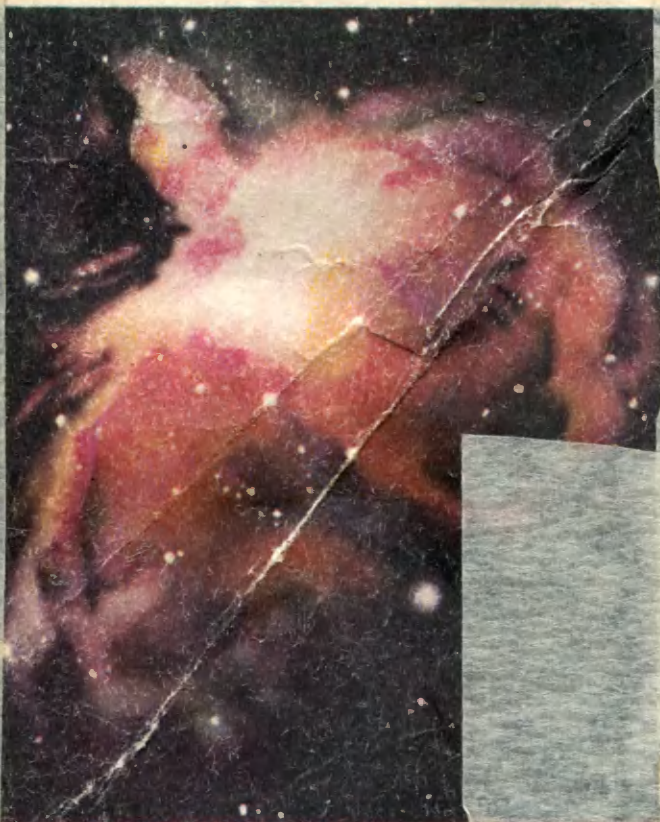


МР
И
знаний

В. П. МИЛАНТЬЕВ, С. В. ТЕМКО

Физика плазмы



М И Р З Н А Н И Й

В. П. МИЛАНТЬЕВ, С. В. ТЕМКО

Физика плазмы

Книга для внеклассного чтения

VIII — X классы

Издание второе, дополненное

МОСКВА „ПРОСВЕЩЕНИЕ“ 1983

Рецензенты: канд. физ.-мат. наук, доцент МГУ
им. М. В. Ломоносова *Б. Н. Швилюк*, канд. физ.-мат. наук,
ст. научный сотрудник ВЭИ им. В. И. Ленина *Н. А. Попов*

Милантьев В. П., Темко С. В.

М60 Физика плазмы: Кн. для внеклас. чтения. VIII—
X кл. — 2-е изд., доп. — М.: Просвещение, 1983. —
160 с., ил. — (Мир знаний).

В книге доходчиво и интересно излагаются основные вопросы физики плазмы — этой непокорной ионизированной среды, четвертого состояния вещества. Большой интерес представят для учащихся старших классов средней школы сведения о достижениях в области осуществления в плазме управляемых реакций термоядерного синтеза, технологического применения плазмотронов и раскрытия на основе знаний по физике плазмы многих космических загадок.

М $\frac{4306021100-793}{103(03)-83}$ 171—83

ББК 22.333
537

Впервые слово «плазма» было произнесено физиологами в середине прошлого века; оно обозначало бесцветный жидкий компонент крови, молока или живых тканей. Такой смысл имело это слово до 1923 г., когда американские физики Ленгмюр и Тонкс назвали плазмой особое состояние ионизованного газа. С тех пор стали различать два совершенно не похожих друг на друга смысла слова «плазма». Несмотря на призывы биологов оставить за словом «плазма» только его прежний, биологический смысл, это понятие твердо вошло в физическую науку, в язык физиков, которые вовсе не собираются от него отказываться.

Так что же физики называют плазмой? Плазма — это смесь электрически заряженных частиц, в которой суммарный отрицательный заряд частиц равен по модулю суммарному положительному заряду. Так что в целом плазма является электрически нейтральной средой, хорошо проводящей электрический ток. Конечно, в какой-нибудь момент времени может оказаться, что в небольшом объеме плазмы общий положительный заряд не равен общему отрицательному. Тогда в плазме возникают очень сильные электрические поля, которые препятствуют дальнейшему разделению зарядов и вызывают такие их перемещения, которые ведут к восстановлению электрической нейтральности этого объема плазмы. Другими словами, концентрация электронов (число электронов в единице объема плазмы) не отличается сколько-нибудь значительно от концентрации положительно заряженных частиц. Это условие квазинейтральности плазмы.

Различают сильно и слабо ионизованную плазму. В сильно ионизованной плазме содержатся в основном электроны и положительные ионы. В слабо ионизованной плазме, кроме электронов и ионов, находятся также возбужденные и нейтральные атомы и молекулы. Электроны, ионы, атомы и молекулы в плазме, вообще говоря, имеют различные температуры; в этом случае говорят о неизоэнтальпической плазме. Если же все указанные компоненты имеют одну и ту же температуру, то плазма называется изотермической.

Хотя физика плазмы стала развиваться лишь в 20-х годах нашего столетия, некоторые ученые гораздо раньше, сами того не зная, в своих опытах имели дело с плазмой.

Еще в 1667 г. ученые Флорентийской академии наук обнаружили, что пламя горелки обладает электропроводящими свойствами. А в 1698 г. в Англии доктор Воль изучал электризацию янтаря, усердно натирая его кусочком шерсти, что называется, не щадя сил своих. И вдруг из янтаря выскочила искра. Так, неожиданно для себя доктор Воль впервые получил небольшой электрический разряд в воздухе. А электрический разряд в воздухе возможен только тогда, когда образуется достаточное количество заряженных частиц и воздух становится электропроводящим газом — плазмой.

Почти через пятьдесят лет после этого электрический разряд наблюдали с помощью лейденской банки. А в начале XIX в. профессор В. В. Петров открыл электрическую дугу, или, как говорят, дуговой разряд. Изучение показало, что газ, в котором происходит электрический разряд, настолько отличается по своим свойствам от газа в неэлектропроводящем состоянии, что плазму стали считать новым, четвертым состоянием вещества. Об этом состоянии английский физик В. Крукс, изучавший электрический разряд в трубках с разреженным воздухом, писал еще в 1879 г.: «Явления в откачанных трубках открывают для физической науки новый мир, в котором материя может существовать в четвертом состоянии».

Еще в глубокой древности мыслители считали, что мир состоит из четырех простых стихий: земли, воды, воздуха и огня. В общем-то они были правы! Этим стихиям соответствуют твердое, жидкое и газообразное состояния вещества и вещество в состоянии плазмы.

Каждое состояние любого вещества существует в определенном интервале температур. Например, при отрицательных (по Цельсию) температурах вода находится в твердом состоянии (лед). В интервале температур от 0 до 100°C вода является жидкостью. Если температура превышает 100°C , мы имеем водяной пар (газ). А при значительно более высоких температурах атомы и молекулы нейтрального газа теряют часть своих электронов и становятся положительными ионами. Когда температура достигает $10\,000^{\circ}\text{C}$, то газ уже представляет собой плазму. И вообще при температурах выше $10\,000^{\circ}\text{C}$ все вещества находятся в своем четвертом состоянии — состоянии плазмы.

Выдающийся советский физик академик Л. Д. Ландау выдвинул гипотезу о возможности существования в природе еще пятого состояния вещества, которое он назвал нейтронным. Нейтронное состояние может быть лишь в недрах некоторых чрезвычайно сжатых звезд, где плотность вещества составляет десятки и сотни тысяч тонн в кубическом сантиметре. В таких условиях протоны (ядра атомов водорода) начинают захватывать электроны и превращаться в нейтроны. Вещество из плазменного состояния переходит в нейтронное. В настоящее время физики считают, что в нейтронном состоянии вещество находится в некоторых недавно открытых звездах — так называемых пульсарах.

Итак, в лабораториях ученые имели дело с плазмой довольно давно. А есть ли плазма в окружающей нас природе? Есть, и притом в больших количествах! Ученые подсчитали, что 99% (по массе) вещества во вселенной находится в состоянии плазмы! Это звезды, наше Солнце, межзвездный газ. Только около одного процента вещества составляют во вселенной такие космические тела, как наша Земля, космическая пыль... Земля также окружена плазмой. Верхние слои атмосферы Земли представляют собой ионизованный газ — плазму; эти слои атмосферы называют ионосферой. Исследования, проведенные с помощью искусственных спутников, показали, что плазменное «покрывало», получившее название радиационного пояса, надежно укрывает Землю от губительного действия корпускулярного излучения Солнца на живые организмы. Полярные сияния, молнии, шаровая молния — все это различные виды плазмы, которые каждый

из нас может видеть в естественных условиях на Земле.

Изучение явлений природы не ограничено выяснением их сущности и нахождением закономерностей, которым они подчинены. Наука стремится изученные явления обратить на пользу людям. Это относится и к изучению плазмы. Пройдитесь вечером по улицам большого города. Везде вас встретят веселые разноцветные огни рекламы. Это — плазма служит людям. Плазма светит, причем цвет свечения зависит от рода газа. Неоновая плазма светится ярким красно-оранжевым цветом, а аргоновая имеет бледно-голубой цвет. Если аргоновая плазма находится в разрядной трубке из желтого стекла, то мы видим зеленый свет. Можно получить любой свет с помощью только неоновой или аргоновой плазмы! Для этого разрядную трубку изнутри покрывают тонкой пленкой особого порошка — люминофора. «Питаюсь» светом неоновой или аргоновой плазмы, люминофор в зависимости от его состава может испускать свет любого цвета. Все хорошо знают лампы дневного света, в создании которых большая заслуга принадлежит замечательному советскому физiku академику С. И. Вавилову. Обычные лампы накаливания очень неэкономичны. Их КПД около 2,5%. В спектре этих ламп преобладают красные, оранжевые и желтые лучи, а синих очень мало. Трубки ламп дневного света изнутри покрывают люминофором очень сложного состава. «Питаюсь» ультрафиолетовыми лучами, которые испускает плазма паров ртути в разрядной трубке, люминофор излучает свет, по своему составу близкий к дневному свету. На этом же принципе основано действие мощных (на 300 кВт) ламп дневного света типа «Сириус», которые используются для освещения аэродромов, стадионов и т. п. О мощности этой лампы можно судить по тому, что на расстоянии ~ 20 см от нее алюминиевый лист расплавляется. Это настоящее маленькое искусственное солнце! Все это — применение плазмы в светотехнике.

А сколько еще других применений находит плазма в науке и технике! Плазменные выпрямители электрического тока, плазменные стабилизаторы напряжения, плазменные усилители и генераторы сверхвысоких частот (СВЧ), счетчики космических частиц — таков далеко не полный «послужной список» плазмы. Во всех перечисленных областях используется так называемая низко-

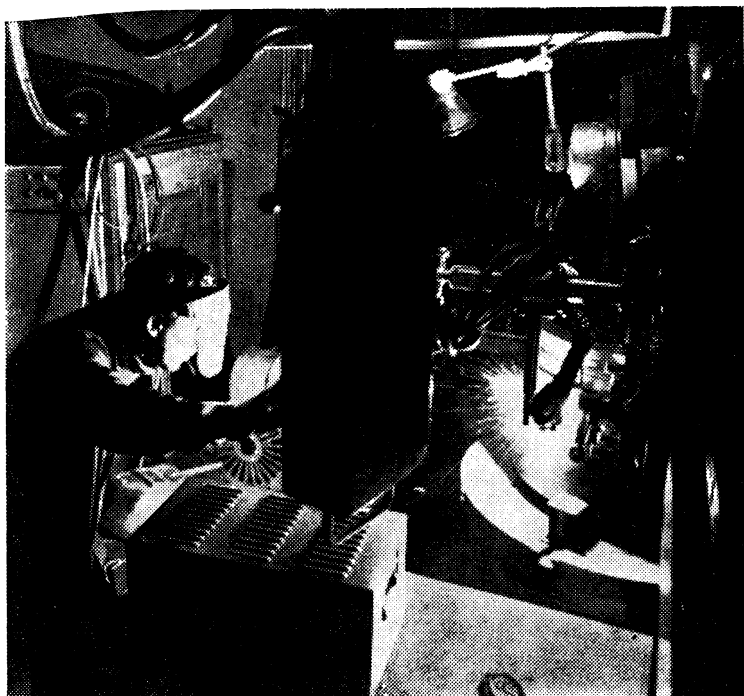


Рис. 1. Карусельный станок с «плазменным резцом».

