

Л. А. АРЦИМОВИЧ

ПЛАЗМА — ЧЕТВЕРТОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА



Плазма — весьма распространенное в природе состояние вещества. Ее изучение началось сравнительно недавно. С физикой плазмы человечество связывает очень большие надежды, прежде всего, в области энергетики. Именно физика плазмы должна решить проблему осуществления управляемых термоядерных реакций и создания термоядерных электростанций. К ней же относятся работы по новым методам получения электрической энергии за счет обычного топлива без помощи паровых котлов и турбин, а также электрических генераторов.

Помещаемая ниже статья принадлежит недавно скончавшемуся члену редакционной коллегии нашего журнала академику Льву Андреевичу Арцимовичу. Он был руководителем советских исследований в области управляемых термоядерных реакций. Именно ему и его сотрудникам удалось впервые осуществить такие реакции в лабораторных условиях.

Текст статьи заимствован из введения к научно-популярной книге Л. А. Арцимовича «Элементарная физика плазмы», выпущенной в свет издательством «Атомиздат» третьим изданием в 1969 году. Публикацию подготовил В. А. Лешковцев.

Пусть в замкнутом сосуде, сделанном из очень тугоплавкого материала, находится небольшое количество какого-либо вещества. Начнем подогревать сосуд, постепенно повышая его температуру. Если первоначально вещество, содержащееся в сосуде, было в твердом состоянии, то при возрастании температуры оно в некоторый момент начнет плавиться, а при еще более высокой температуре испарится, и образовавшийся газ равномерно заполнит весь объем. Когда температура достигнет достаточно высокого уровня, все молекулы газа (если это молекулярный газ, как, например, водород, азот или кислород) диссоциируют, то есть распадутся на отдельные атомы. В результате внутри сосуда будет содержаться газообразная смесь элементов, из которых состоит вещество. Атомы этих элементов будут быстро и совершенно беспорядочно двигаться, испытывая время от времени случайные столкновения между собой.

Средняя скорость хаотического теплового движения атомов растет пропорционально квадратному корню из абсолютной температуры газа. Она тем больше, чем легче газ, то есть чем меньше атомный вес вещества. Величину средней скорости \bar{v} можно найти с помощью следующей формулы:

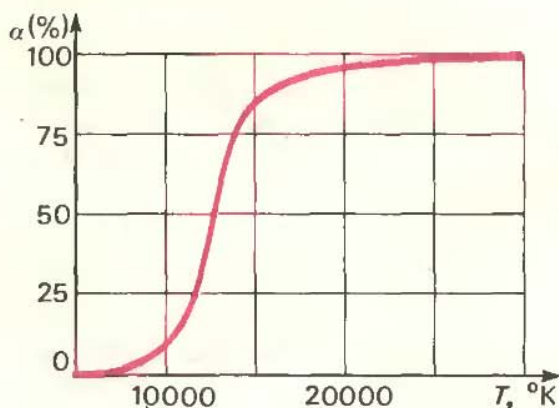
$$\bar{v} = 1,3 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{T}{A}}. \quad (1)$$

Здесь T — абсолютная температура и A — атомный вес вещества. Из формулы (1) следует, например, что, при $T = 1000^\circ \text{K}$ средняя скорость атомов водорода составит около $4 \cdot 10^3$ м/с, а средняя скорость атомов ртути — всего лишь $3 \cdot 10^2$ м/с.

Изменяя температуру от наиболее низкого уровня, соответствующего технике глубокого охлаждения (несколько градусов от абсолютного нуля), до нескольких тысяч градусов, мы можем заставить практически лю-

бое вещество пройти через все три состояния — твердое, жидкое и газообразное. Естественно возникает вопрос: как будут изменяться свойства вещества, если нагревание продолжится дальше и температура выйдет за пределы нескольких тысяч градусов? Конечно, при очень высокой температуре изображаемую нами картину нагревания вещества в тугоплавком сосуде можно представить только теоретически, так как предел термической стойкости даже самых тугоплавких материалов сравнительно невелик — не более 3000—4000 °K. Однако это практическое возражение не снимает вопроса о том, как будет вести себя вещество при непрерывном повышении его температуры. Поэтому мы не будем пока отказываться от принятой простой схемы. Допустим, что стенки сосуда обладают волшебной способностью противостоять сколь угодно высокой температуре, не разрушаясь и не испытывая никаких изменений. Итак, нагревание продолжается. В таком случае уже при 3000—5000 °K мы сможем заметить первые признаки появления новых процессов, которые будут связаны с изменением свойств самих атомов вещества.

