

В. И. КРАСОВСКИЙ

**О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПЫЛЕВОГО И ГАЗОВОГО  
МЕЖЗВЕЗДНОГО ВЕЩЕСТВА**

(Представлено академиком Г. А. Шайном 27 VII 1953)

Вопрос об относительной концентрации пыли в межзвездной среде все еще остается неясным. Известные спектры звезд и газовых туманностей в большинстве случаев указывают на незначительную относительную концентрацию элементов с  $Z > 4$  ( $< 1/1000$ ), т. е. тех элементов, из которых может образовываться пыль. О другом свидетельствует большая относительная концентрация элементов с  $Z > 4$  в космических лучах. Это обстоятельство усугубляется еще и тем, что легкие элементы (водород, гелий и литий) могут появляться в них за счет дробления более тяжелых ядер. Правда, происхождение космических лучей в настоящее время еще окончательно не установлено. Возможно, их относительный состав и не должен отображать такой же состав межзвездной среды и тем самым делать такое предположение обязательным. Чтобы пролить некоторый дополнительный свет на относительную концентрацию пылевой материи, небезынтересно оценить ее влияние на ионизацию и диссоциацию межзвездного газа, на что уже указывалось в (1).

Обычно считают, что в сильно ионизованных межзвездных облаках H I образуется при столкновении H II с электронами. Количество атомов H I, появляющихся в некотором объеме  $Q$ , равно  $Qn_0s_0n_-$ , где  $Q$  в  $\text{см}^3$ ,  $n_0$  — число протонов в  $1 \text{ см}^3$ ,  $s_0$  — эффективное сечение нейтрализации H II на электронах в  $\text{см}^2$  и  $n_-$  — поток электронов на  $\text{см}^2$  в сек.

Однако возможна нейтрализация H II и на поверхности космических пылинки. Для упрощения положим вначале, что пылинки нейтральны и что каждый положительный ион при столкновении с пылинкой нейтрализуется. Будем считать, что в вышеуказанном объеме  $Q$  в среднем находится одна пылинка с радиусом  $r$  (в см) и плотностью  $\rho$  (в  $\text{г}/\text{см}^3$ ). В этом случае объем  $Q$  может быть определен как отношение массы пылинки к средней плотности межзвездной пылевой материи  $\rho_0$  (в  $\text{г}/\text{см}^3$ ). Тогда количество нейтрализующихся на космических пылинках атомов H II в объеме  $Q$  будет равно  $Sn_+$ , где  $S$  — поверхность пылинки в  $\text{см}^2$ , а  $n_+$  — поток положительных ионов H II на  $\text{см}^2$  в сек. Учитывая, что при термодинамическом равновесии  $n_+/n_- = (m/M)^{1/2}$ , где  $m$  — масса электрона, а  $M$  — масса протона, получим, что в одном и том же объеме отношение числа атомов H II, нейтрализующихся на пылинках, к числу атомов H II, нейтрализующихся при столкновении с электронами, равно приблизительно  $3\rho_0(m/M)^{1/2}/n_0\rho r s_0$ . Это отношение зависит только от относительной концентрации космической пыли и не зависит от общей плотности внезвездного вещества, если  $\rho r s_0$  постоянно.

В качестве некоторого примера рассмотрим случай, когда  $\rho_0 = 5 \cdot 10^{-25}$  г/см<sup>3</sup>,  $n_0 = 1$  протону в см<sup>3</sup>,  $\rho \sim 2 \div 3$  г/см<sup>3</sup> и  $r = 10^{-5}$  см ( $s_0$  принимаем равным, как это обычно делается,  $10^{-21}$  см<sup>2</sup>). В этом случае Н I будет образовываться в одинаковых количествах как за счет нейтрализации Н II на пылинках, так и при столкновении с электронами. Однако предупреждаем, что этот пример может оспариваться из-за слишком большой относительной концентрации в межзвездном веществе космических пылинок с  $r = 10^{-5}$  см. Предположение, что, кроме пылинок с  $r = 10^{-5}$  см, существуют еще более многочисленные пылинки с  $r < 10^{-5}$  см, но с общей массой меньшей, чем у больших пылинок, приводит к предположению о преобладании нейтрализации на пылинках. Так, вполне приемлемая картина получается при допущении начальных конденсатов из десятков, сотен, тысяч и более атомов или молекул.

Сделанное вначале предположение о нейтральности пылинок не может привести к существенной переоценке или недооценке нейтрализации ионов на пылинках. Если поток расфокусирующихся положительных ионов на положительно заряженную пылинку и будет несколько меньше, чем в случае нейтральной частицы, то в случае отрицательно заряженной пылинки он, фокусируясь, будет несколько больше. Что же касается собственно нейтрализации иона на поверхности пылинки, то она, конечно, в основном совершается всегда и не зависит от температуры поверхности.

