

МНОГОФОТОННАЯ ИОНИЗАЦИЯ КРИПТОНА И АРГОНА
ИЗЛУЧЕНИЕМ РУБИНОВОГО ЛАЗЕРА

Г.С.Воронов, Г.А.Делоне, Н.Б.Делоне

Наблюдалась многофотонная ионизация атомов криптона и аргона излучением рубинового лазера при напряженности электрического поля $\sim 10^7$ в/см. Соотношение потенциалов ионизации ($I(\text{Kr}) = 13,97$ эв; $I(\text{Ar}) = 15,75$ эв) и энергии кванта ($\hbar\omega = 1,785$ эв) показывает, что ионизация может происходить при поглощении соответственно 8 и 9 квантов. При одной и той же интенсивности потока фотонов измерены отношения ионных сигналов криптона, аргона и ксенона, для которого были проведены измерения абсолютной величины вероятности ионизации [1].

Постановка опыта была аналогична осуществленной нами ранее при наблюдении многофотонной ионизации атома ксенона [1,2] и молекулы водорода [3]. Режим работы лазера был тщательно стабилизирован. Вакуумная камера попеременно наполнялась ксеноном, криптоном и аргонном до давления в интервале $10^{-5} - 10^{-4}$ мм рт.ст. Давление измерялось ионизационным манометром с учетом поправок на его чувствительность к разным газам [4]. Образующиеся ионы анализировались прелетным масс-спектрометром с разрешением лучше 20 и регистрировались электронным множителем.

Отношения ионных сигналов при одинаковой плотности газов и при интенсивности потока фотонов $F^1 = 10^{30,6 \pm 0,3} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ (напряженность поля $E = 2 \cdot 10^7 \text{ в/см}$) приведены в таблице. Ошибка в основном связана с неопределенностью коэффициента вторичной эмиссии первого диода электронного умножителя для ионов различной массы.

Результаты эксперимента и теории (точность теоретических значений соответствует ошибке экспериментального определения F^1)

	Отношения ионных сигналов	Отношение вероятностей ионизации			
		эксперимент	расчет по Ф-ле Келдыша [8]	результаты Голда и Бейба	
				[6]	[7]
Kz/Xe	$10^{-0,83 \pm 0,1}$	$10^{-0,87 \pm 0,3}$	$10^{-2,8 \pm 0,3}$	$10^{-3,85 \pm 0,3}$	$10^{+3,15 \pm 0,3}$
Az/Xe	$10^{-2,37 \pm 0,3}$	$10^{-2,06 \pm 0,5}$	$10^{-5,7 \pm 0,6}$	$10^{-2,6 \pm 0,6}$	$10^{+2,2 \pm 0,6}$

Из экспериментальных данных об отношении ионных сигналов можно получить отношение вероятностей многофотонной ионизации.

Вероятность ионизации связана с числом образующихся ионов N_i соотношением:

$$W = N_i / n V_k \tau_k,$$

где n - плотность нейтральных атомов, V_k и τ_k - эффективные объем и время [1]. Эти величины зависят от степени зависимости вероятности ионизации от интенсивности потока фотонов ($W = AF^k$). Как показали измерения для ксенона [1], экспериментальное значение k примерно на 1 меньше, чем число квантов, необходимых для ионизации $\langle \frac{I}{\hbar\omega} + 1 \rangle$, где $\langle x \rangle$ означает целую часть x . Этот эффект можно объяснить воздействием сильного электрического поля излучения на верхние уровни энергии атома [8].