Как известно, каждый атом состоит из положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, и электронов, вращающихся вокруг ядра и образующих в совокупности так называемую электронную оболочку атома. Эта оболочка и в особенности ее внешний слой, содержащий электроны, сравнительно слабо связанные с атомным ядром, обладают довольно хрупкой структурой. При столкновении атома с какой-либо быстро движущейся частицей один из внешних электронов может быть оторван от атома, который превратится в положительно заряженный ион. Именно этот процесс ионизации и будет наиболее характерным для рассматриваемой стадии нагревания вещества. При достаточно высокой температуре газ перестает быть



нейтральным: в нем появляются положительные ионы и свободные электроны, оторванные от атомов.

С увеличением температуры относительная доля ионов и электронов в этой смеси очень быстро возрастает. В условиях, когда нагретое вещество находится в тепловом равновесии с окружающей средой (в нашем случае со стенками воображаемого идеального сосуда) при температуре в несколько десятков тысяч градусов, подавляющая часть атомов в любом газе ионизирована и нейтральные атомы практически отсутствуют.

Кривая на рисунке показывает, как должна расти с температурой относительная доля ионизированных атомов в водороде. По оси абсцисс отложена абсолютная температура, по оси ординат — величина α — отношение числа положительных ионов к числу нейтральных атомов, первоначально имевшихся в газе, в процентах. Степень ионизации α зависит не только от температуры, но и от плотности газа (хотя и не так сильно). Поэтому для определенности отметим, что рисунок относится к тому случаю, когда в 1 см³ газа полное число положительных ионов и нейтральных атомов равно $7 \cdot 10^{16}$. При комнатной температуре газ с такой плотностью будет иметь давление, близкое к 1 мм рт. ст. При $T = 10\,000$ °K число ионизированных атомов меньше 10% общего числа атомов водорода, тогда как при $T = 30\,000$ °K на $2 \cdot 10^4$ положительных ионов (про-

тонов) приходится всего лишь один нейтральный атом.

Электронная оболочка атома водорода содержит только один электрон, и поэтому с потерей электрона ионизация заканчивается. В атомах других элементов электронная оболочка имеет более сложную структуру. В ее состав входят электроны, обладающие разной степенью связи с атомом в целом. Электроны, принадлежащие к внешним слоям оболочки, отрываются сравнительно легко. Как уже говорилось выше, при температуре порядка $30\,000^\circ\text{K}$ почти не должно оставаться примеси нейтральных атомов. Это означает, что можно говорить о полной ионизации газа. Однако отсюда не следует, что процесс ионизации закончился, так как положительные ионы в упомянутой области температур сохраняют значительную часть своего «электронного одеяния».

Чем больше порядковый номер элемента в периодической системе Менделеева, тем больше число электронов в атоме и тем прочнее связаны электроны внутренних слоев оболочки с атомным ядром. Поэтому окончательная ионизация атомов таких тяжелых элементов происходит только при очень высоких температурах (миллионы или даже десятки миллионов градусов). Отметим, что в тяжелом газе при окончательной ионизации на каждый положительный ион будет приходится столько же свободных электронов, сколько их первоначально находилось в связанном состоянии в атоме. При этом газ в целом остается нейтральным, так как процессы ионизации сами по себе не создают избытка в зарядах того или другого знака.

В ионизации газа при высокой температуре принимают участие различные процессы взаимодействия между отдельными атомами, с одной стороны, и электронами, ионами и световым излучением — с другой.

Газ, в котором значительная часть атомов или молекул ионизирована,

называется плазмой. Это название было предложено в 1923 году американскими физиками Ленгмюром и Тонксом. Плазма — нормальная форма существования вещества при температуре порядка $10\,000^\circ\text{K}$ и выше. Вместе с тем это и наиболее распространенное состояние вещества в природных условиях. Солнце и все звезды представляют собой не что иное, как гигантские сгустки высокотемпературной плазмы. Верхний слой атмосферной оболочки Земли также образован из плазмы — это так называемая ионосфера.

