

ДЕФЛЕКЦИЯ СВЕТА НА ОСНОВЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ЭФФЕКТА ВБЛИЗИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ

А. Д. Алехин, И. И. Кондиленко, П. А. Коротков, А. В. Чалый
и Ю. И. Шиманский

Проведено экспериментальное исследование высотной и температурной зависимостей углов отклонения световых лучей в растворе н.-пентан—бензол вблизи критического состояния парообразования. Полученные экспериментальные результаты согласуются с проведенными теоретическими расчетами дефлексии световых лучей в системах, испытывающих существенное влияние гравитационного поля вблизи критической точки.

Оптическая неоднородность системы, приводящая к дефлексии светового пучка, может быть вызвана рядом причин, возможности которых подробно проанализированы в [1]. Менее детально в этом плане изучена ситуация, которая реализуется в веществе, находящемся вблизи критических точек и точек фазовых переходов II рода. Несмотря на разнообразную природу критических явлений, ряд обстоятельств (прежде всего рост радиуса корреляции характерного параметра порядка, который может быть введен для описания данного фазового перехода) позволяет описывать их единым образом на основе теории масштабных преобразований [2]. В связи с этим анализ, который будет проведен ниже для критической точки жидкость—пар, является пригодным и для других изоморфных критических состояний.

Одна из наиболее характерных особенностей поведения вещества в околокритическом состоянии состоит в аномальном росте восприимчивости (для критической точки жидкость—пар—изотермической сжимаемости) системы к внешним воздействиям, который в определенных условиях приводит к существенной пространственной неоднородности показателя преломления вещества. Это обстоятельство может быть использовано для непрерывной дефлексии лучей на сравнительно большие углы вблизи критической точки среды, находящейся в гравитационном поле. В данном сообщении будут рассмотрены теоретические основы и результаты экспериментального исследования дефлексии света вблизи критической точки.

Связь между углом отклонения α светового луча в вертикальной плоскости и высотным градиентом показателя преломления dn/dz дается известным выражением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial z} w, \quad (1)$$

которое справедливо при малых значениях dn/dz [3]. В формуле (1) w — поперечные размеры среды в горизонтальном направлении. Высотная и температурная зависимости градиента показателя преломления могут быть получены на основе теории масштабных преобразований [2] в виде

$$\frac{\partial n}{\partial h} = \tau^{-1} \varphi(x). \quad (2)$$

Здесь $\tau = (T - T_k)/T_k$, $x = h/\tau^{\beta\delta}$, $h = \rho_k g z / P_k$,

T_k, ρ_k, P_k — критические температура, плотность и давление; g — ускорение свободного падения; z — высота, отсчитанная от уровня с критической плотностью при $\tau \rightarrow 0$; γ, β, δ — индексы теории подобия [2]. Масштабная функция $\varphi(x)$ имеет следующие асимптотики [4]: в окрестности критической изохоры ($x \ll 1$)

$$\varphi(x) = a_0 [1 + a_1 x^2 + \dots], \quad (3)$$

в окрестности критической изотермы ($x \gg 1$)

$$\varphi(x) = b_0 x^{\frac{1-\delta}{\delta}} [1 + b_1 x^{-1/\beta\delta} + \dots]. \quad (4)$$

Из (1)–(4) следует, что величина тангенса угла отклонения светового луча растет пропорционально $\tau^{-\gamma}$ с приближением температуры системы к критической при $\rho = \rho_k$, и пропорционально $|z|^{(1-\delta)/\delta}$, с приближением к уровню $z=0$ при $T=T_k$. Сравнение этих теоретических результатов

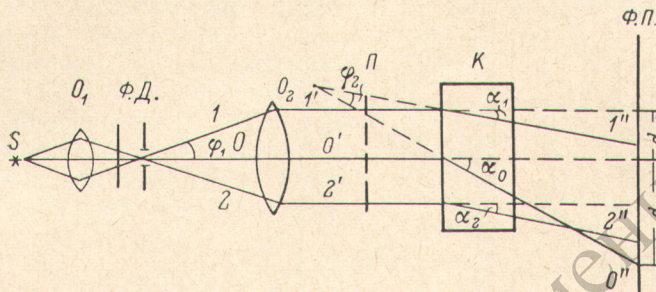


Рис. 1. Схема оптической установки.

