

ДИФФУЗИЯ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМОВ ГЕЛИЯ
В КРИОГЕННОЙ ПЛАЗМЕ

И.Я.Фуголь, П.Л.Пахомов

В работе исследована скорость диффузионного разрушения метастабильных атомов гелия в распадающейся гелиевой плазме при температуре ниже 6°K . Плазму, атомы которой имеют столь низкую температуру, будем называть в дальнейшем криогенной плазмой. Гелиевая плазма возбуждалась в кварцевой цилиндрической кювете, которая

была погружена непосредственно в жидкий гелий при температуре 4,2 и 1,8°К (гелий под откачкой). Возбуждение осуществлялось безэлектродным способом с помощью импульсов высокочастотного разряда длительностью 0,08 мсек, следовавших через 40 мсек. Концентрация метастабильных атомов гелия в состоянии $2^3S_1^0$ определялась по величине резонансного поглощения линии 3889А от внешнего источника. Описание деталей эксперимента при 77 и 20°К можно найти в предыдущих работах авторов [1,2].

Кинетика изменения концентрации метастабильных атомов гелия измерялась спустя 150 мксек после прекращения ВЧ-импульса. Это время в несколько раз превышает время термализации электронов и время установления теплового равновесия внутри плазмы. Для контроля температуры газа внутри разрядного сосуда измерялось давление газа в режиме возбуждения и давление невозбужденного газа. Эти измерения показали, что средняя температура атомов плазмы за счет высокочастотного нагрева кюветы увеличивалась не более чем на 1,5°К по сравнению с температурой криогенной жидкости. Аналогичные наблюдения сообщаются и в работе по криогенной плазме Голдена и Голдстейна [3].

Характерные кривые изменения концентрации метастабильных атомов $2^3S He$ в криогенной плазме показаны на рис. 1. В соответствии с полученными ранее результатами при 300, 77 и 20°К [1,2,4], разрушение метастабильных состояний M при малых плотностях газа ($n \approx 1 \div 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) происходит по экспоненциальному закону

$$M(t) = M_0 \exp(-\nu(p)t). \quad (1)$$

Величина показателя экспоненты $\nu(p)$ обратно пропорциональна давлению p . Зависимость показателя экспоненты от давления иллюстрируется на рис. 2 для температуры жидкого гелия 4,2 и 1,8°К (этим измерениям соответствовали температуры атомов примерно 5,5 и 2,5°К с точностью до 1,5°К). Разброс точек на рис. 2 не выходит за пределы погрешности эксперимента, которая составляет 20%. (Везде на рисунках давления даны в приведенных величинах $p = p_0 \frac{300}{T}$).

Полученные результаты для криогенной плазмы, также как и для плазмы при более высоких температурах, можно объяснить с помощью диффузионного механизма разрушения метастабильных атомов. Действительно, диффузия приводит к экспоненциальному закону изменения концентрации со временем (1). При этом $\nu(p)$ имеет смысл диффузионной частоты столкновений

$$\nu(p) = \frac{D}{\lambda^2}, \quad (2)$$

где D - коэффициент диффузии, который обратно пропорционален давлению, а λ - диффузионная длина сосуда.

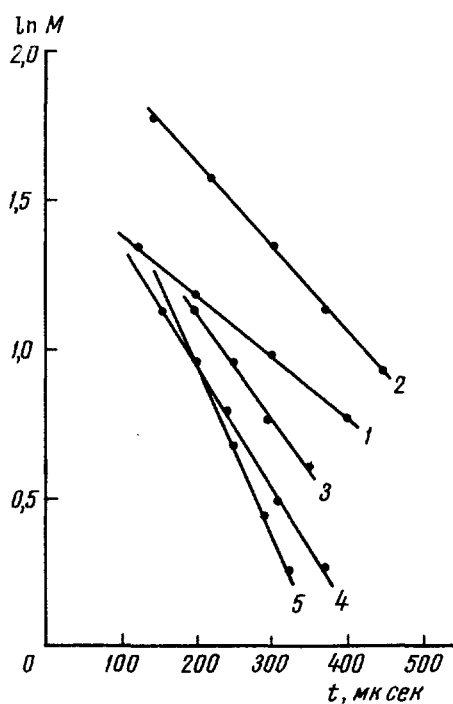


Рис. 1. Изменение концентрации метастабильных атомов гелия в распадающейся криогенной плазме при 5,5°К $p = 1,1$ (кривая 1), 0,85 (2); 0,6 (3); 0,55 (4); 0,4 мм рт.ст. (5). (Давление $p = p_0 \frac{300}{T}$)

Используя соотношения (1) и (2), из графиков рис. 1 определили коэффициенты диффузии. Значения их показаны на рис. 3. Здесь же представлен температурный ход коэффициента диффузии от 2,5 до 77°К. Сплошная кривая проведена для области, где эксперимент хорошо согласуется с теоретическими расчетами. Точки при 20, 64 и 77°К взяты из наших предыдущих работ [1, 5]. Анализ температурной зависимости коэффициента диффузии метастабильных атомов гелия показывает, что в криогенной плазме имеет место его резкое возрастание.

Необычное поведение коэффициента диффузии при низких температурах может быть связано с изменением диффузионного сечения рассеяния для медленных столкновений. Согласно кинетической теории [6], коэффициент диффузии определяется выражением

$$D = \frac{3\pi}{32} \frac{\bar{v}}{n \bar{Q}_d}, \quad (3)$$

где $\bar{v} = \left(\frac{16kT}{\pi m}\right)^{1/2}$ - средняя относительная скорость двух молекул газа, n - плотность газа, \bar{Q}_d - эффективное сечение диффузии [1].

