонансных линий Na I давлением инертных газов, и прежде всего гелием. Повторение этих исследований дает возможность оценить точность экспериментального метода, использовавшегося в данной работе. С другой стороны, перечисленный набор газов позволяет выяснить вклад различных типов взаимодействий в уширение спектральных линий, так как молекулярные газы обладают довольно широким набором электрических моментов при небольших различиях в поляризуемости (табл. 1). Близость поляризуемостей обеспечивает равенство маскирующих эффектов дисперсионных сил, на фоне которых проявляются другие типы взаимодействий, а равенство молекулярных весов приводит к тому, что расстояния наибольшего сближения сталкивающихся частиц будут одинаковы.

Уширение посторонними газами

Исследование уширения D_1 линии Na I ($\lambda=589.6$ нм) проводилось методом Вейнгера [6], фотоэлектрический вариант которого подробно описан нами в работах [7, 8]. Непосредственно измеряемой величиной в данном методе является отношение ширины лоренцевского контура линии γ к константе rH , связанной с зеемановским расщеплением (H — напряженность магнитного поля). На рис. 1 в качестве примера приведена зависимость величины γ/rH для D_1 линии Na I от давления He.

Таблица 1

Значения эффективных сечений уширения и характеристик газов

Газ	$\alpha \cdot 10^{24}$, см ³	$q \cdot 10^{23}$, СГСЕ	$\mu \cdot 10^{18}$, СГСЕ	T, К	σ , Å ²	$\frac{\sigma(D_1)}{\sigma(D_2)}$ *
N ₂ O	2.92	4.2	0.17	582	305 ± 3	1.22 ± 0.09
CO	1.94	2.1	0.1	595	252 ± 9	1.10 ± 0.06
N ₂	1.75	1.6	0	580	270 ± 10	1.20 ± 0.1
					224 [10]	
NO	1.70	2.0	0.16	583	282 ± 9	1.22 ± 0.05
					276 ± 15	1.21 ± 0.09
Ar	1.64	0	0	585	238 ± 20 [1]	1.22 [1]
					297 [3]	1.16 [3]
					261 ± 4 [10]	—
H ₂	0.82	0.6	0	584	112 ± 1	1.03 ± 0.06
					110 ± 2 [10]	—
					97 ± 4	0.84 ± 0.04
					113 ± 6 [1]	0.87 [1]
					91 ± 6 [2]	0.94 [2]
He	0.20	0	0	577	112 [4]	0.96 [4]
					88 [5]	—
					136 ± 20 [6]	0.86 ± 0.2 [6]
					102 ± 2 [10]	—

* Отношения сечений получены с использованием данных работ [7, 8], параметры молекул взяты из [11, 12], α — поляризуемость, q — квадрупольный момент, μ — дипольный момент.

Во всех исследованных нами случаях наблюдалась строгая линейная зависимость ширины линии от давления, величина которого не превышала 15 тор. В табл. 1 указаны полученные значения эффективных сечений уширения σ и условия эксперимента. Среднеквадратичная погрешность характеризует воспроизводимость результатов.

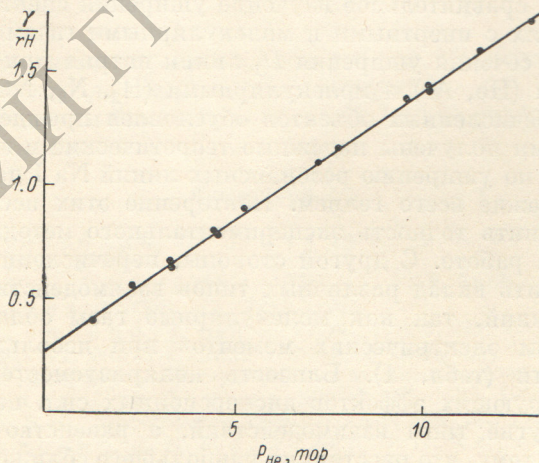


Рис. 1. Зависимость ширины линии от давления атомов гелия.

$$rH = 5.47 \cdot 10^8 \text{ рад/с}, Nfl = 14.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}.$$

Прежде чем перейти к обсуждению полученных результатов, необходимо сделать замечание о форме контура спектральной линии. Метод Вейнгера относится к числу так называемых «косвенных» методов измерения ширины линии. Измеряемая величина γ/rH находится по углу φ между поляроидами системы. В предположении лоренцевского контура можно получить аналитическую связь между γ/rH и φ [7]. Если контур исследуемой линии лоренцевский, то значение γ , определенное при раз-

личных напряженностях магнитного поля (и, следовательно, различных φ), должно быть одинаковым. В табл. 2 приведена сводка данных по измерению ширины линии $\lambda=589.6$ нм Na I, уширенной давлением атомов аргона. Погрешность $\Delta\gamma$ соответствует ошибке 5' в измерении угла φ . Как видно из данных табл. 2, при увеличении напряженности магнитного поля в 4 раза значение γ практически не меняется; таким образом, можно считать, что контур линии лоренцевский. Аналогичные измерения были проведены и для других газов.