с экспериментально наблюдаемыми значениями углов дефлексии вблизи критической точки представлено ниже.

Для трансформации малых изменений направления светового луча в значительные может быть использована плоскопараллельная среда, обладающая существенным распределением градиента показателя преломления. В качестве такой среды, как показал теоретический анализ, в частности, может быть использовано вещество, находящееся в изотермических условиях вблизи критической точки жидкость—пар. Большие отклонения светового пучка от исходного распространения при прохождении через подобную систему наблюдались в многочисленных экспериментах [5] при исследовании критических явлений жидкость—пар.

В настоящей работе для изучения преломляющих свойств среды, находящейся в околкритическом состоянии, была использована камера и термостат, описанные ранее в работе [6] и оптическая установка, схематически изображенная на рис. 1.

Свет от источника S (ртутная лампа ДР-120) при помощи конденсатора O_1 с фокусным расстоянием $F_1 = 90$ мм, пройдя через фильтр Φ ($\lambda = 5461 \text{ \AA}$), фокусировался на точечную диафрагму D ($\varnothing = 0.2$ мм). Диафрагма D помещалась в фокусе объектива O_2 ($F_2 = 400$ мм). После O_2 нормально к его главной оптической оси устанавливалась пластинка Π из латунной фольги с набором точечных отверстий ($\varnothing = 0.5$ мм) по высоте. На пути параллельных световых лучей $0, 1, 2$ и др., прошедших через Π на различных высотах, устанавливалась камера с веществом, находящимся вблизи критической точки жидкость—пар. Ось светового пучка $00'$ проходила через центр камеры. В силу гравитационного эффекта, описанного выше, на выходе из камеры лучи $0'', 1'', 2''$ будут отклонены от горизонтального направления на различные углы $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$, согласно (1), где соответствующие производные относятся к точкам входа лучей $0', 1', 2'$. При выполнении критериев (1) угол между направлениями лучей $0''$ и $1''$ будет равен

$$\varphi_2 = \alpha_0 - \alpha_1 = \arctg \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dz} w \right)_0 - \arctg \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dz} w \right)_1.$$

В данной оптической схеме смещение горизонтальных лучей $0'$, $1'$, $2'$ по вертикали осуществлялось за счет изменения угла падения лучей 0 , 1 , 2 на объектив O_2 . Таким образом, если направление падающего на систему светового луча 1 изменить на угол φ_1 , то после прохождения камеры с веществом лучи $1''$ и $0''$ будут расходиться под углом φ_2 , который зависит от термодинамических свойств вещества на различных высотах камеры. Если в качестве коэффициента трансформации угла выбрать величину $k = \text{tg}\varphi_2 / \text{tg}\varphi_1$, то при $\tau \rightarrow 0$ и $z \rightarrow 0$ эта величина может быть значительно больше единицы. Задача данного исследования заключается в том, чтобы определить те условия, при которых $k \gg 1$.