температурная плазма, т. е. плазма, температура которой составляет «всего только» около десяти тысяч градусов.

Многие применения низкотемпературной плазмы стали возможны благодаря созданию генераторов низкотемпературной плазмы — так пазываемых плазмотронов. Плазмотроны различаются своей конструкцией, но все они основаны на использовании электрической дуги. С их помощью можно сконцентрировать в очень малом объеме огромное количество теплоты и нагреть почти любой газ до температуры $7000-10\,000\text{ K}$ в течение десятых и даже тысячных долей секунды! С созданием плазмотрона возникла новая область химии — плазменная химия. Как оказалось, в плазменной струе многие химические реакции ускоряются, многостадийные процессы заменяются одностадийными. В горнорудной промышлен-



Рис. 2. Напыление оксида алюминия с помощью плазмотрона.

ности плазменная струя плазмотрона бурит скважины в крепких горных породах! Перед температурой 10 000 К неспособно выстоять ни одно твердое вещество! Промышленностью освоены установки для плазменной резки листового проката. Голубой огонек — поток ионизованного газа с температурой от 5 до 30 тыс. градусов, как острой бритвой, рассекает самые термостойкие материалы, толстый стальной лист. При этом кромка

не нуждается в дальнейшей механической обработке, которая необходима при других способах резки металлов. На рисунке 1 показан карусельный станок с «плазменным резцом».

В настоящее время созданы экспериментальные установки для обработки плазменной струей поверхностей строительных материалов. Из сопла плазменного генератора с температурой 8000—10 000 К струя в течение доли секунды оплавляет поверхностный слой керамических и других строительных материалов, покрывая их прочной «рубашкой». Введя в плазменную струю различные красители, можно наносить на стены архитектурных сооружений орнаменты (создавать защитные покрытия любого цвета — см. рис. 2).

В наши дни вряд ли кто не слышал о чудесных генераторах света с фантастической мощностью в миллионы ватт — лазерах. За работы по созданию лазеров советские физики Н. Г. Басов и А. М. Прохоров и американский ученый Таунс были удостоены Нобелевской премии. В первых лазерах использовались кристаллы рубина. Но затем были созданы газовые лазеры, в которых работала плазма гелия, неона и других газов.

Еще более захватывающие и фантастические перспективы физики видят в использовании плазмы, темпе-

ратура которой составляет миллионы и даже десятки и сотни миллионов кельвинов. Это так называемая высокотемпературная плазма. В такой плазме в земных условиях, а также на Солнце и других звездах должны происходить термоядерные реакции с выделением огромной энергии. Именно с целью осуществления таких реакций физики проявили в свое время повышенный интерес к плазме. Но плазма оказалась «непослушной и капризной»; она обнаружила такие непредвиденные свойства, которые до сих пор озадачивают ее исследователей.

Огромные усилия физиков, направленные на укрощение высокотемпературной плазмы, однако, не пропали даром и привели к замечательным открытиям и техническим достижениям.

Мы уже говорили, что вещество во Вселенной, в основном, находится в состоянии плазмы. Поэтому астрофизические исследования в большой мере относятся к физике плазмы. Особое место в таких исследованиях отводится изучению процессов и явлений, происходящих на Солнце и в окосолнечном пространстве, а также в магнитосфере Земли, поскольку от этих процессов зависят погода, жизнь и здоровье людей и различные области их трудовой деятельности (навигация, радиосвязь и др.).

Что такое плазма? Как ее получают? Как исследуют ее свойства? Как ведет она себя в разных условиях? Каково будущее плазмы? На эти и на многие другие вопросы мы стремились ответить в нашей книге.

РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ

§ 1. ДВА ВИДА ГАЗОВЫХ РАЗРЯДОВ

Хорошо известно, что в обычных условиях все газы практически не проводят электрический ток и являются изоляторами. Однако при достаточно высокой температуре или в сильном электрическом поле свойства газа существенно меняются: он ионизируется и становится проводником электричества. При ионизации нейтральные атомы и молекулы газа теряют часть своих электронов и превращаются в положительно заряженные частицы — ионы. Ионизованный газ и есть плазма. В ней содержатся электроны, ионы и нейтральные атомы. При некоторых условиях наступает полная ионизация всех атомов, образующих данный газ.

Плазма, возникшая при газовом разряде, называется газоразрядной. Состояние газоразрядной плазмы поддерживается за счет энергии, выделяемой проходящим через плазму разрядным током. Если внешнее электрическое поле устранить, то очень быстро исчезает и газоразрядная плазма — она превращается в обычный газ. Процесс исчезновения предоставленной самой себе газоразрядной плазмы называется деионизацией газа.

Рассмотрим теперь подробнее свойства газоразрядной плазмы.

Электрические разряды в газах подразделяются на две большие группы. К первой из них относятся несамостоятельные разряды, а ко второй — самостоятельные.

При несамостоятельных разрядах электропроводность газа поддерживается с помощью внешних источников ионизации — ионизаторов. Образующиеся ионы и свободные электроны под действием электрического поля при-

ходят в направленное движение — возникает электрический ток.

В случае самостоятельных разрядов ионизация газа производится главным образом самим разрядом. При одинаковых условиях самостоятельный разряд характеризуется гораздо более высокой плотностью электрического тока, чем несамостоятельный, так как в обычных лабораторных условиях применяются очень слабые ионизаторы. В межзвездном пространстве и в атмосфере Солнца и звезд, где ионизатором является очень высокая температура, имеет место почти полная ионизация вещества и несамостоятельный разряд может сопровождаться очень сильным электрическим током.

§ 2. НЕСАМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД

Существуют два основных средства, с помощью которых производится ионизация газа при несамостоятельном разряде: высокая температура и различные излучения.

Если нагревать газ, то часть его молекул приобретает довольно большую энергию. Эта энергия может оказаться достаточной для ионизации других молекул газа при соударениях с ними. И тогда газ становится электропроводящим. Именно из-за ионизации газа при нагревании (термоионизация) пламя газовой горелки приобретает некоторую электропроводность.

Расщепление атома или молекулы газа на электрон и ион под действием излучения называется фотоионизацией. Не всякое излучение способно вызвать ионизацию газа. Свет с большой длиной волны не в состоянии «вырвать» электрон из нейтрального атома или молекулы. Только коротковолновое излучение способно ионизовать газ. К излучениям такого типа относятся ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи, γ -излучение и космические лучи, попадающие в атмосферу Земли из межзвездного пространства.

Ионизация газа возможна не только под влиянием коротковолнового излучения, действующего на газ извне. Ионизацию газа может вызвать и собственное излучение самого газового разряда.

Несамостоятельные разряды, обусловленные коротковолновым излучением, применяются, например, в ионизационных камерах. Такие приборы позволяют по току

проводимости судить о количестве появившихся в газе ионов и, следовательно, об интенсивности излучения, происходящего в газ.

§ 3. САМОСТОЯТЕЛЬНЫЕ РАЗРЯДЫ

Разряды в газах принято называть самостоятельными, если, как мы уже говорили раньше, электропроводность поддерживается самим разрядом, без какого-либо участия внешнего источника тепла или излучения.

Искровой разряд. Простейшим примером самостоятельного разряда в газе может служить разряд между двумя параллельными металлическими пластинами. Если напряжение между такими пластинами мало, газ ведет себя как хороший изолятор. Как только напряжение достигает значения так называемого пробойного напряжения, сразу же между пластинами проскакивает искра. Искровой разряд в газах характеризуется очень малой продолжительностью и большой силой тока. В момент пробоя газа напряжение в газовом промежутке между металлическими электродами резко падает и разряд прекращается. Искровой разряд относится к числу прерывистых разрядов даже в том случае, когда электроды



Рис. 3. Молния.

присоединены к источнику постоянного напряжения. При искровом разряде образуется пучок зигзагообразных, сильно разветвляющихся, тонких, ярко светящихся полосок. Это искровые каналы. Они мгновенно пронизывают разрядный промежуток между электродами. Наиболее мощным искровым разрядом является молния (рис. 3).

В канале искрового разряда происходит выделение значительной энергии, в результате чего температура газа достигает значения порядка 10^4K . Такая высокая температура приводит к термической ионизации газа. Давление газа в канале искры также возрастает до очень больших значений. Образование области очень высокого давления и ее перемещение в газе является причиной тех звуковых эффектов, которые сопровождают искровой разряд.

В случае искрового пробоя электрический ток в газе переносится только электронами; за малое время развития искры положительные ионы не успевают изменить своего положения, так как их масса во много раз больше массы электронов.

В воздухе всегда имеется некоторое количество электронов. В сильном электрическом поле между металлическими электродами происходит разгон электронов до больших энергий. Быстрые электроны, сталкиваясь с нейтральными молекулами газа, производят их расщепление на вторичные электроны и положительные ионы. Этот процесс ионизации газа нарастает со скоростью взрыва и по своему характеру напоминает развитие снежной лавины в горах (рис. 4). Такие процессы называют лавинными процессами. В свою очередь положительные ионы, достигая катода, выбивают из него электроны. Это приводит к процессу, который называют размножением электронов.

Если длина разрядного промежутка мала, то искровой разряд разрушает металл анода, вызывая эрозию металла. Эрозия возникает на очень узком участке по-

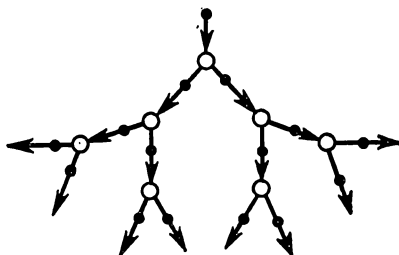


Рис. 4. Электронная лавина (кружками обозначены атомы, а черными точками — электроны).

верхности анода. Используя явление эрозии, советские ученые Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко разработали очень интересный способ электроискровой обработки металлов, который в настоящее время находит широкое применение в производстве.

Дуговой разряд. Примером самостоятельного разряда большой продолжительности служит самостоятельный дуговой разряд, который впервые наблюдал профессор В. В. Петров. Такой разряд возникает между двумя накалированными угольными стержнями, к которым подведено соответствующее электрическое напряжение. Ярко светящийся канал разряда принимает форму дуги. Это обусловлено тем, что на сильно нагретые газы действует архимедова сила, направленная вверх.

Раскаленный угольный катод испускает электроны (термоэлектронная эмиссия). Самостоятельный дуговой разряд между накалированными угольными стержнями называется термоэлектронной дугой. Благодаря высокой температуре концы угольных стержней светятся ослепительно ярким светом.