Таблица 2

H , гс	γ/rH	$\gamma \cdot 10^7$, рад/с	φ , град
40.9	0.73	35 ± 1	10.25
30.3	0.98	35 ± 2	8.75
20.2	1.47	35 ± 3	6.75
10.5	2.67	33 ± 6	4.25

Обсуждение результатов измерений

Инертные газы. Наиболее тщательно теоретически и экспериментально [1-5, 9] изучено уширение D_1 линии Na I при столкновениях с атомами гелия. В большинстве цитируемых работ приведена величина константы уширения γ/N , значения сечений уширения были вычислены нами и приведены для сравнения в табл. 1. Как видно из данных этой таблицы, результаты разных авторов по уширению гелием хорошо согласуются между собой, исключение составляют лишь данные работы [9], в которой получено несколько завышенное значение σ . Наши исследования [7] подтверждают различие в уширении резонансных линий натрия: отношение сечений уширения гелием согласуется в пределах погрешностей с данными других работ [1-4, 9].

В случае уширения давлением аргона различие экспериментальных данных достигает 20%. Измеренное нами значение σ лучше всего согласуется с данными Шутца [10] и результатами расчета, проведенного в работе [3]. Несмотря на различие в абсолютных значениях эффективных сечений, отношение $\sigma(D_1)/\sigma(D_2)$ практически одно и то же у всех авторов. Обращает на себя внимание тот факт, что в тех случаях, когда основной вклад в уширение вносят силы притяжения (Ar), отношение сечений уширения D_1 - и D_2 -линий больше единицы, в случае сил отталкивания (He) — меньше единицы.

Молекулярные газы. Уширение D_1 -линии натрия молекулярными газами (H_2 , N_2) при низких давлениях исследовалось лишь в работе Шутца [10]. Приведенные нами значения сечений уширения для водорода совпадают в пределах указанных погрешностей с данными работы [10], а сечения уширения азотом отличаются на 19%. Такое расхождение связано с тем, что автор работы [10] использовал недостаточно чувствительный, визуальный метод регистрации и не разделял компонент дублета. Как видно из данных табл. 1, за исключением водорода, все молекулярные газы по-разному уширяют компоненты резонансного дублета натрия. В среднем отношение сечений σ_{D_1} и σ_{D_2} равно 1.2. Такое же отношение сечений наблюдается и при уширении давлением аргона, следовательно, можно предположить, что вклады потенциалов, обусловленных дипольными и квадрупольными моментами использованных молекул, не проявляются в уширении спектральных линий. Интересно сравнить отношения эффективных сечений уширения в ряду $Ar-NO-N_2-CO-N_2O$. Если взаимодействие атома натрия с тяжелыми возмущающими газами имеет чисто дисперсионный характер и пропорционально поляризуемости молекулы α , то отношения сечений должны быть пропорцио-

нальны $(\alpha/\bar{v})^{2/5}$ ($\bar{v}$ — относительная скорость). На основании данных табл. 1 и результатов предыдущих измерений [7, 8] можно получить

$$\left. \begin{aligned} D_1 \sigma_{\text{Ar}} : \sigma_{\text{NO}} : \sigma_{\text{N}_2} : \sigma_{\text{CO}} : \sigma_{\text{N}_2\text{O}} &= 1 : 1.02 : 0.97 : 0.91 : 1.11, \\ D_2 \sigma_{\text{Ar}} : \sigma_{\text{NO}} : \sigma_{\text{N}_2} : \sigma_{\text{CO}} : \sigma_{\text{N}_2\text{O}} &= 1 : 1.01 : 0.97 : 1.01 : 1.1, \\ \text{теория } \left(\frac{\alpha}{\bar{v}}\right)_{\text{Ar}}^{2/5} : \left(\frac{\alpha}{\bar{v}}\right)_{\text{NO}}^{2/5} : \left(\frac{\alpha}{\bar{v}}\right)_{\text{N}_2}^{2/5} : \left(\frac{\alpha}{\bar{v}}\right)_{\text{CO}}^{2/5} : \left(\frac{\alpha}{\bar{v}}\right)_{\text{N}_2\text{O}}^{2/5} &= 1 : 0.99 : 1.00 : 1.03 : 1.27. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Из (1) видно, что с высокой степенью точности ($\leq 3\%$) отношения сечений близки к результатам, предсказанным теорией при вандерваальсовом взаимодействии. Исключение составляет лишь случай уширения молекулами N_2O , для которого различие около 14%. По-видимому, только при уширении молекулами N_2O , имеющими наибольший квадрупольный и дипольный моменты, взаимодействие отличается от дисперсионного.