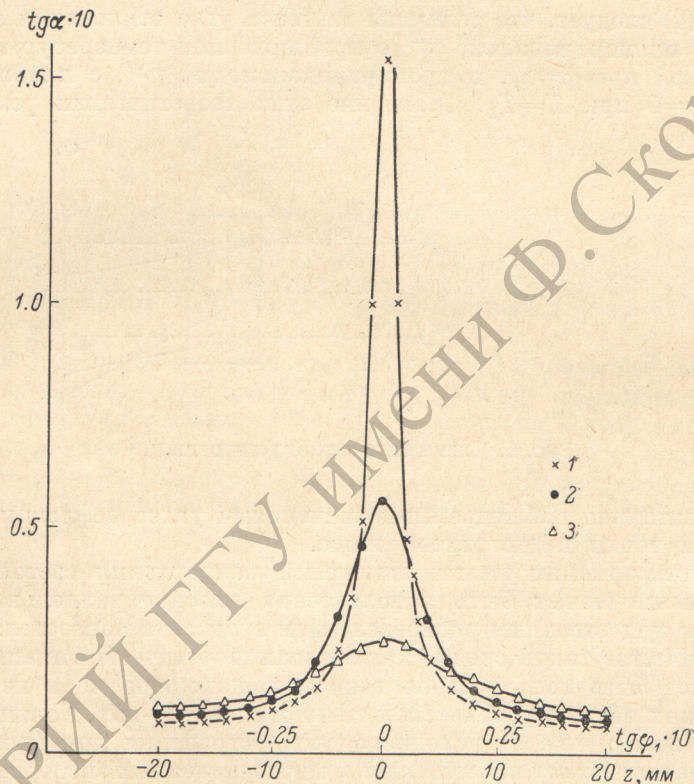


Рис. 2. Высота зависимость углов отклонения световых лучей при различных температурах $T - T_{кр}$.
1 — 0.34, 2 — 0.98, 3 — 1.82 К.

В качестве системы, отклоняющей световые лучи, был использован раствор 26.8% бензола в н.-пентане вблизи критического состояния парообразования. Заполнение камеры раствором осуществлялось таким образом, чтобы при критической температуре мениск, разделяющий жидкую и газообразную фазы, исчезал посередине камеры. На этой высоте ($z=0$) при $T \geq T_k$ плотность и показатель преломления раствора принимают критические значения.

Измерения углов отклонения световых лучей производились следующим образом. Первоначально камера с веществом нагревалась до температуры $T=247^\circ \text{C}$, которая на 30° превышала критическую. Так как при такой температуре вещество в камере было полностью однородным по высоте, то световые лучи не отклонялись от первоначального направления и, проходя через систему на любой высоте, фотографировались на фотопластинку $\Phi\Pi$ (рис. 1). Фотопластинка была расположена на расстоянии $L=200$ мм от камеры с веществом. После этого система охлаждалась до температур, близких к критической. Критическая температура раствора $T_k=216.93^\circ \text{C}$ определялась как температура, при которой интенсивность

светорассеяния в этом растворе на высоте $z=0$ была максимальной. Подробности метода определения T_k изложены в [6]. Вследствие значительного гравитационного эффекта световые лучи изменяли направление своего распространения при прохождении через неоднородную среду и вновь регистрировались на фотопластинке. Угол отклонения α луча от горизонтального направления на определенной высоте z рассчитывался по формуле $\operatorname{tg} \alpha = d/L$ (d — смещение преломленного пучка на фотопластинке относительно его положения при $T=247^\circ \text{C}$). Величина смещения d определялась на микрофотометре МФ-4 с точностью 0.1 мм. Перед измерениями углов отклонения световых лучей система тщательно термостатировалась с точностью 0.005° .

На рис. 2 представлены несколько изотерм углов отклонения световых лучей α как функция высоты z или $\operatorname{tg} \varphi_1 = z/F_2$. Угол преломления световых лучей, как видно из рис. 2, существенно зависит от высоты даже при температурах, относительно далеких от критической. Наибольший угол отклонения светового луча наблюдался на высоте $z=0$. При приближении к критической температуре при $\tau \leq 10^{-3}$ угол отклонения светового луча на этой высоте увеличивался (рис. 3) в соответствии с разложением (3) по закону

$$\operatorname{tg} \alpha = A\tau^{-\gamma},$$

где $\gamma = \beta(\delta - 1) = 1.26 \pm 0.05$, A — постоянная величина.