Дуговой разряд возможен и между металлическими электродами. Например, в вольфрамовых дуговых лампах дуговой разряд возникает между шарообразными вольфрамовыми электродами диаметром 1 мм, которые находятся друг от друга на расстоянии в 1 мм. Дуговой разряд в вольфрамовой лампе сам по себе дает очень мало света и предназначается только лишь для нагрева вольфрамовых электродов, которые и являются основными источниками света.

Заметим, что если дуговой разряд происходит при атмосферном или более высоком давлении, то температуры электронов, ионов и атомов примерно одинаковы и составляют около 6000 К.

Может возникнуть вопрос: каким образом стенки разрядных камер выдерживают такие температуры? Дело в том, что столь высокой температурой обладает лишь центральная часть канала дуги, которую окружает более холодная оболочка газа.

Дуговой разряд используется в специальных осветителях, в электродуговых печах для плавки высококачественных сталей, при электросварке металлов, в плазменных насосах и двигателях и т. д.

§ 4. О ХОЛОДНОЙ ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Дуговой разряд может поддерживаться не только за счет термоэлектронной эмиссии, но и за счет эмиссии электронов с холодного катода. Такой дуговой разряд осуществляется, например, в откачанной трубке, заполненной парами ртути.

Давление паров ртути при комнатной температуре в трубке составляет только 3 Па. Под действием электрического поля очень большой напряженности (более 10^6 В/см) электроны выходят с поверхности холодного катода (обычно ртутного). Такую эмиссию электронов называют холодной эмиссией.

Дуговой разряд в атмосфере ртутных паров, поддерживаемый холодной эмиссией электронов, применяется в кварцевых лампах для ультрафиолетового облучения и в ртутных выпрямителях.

В спектроскопии дуговой разряд с холодной эмиссией между металлическими электродами применяется для определения концентраций примесей в исследуемом образце. Искомые концентрации устанавливаются по интенсивности соответствующих линий в наблюдаемом оптическом спектре.

§ 5. ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД

Важной разновидностью самостоятельного разряда в газах является так называемый тлеющий разряд. Его можно получить в разрядной трубке при сравнительно низком давлении газа — порядка 10^3 Па (рис. 5). При определенном электрическом режиме в цепи и специальном непрерывном охлаждении катода тлеющий разряд может происходить и в воздухе при атмосферном давлении.

Испускание катодом электронов в случае тлеющего разряда происходит в основном вследствие ударов положительных ионов о катод и действия на него собственного излучения разряда.

В тлеющем разряде можно выделить три различных участка: катодный, анодный и положительный столб.

На катодном участке электроны, создающие главную часть электрического тока, возникают в результате эмиссии с катода и ионизации газа.

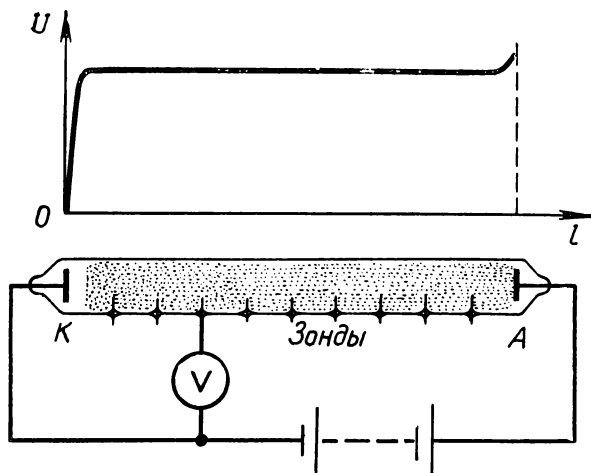


Рис. 5. Тлеющий разряд.

Анодный участок располагается непосредственно около анода трубки.

Газоразрядная плазма, простирающаяся от катодного до анодного участков, образует положительный столб, который отличается от остальных частей тлеющего разряда постоянством существующих в нем условий вдоль всей его длины.

Измерения показывают, что напряженность электрического поля в положительном столбе тлеющего разряда всюду одинакова. Это связано с тем, что в плазме положительного столба тлеющего разряда всюду одинакова плотность электронов и ионов.

Плазма положительного столба тлеющего разряда представляет собой наиболее характерный пример газоразрядной плазмы.

В тлеющем разряде наблюдается распределение потенциала по длине трубки, показанное на рисунке 5. Это распределение можно выявить, встав вдоль трубки ряд дополнительных электродов — зондов. Между катодом и соответствующим зондом присоединяется вольтметр с большим внутренним сопротивлением. Из кривой распределения потенциала вдоль трубки следует, что почти все

падение потенциала в тлеющем разряде приходится на область прикатодного пространства. Эта разность потенциалов между катодом разрядной трубки и границей тлеющего свечения получила название катодного падения потенциала.

Трубки тлеющего разряда из-за своей очень малой мощности используются на практике в качестве индикаторов работы различных радиотехнических схем. На использовании тлеющего разряда основано действие специальных ламп, применяемых для стабилизации напряжения (стабилитроны).

§ 6. ЧТО ПРОИСХОДИТ НА КАТОДЕ

Все виды электрических разрядов в газах отличаются друг от друга главным образом катодным механизмом, т. е. теми процессами, которые протекают на катоде и в его окрестности.

Для тлеющего разряда, например, характерна интенсивная эмиссия электронов с поверхности катода. Благодаря наличию катодного падения потенциала вылетающие из катода электроны начинают сталкиваться с атомами газа лишь на некотором расстоянии от катода. Ширина катодного пространства приблизительно равна средней длине свободного пробега электронов в газе; с уменьшением давления катодное пространство расширяется.

В тлеющем разряде катодное падение потенциала приблизительно равно потенциалу ионизации или потенциалу возбуждения атомов газа и составляет обычно 75—250 В.

Эмиссия с катода осуществляется за счет бомбардировки его ионами, световыми квантами и быстро движущимися атомами.

В дуговом разряде катодное падение потенциала меньше, чем в тлеющем разряде; основную роль в этом случае играет термоэлектронная эмиссия.

Накопец, возможна очень сильная эмиссия электронов с холодного катода, обусловленная большой напряженностью электрического поля.

Свойства газоразрядной плазмы непосредственно не зависят от катодного механизма. Плазма, образующаяся при разрядах разных типов, имеет одинаковые свойства.

Во всех случаях в газоразрядной плазме происходят одни и те же процессы.

Однако свойства плазмы зависят, конечно, от силы тока, протекающего через газ.

Межзвездная плазма и плазма в атмосфере звезд и Солнца отличается от плазмы, полученной в лабораторных условиях. В космических условиях электродами служат ионизованные слои газа, плотность которых выше, чем плотность плазмы между этими слоями. Такие слои являются источниками электронов, и между ними происходят мощные газовые разряды.

В качестве примеров космических явлений, которые представляют собой электрические разряды, можно назвать солнечные протуберанцы и полярные сияния (см. гл. 14).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ

§ 1. ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

Изучение свойств плазмы начинается с описания наблюдаемых явлений и определения условий, при которых они развиваются. Следующий шаг состоит в измерении параметров плазмы — концентрации электронов и ионов, состава плазмы, температуры и др. Выполнение таких измерений представляет собой очень сложную проблему, образует специальный раздел экспериментальной физики, получивший название диагностики плазмы.

Физик-экспериментатор, имеющий дело с обычными газами, состоящими из нейтральных молекул, даже не может представить себе, какие трудности ждут его на пути изучения плазмы. В большинстве случаев для изучения плазмы оказываются непригодными методы, основанные на помещении в исследуемую среду различных датчиков. Измерения одной и той же физической величины различными способами в случае плазмы часто не дают одинаковых результатов. Более надежными являются методы, основанные на регистрации изменения внешних проявлений плазмы, исследовании ее излучений и др. Таким образом, источниками информации о свойствах плазмы могут служить сами физические явления, которые протекают в плазме. Каждый из методов анализа физических свойств плазмы имеет свою область применимости на практике. Однако сведения, добытые с помощью различных методов диагностики плазмы, успешно дополняют друг друга и в результате удается получить надежные знания об этой «капризной» среде — плазме.

Мы расскажем здесь о наиболее важных и широко применяемых в физике плазмы методах диагностики.

§ 2. ПЛАЗМА «ПОЗИРУЕТ» ПЕРЕД ФОТООБЪЕКТИВОМ

Для фиксации динамики изменения внешних структурных особенностей плазмы используется фотография. Поскольку продолжительность протекания импульсного разряда в газе обычно составляет лишь миллионные доли секунды, для фотографирования плазмы необходима высокоскоростная фотография и киносъемка. В настоящее время на вооружении физиков-экспериментаторов имеются кинокамеры и фотоаппараты высокоскоростной съемки, дающие свыше 40 000 000 кадров в 1 с. Особое значение имеют скоростная фотография и киносъемка для исследования таких быстропротекающих процессов, как, например, импульсные разряды, искровой разряд и молнии. Фотографирование быстро развивающихся во времени процессов в плазме осуществляется с помощью камер с подвижными объективами. В камере скоростного фоторегистратора имеется вращающееся зеркало. Свет от разрядной трубки, отражаясь от него, попадает на фотопленку. Вращающееся зеркало изготавливается в виде зеркальной многогранной призмы. Фотопленка помещается в кассете, имеющей форму дуги (рис. 6). В результате быстрого вращения зеркала световой луч пробегает по пленке. При правильной работе затвора фотоаппарата можно с помощью скоростного фотографирования получить на фотопленке непрерывную запись поведения разряда в течение очень короткого промежутка времени его протекания. Так было, например, получено отчетливое доказательство неустойчивости самосжато́го разряда.

Совместно со скоростным фотоаппаратом (фоторегистратором) применяются электронно-оптические преобразователи. С их помощью удается получить изображение разряда за время порядка всего лишь одной миллионной доли секунды. Электронно-оптический преобразователь позволяет выбрать с большой точностью тот момент, в который надлежит сделать фотографию разряда. Если сделать ряд последовательных снимков в различные моменты времени, можно получить достаточно подробную картину поведения плазмы.

При изучении самостоятельного разряда большую пользу приносит применение камеры Вильсона. С помощью камеры Вильсона удалось, например, фиксировать

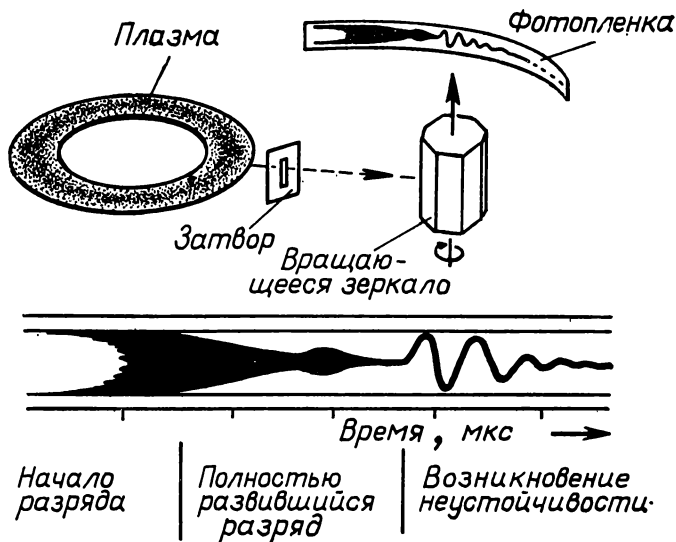


Рис. 6. Скоростной фоторегистратор с вращающимся зеркалом.