Становится ясным, что оценка концентрации Н I в сильно запыленной среде только по столкновению Н II с электронами может приводить к занижению плотности Н I. При определении размеров ионизованной зоны неучет нового обстоятельства может повести к увеличению ее размеров\*.

В сильно нагретом ионизованном межзвездном газе первые конденсаты, повидимому, могут состоять из трудно испаряющихся элементов вроде железа. В этих же условиях поверхность пылинок из окислов (например, железа и кремния) будет покрыта корою основного элемента, так как нагретый атомарный водород, несомненно, будет активно восстанавливать любые окислы. Сходное возможно и в отношении других химических соединений. Адсорбция атомарного водорода на металлических поверхностях имеет химическую природу. Адсорбированные атомы водорода становятся как бы наружными элементами единого металлического тела. Первая моноатомная пленка, обволакивающая металлическую поверхность, имеет с нею прочную связь и практически не в состоянии испариться при температуре пылинки в несколько градусов К. Чтобы атом водорода, ударяющийся о поверхность пылинки, рекомбинировал с адсорбированным атомом в молекулу, необходима энергия активации в несколько десятых электронвольта. В межзвездной газовой среде с температурой в несколько тысяч градусов практически каждое соударение атома с пылинкой будет сопровождаться образованием испаряющейся молекулы или адсорбцией атома в дырках моноатомной пленки.

Однако в межзвездном газе с низкой температурой (например, около 100° К) аналогичная рекомбинация не может быть существенной, так как в молекулы будет превращаться лишь ничтожнейшее количество атомов, обладающих энергией  $E$ , равной и превосходящей энергию активации. В этом случае отношение  $E/kT$  будет иметь величину, большую 10. Можно было бы ожидать, однако, более слабую ван-дер-ваальсовскую адсорбцию с энергией связи  $E_0$  в несколько тысячных электронвольта. Рекомбинация

\* Весьма заманчиво объяснить темные пылевые туманности как зоны сильной запыленности с нейтрализованным Н II. Возможно также, что светящиеся газовые волокна являются результатом повышенной нейтрализации Н II в локальных пылевых волокнах, имеющих ничтожную оптическую толщину. Время, необходимое для половинной нейтрализации запыленной газовой среды, имеет величину порядка  $\rho r / \rho_0 v$ , где  $v$  — средняя скорость ионов. Повидимому, можно предполагать, что в реальном космическом пространстве нейтрализация Н II в пылевых туманностях будет достигаться практически за время порядка  $10^6$  лет.

на сплошной пленке атомов, адсорбировавшихся таким образом, была бы эффективной. Однако низкая плотность межзвездного газа исключает образование сплошных пленок атомов, адсорбированных таким образом. В среде, содержащей, например, один и менее атомов водорода в  $1 \text{ см}^3$  и имеющей температуру около  $100^\circ \text{ К}$ , на  $1 \text{ см}^2$  поверхности будет ударяться менее  $10^5$  атомов в сек. На каждый атом в зоне его взаимодействия будет приходиться свободная подстилающая площадь порядка  $10^{-15} \text{ см}^2$ . На эту элементарную площадку будет попадать один атом не менее, чем за  $10^{10}$  сек. С другой стороны, время пребывания атома на такой элементарной площадке (с  $T \sim 1 \div 2^\circ \text{ К}$ ) будет порядка  $10^4$  сек., так как  $E_0/kT$  будет иметь величину, близкую 10. Совершенно очевидно, что в этом случае коэффициент заполнения поверхности атомами, адсорбирующимися ван-дер-ваальсовскими силами, будет ничтожен (на несколько порядков меньше единицы). Следовательно, при этом и рекомбинация не может быть существенной.

Холодные конденсаты из  $\text{H}_2\text{O}$  и в большей степени из  $\text{NH}_3$  и затем  $\text{SiH}_4$  и  $\text{CH}_4$ , обладающие температурой в несколько градусов К, вследствие очень низкой плотности межзвездной газовой среды, разложения в реакции с атомарным водородом или быстрого испарения, маловероятны даже в холодных зонах межзвездного газа. На поверхностях таких пылинок при низких температурах среды около  $100^\circ \text{ К}$  возможна лишь ван-дер-ваальсовская адсорбция. Но тем не менее и их присутствие не в состоянии увеличить незначительную рекомбинацию атомов в молекулы. Все рассуждения, касающиеся холодных металлических поверхностей, останутся в силе и в случае  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{CH}_4$  \*.