Для того чтобы подойти к понятию плазмы, мы воспользовались весьма простой идеей о нагревании вещества в некотором идеальном сосуде. Однако практически это совсем не наилучший и уж, во всяком случае, не наиболее легко осуществимый метод получения плазмы. Как в лабораторных опытах, так и в технике нормальными условиями для получения плазмы считаются различные виды электрических разрядов в газах. При электрическом разряде через газ проходит ток. Носителями этого тока являются электроны и ионы, которые образуются в результате ионизации газа. Самый процесс ионизации неразрывно связан с прохождением тока. Только благодаря наличию тока в газе все время возникают новые ионы и электроны, и поэтому степень ионизации поддерживается на определенном уровне. Будь то молния, электрическая дуга, нарядно окрашенный разряд в рекламной трубке или разряд в люминесцентной лампе дневного света — во всех случаях мы имеем дело с явлениями, разыгрывающимися в сильно ионизированной плазме.

Вместе с тем между плазмой, сформировавшейся при нагревании вещества заодно с сосудом, в котором оно находится, и плазмой газового разряда имеется одно существенное различие. Плазма газового разряда не является в термическом (тепловом) отношении равновесной. Она нагре-

вается изнутри за счет энергии, выделяющейся при прохождении тока, и охлаждается с поверхности вследствие контакта с холодными стенками газоразрядного прибора или же с окружающими слоями обычного газа. Плазма, образующаяся при интенсивных газовых разрядах, может иметь во много раз более высокую температуру, чем металл, стекло или нейтральный газ, которые ее окружают. Кроме того, такая плазма термически неравновесна еще в одном отношении. Она состоит из смеси нескольких компонент, неодинаково нагретых. Одной из этих компонент являются электроны, другой — положительные ионы и третьей — нейтральные атомы. Они так же равномерно перемешаны между собой, как кислород и азот в атмосфере.

В противоположность обычной газовой смеси, все частицы которой независимо от их принадлежности к той или другой составляющей имеют одинаковую среднюю кинетическую энергию беспорядочного теплового движения, у электронов, ионов и нейтральных атомов плазмы газового разряда средняя кинетическая энергия различна. Электроны, как правило, обладают гораздо более высокими энергиями, чем ионы, а кинетическая энергия ионов может превышать энергию нейтральных атомов и молекул. Поэтому можно сказать, что плазма представляет собой смесь компонент с различными температурами. Как известно, средняя величина кинетической энергии \bar{E} частиц газа, участвующих в беспорядочном тепловом движении, связана с температурой T следующей простой формулой:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT, \quad (2)$$

где k — постоянная Больцмана.

Из-за различия в величине средней кинетической энергии электронов, ионов и нейтральных частиц в плазме вместо одной общей температуры следует различать три разные

температуры — электронную T_e , ионную T_i и атомную T_a . Обычно $T_e \gg T_i > T_a$. Очень большое различие между T_e и T_i , характерное для большинства форм газового разряда, обусловлено громадной разницей в величине массы электронов и ионов. Внешние источники электрической энергии, с помощью которых создается и поддерживается газовый разряд, передают энергию непосредственно электронам плазмы, так как именно легкие электроны являются носителями тока. Ионы приобретают свою энергию благодаря столкновениям с быстро движущимися электронами. Однако при каждом отдельном столкновении из-за большого различия в массе легкий электрон передает иону лишь небольшую часть своей кинетической энергии, отскакивая от него, как шарик для пинг-понга, ударившийся о массивный стальной шар.

Простой анализ, основанный на применении закона сохранения энергии и закона сохранения количества движения, показывает, что если тело малой массы m_1 сталкивается упруго с телом во много раз большей массы m_2 , то относительная доля кинетической энергии, которую легкое тело в состоянии передать тяжелому, не может превысить $\frac{4m_1}{m_2}$ (попробуйте доказать это сами). Отношение массы электрона к массе иона равно $1 : 1840 A$, где A — атомный вес вещества, которому принадлежат ионы. Следовательно, наибольшая относительная величина передаваемой в одном соударении энергии составляет всего лишь около $2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{A}$.

Поэтому электрон должен испытать очень много столкновений с ионами для того, чтобы полностью отдать имеющийся у него излишек энергии.

Поскольку параллельно процессам, при которых происходит обмен энергиями между электронами и ионами, идет процесс приобретения энергии электронами от источников элект-

рического тока, питающего разряд, в плазме при газовом разряде обычно все время поддерживается большой перепад температур между электронами и ионами. Так, например, в упоминавшихся выше газоразрядных приборах (рекламные трубки, лампы дневного света, ртутные выпрямители и т. д.) величина T_e обычно лежит в пределах нескольких десятков тысяч градусов, в то время как величины T_i и T_a , как правило, не превышают одной—двух тысяч градусов. При дуговом разряде, который используется для электросварки, электронная и ионная температуры ближе друг к другу вследствие того, что в этом случае разряд происходит в газе с большей плотностью и частые столкновения между электронами и ионами быстро выравнивают разность температур. Однако и в дуговом разряде T_e все же больше T_i (T_e порядка нескольких десятков тысяч градусов, а T_i и T_a порядка 6000 °K).