рост первоначальных электронных лавин в искровом разряде. Применение камеры Вильсона позволяет получить ряд фотографий распределения путей ионизирующих частиц и сделать непосредственные выводы относительно процессов в плазме.

§ 3. О ЧЕМ РАССКАЗЫВАЕТ СВЕЯЩАЯСЯ ПЛАЗМА

В сравнении с фотографированием намного более важным методом диагностики плазмы является спектральный анализ света, испускаемого газовым разрядом. Интенсивность и спектральный состав излучения плазмы зависят от ее температуры и плотности. На основе данных, получаемых методом спектрального анализа, можно судить о температуре электронов и ионов, о составе и концентрации различных компонентов плазмы и о степени ее чистоты. Результаты спектроскопических измерений значительно пополняют наши представления о тех процессах, которые протекают в плазме.

Спектральный анализ оказывается ценным методом диагностики плазмы, температура которой не превышает нескольких миллионов градусов. При более высокой температуре очень чистая плазма испускает мало видимого света. Поэтому роль оптических методов в диагностике полностью ионизованной плазмы снижается по сравнению с другими экспериментальными методами.

§ 4. «ПРОЩУПЫВАНИЕ» ПЛАЗМЫ МИКРОРАДИОВОЛНАМИ, МАГНИТНЫМИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЗОНДАМИ

1. Микрорадиоволны представляют собой высокочастотное электромагнитное излучение. Исследуя поглощение и рассеяние микрорадиоволн в плазме, можно сделать заключение о плотности электронов в ней. Путем изучения высокочастотных плазменных колебаний удается установить температуру электронов. Микроволновые колебания плазмы получили название шумов.

Для того чтобы понять физическое содержание метода микрорадиоволн, необходимо сначала ознакомиться подробнее с вопросом о распространении электромагнитных волн в плазме. Этому интересному и важному вопросу посвящена глава 9 этой книги.

2. Магнитные зонды. При осуществлении многих экспериментальных работ бывает необходимо установить распределение индукции магнитного поля внутри плазмы в разрядной трубке. Это очень важная и сложная задача диагностики плазмы. Дело заключается в том, что магнитное поле тесно связано со свойствами плазмы. Индукция магнитного поля в каждой точке разрядной трубки является одной из тех физических величин, которые характеризуют свойства плазмы газового разряда. Зная структуру магнитных полей, можно составить ценные сведения о распределении токов в плазме. В некоторых случаях даже можно установить температуру плазмы.

Магнитный зонд представляет собой крошечную проволочную катушку диаметром около 1 мм

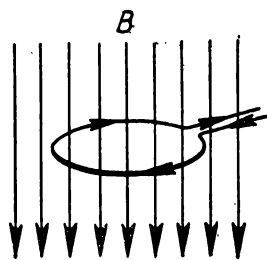


Рис. 7. Магнитный зонд.

(рис. 7). Эта катушка крепится на конце небольшой кварцевой трубки. Такой зонд можно ввести в любую часть камеры газového разряда. При этом в катушке магнитного зонда в результате изменения магнитного поля наводится ЭДС. По значению напряжения на выводах катушки можно судить о скорости изменения индукции магнитного поля в разрядной камере. Напряжения на выводах катушки регистрируют с помощью осциллографа.

Однако применение магнитных зондов не всегда возможно. В частности, потому, что из-за испарения материала стенок зондов в плазме появляются примеси. Другое очень существенное обстоятельство связано с тем, что зонд

влияет на характер протекания разряда. Это ведет к искажению картины и, следовательно, к снижению точности данных, получаемых с помощью зонда.

3. Электрические зонды. Электрический зонд представляет собой тонкую металлическую проволочку, которая изолируется по всей ее длине, кроме лишь самого кончика. С помощью такого зонда можно определить концентрацию электронов и температуру плазмы. Поместив в плазму металлический зонд (рис. 8), измеряют в цепи зонда зависимость силы тока от поданного на зонд потенциала.

Метод зонда позволяет обнаружить важное свойство плазмы. Оказывается, что плазма не подчиняется закону

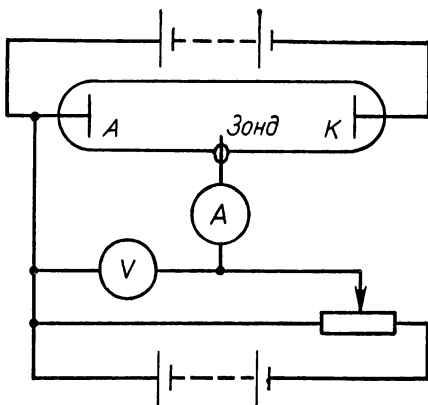


Рис. 8. Схема включения простого электрического зонда.

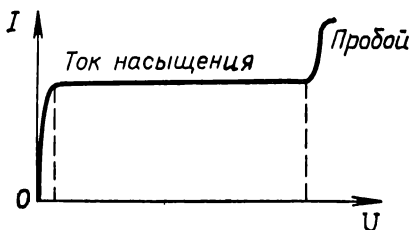


Рис. 9. Зависимость силы разрядного тока от напряжения.

Ома. Сила тока в плазме при больших положительных потенциалах стремится к некоторому предельному значению (рис. 9), которое не зависит от значения потенциала. Это предельное значение силы тока называется током насыщения.

При своем тепловом движении электроны непрерывно ударяются о поверхность зонда. Зная значение силы тока насыщения и тепловую скорость электронов, можно найти их концентрацию в плазме. Методом зондов нельзя, однако, найти концентрацию возбужденных атомов и молекул. Эти данные, как уже было отмечено выше, определяются оптическими методами.

§ 5. О ЧЕМ СООБЩАЮТ НЕЙТРОНЫ, ИСПУСКАЕМЫЕ ПЛАЗМОЙ?

Наиболее удовлетворительным методом диагностики плазмы очень высокой температуры может служить измерение интенсивности испускания плазмой нейтронов.

Если температура плазмы ниже миллиона градусов, то эта интенсивность ничтожно мала и нейтроны не удастся обнаружить. При повышении температуры поток испускаемых плазмой нейтронов усиливается.

Измерение интенсивности испускания нейтронов плазмой лежит в основе чрезвычайно чувствительного метода определения температуры плазмы. Однако использование этого метода для исследования плазмы затрудняется тем, что нейтроны выделяются не только при так называемых реакциях синтеза внутри самой плазмы, но и за счет других процессов, которые можно расценивать как шумы. Из-за этого некоторые выводы могут оказаться ложными.

Для наблюдения нейтронного излучения существует ряд методов. В одном из них используются фотографические эмульсии. В других случаях для регистрации нейтронов

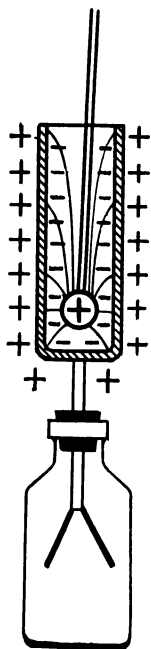


Рис. 10. Цилиндр Фарадея.

применяются сцинтилляционные счетчики. Нейтроны в них выбивают ядра из сцинтиллятора, что сопровождается вспышками света.

§ 6. О ДРУГИХ МЕТОДАХ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

Кроме указанных выше методов диагностики плазмы, находит применение также ряд других методов. Например, энергию электронов можно определить путем измерения интенсивности испускаемых плазмой рентгеновских лучей.

В экспериментальной практике используют корпускулярную диагностику плазмы. В случае пассивной диагностики анализируют свойства частиц (электронов, ионов, атомов), выходящих из объемов изучаемой плазмы. При этом скорость ухода электронов и ионов из области газового разряда можно определить с помощью цилиндра Фарадея (рис. 10) или других аналогичных приборов, называемых коллекторами заряженных частиц.

При активной диагностике анализу подвергают изменения в свойствах потоков частиц, которыми зондируется плазма.

Заметим в заключение, что для диагностики плазмы используется и лазерный луч. С помощью лазерного зондирования находят концентрацию электронов в плазме.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ

§ 1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ

Если различные части одного и того же тела имеют одинаковую температуру, то говорят, что данное тело находится в состоянии теплового, или термодинамического, равновесия.

При значительной плотности газа соударения между молекулами очень быстро приводят к состоянию теплового равновесия. Напротив, в сильно разреженных газах столкновения очень редки, и поэтому в них длительное время могут сохраняться состояния, далекие от термодинамического равновесия.

Пусть газ заключен в сосуд, стенки которого предварительно нагреты и все время поддерживаются при достаточно высокой температуре. Молекулы газа, находящегося в сосуде, совершают быстрое хаотическое движение. Беспорядочно перемещаясь, молекулы газа испытывают столкновения друг с другом, поглощают и излучают энергию, теряют и вновь присоединяют к себе электроны. В результате в газе возникают процессы, каждый из которых компенсируется противоположным ему. Если каждый процесс в газе уравнивается обратным ему процессом, то о таком газе принято говорить, что он находится в состоянии полного термодинамического равновесия.

Между плазмой и обычными газами имеется много общего, несмотря даже на то, что плазма является особой средой, в которой существенную роль играют кулоновские силы, действующие между заряженными частицами. Физика плазмы изучает главным образом свойства вещества при температурах от $2 \cdot 10^3$ до 10^9 К. Состояния

плазмы во многих случаях оказываются термодинамически неравновесными, хотя они и могут длительное время сохраняться неизменными.

§ 2. СВОЙСТВА ГАЗОВ

При малой плотности среднее расстояние между молекулами газа во много раз превышает размеры самих молекул. Поэтому в таком газе можно пренебречь размерами молекул и их взаимодействием, т. е. газ при достаточно большом разрежении вполне можно рассматривать как идеальный. Если газ сжать настолько, чтобы расстояния между его частицами стали сравнимыми с размерами самих молекул, то его свойства будут значительно отличаться от свойств идеального газа.

При высоких температурах и малом давлении все газы ведут себя как идеальный газ. В плазме взаимодействие между заряженными частицами является причиной некоторого отклонения от условий, при которых газ можно считать строго идеальным. Учет этих отклонений приводит к совершенно новым представлениям о свойствах ионизованного газа — плазмы. Однако если энергия взаимодействия между частицами в плазме оказывается малой в сравнении со средней кинетической энергией теплового движения частиц, то можно считать, что плазма ведет себя в термодинамическом отношении как идеальный газ. При достаточно большой плотности плазмы ее энергия определяется не только средней кинетической энергией хаотического движения частиц, но и потенциальной энергией их взаимодействия. Из-за частых столкновений между частицами такая плазма должна очень быстро переходить в состояние полного термодинамического равновесия, при котором температура у электронов и ионов одинакова. Время, в течение которого происходит установление теплового равновесия, называется временем релаксации. При дальнейшем повышении плотности плазмы она перестает вести себя как идеальный газ, и это приводит к изменению ее термодинамических свойств.

Основные характеристики состояния идеального газа (давление p , объем V и температура T) связаны уравнением Клапейрона — Менделеева, которое для 1 моль газа имеет вид:

$$pV = RT,$$

где $R = 8,31 \cdot 10^3$ Дж/(кмоль·К) — молярная газовая постоянная.

Число молекул в 1 кмоль определяется числом Авогадро $N_A = 6,025 \cdot 10^{26}$ кмоль⁻¹, а число молекул в 1 м³ газа при нормальных условиях ($T_0 = 273$ К и $p_0 = 1,013 \times 10^5$ Па) — числом Лошмидта $n_0 = 2,687 \cdot 10^{25}$ м⁻³.

