

С. А. КАПЛАН

О КОНДЕНСАЦИИ МЕЖЗВЕЗДНОГО ГАЗА НА ЧАСТИЦАХ КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ

Гипотеза конденсации межзвездного газа на частицах космической пыли, выдвинутая Линдбладом (1), повидимому, теперь является общепризнанной. Одна из последних по этому вопросу работ принадлежит Ван де Хальсту (2) и посвящена обоснованию этой гипотезы при помощи данных, полученных в результате опытов по аккомодации газов. По этим экспериментам можно заключить, что коэффициент аккомодации или вероятность адсорбции на поверхности с посторонними примесями (какие, повидимому, и осуществляются в случае кристалликов космической пыли) близки к единице. Между тем последним автором не учитывался тот факт, что во всех без исключения земных опытах, во-первых, разность между температурой газа и адсорбента мала, а, во-вторых, температура адсорбирующегося газа не превосходила $300 - 400^\circ$ абсолютной шкалы.

В межзвездном пространстве такие условия осуществляются лишь в плотных пылевых облаках, расположенных в областях неионизированного водорода (HI), т. е. на достаточном расстоянии от горячих звезд. Спитцер нашел, что температура газа в таких облаках порядка нескольких десятков и в крайнем случае — сотни градусов (3). Поэтому только на эти пылевые облака в областях HI можно экстраполировать земные данные и только к ним применимы соображения и доказательства Ван де Хальста.

Вне пылевых облаков температура межзвездного газа, по оценке Спитцера (3), достигает одной тысячи градусов, однако в силу малой плотности пылевой материи в этих областях адсорбция газа вряд ли имеет какое-либо значение.

И, наконец, в областях ионизированного водорода (HII) температура межзвездного газа достигает десяти и даже более тысяч градусов, в то время как температура пылинок попрежнему не превышает $30 - 40^\circ$. Ясно, что экстраполяция результатов земных экспериментов на эти условия, как это делает Ван де Хальст, совершенно незаконна.

Прежде всего заметим, что в силу большой разности температур процесс адсорбции в областях HII можно рассматривать только кинетически. Методы статистической теории адсорбции здесь совершенно неприменимы. Далее, так как теории кинетического процесса адсорбции фактически не существует, то самое большее, на что можно рассчитывать, — это качественные оценки.

В. П. Бонч-Бруевичем дан хороший обзор теоретических работ и современных представлений о кинетике процесса адсорбции, к которому мы и отсылаем за всеми подробностями физической стороны проблемы (4).

Как известно, процесс адсорбции заключается в следующем механизме: атом газа, налетающий на поверхность кристалла, отдает свою энергию кристаллической решетке и попадает в связанное состояние. Атом может передавать энергию кристаллической решетке благодаря возбуждению тепловых колебаний (фононов). Однако надо всегда иметь в виду, что спектр энергии фононов ограничен сверху, а вероятность возбуждения одновременно нескольких фононов очень мала. Поэтому кристаллическая решетка не может поглотить в одном акте энергию, большую чем $k\Theta$, где Θ — дебаевская температура, а k — постоянная Больцмана. Для большинства кристаллов Θ порядка 300° .

Таким образом, чтобы адсорбция атома с энергией порядка kT , где T — температура межзвездного газа, могла бы иметь место с достаточной вероятностью, необходимо чтобы $T \leq \Theta$, что справедливо лишь для областей неионизированного водорода. В областях ионизированного водорода, где $T \gg \Theta$, вероятность передачи энергии кристаллической решетке космической пылинки очень мала, следовательно, и адсорбция будет сильно уменьшена по сравнению с областями HI. Оценить адсорбцию в этом случае можно, если принять, что все атомы с энергией, меньшей чем $k\Theta$, адсорбируются при столкновении с пылинками, а все атомы с энергией, большей чем $k\Theta$, — не адсорбируются.