При некоторых специальных условиях в сильно ионизированной плазме ионная температура может значительно превысить электронную. Такие условия возникают, например, при кратковременных электрических разрядах очень большой мощности в экспериментальных установках, предназначенных для исследования способов генерации так называемых управляемых термоядерных реакций.

Теперь несколько уточним общие представления о плазме и ее основных характеристиках. Плазма, то есть ионизированный газ, может обладать довольно сложным составом. Даже в том случае, если плазма образуется в результате ионизации химически простого газа, например азота, кислорода или паров ртути, ее ионная компонента будет содержать ионы различных сортов — с одним, двумя, тремя или более элементарными зарядами. Следует отметить, что кроме атомарных ионов могут присутствовать молекулярные ионы, а также нейтральные атомы и молекулы. Каждая из этих компонент будет харак-

теризоваться своей концентрацией n и температурой T .

В простейшем случае, когда все ионы — однозарядные атомарные ионы, а нейтральная компонента полностью диссоциирована и состоит только из атомов, в плазме будут присутствовать всего три компоненты: электроны, ионы и нейтральные атомы. Такие условия создаются только при интенсивных разрядах в водороде, дейтерии или тритии. В приведенном примере концентрация ионов n_i приблизительно равна концентрации электронов n_e . В более общем случае, когда в плазме присутствуют однозарядные ионы с концентрацией n_1 , двухзарядные — с концентрацией n_2 , трехзарядные — с концентрацией n_3 и т. д., можно записать следующее приблизительное равенство:

$$n_e = n_1 + 2n_2 + 3n_3 + \dots$$

Такое соотношение между концентрацией отрицательных и положительных зарядов в плазме говорит о том, что плазма в целом квазинейтральна, то есть в ней нет заметного избытка зарядов одного знака над зарядами другого знака.

На этом свойстве плазмы нужно остановиться несколько подробнее, так как оно имеет существенное значение и, в конечном счете, в нем содержится самое определение понятия «плазма».

Возникает естественный вопрос: с какой степенью точности в ионизированном газе должно соблюдаться условие квазинейтральности? Каким бы путем ни создавалась ионизация, заранее совсем не очевидно, что положительных и отрицательных зарядов должно быть поровну. Из-за различия в скоростях движения электронов и ионов первые могут с большей легкостью покидать объем, в котором они возникли. Поэтому если благодаря процессам ионизации атомов первоначально образуется одинаковое число зарядов противоположных знаков, то из-за быстрого исчезновения электронов, погибающих на стенках

аппаратуры, внутри которой находится ионизированный газ, ионы, казалось бы, должны оставаться в значительно большем числе, то есть ни о какой квазинейтральности не должно быть и речи.

С другой стороны, нужно учесть, что при преимущественной утечке зарядов одного знака (электронов) в ионизированном газе немедленно образуется избыточный заряд другого знака, который способствует выравниванию потока электронов и ионов и препятствует увеличению разницы между концентрациями частиц обоих знаков. Условия, при которых этот эффект будет достаточен для того, чтобы поддерживать квазинейтральность, можно разъяснить с помощью следующих соображений.

Допустим для простоты, что в ионизированном газе присутствуют кроме электронов только однозарядные ионы. Квазинейтральность означает, что n_e очень мало отличается от n_i . Как отразится на поведении отдельных частиц заметное отклонение n_e от n_i ? Очевидно, что все будет зависеть от того, насколько сильным окажется обратное влияние электрического поля, возникающего при таком отклонении, на движение заряженных частиц. Здесь сразу же выделяются два крайних случая. Если число заряженных частиц в объеме невелико, то создаваемые ими электрические поля слишком слабы для того, чтобы повлиять на их движение, даже если все поля складываются. В этом случае отдельные электроны и ионы в своем поведении никак не связаны друг с другом и каждая из частиц движется так, как будто бы все другие отсутствуют. Следовательно, условие квазинейтральности здесь не обязано выполняться. Противоположный случай соответствует ионизированному газу с высокой концентрацией заряженных частиц, занимающему достаточно большой объем. В этом случае избыточные заряды, возникающие при сильном нарушении равенства между n_e и n_i ,

создают электрические поля, достаточные для выравнивания потоков и восстановления квазинейтральности.