Важной величиной, характеризующей состояние газа, является концентрация n молекул, т. е. число молекул в 1 м³. Так как

$$n = \frac{N_A}{V},$$

то уравнение состояния идеального газа может быть записано так:

$$p = nkT,$$

где $k = \frac{R}{N_A} = 1,38032 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана.

§ 3. ПЛАЗМА — СМЕСЬ НЕСКОЛЬКИХ ГАЗОВ

Очень важным следствием из уравнения состояния идеального газа является закон Дальтона. В том случае, когда газ представляет собой смесь нескольких не реагирующих друг с другом компонентов с концентрациями частиц n_1 и n_2 , ..., каждый из компонентов смеси будет характеризоваться определенным давлением — так называемым парциальным давлением. Парциальное давление каждого компонента газовой смеси пропорционально концентрации его частиц:

$$p_i = n_i kT.$$

Полное давление смеси равно сумме парциальных давлений:

$$p = p_1 + p_2 + \dots = (n_1 + n_2 + \dots) kT.$$

Говорят, что смесь газов находится в тепловом равновесии, если температура всех ее компонентов одинакова. Для смеси нейтральных газов это условие почти всегда выполняется, так как в газах, состоящих из нейтральных атомов или молекул, происходит очень интенсивный обмен энергией между молекулами различных компонентов смеси.

Плазма, образующаяся при ионизации какого-либо однородного газа, также состоит из различных частиц. Это нейтральные атомы или молекулы данного газа, свободные электроны, положительные ионы, кванты света (фотоны). Иногда в плазме образуются также многозарядные отрицательные ионы. Совокупность частиц каждого из указанных видов образует свой собственный газ: газ нейтральных атомов или молекул, электронный газ, ионный газ, фотонный газ. Смесь этих газов и является плазма.

Если температура всех компонентов плазмы одинакова, то плазма называется изотермической, а в противном случае — неизотермической. Изотермическая плазма чаще всего встречается в космических условиях. Что же касается плазмы, образующейся при электрическом разряде в газах, то она, как правило, не находится в тепловом равновесии. Газоразрядная плазма разогревается изнутри за счет энергии, которая выделяется при прохождении электрического тока через газ. Наряду с разогревом плазмы за счет энергии источника тока происходит ее непрерывное охлаждение из-за контакта с холодными стенками газоразрядной трубки или с окружающими ее слоями нейтрального газа. Разные компоненты газоразрядной плазмы характеризуются различными значениями температуры. Обычно температура T_e электронного газа значительно выше температуры T_i газа ионов. Последняя же выше температуры T_0 нейтрального газа. Наконец, фотонный газ должен обладать еще более высокой температурой, чем электронный. При этом под температурой фотонного газа понимают температуру нагретого тела, которое испускает точно такой же поток фотонов, как и плазма.

Внешний источник электрической энергии, вызывающий разряд в газе, отдает энергию непосредственно электронам плазмы. Ионы получают энергию при соударениях с быстрыми свободными электронами. Однако из-за огромной разницы в массе электрон при соударении может отдать иону лишь очень малую долю своей кинетической энергии; электрон отскакивает от иона подобно тому, как отскакивает маленький костяной шарик от большого и тяжелого металлического шара. Только лишь после огромного числа последовательных столкновений электрон может полностью передать ионам имеющийся

избыток энергии. Наряду с обменом энергией между электронами и ионами в газоразрядной плазме непрерывно происходит пополнение энергии электронов за счет источника тока. Именно поэтому плазма газового разряда длительное время будет неизотермической (со значительным различием между температурами электронов и ионов).

Так, в газосветных трубках, которые используются для рекламных целей, в лампах дневного света, а также в газоразрядных лампах, используемых для выпрямления переменного тока, температура электронов обычно составляет десятки тысяч кельвинов, между тем как ионная температура и температура нейтрального газа оказывается не выше 1000—2000 К.

В дуговом разряде различие температур электронного и ионного компонентов меньше. В этом случае разряд протекает в достаточно плотном газе, в котором частые столкновения между электронами и ионами приводят к быстрому выравниванию температур компонентов. Однако и здесь температура электронов составляет несколько десятков тысяч кельвинов, в то время как температура ионного газа и газа нейтральных молекул равна всего лишь около 6000 К.

§ 4. КАК МОЛЕКУЛЫ ГАЗА РАСПРЕДЕЛЕНЫ ПО СКОРОСТЯМ?

Одной из важнейших закономерностей, которой характеризуются газы, является распределение молекул газа по скоростям. Рассмотрим простейший случай газа, состоящего из молекул лишь одного и того же сорта. Если температура такого однородного газа поддерживается на некотором неизменном уровне, то это совсем не должно означать, что все молекулы газа непременно обладают одинаковыми скоростями. Оказывается, что молекулы, входящие в состав такого газа, могут иметь самые различные скорости по модулям и направлениям. В середине прошлого века английский физик Максвелл открыл закон, которому подчиняется распределение молекул по скоростям. Что же понимают под распределением молекул по скоростям? Газ состоит из огромного числа молекул, находящихся в непрерывном тепловом движении. Если удалось бы с помощью скоростной фотографии сде-

дать ряд последовательных моментальных фотоснимков газа и таким образом определить модули и направления скоростей отдельных молекул в газе, можно было бы обнаружить, что молекулы совершают движение с самыми разнообразными скоростями: некоторые из них движутся с очень большими скоростями, намного превышающими среднюю скорость теплового движения, между тем как другие имеют очень малые скорости. Однако все же подавляющее большинство молекул газа движется со скоростями, отличающимися от средней скорости не более чем вдвое. С помощью таких фотоснимков можно было бы также определить, какое число молекул обладает той или иной заданной скоростью, т. е. установить, как распределены молекулы по скоростям.

Пусть газ, находящийся при температуре T , состоит из молекул массы m . Средняя скорость u теплового движения молекул определяется по формуле

$$u = \sqrt{\frac{kT}{m}}.$$

Число молекул ΔN со скоростями, попадающими в достаточно узкий интервал Δv_x значений скоростей — от v_x до $v_x + \Delta v_x$, движущихся в данном направлении по оси X , зависит от скорости v_x . Эта зависимость графически изображается кривой, которая представляет собой

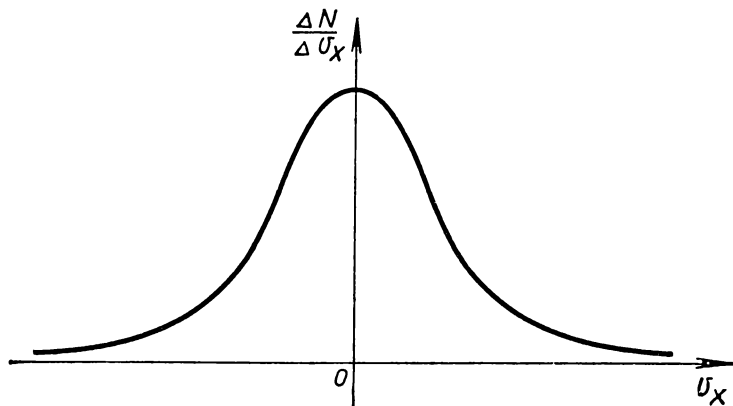


Рис. 11. Максвелловское распределение молекул по значениям проекции скорости на данную ось в однородном газе.

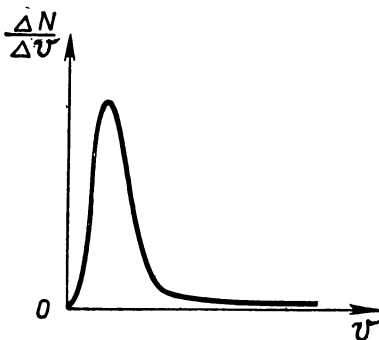


Рис. 12. Максвелловское распределение молекул по значениям модуля скорости в однородном газе.

максвелловское распределение молекул газа по скоростям (рис. 11). На самом деле молекулы газа движутся не по одной оси и их скорости имеют произвольные направления в пространстве. Скорость любой молекулы можно разложить по трем взаимно перпендикулярным направлениям, которые обычно принимаются за оси координат. Число молекул, у которых проекции скорости заключены в пределах от v_x до $v_x + \Delta v_x$, от v_y до $v_y + \Delta v_y$ и

от v_z до $v_z + \Delta v_z$, является функцией значений v_x , v_y или v_z . Эти зависимости для всех трех осей одинаковы.

Часто бывает необходимым указать распределение молекул по значениям модуля скоростей, а не по значениям проекций. Такое распределение молекул графически изображается несимметрично кривой (рис. 12). Эта кривая, как видно из рисунка, поднимается от нуля до максимального значения, а затем медленно приближается к нулю по мере увеличения скорости. Вычисления показывают, что при максвелловском распределении молекул по скоростям число молекул, значительно превышающих среднюю тепловую скорость u , очень мало. Если подсчитать относительное число молекул газа, имеющих скорости u , $2u$, $3u$, $4u$, $5u$, то получим данные, представленные в таблице:

| v | $\Delta N(v) / \Delta N(u)$ |
|------|-----------------------------|
| u | 1,000 |
| $2u$ | 0,199 |
| $3u$ | 0,0030 |
| $4u$ | 0,000005 |
| $5u$ | 0,000000009 |

Максвелловское распределение молекул газа является одним из фундаментальных законов природы.

Часто предполагают, что каждый из трех компонентов плазмы (нейтральный газ, ионный и электронный газы) подчиняется распределению Максвелла.

В плазме обычно протекают процессы двух типов. Одни из них ведут к нарушению максвелловского распределения, а другие, напротив, действуют в сторону восстановления максвелловского распределения. Соударения электронов с электронами и электронов с ионами, восстанавливающие распределение Максвелла, происходят в плазме значительно чаще других процессов. Поэтому считают, что отклонения от максвелловского распределения должны быть в плазме незначительными. В изотермической плазме благодаря соударениям между частицами разных компонентов температуры компонентов выравниваются и общее состояние плазмы соответствует максвелловскому распределению с единой температурой.

Плазма газового разряда обычно является неизоотермической. В ней нет теплового равновесия между разными компонентами, хотя каждый из них подчиняется распределению Максвелла.

§ 5. ОТКРЫТИЕ БОТАНИКА БРОУНА

В 1820 г. ботаник Броун обнаружил беспорядочное движение крупных твердых частичек, взвешенных в жидкости, которое позже получило название броуновского движения.

Непосредственно наблюдая за поведением мелких пылинок, освещенных солнечными лучами, можно заметить, что они ведут себя аналогичным образом. Более подробно движение этих частичек можно проследить с помощью скоростной киносъемки.

Если проследить путь какой-либо отдельной броуновской частицы, рассматривая ее последовательные положения на кадрах такой киносъемки, можно обнаружить, что он представляет собой зигзагообразную ломаную линию, состоящую из прямолинейных отрезков различной длины (рис. 13). Каждый излом пути является результатом упругого соударения рассматриваемой броуновской частицы с молекулами газа. Время, в течение которого происходит соударение при упругих ударах, очень мало

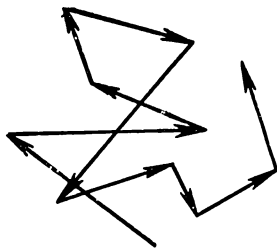


Рис. 13. Путь броуновской частицы в газе.