Так как верхние уровни всех атомов водородоподобны, можно ожидать, что воздействие сильного поля на эти уровни приводит к аналогичному эффекту также и в случае других атомов. Поэтому мы предполагаем, что в случае Az и Kz вероятность ионизации пропорциональна интенсивности потока фотонов в степени k , лежащей в пределах

$$\langle \frac{I}{\hbar\omega} + 1 \rangle \geq k \geq \langle \frac{I}{\hbar\omega} + 1 \rangle - 1.$$

При этом предположении о величине k , воспользовавшись данными, полученными ранее [1,3], получаем соотношения:

$$\frac{V_k \varepsilon_k (Kz)}{V_k \varepsilon_k (Xe)} = 0,7 \pm 0,2; \quad \frac{V_k \varepsilon_k (Az)}{V_k \varepsilon_k (Xe)} = 0,3 \pm 0,1.$$

В таблице приведены отношения вероятностей, полученные из экспериментальных данных об ионных сигналах и их отношениях. Видно, что учет изменения величины $V_k \varepsilon_k$ дает незначительную поправку, так что возможное отличие величины k от предполагаемой слабо влияет на результат.

Результаты эксперимента сравнивались с предсказаниями теории Л.Келдыша [5] для переходов по виртуальным уровням непрерывного спектра и с результатами расчета Голда и Бейба [6,7] по теории возмущений, проведенного на электронной вычислительной машине до четырнадцатого порядка.

При расчете по формуле Келдыша мы использовали экспериментально измеренную величину k для атома Xe , а для атомов Kz, Az величину k выбирали в соответствии с вышеприведенными предположениями. Расчет при этом дает соотношение $W(Kz)/W(Xe) \sim F^{-2}$, а $W(Az)/W(Xe) \sim F^{-2}$.

Расчет по формуле Келдыша (см. [8], ф.(1)) и результаты, полученные Голдом и Бейбом в их первой работе [6], дают качественно правильное соотношение вероятностей ионизации. Количественное расхождение результатов расчета по формуле Келдыша с экспериментом, по-видимому, связано с тем, что в использованной нами формуле не учтены квазирезонансные переходы через промежуточные уровни. В своей второй работе [7] Голд и Бейб уточнили волновые функции за счет учета кулоновского взаимодействия в конечном состоянии, а также уточнили энергетические разности. Однако расчет [7] дает результат, качественно не согласующийся с экспериментом: при $F \approx 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ вероятность многофотонной ионизации Kz и Az получается большей, чем для Xe . По-видимому, это расхождение связано с тем,

что смещение и уширение уровней в сильном поле играет значительную роль, так что теория возмущений неприменима.

В заключение следует отметить, что ввиду хорошей точности, с которой можно измерить отношение вероятностей многофотонной ионизации различных атомов (по сравнению с точностью измерения абсолютной величины вероятности), такие результаты представляют большую ценность для проверки теоретических предположений.

Авторы благодарны А.А.Грачеву, С.А.Объедкову и В.П.Соловьеву за помощь в проведении данной работы, Л.В.Келдышу и М.С.Рабиновичу за ценные обсуждения и Б.Бebbe и А.Голду за возможность ознакомления с их неопубликованными расчетами.

Физический институт

им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
15 апреля 1966 г.

Литература

- [1] Г.С.Воронов, Н.Б.Делоне. ЖЭТФ, 50, 78, 1966.
- [2] Г.С.Воронов, Н.Б.Делоне. Письма ЖЭТФ, I, вып. 2, 42, 1965.
- [3] Г.С.Воронов, Г.А.Делоне, Н.Б.Делоне, О.В.Кудреватова, Письма ЖЭТФ, 2, 377, 1965.
- [4] R.Barre, R.Geller, G.Mongonin, Le Vide, 69, 195, 1957.
- [5] Л.В.Келдыш, ЖЭТФ, 47, 1945, 1964.
- [6] A.Gold, V.Bebb. Phys. Rev. Lett., 14, 60, 1965.
- [7] V.Bebb, A.Gold. Phys. Rev. (в печати).
- [8] Г.С.Воронов, В.М.Горбунков, Г.А.Делоне, Н.Б.Делоне, Л.В.Келдыш, М.С.Рабинович. Докл. на 7-й Междунар. конф. по явлениям в ионизированных газах, Белград, 1965; препринт ФИАН, А-ИИ5, 1965.