В конечном счете все зависит от соотношения между потенциальной энергией отдельного иона или электрона в электрическом поле, возникающем при нарушении квазинейтральности, и величиной средней кинетической энергии частиц, связанной с их тепловым движением. Если потенциальная энергия W_n , соответствующая заметному отклонению n_e от n_i , будет значительно превышать величину kT_e , которая является мерой энергии теплового движения электронов, то условие квазинейтральности будет соблюдаться с достаточно хорошей точностью. Анализируя соотношение между W_n и kT_e более детально, можно прийти к простому количественному критерию, характеризующему условия, при которых квазинейтральность сохраняется:

$$r \gg 5 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}}. \quad (3)$$

В этом соотношении n_e — концентрация заряженных частиц (число электронов в единице объема) и r — линейный размер области, занятой ионизированным газом, например, радиус сферической колбы, в которой этот газ находится. Появление величины r в данном выражении не трудно разъяснить. При заданной концентрации заряженных частиц создаваемый ими потенциал, а следовательно, и потенциальная энергия отдельной частицы зависят от размеров области, в которой находятся эти частицы. Поэтому величина, характеризующая данный размер, должна обязательно входить в формулу, выражающую условие квазинейтральности. Величина $5 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} = r_d$ носит название дебаевского радиуса по имени немецкого физика Дебая.

Согласно условию (3), если размеры области, занимаемой ионизированным газом с заданной концентрацией n_e и электронной темпера-

турой T_a , значительно превосходят r_d , то внутри этой области $n_a \approx n_i$. В этом случае при сильном отклонении n_a от n_i образующееся электрическое поле будет выталкивать частицы одного знака (присутствующие в избытке) и задерживать уход частиц другого знака. Такой механизм, автоматически поддерживающий равенство n_a и n_i , перестает действовать в случае, когда $r \ll r_d$. В объемах с линейными размерами, значительно меньшими, чем r_d , электрические поля, возникающие при отклонении n_a от n_i , будут слишком малы, чтобы оказать заметное влияние на движение отдельных частиц.

Теперь можно вложить более определенный смысл в понятие «плазма». До той поры, пока мы имеем дело с относительно небольшим числом заряженных частиц, которые не в состоянии создать достаточно сильное поле для того, чтобы оно могло существенно сказаться на поведении каждой из частиц, не имеет смысла говорить о наличии какого-то нового состояния вещества. Новая форма вещества — плазма — соответствует такому состоянию, когда число электронов и ионов настолько велико, что даже небольшое смещение электронной компоненты по отношению к ионной оказывается невозможным из-за сильных электрических полей, возникающих при нарушении равенства между n_a и n_i . Таким образом, ионизированный газ имеет право называться плазмой только в том случае, если условие (3) выполнено с достаточным запасом.

Нужно подчеркнуть, что квазинейтральность плазмы соблюдается только в пределах достаточно больших объемов. Если выделить внутри плазмы куб со стороной x , значительно меньшей, чем r_d , то в пределах этого куба число ионов может значительно отличаться от числа электронов. Чем меньше отношение x/r_d , тем больше может быть различие между величиной отношения n_a/n_i и единицей.

Как появился

знак корня

Извлечение корня обозначается знаком $\sqrt{\quad}$. Не все знают, что это — видоизменение латинской буквы r , первой в латинском слове «radix», означающем «корень». В XVI веке знаком корня служила не строчная, а прописная буква R , а рядом с нею ставилась первая буква латинских слов «quadratus» — «квадратный» (q) или «cubicus» — «кубический» (c), чтобы указать, какой именно корень требуется извлечь. Например, писали $R.q.4352$ вместо нынешнего $\sqrt{4352}$.

Найти число

1. Найти трехзначное число, которое, будучи прочитано справа налево, сохраняет свое значение, если считать, что в этом случае оно изображено в девятиричной системе счисления.

2. 3, 5, 7 — при последовательных нечетных простых числа. Имеются ли в натуральном ряде чисел еще три последовательных нечетных простых числа?

3. Найти четырехзначное число, равное квадрату числа, образованного двумя последними цифрами этого числа.

4. Найти двухзначное число, квадрат которого равен кубу суммы его цифр.

5. Найти четырехзначное число, равное 4-й степени суммы его цифр.

6. Найти число, являющееся точным квадратом, если известно, что в пятиричной системе оно оказывается числом четырехзначным, а если его записать в семирочной системе, то оно изображается одинаковыми цифрами.