Резонансное уширение. На рис. 2 приведен график зависимости ширины линии $\lambda = 589.6$ нм от концентрации поглощающих атомов (величины Nfl). Обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов показала, что значение естественной ширины линии $\gamma = (0.62 \pm 0.04) \cdot 10^8$ рад с^{-1} в пределах погрешности равно обще-

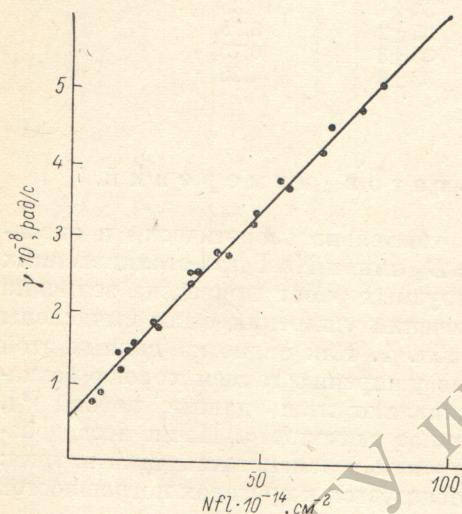


Рис. 2. Зависимость ширины линии от концентрации атомов натрия (величины Nfl). $l = (19 \pm 1)$ см.

принятому значению [13]. Величина эффективного сечения резонансного уширения $\sigma_{\text{Na}} = (164 \pm 4) \cdot 10^{-14}$ см². Это значение хорошо согласуется с теоретическим $\sigma = 154 \cdot 10^{-14}$ см², вычисленным по формуле [14]

$$\sigma = k \frac{\pi e^2}{m \omega_0} \sqrt{\frac{2J_0 + 1}{2J_1 + 1}} \frac{f}{\bar{v}}, \quad (2)$$

где π , e , m — известные постоянные; ω_0 , f — частота и сила осциллятора исследуемого перехода; J_0 , J_1 — полные моменты нижнего и верхнего состояний; $\bar{v}$ — относительная скорость атомов Na. Значение множителя k в (2) бралось равным двум, так как в этом случае наблюдается наилучшее согласие экспериментальных данных и вычислений [15]. Значение сечения резонансного уширения $\sigma = 229 \cdot 10^{-14}$ см² [16] существенно завышено, причиной этого, на наш взгляд, могут быть как систематические ошибки в определении концентрации атомов натрия по данным упругости паров, так и искажения дисперсионного контура линии доплеровским уширением.

В данной работе измерены эффективные сечения уширения D_1 линии натрия при столкновениях с атомами собственного и примесных газов (He, Ar, H_2 , N_2 , CO, NO, N_2O). Полученные значения σ_{He} и σ_{Ar} хорошо согласуются с имеющимися литературными данными.

Показано, что обе компоненты резонансного дублета Na I по-разному уширяются примесными молекулярными газами. Отношение сечений уширения давлением тяжелых газов в среднем равно 1.2.

Отношение эффективных сечений уширения в ряду $\text{Ar}-\text{N}_2-\text{NO}-\text{CO}$, вычисленных в предположении чистого дисперсионного потенциала взаимодействия, с большой степенью точности совпадают с отношениями

экспериментальных значений σ . Это говорит о том, что потенциал взаимодействия, обусловленный дипольными и квадрупольными моментами молекул, не вносит заметного вклада в уширение спектральных линий.

Время жизни $3^2P_{1/2}$ -уровня атома натрия, измеренное в данной работе, хорошо согласуется с общепринятым значением $\tau=16$ нс.

Исследование резонансного уширения линии $\lambda=589.6$ нм указывает на хорошее согласие результатов измерений и теории.

Авторы глубоко благодарны Н. П. Пенкину за постоянное внимание к работе и полезные обсуждения.

Литература

- [1] D. G. McCartan, J. M. Farr. J. Phys. B, 9, 985, 1976.
- [2] J. P. Deleage, D. Kunth, G. Testor, F. Rostas, E. Roueff. J. Phys. B., 6, 1892, 1973.
- [3] N. Lwin, D. G. McCartan, E. L. Lewis. J. Phys. B, 9, L 161, 1976.
- [4] A. D. Wilson, J. Shimoni. J. Phys. B, 8, 2415, 1975.
- [5] J. F. Kielkopf. J. Phys. B, 9, 547, 1976.
- [6] M. Weingeroff. Zeits. f. Phys., 67, 679, 1931.
- [7] К. Г. Попов, В. П. Рузов. Вестн. ЛГУ, № 4, 31, 1979.
- [8] К. Г. Попов, В. П. Рузов, Ю. А. Салганик, В. Н. Сивков. Опт. и спектр., 46, 40, 1979.
- [9] G. H. Copley. Can. J. Phys., 54, 619, 1976.
- [10] W. Schütz. Z. f. Phys., 45, 30, 1927.
- [11] Б. М. Смирнов. Асимптотические методы в теории атомных столкновений. Атомиздат, М., 1973.
- [12] Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертис, Р. Берд. Молекулярная теория газов и жидкостей. ИЛ, М., 1961.
- [13] М. П. Чайка. Интерференция вырожденных атомных состояний. ЛГУ, Л. 1975.
- [14] И. И. Собельман. Введение в теорию атомных спектров. ФМЛ, М., 1963.
- [15] Н. П. Пенкин, Л. Н. Шабанова. Опт. и спектр., 34, 639, 1973.
- [16] М. С. Армане, М. А. Лиепкаула. В сб.: Сенсibilizированная флуоресценция смесей паров металлов, 6, Рига, 1977.

Поступило в Редакцию 6 апреля 1979 г.