по сравнению со временем, затраченным частицей на прохождение прямолинейных участков пути между двумя последовательными столкновениями. После каждого столкновения броуновская частица может начать двигаться в любом направлении независимо от направления предыдущего ее перемещения. Это простейшая схема лежит в основе объяснения многих свойств газообразного состояния. Основные положения теории газов

в несколько видоизмененной форме находят свое практическое применение в физике плазмы. Однако в случае плазмы должны учитываться особые свойства этой среды, в которой значительную роль играют силы электростатического взаимодействия заряженных частиц.

§ 6. О ТОМ, КАК ДВИГАЮТСЯ МОЛЕКУЛЫ В ГАЗЕ

Постараемся теперь, используя картину броуновского движения, выяснить, как движутся молекулы газа.

Средняя длина прямолинейных участков пути, из которых составляется весь путь частицы, получила название средней длины свободного пробега. Обозначим ее через l . Время, затраченное частицей на прохождение отдельных прямолинейных участков пути, будет неодинаковым. Поэтому вводится также понятие среднего времени между столкновениями, которое соответствует времени пролета частицей средней длины свободного пробега. Это время обозначим через τ . Зная τ , можно найти среднее число столкновений данной частицы с молекулами газа за 1 с, которое обозначим через ν :

$$\nu = \frac{1}{\tau}.$$

Очень важным является понятие эффективного сечения столкновений. Столкновение между двумя молекулами возможно, если их центры сближаются до некоторого минимального расстояния. Это расстояние называют эффективным радиусом столкновения. Представим себе мо-

лекулы в виде упругих шариков с радиусом a . Столкновения тогда будут происходить, если молекулы сближаются на расстояние $r < 2a$ (рис. 14). В рассматриваемом случае «эффективное сечение» столкновений σ будет соответствовать площади круглой мишени радиуса $2a$:

$$\sigma = 4\pi a^2.$$

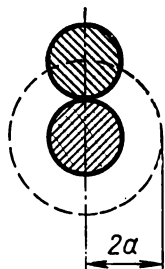


Рис. 14. Эффективное сечение столкновений.

Теперь столкновение можно трактовать как попадание молекулы в мишень определенных размеров. Ясно, что, чем больше размер мишени, тем чаще при всех прочих одинаковых условиях будут происходить столкновения между молекулами газа и тем меньшей будет средняя длина их свободного пробега. Совершенно очевидно, что длина свободного пробега l должна зависеть и от концентрации n молекул в газе: с ростом концентрации длина свободного пробега уменьшается. Для длины свободного пробега может быть получена следующая приближенная зависимость:

$$l \approx \frac{1}{n\sigma}.$$

Среднее же время между двумя последовательными столкновениями выражается так:

$$\tau = \frac{l}{u},$$

где u — средняя скорость теплового движения молекул в газе. Среднее число столкновений, которое испытывает молекула за 1 с, определится формулой

$$\nu = \frac{u}{l} \approx nu\sigma.$$

Если при соударениях могут происходить различные процессы, то можно ввести понятия частоты соударений и эффективного сечения для каждого из них. При наличии k различных процессов общее число столкновений за 1 с определяется выражением

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_k.$$

Обратная величина средней длины свободного пробега равна сумме обратных величин длин свободного пробега для всех процессов.

Если газ состоит из нейтральных молекул или атомов, то величину σ можно приближенно принять независимой от скорости молекул. Тогда длина свободного пробега тоже окажется независимой от скорости, а следовательно, и температуры; она будет изменяться только при изменении концентрации n молекул.

§ 7. ЭНЕРГИЯ ЧАСТИЦ И ТЕМПЕРАТУРА ГАЗА

Частица с массой m и скоростью v обладает кинетической энергией

$$U = \frac{mv^2}{2}.$$

Если газ находится в состоянии термодинамического равновесия при абсолютной температуре T , то средняя энергия, приходящаяся на одну его молекулу, определяется формулой

$$U_{\text{ср}} = \frac{3}{2} kT,$$

где k — постоянная Больцмана.

Следовательно, значение средней энергии частиц в газе, соответствующее 1К, составляет $2,07 \cdot 10^{-23}$ Дж. Удобно энергию измерять в электронвольтах (эВ):

$$1\text{эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Для того чтобы выразить энергию в электронвольтах, нужно разделить ее значение в джоулях на переводной коэффициент $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Дж/эВ, численно равный заряду электрона, выраженному в кулонах:

$$U = \frac{mv^2}{2e}.$$

Понятие температуры, строго говоря, определено для состояния термодинамического равновесия. Однако плазма не всегда находится в таком состоянии, поэтому под температурой понимают величину, характеризующую среднюю кинетическую энергию частиц. Это так называемая кинетическая температура. Обычно в физике плазмы приходится иметь дело именно с этой температурой. Исключение составляет температура излучения плазмы.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В ПЛАЗМЕ

§ 1. УПРУГИЕ И НЕУПРУГИЕ СОУДАРЕНИЯ

Переход газа в состояние плазмы сопровождается различными процессами взаимодействия между образующими его частицами. Эти процессы происходят в результате столкновений частиц между собой или при взаимодействии их с излучением. Кроме того, частицы плазмы могут сталкиваться с окружающими ее поверхностями, так как плазму практически нельзя идеально изолировать. В результате столкновения со стенками частицы плазмы могут выбивать из них атомы, которые, поступая в плазму, образуют в ней примеси посторонних веществ. Ведутся поиски условий предотвращения этого нежелательного явления загрязнения плазмы.

Рассмотрим важнейшие типы взаимодействий между частицами в плазме.

В физике плазмы всякое взаимодействие между частицами трактуется как соударение. Соударения между частицами можно условно разделить на два вида: упругие соударения и неупругие. Соударение называется упругим, если свойства сталкивающихся частиц после взаимодействия остаются прежними. Особую роль играют столкновения, в результате которых частицы отклоняются на малые углы. Это имеет место, когда пролетные расстояния велики и взаимодействие между частицами является слабым. Именно такое взаимодействие между частицами в плазме рассматривается как упругое столкновение.

Взаимодействия между частицами плазмы, приводящие к изменениям свойств одной или более частиц, называют неупругими столкновениями. В результате неупругих столкновений могут происходить такие процессы,

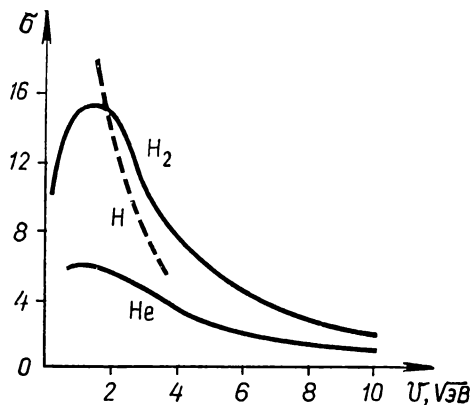


Рис. 15. Зависимость эффективного сечения σ упругих столкновений электронов от их скорости в атомарном и молекулярном водороде и гелии (сечение выражено в сотых долях от 1 нм^2).

как, например, ионизация, возбуждение, диссоциация, синтез и т. д.

Всякий процесс столкновений между частицами плазмы характеризуется соответствующим эффективным сечением (см. § 6 предыдущей главы).

Упругие столкновения электронов с нейтральными молекулами газа. Одним из наиболее часто встречающихся в плазме случаев столкновения является упругое столкновение электрона с молекулой или атомом. На рисунке 15 приведены графики зависимости эффективного сечения упругих столкновений электронов в атомарном и молекулярном водороде и гелии (по оси абсцисс откладывается квадратный корень из энергии электронов, выраженной в электронвольтах; такой выбор масштаба удобен тем, что абсцисса оказывается пропорциональной скорости электрона).

Из приведенных графиков видно, что при значениях энергии, превышающих несколько электронвольт, сечения упругого столкновения с ростом скорости электрона уменьшаются. В атомарном и молекулярном водороде и гелии это уменьшение происходит приблизительно обратно пропорционально скорости электрона.

Перезарядка. Под перезарядкой подразумевают передачу заряда быстрым ионом медленно движущемуся атому. При этом высокоэнергетический ион может превратиться в нейтральный атом, образовав в плазме новый ион с низкой энергией, что ведет к постепенному остыванию плазмы.

Графики зависимости эффективного сечения перезарядки протонов в различных газах

от их скорости приведены на рисунке 16. Их рассмотрение позволяет сделать заключение, что с увеличением скорости протона сечение перезарядки сначала быстро увеличивается, достигая при некоторой определенной скорости своего максимального значения, а затем начинает быстро убывать. Скорость протона, при которой эффективное сечение перезарядки достигает своего наибольшего значения, называется оптимальной скоростью. При оптимальной скорости протона значение сечения перезарядки довольно велико.

Возбуждение. При соударениях с одной из тяжелых частиц электрон может вызвать ее возбуждение, в результате чего рассматриваемая частица будет обладать более высокой энергией, чем до столкновения с электроном. Зависимость эффективного сечения возбуждения от энергии электрона дана на рисунке 17. Возбужденные атом, ион или молекула могут переходить в невозбужденное состояние с меньшей энергией. В ре-

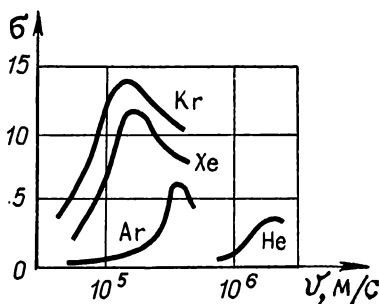


Рис. 16. Зависимость эффективного сечения σ перезарядки протонов от их скорости v в различных газах (сечение выражено в сотых долях от 1 нм^2).

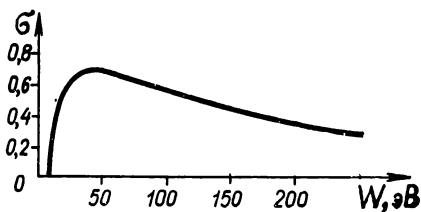


Рис. 17. Зависимость эффективного сечения σ возбуждения атомов водорода при их соударении с электронами от энергии последних (сечение выражено в сотых долях от 1 нм^2).

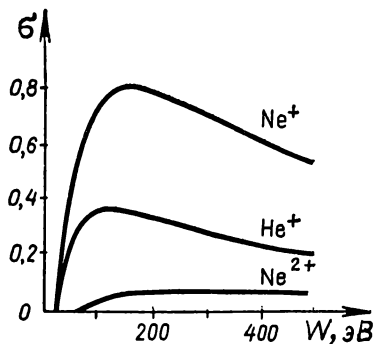


Рис. 18. Зависимость эффективного сечения σ ионизации нейтральных атомов гелия и неона (образование ионов He^+ , Ne^+ и Ne^{2+}) при их столкновении с электронами от энергии последних (сечение выражено в сотых долях от 1 nm^2).

зультате перехода испускается квант света — фотон. Такой переход в невозбужденное состояние может происходить, если он «разрешен» в квантовой механике — науке о процессах в микромире.

В некоторых случаях возбужденные состояния могут сохраняться довольно длительное время. Такие возбужденные состояния называют метастабильными.

Возбуждение может происходить также в результате столкновений ионов с ионами или ионов с атомами. Однако возбуждения этого типа возника-

ют при гораздо больших значениях энергии движущихся частиц, чем в случае соударения электрона с атомом или ионом.

Ионизация. Переход газа в состояние плазмы связан с различными процессами, происходящими при соударениях, но особую роль играют процессы ионизации — отрыв электрона от атома или молекулы газа. Известны два типа ионизации. В плотной плазме ионизация газа возникает под действием столкновений электронов с нейтральными атомами или молекулами. В сильно разреженном газе причиной ионизации является действие ультракоротковолнового излучения. Возможна ионизация газа под влиянием столкновений атомов газа друг с другом или с ионами. Однако для этого нужны значительно более высокие энергии, чем в случае соударения атомов с электронами или взаимодействия с излучением.