Таким образом, эффективное образование молекул на пылинках возможно только в зонах сильно уплотненного или нагретого межзвездного газа и невозможно в его разреженных холодных частях. В этих последних атомы  $\text{H I}$  будут временно прилипать к пылинкам и испаряться с их поверхности со скоростями, соответствующими температуре в несколько градусов К \*\*. Если бы все пылинки находились в покое или в состоянии недалеко от него, то температура межзвездного газа из  $\text{H I}$  была бы только порядка нескольких градусов К. Однако в действительности она достигает  $100^\circ \text{ К}$ . Кроме разогрева за счет ионизации элементов с низким потенциалом ионизации, это возможно объяснить, например, и тем, что общая масса космических пылинок соизмерима с газовой массой, а их кинетическая энергия и скорость значительно больше кинетической энергии атомов и молекул газовой среды. В этих условиях скорость испаряющихся атомов и молекул относительно центра тяжести межзвездного облака будет отображать скорость космических пылинок.

Межзвездные пылинки, повидимому, являются маленькими частицами неправильной формы и с поверхностью неоднородной в физическом отношении. Скорее всего, они напоминают маленькие коллоидальные частицы, которые теперь легко наблюдаются при помощи электронного микроскопа. Предположение о неправильной форме и неоднородной поверхностной структуре пылинок не должно показаться чем-то невероятным, тем более, что уже постулируют частички неправильной формы, чтобы объяснить поляризацию света в космическом пространстве. Здесь обращаем особое внимание только на возможность нейтрализующей и химической катали-

\* Повидимому, время, необходимое для перевода половины  $\text{H I}$  в молекулы из-за неэффективной рекомбинации и низкой температуры газовой среды будет на много порядков больше времени, требующегося для нейтрализации  $\text{H II}$ . Следовательно речь может идти о десятке, сотне и тысяче миллиардов лет. Но пылевые туманности едва ли существуют в течение столь долгого времени, во всяком случае, в своем первоначальном невозмущенном состоянии.

\*\* Напоминаем, что, как установлено в лабораторных условиях, нейтрализовавшиеся ионы и вновь образовавшиеся или испаряющиеся атомы и молекулы отлетают от катализирующего основания с тепловыми скоростями этой поверхности. Нет доводов допускать что-либо отличное в космическом пространстве.

тической неоднородности поверхности пылинок. Неоднородность нейтрализующих и рекомбинирующих свойств поверхности пылинок неизбежно связана с сообщением им дополнительного поступательного или вращательного ускорения. Поэтому пылинки не могут находиться в обычном термодинамическом равновесии с окружающей их газовой средой. Энергия каждой неоднородной пылинки будет выше средней кинетической энергии элементарных частиц окружающего ее газа\*.

Вблизи горячих звезд, где, возможно, отсутствуют значительные количества космической пыли (во всяком случае, легко испаряющейся) и где, следовательно, преобладает нейтрализация Н II при столкновении с электронами, радиотемпература Н I может быть более высокой, чем в областях с большим содержанием космической пыли. Из областей космического пространства около этих звезд пыль может изгоняться с высокими скоростями, как уже давно указывается, световым давлением. Если космические пылинки обладают значительной фотоэлектрической эмиссией, обычно направленной преимущественно в сторону падающего на них света, то за счет эмитированных электронов неизбежно давление, существенно дополняющее световое. Различные световое и электронное давления могут создавать сортировку космической пыли. Эта пыль, изгоняемая из областей вблизи горячих звезд и обладающая большими скоростями, будет повышать ее концентрацию в более отдаленных от звезд пространствах. Состав космической пыли в различных частях космического пространства, по видимому, должен быть неодинаков. Следовательно, неодинаковыми должны быть как интенсивность радиоизлучения, так и кинетическая температура Н I. В какой степени это соответствует действительности — покажут дальнейшие исследования.

Между прочим, низкая температура Н I, по видимому, может наблюдаться и в сильно нагретом ионизованном межзвездном газе при условии, если он сильно запылен и если время до фотоионизации только что нейтрализовавшихся на пылинке Н II меньше времени, за которое вновь образовавшиеся Н I совершают перемещение по длине свободного пробега\*\*.

Поступило  
22 VII 1953

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> В. И. Красовский, ДАН, 89, № 5, 805 (1953).

\* Пылинки могут также обладать увеличенными скоростями по сравнению с равновесной термодинамической вследствие того, что, находясь в поле излучения, они имеют поверхность с неравномерной отражательной способностью или различным фотоэлектрическим эффектом.

\*\* Если высказанные здесь предположения о большой относительной концентрации элементов с  $Z > 4$  окажутся справедливыми, это будет означать, что по крайней мере в некоторых темных туманностях относительная концентрация пылевой материи велика. Однако это еще не будет означать, что такой тип образований исчерпает все возможное, в том числе и холодные облака Н I с малым содержанием пыли, в которых нейтрализация и температура определяются иными обстоятельствами.