Число столкновений атомов массы m , энергия которых находится в интервале от u до $u + du$, с единицей площади на поверхности кристалликов за единицу времени определяется известной формулой:

$$dz(u) = \frac{nudu}{(2\pi m)^{1/2} (kT)^{3/2}} e^{-\frac{u}{kT}}, \quad [1]$$

где n — число атомов в единице объема межзвездного пространства. Отсюда число столкновений с энергией, меньшей чем $k\Theta$:

$$z(k\Theta) = \int_0^{k\Theta} dz(u) = n \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \left(1 + \frac{\Theta}{T} \right) e^{-\frac{\Theta}{T}} \right\} \quad [2]$$

или, приближенно, учитывая, что $\Theta \ll T$:

$$z(k\Theta) \approx \frac{n}{2} \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2} \frac{\Theta^2}{T^2} \quad [3]$$

Так как полное число столкновений $z = n \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2}$, то вероятность адсорбции:

$$\bar{w} = \frac{z(k\Theta)}{z} \approx \frac{1}{2} \frac{\Theta^2}{T^2} \approx 5 \cdot 10^{-4}, \quad [4]$$

если принять $\Theta = 300^\circ$ и $T = 10000^\circ$. Заменяя в [3] m на Am_n , где A — атомный вес, а m_n — масса атома водорода, получим для числа

атомов, адсорбирующихся за 1 сек. на 1 см^2 поверхности кристалликов:

$$\frac{n}{2A^{1/2}} \left(\frac{kT}{2\pi m} \right)^{1/2} \frac{\Theta^2}{T^2}$$

или численно:

$$165 \frac{n}{A^{1/2}} \quad [5]$$

Поскольку время существования III области не превосходит 10^{16} сек., то полное число атомов, адсорбированных на 1 см^2 поверхности пылинок, должно быть меньше, чем:

$$1,65 \cdot 10^{18} \sum \frac{n}{A^{1/2}},$$

где сумма распространена по всем элементам, способным адсорбироваться. Поскольку водород и гелий не могут адсорбироваться в значительном количестве, то $\sum \frac{n}{A^{1/2}} \leq 1$. Между тем, для того, чтобы рост частиц вследствие адсорбции был бы заметен, необходимо, чтобы число атомов, адсорбированных на 1 см^2 поверхности пылинок, было бы порядка $10^{22} - 10^{23}$.

Таким образом, мы можем заключить, что прямой процесс адсорбции, т. е. основной механизм передачи кинетической энергии тепловым колебанием решетки в областях ионизированного водорода имеет очень малую вероятность.

Помимо прямого акта передачи кинетической энергии адсорбирующегося атома решетке, было предложено несколько механизмов, растягивающих этот процесс во времени и тем самым позволяющих возбуждение нескольких фононов 4. Однако эти процессы не в состоянии заметно увеличить вероятность [4], так как для адсорбции атома с $T = 10^4$ градусов требуется возбуждения по крайней мере 30 фононов.

Большую вероятность в нашем случае имеет механизм адсорбции, заключающийся в перебрасывании поверхностных атомов решетки на возбужденные уровни. Возможно также поглощение энергии за счет выбивания атомов из положения равновесия в решетке и перебрасывания их в другой узел или в междуузлие. К сожалению, эти механизмы в теории кинетики адсорбции еще не рассматривались. Необходим детальный анализ. Однако мало вероятно, чтобы эти механизмы увеличили вероятность адсорбции [4] в $10^4 - 10^5$ раз. Заметим, что оба эти механизма приводят не только к адсорбции, но и к разрушению кристалликов.

Отсюда следует, что рост пылевых частиц в облаках, расположенных в областях ионизированного водорода, практически не происходит.

Наличие пылевых облаков вблизи звезд типа VI — A0, находящихся при этом в зоне III, можно, повидимому, объяснить случайной встречей звезды с облаком.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Lindblad B. — Nat 135 133, 1935.
2. Van de Hulst H. — Rech d'Obs d'Utrecht XI part 2, 1949.
3. Spitzer L., Savedoff—Ap J 111 593, 1950.
4. Бонч-Бруевич В. Л. — УФН 60 369, 1950.