Электрон может в результате соударения ионизовать нейтральный атом или молекулу. Эффективные сечения ионизации электронными ударами хорошо изучены до энергий электронов в несколько сот электронвольт. На рисунке 18 приведены графики для сечений ионизации в неоне и гелии при столкновении атомов с электронами.

Отношение числа ионизованных частиц в газе к исходному числу частиц называется степенью ионизации, которую можно обозначить через α . В полностью ионизованном газе степень ионизации α равна 1. Если плазма является слабо ионизованной, то $\alpha \ll 1$. В состоянии теплового равновесия степень ионизации газа зависит от температуры и плотности плазмы.

Вопрос об определении степени ионизации газа при термодинамическом равновесии был изучен индийским ученым Саха.

Процесс ионизации атомов носит ступенчатый характер: сначала от атома отщепляется наиболее слабо связанный с ядром внешний электрон, а затем последующие электроны.

Рескомбинация. Рескомбинация — это процесс соединения иона и электрона в нейтральную молекулу или атом. Этот процесс является обратным процессу ионизации.

Электроны и положительные ионы или ионы, имеющие заряды противоположных знаков, могут рескомбинировать. Этот процесс в некоторых случаях сопровождается излучением.

При малых давлениях возвращение ионизованных частиц в нейтральное состояние происходит путем рескомбинации электронов с положительными ионами. При этом могут происходить процессы двух видов. В одних случаях происходит непосредственная рескомбинация свободного электрона с положительным ионом, в результате чего избыточная энергия электрона излучается в виде светового кванта — фотона. Этот элементарный процесс рескомбинации является обратным процессу фотоионизации. В других случаях рескомбинация происходит при взаимодействии положительного иона одновременно с двумя электронами. При этом один из электронов нейтрализует положительный ион, а другой принимает на себя выделяющуюся в результате такого процесса энергию ионизации и отлетает с увеличенной скоростью. Такой процесс рескомбинации возможен при достаточно высокой концентрации электронов в плазме.

В случае низких давлений существенную роль в явлении рескомбинации играют стенки газоразрядной трубки, а также введенные в газ изолированные тела (зонд или сетка). При этом рескомбинация на стенках становится столь существенной, что рескомбинацию электронов и

ионов внутри плазмы газового разряда можно даже не принимать во внимание.

Для рекомбинации недостаточно лишь встречи двух противоположно заряженных частиц плазмы; нужно еще, чтобы скорость их относительного движения не была слишком велика. В случае большой скорости относительного движения разнородно заряженных частиц они свободно пролетают одна мимо другой. Именно по этой причине в газах, в которых возможно образование отрицательных ионов, сперва свободные электроны «прилипают» к нейтральным молекулам газа, образуя с ними отрицательные ионы, а уже затем при встрече медленно движущихся отрицательных ионов с положительными ионами происходит их взаимная рекомбинация.

Мы уже говорили о том, что газ может находиться в состоянии полной или частичной ионизации. Если не полностью ионизованную плазму поддерживать в постоянных во времени внешних условиях, то в ней будут одновременно происходить как процессы ионизации, так и рекомбинации. В результате в плазме устанавливается такое состояние, при котором скорость ионизации газа равна скорости рекомбинации. Концентрации ионов и электронов не меняются во времени. Это состояние называют стационарным. При определенных условиях стационарное состояние плазмы совпадает с состоянием теплового равновесия.

Прилипание электронов. Электрон может присоединиться к нейтральному атому, образовав отрицательный ион. Этот процесс называют прилипанием.

Атомная теория дает объяснение процессу прилипания. Хорошо известно, что, чем меньше электронов во внешней оболочке атома, тем он легче отдает свои валентные электроны, превращаясь в положительный ион. Так, атомы щелочных и щелочноземельных элементов легко отдают валентный электрон другому атому, превращаясь в положительно заряженный ион. У инертных газов прилипание практически не наблюдается. Напротив, атомы элементов, которые во внешней оболочке имеют много электронов (число валентных электронов меньше восьми), обладают способностью присоединять и удерживать на своей внешней оболочке дополнительные электроны. Это и приводит к образованию отрицательных ионов. Сильное прилипание проявляется у атомов галогенов

(атомы элементов VII группы), у которых во внешней оболочке имеются семь электронов. Опыт показывает, что особенно сильным прилипание электронов к атомам оказывается у элементов группы кислорода (VI группы).

Образование отрицательных ионов кислорода имеет значение для физики верхних слоев атмосферы. Здесь захват электронов атомами кислорода вызывает уменьшение электропроводности плазмы, составляющей ионосферу. Такое уменьшение электропроводности связано с тем, что носителями электрического тока вместо быстрых электронов становятся тяжелые, малоподвижные отрицательные ионы кислорода. Таким образом, прилипание ведет к уменьшению электропроводности газов.

§ 2. ДИФфуЗИЯ В ПЛАЗМЕ

Представьте себе следующую упрощенную картину. Пусть какой-либо газ, составленный из одинаковых молекул, имеет постоянную плотность по всему объему. Будем считать, что газ находится в цилиндре под поршнем при достаточно высоком давлении.

Рассмотрим теперь случай, когда к молекулам основного сорта добавляется небольшая порция молекул газа другого сорта, который будем называть газом «пробных частиц». Пусть плотность и масса частиц пробного газа очень мала по сравнению с плотностью данного газа. При этом условии можно предположить, что молекулы газа основного сорта неподвижны, а молекулы пробного газа должны сталкиваться лишь с молекулами основного газа и не должны испытывать столкновений между собой. Если концентрация молекул пробного газа будет неодинакова по всему объему, занятому газом под поршнем в цилиндре, то они будут переходить из области, где концентрация больше, в область, где концентрация меньше (рис. 19). Этот процесс называется диффузией и характеризуется коэффициентом диффузии D .

Коэффициент диффузии связан со средней скоростью теплового движения частиц

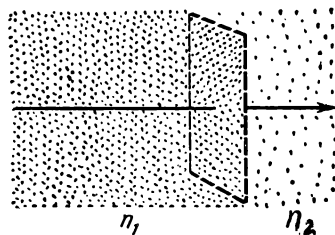


Рис. 19. Диффузия частиц.

рассматриваемого вида и со средней длиной их свободного пробега в данных условиях. Значение коэффициента диффузии зависит от характера взаимодействия между частицами.

Рассмотрим теперь диффузию в плазме.

При отсутствии внешнего поля движение заряженных частиц в плазме напоминает обычное тепловое движение молекул нейтрального газа. Однако оно значительно отличается от поведения нейтральных молекул газа, так как электроны и ионы в плазме испытывают взаимодействия особого характера.

Дело в том, что силы электростатического притяжения и отталкивания между электронами и ионами в отличие от сил взаимодействия между нейтральными молекулами сохраняют заметную величину даже при весьма значительном удалении заряженных частиц друг от друга. Согласно закону Кулона силы взаимодействия между заряженными частицами уменьшаются обратно пропорционально квадрату расстояния. Поэтому имеется некоторое различие между беспорядочным тепловым движением молекул газа и движением заряженных частиц плазмы. Траекторию заряженной частицы в плазме уже нельзя просто разложить на прямолинейные отрезки, которые начинаются и оканчиваются в тех точках, где происходили столкновения.

В плазме каждая отдельная частица при своем тепловом движении все время находится в электрическом поле, создаваемом всем коллективом остальных электронов и ионов. Это поле в течение времени непрерывно изменяется по модулю и направлению. Оно называется микрополем. Его действие приводит к непрерывному изменению модуля и направления скорости движения рассматриваемой заряженной частицы. Это изменение происходит достаточно плавно, так как напряженность электрического микрополя в среднем невелика.

Непрерывное изменение скорости заряженной частицы в плазме обусловлено сложением очень большого числа взаимодействий данной частицы с другими заряженными частицами плазмы. Каждое из таких взаимодействий связано с влиянием на данную заряженную частицу электростатического поля другой частицы, мимо которой она пролетает. Отклонение направления движения рассматриваемой частицы от ее первоначального направления

полета на большие углы в плазме происходит сравнительно редко. Напротив, отклонение на малые углы в результате взаимодействия между заряженными частицами происходит очень часто и приводит к постепенным изменениям скорости движения заряженной частицы, траектория которой изображена на рисунке 20. Эта картина поведения заряженной частицы в плазме соответствует упругим столкновениям, при которых мы можем не учитывать таких явлений, как ионизация в результате столкновений, образование отрицательных ионов, рекомбинация положительных ионов и электронов и другие процессы, протекающие при неупругих соударениях.

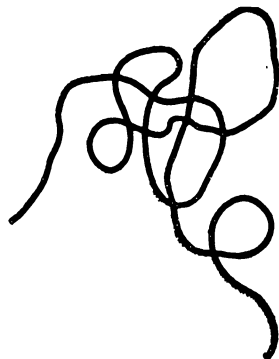


Рис. 20. Траектория заряженной частицы в плазме.

Мы уже знаем, что плазма представляет собой смесь газов, образованных нейтральными атомами и молекулами, электронами, ионами и возбужденными частицами. Каждый из этих газов имеет свое парциальное давление, свою концентрацию, а в случае неизотермической плазмы — также свою температуру. Если нарушить постоянство концентрации одного из компонентов плазмы, то в ней возникает диффузионное движение.

§ 3. ПЛАЗМА — ПРОВОДНИК ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И ТЕПЛА

При отсутствии внешнего магнитного поля и значительных перепадах давления в плазме справедлив закон Ома, связывающий вектор плотности электрического тока \vec{j} с вектором напряженности электрического поля \vec{E} :

$$\vec{j} = \frac{1}{\eta} \vec{E},$$

где η — удельное сопротивление плазмы. Из этого соотношения получается закон Джоуля — Ленца:

$$\eta j^2 = jE \cos \alpha,$$

где α — угол между вектором \vec{j} и \vec{E} . Величина $jE \cos \alpha$

представляет собой работу, которую совершает электрическое поле в единице объема плазмы за единицу времени. Величина ηj^2 равна джоулеву теплу, выделяемому в единице объема плазмы за единицу времени при прохождении электрического тока.

Электрическое сопротивление плазмы обусловлено столкновением заряженных частиц, движущихся под действием электрического поля, с другими частицами.

Удельное сопротивление плазмы η зависит от степени ее ионизации. При достаточно высокой степени ионизации плазмы проводимость $\frac{1}{\eta}$ достигает значения, которое

соответствует проводимости металлических проводников. Так, при температуре электронного газа $T_e = 1$ кэВ удельное сопротивление плазмы η оказывается несколько большим удельного сопротивления меди при комнатной температуре. При $T_e = 50$ кэВ удельное сопротивление плазмы становится в 350 раз меньше, чем у меди.

В полностью ионизованной плазме удельное сопротивление не зависит от плотности заряженных частиц, потому что в такой плазме увеличение плотности электронов в точности компенсируется соответствующим увеличением плотности ионов, которые обуславливают рассеяние электронов.