На высотах $|z| \geq 10$ мм при $T \rightarrow T_k$ углы отклонения световых лучей, согласно (4), уменьшаются. Этот результат подтверждает выводы экспериментального и теоретического исследования рассеивающей способности вещества вблизи критической точки, проведенного в [4] на основе теории масштабных преобразований [2]. Однако в области $\tau \leq 10^{-3}$ и $\alpha \geq 6^\circ$ наблюдается систематическое отклонение экспериментальных точек от зависимости $\operatorname{tg} \alpha \sim \tau^{-\gamma}$. Эти отклонения могут быть обусловлены ограниченной областью применимости формулы (1), которая справедлива лишь при малых углах отклонения световых лучей.

Из экспериментальных данных, представленных на рис. 2, видно, что наибольший коэффициент трансформации угла $k = \operatorname{tg} \varphi_2 / \operatorname{tg} \varphi_1$ достигается вблизи уровня $z=0$ при $T - T_{кр} = 0.34^\circ$. Так, например, если до падения на камеру с веществом лучи 0 и 1 расходились под углом $\varphi_1 = 30'$ (рис. 1), то после прохождения через вещество, находящееся вблизи критической точки, они разошлись под углом $\varphi_2 = 8^\circ 30'$. Таким образом, в этом случае коэффициент трансформации угла $k = 17$.

При уменьшении τ угол отклонения световых лучей от первоначального направления на высоте $z=0$ $\alpha(z=0)$ увеличивается, а на высотах $z \neq 0$ $\alpha(z \neq 0)$ уменьшается (рис. 3). Это приводит к тому, что при $\tau \rightarrow 0$ $\varphi_2 = \alpha(z=0) - \alpha(z \neq 0)$ будет продолжать увеличиваться и коэффициент трансформации угла еще более возрастет.

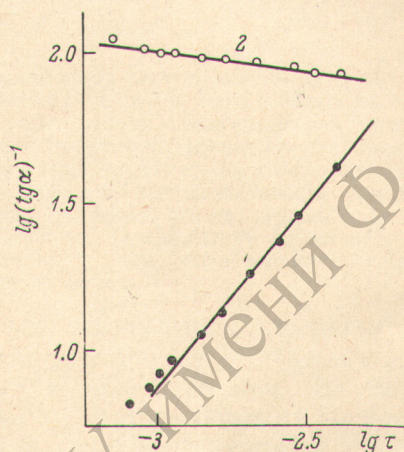


Рис. 3. Температурное поведение углов отклонения световых лучей на высотах $z=0$ (1) и $z=10$ мм (2).

Литература

- [1] Г. П. Китыс, И. В. Кравцов, Л. Е. Чирков, С. М. Коновалов. Модуляция и отклонение оптического излучения. «Наука», М., 1967; Е. Л. Мустель, В. И. Парыгин. Методы модуляции и сканирования света. «Наука», М., 1970.

- [2] А. З. Паташинский, Е. Л. Покровский. Флуктуационная теория фазовых переходов. «Наука», М., 1975.
- [3] Л. А. Васильев. Теневые методы. «Наука», М., 1968; Н. Л. Цыганов, А. В. Чалый, Ю. И. Шиманский. Опт. и спектр., 32, 1190, 1972.
- [4] А. Д. Алехин, Н. П. Крупский, А. В. Чалый. ЖЭТФ, 63, 1417, 1972.
- [5] Н. Lorentzen. Acta Chem. Scand., 37, 353, 1953; Н. Palmer. J. Chem. Phys., 22, 625, 1954; Е. Т. Шиманская. УФЖ, 3, 542, 1958; Л. М. Артюховская, Е. Т. Шиманская, Ю. И. Шиманский. ЖЭТФ, 64, 1679, 1973.
- [6] А. З. Голик, А. Д. Алехин, Н. П. Крупский, А. В. Чалый, Ю. И. Шиманский. УФЖ, 14, 475, 1969.

Поступило в Редакцию 13 октября 1975 г.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скоринны