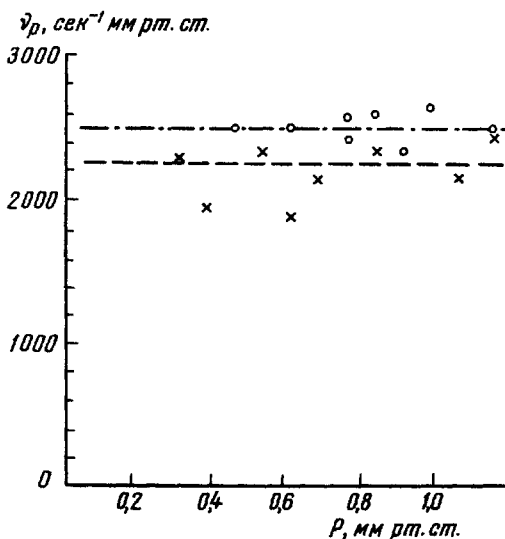


Рис. 2. Зависимость величины $\nu(p) \cdot \rho$ от давления P . \circ --- $T = 5,5^\circ\text{K}$; \times --- $T = 2,5^\circ\text{K}$

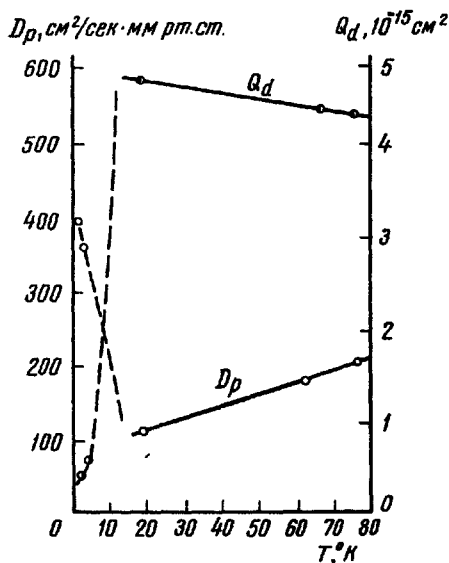


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента диффузии D и диффузионного сечения \bar{Q}_d

Вычисленные из соотношения (3) величины диффузионного сечения рассеяния \bar{Q}_d приведены на рис. 3. На этом рисунке кривая $\bar{Q}_d(T)$ продолжена в область более высоких температур, где эксперимент и теория хорошо согласуются между собой [5]. При температурах ниже 20°K виден аномальный температурный ход сечения рассеяния.

Расчет рассеяния метастабильных атомов гелия в квазиклассическом приближении был проведен Бакингом и Далгарно [7] вплоть до температуры 30°K , чему соответствует величина волнового числа атомов $q = 2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1}$ и длина волны де-Бройля $\lambda = 3,1 \cdot 10^{-8} \text{ см}$.

При более низких температурах, когда длина волны становится больше эффективного диаметра атома, квазиклассическое приближение неприменимо. Теоретические расчеты сечения рассеяния для этих условий отсутствуют.

Особенностью процесса рассеяния метастабильного атома гелия нормальным является наличие "горба" ($V \approx 0,1$ эв) на потенциальной кривой их взаимодействия при межъядерном расстоянии $d = 4a_0$ [8],

a_0 — боровский радиус. Для метастабильных атомов в криогенной гелиевой плазме выполняется неравенство $q \ll q_0 = (2\mu V \hbar^{-2})^{1/2}$. При таких параметрах рассеяния на кривой зависимости сечения от q (или от температуры) не следует ожидать появления минимума при $q \rightarrow 0$. Эффективное сечение при этом должно монотонно возрастать. Таким образом, следуя обычной схеме решения задачи рассеяния, не удастся объяснить наблюдаемое уменьшение диффузионного сечения при малых энергиях. Заметим, что в недавних теоретических и экспериментальных работах по рассеянию медленных электронов с учетом отталкивательного псевдопотенциала атома гелия также обсуждается уменьшение сечений рассеяния при энергиях от 0,05 эв до нуля (соответствующая электронная температура ниже 500°K) [3,9]. Можно предположить наличие аналогии между этими результатами и нашими данными о величине сечения диффузии метастабильных атомов в криогенной гелиевой плазме.

Физико-технический институт
низких температур
Академии наук Украинской ССР

Поступило в редакцию
7 марта 1966 г.

Литература

- [1] П.Л.Пахомов, Г.П. Резников, И.Я. Фуголь. Оптика и спектроскопия, 20, 10, 1966.
- [2] П.Л.Пахомов, И.Я.Фуголь. ВИНТИ, Харьков, 1966.
- [3] P.D.Goldan, L.Goldstein. Phys.Rev., 138A, 39, 1965.

- [4] A.V.Phelps, J.P.Molnar. *Phys.Rev.*, 89, 1204, 1953.
- [5] П.Л.Пахомов, И.Я.Фуголь. *ЖТФ*, 36, № 4, 1966.
- [6] Г.Месси, Е.Бархоп. *Электронные и ионные столкновения*, Изд. иностр. лит., 1958.
- [7] R.W.Buckingham, A.Dalgarno. *Proc.Roy. Soc.*, 213, 506, 1952.
- [8] J.Matthis. *Astrophys. J.*, 125, 318, 1957.
- [9] L.P.Kestner, J.Jortner, M.Cohen, S.A.Mice. *Phys.Rev.*, 140A, 56, 1965.

1) Плотность метастабильных состояний в возбужденной плазме на четыре порядка меньше плотности нормальных атомов гелия.