Плазма обладает также теплопроводностью. Если в плазме появляется разность температур, то в ней возникают потоки тепла из области с более высокой температурой в область с пониженной температурой. Передача теплоты осуществляется и за счет конвекционного движения частиц. Но движение электрических зарядов является электрическим током. Следовательно, под действием разности температур в плазме создается электрический ток, который называется термоэлектрическим током,

ПЛАЗМА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

§ 1. ЗАРЯД В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Существование поля обнаруживается по тем силам, действие которых испытывают помещенные в него тела. Силовые свойства электрического поля описываются его напряженностью. Общую картину поля наглядно представляют с помощью линий напряженности. Если линии напряженности являются прямыми, которые всюду находятся на одинаковом расстоянии друг от друга, то поле однородно. Его напряженность одинакова во всех точках и по модулю, и по направлению. Такое поле существует, например, между обкладками плоского конденсатора. В общем же случае напряженность поля больше там, где линии напряженности располагаются гуще. Итак, напряженность электрического поля характеризует способность поля действовать на помещенные в него заряды. Но если поле способно действовать на заряды, то, значит, оно способно совершать работу. Эта «работоспособность» поля характеризуется потенциалом в данной точке поля или разностью потенциалов между двумя точками поля.

Рассмотрим сначала, как движется заряженная частица в постоянном и однородном электрическом поле. (Под постоянным понимают поле, напряженность которого не зависит от времени.)

Пусть в такое поле внесен положительный заряд q . Тогда поле будет на него действовать с силой

$$\vec{F} = q\vec{E},$$

направленной вдоль линии напряженности. Если на за-

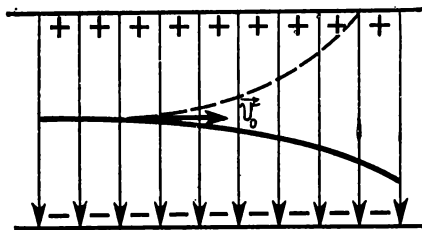


Рис. 21. Движение заряженной частицы в однородном электрическом поле.

ряженную частицу, первоначально находившуюся в состоянии покоя, не действуют другие силы, кроме силы со стороны однородного постоянного электрического поля, то она движется равноускоренно вдоль линии напряженности.

А как движется отрицательно заряженная

частица? На нее поле также действует с постоянной силой, но направленной против линий напряженности. Следовательно, отрицательно заряженная частица также движется равноускоренно, но в сторону, противоположную направлению движения положительного заряда.

Допустим теперь, что в поле влетает положительный заряд q параллельно пластинам конденсатора, т. е. перпендикулярно силовым линиям (рис. 21). На этот заряд действуют сила тяжести \vec{F}_T и электрическая сила $\vec{F} = q\vec{E}$. Обе эти силы направлены вертикально вниз. Поэтому частица движется равноускоренно вертикально вниз. В горизонтальном же направлении никакие силы на заряд не действуют, и, следовательно, его движение в этом направлении является равномерным. Такое движение положительного заряда совершенно аналогично движению тела, брошенного горизонтально. Следовательно, траекторией движения положительного заряда в постоянном и однородном электрическом поле является парабола (сплошная линия на рисунке 21). Если не учитывать тяжести, то отрицательно заряженная частица в поле, показанном на рисунке 21, будет двигаться по параболической траектории, изображенной штриховой линией (на отрицательный заряд действует сила, направление которой противоположно направлению линий напряженности). Если же учитывать силу тяжести, то парабола, являющаяся траекторией движения отрицательно заряженной частицы, может быть обращена как выпуклостью вверх, так и выпуклостью вниз в зависимости от того, какая сила больше — сила тяжести или электрическая сила. Если же эти силы по модулю одинаковы, то частица вообще не

будет отклоняться в вертикальном направлении. Отрицательный заряд в этом случае будет двигаться равномерно в горизонтальном направлении со скоростью, равной начальной скорости влета заряда в поле. Конечно, такие же условия могут осуществиться и для положительного заряда, но в поле противоположного направления. Указанные особенности движения заряженных частиц в электрическом поле используются в электронно-лучевых трубках.

Совершенно так же рассматривается движение заряженной частицы, влетающей в электрическое поле под углом к линиям напряженности. И в этом случае траекторией заряженной частицы является парабола или какой-то отрезок параболы (как при движении тела, брошенного под углом к горизонту в поле тяготения).

Заметим, что траектория заряженной частицы в электрическом поле будет параболической лишь в том случае, если скорость этой частицы намного меньше скорости света $c = 300\,000$ км/с. В противном случае траекторией является так называемая цепная линия (форму такой линии принимает тяжелая цепь, подвешенная за оба конца).

Мы часто проводили аналогию между движением заряда в электрическом поле и движением тела, брошенного над поверхностью Земли. Но такая аналогия справедлива лишь до тех пор, пока речь идет о движении заряда в пределах однородного поля.

А как движется заряд в произвольном электрическом поле?

Ответить на этот вопрос в общем случае трудно. Ограничимся частным случаем: рассмотрим движение одной заряженной частицы в электрическом поле другой за-

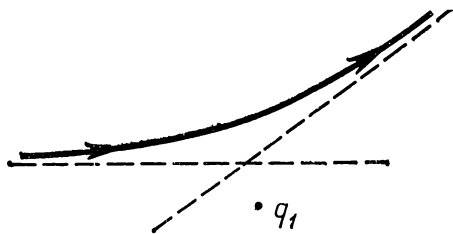


Рис. 22. Траектория заряженной частицы в кулоновском поле.

ряженной частицы, которую будем считать неподвижной. Так как расстояние между частицами изменяется, то изменяется и сила взаимодействия между ними. Пока частицы находятся далеко друг от друга, силы взаимодействия малы и траектория мало искривляется. Когда же движущаяся частица подлетает близко к неподвижной, сила взаимодействия возрастает и траектория частицы искривляется сильно. При удалении движущейся частицы искривление траектории опять становится незначительным. Траекторией частицы в этом случае является гипербола (рис. 22).

§ 2. ДЕБАЕВСКАЯ СФЕРА

В предыдущем параграфе рассматривалось движение только отдельных заряженных частиц. Перейдем теперь к вопросу о движении заряженных частиц плазмы. Плазма состоит из огромного числа положительных и отрицательных зарядов, каждый из которых, конечно, влияет на поведение всех остальных частиц плазмы. Рассмотрение упрощается, если иметь в виду разреженную плазму, в которой плотность частиц мала, и можно считать, что частицы находятся довольно далеко друг от друга. В этих условиях можно взаимодействием частиц пренебречь и считать, что их движение определяется лишь действием внешнего поля. Такое упрощенное описание разреженной плазмы можно назвать моделью независимых частиц (вообще, под моделью понимают упрощенное представление о строении какой-нибудь сложной системы).

Вокруг уединенного электрического заряда кулоновское электрическое поле существует, как известно, во всем пространстве (рис. 23); оно исчезает только на бесконечно большом расстоянии от заряда. Если же рассмотреть поле того же заряда в плазме, т. е. в окружении большого числа разноименно заряженных частиц, то получается иная картина: поле данного заряда не простирается до бесконечности, а обрывается (как говорят физики, экранируется) начиная с некоторого расстояния r_D (рис. 24), получившего название дебаевского радиуса (по имени немецкого физика Дебая). Дебаевский радиус определяется формулой

$$r_D \approx \sqrt{\frac{T}{n}},$$

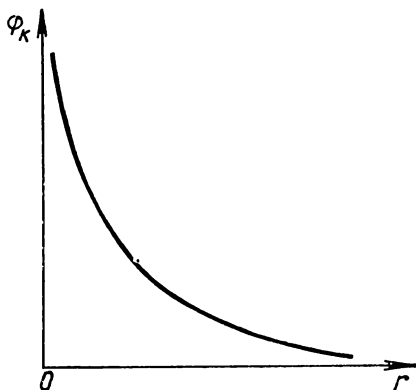


Рис. 23. Зависимость от расстояния потенциала φ_K электрического поля.

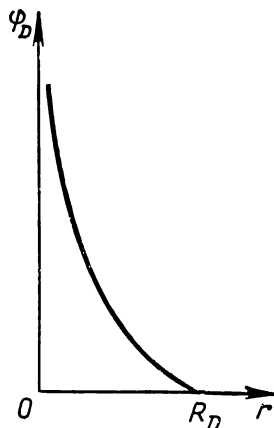


Рис. 24. Зависимость от расстояния потенциала φ_D поля точечного заряда в плазме.

где T — абсолютная температура, а n — концентрация электронов. Таким образом, электрическое поле заряженной частицы в плазме имеется только внутри сферы радиуса r_D . Ее называют дебаевской сферой. Вне дебаевской сферы электрического поля практически нет. Так что частицы в плазме взаимодействуют друг с другом только тогда, когда они находятся на расстоянии, меньшем дебаевского радиуса. Чтобы представить себе порядок величины дебаевского радиуса, подсчитаем его значение для положительного столба тлеющего разряда.

Приняв $n = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и $T = 3 \cdot 10^4 \text{ К}$, получим:

$$r_D = 10^{-4} \text{ м.}$$

Это расстояние гораздо больше среднего расстояния между частицами, которое в данном случае приблизительно равно

$$r_{\text{ср}} \approx \frac{1}{\sqrt[3]{n}} \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Отсюда можно сделать вывод, что внутри дебаевской сферы находится очень много заряженных частиц плазмы. В нейтральном же газе, наоборот, эффективное расстоя-

ние взаимодействия между частицами намного меньше среднего расстояния между ними.

Вспомним теперь условие квазинейтральности плазмы, о котором говорилось во введении. Согласно этому условию концентрация отрицательно заряженных частиц должна мало отличаться от концентрации положительно заряженных частиц. Это условие выполняется, если линейные размеры L области, заполненной смесью заряженных частиц, намного больше дебаевского радиуса ($L \gg r_D$).

Дебаевский радиус является очень важной характеристикой плазмы. В частности, он определяет так называемый ленгмюровский слой, образующийся при соприкосновении плазмы с твердым телом (например, с зондом). Так как электроны в плазме имеют большую скорость, чем ионы, то число электронов, попадающих на зонд, больше, чем число ионов. Поэтому зонд заряжается отрицательно. Между зондом и плазмой возникает электрическое поле, которое препятствует движению электронов. Когда движение электронов прекратится, вокруг отрицательно заряженного зонда возникает слой положительного заряда. Толщина этого слоя определяется дебаевским радиусом.

§ 3. РАССЕЯНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Экранирование электрического поля заряда в плазме приводит к тому, что кулоновское взаимодействие заряженных частиц происходит только внутри дебаевской сферы. Значит, рассуждение о движении заряженной частицы плазмы в кулоновском поле справедливо лишь на расстояниях, меньших дебаевского радиуса. Но внутри дебаевской сферы находится много заряженных частиц плазмы. Их движение называют рассеянием заряженных частиц кулоновским центром. Что под этим подразумевается? Представьте, что на неподвижный заряд, который называют рассеивателем, налетает пучок заряженных частиц. Из-за взаимодействия с неподвижным зарядом частицы пучка отклоняются и притом по-разному. Это и есть рассеяние падающего лучка. Всякое рассеяние характеризуется эффективным сечением. Пучок нейтральных частиц (например, шариков) рассеивается только после непосредственного столкновения с рассеивающей

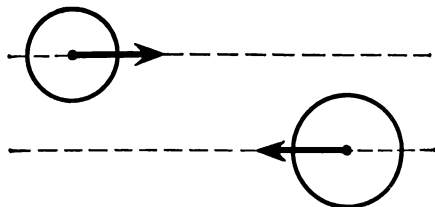


Рис. 25. Столкновение движущихся шаров.

частицей. Такие столкновения происходят в том случае, когда расстояние между центрами шариков меньше или хотя бы равно сумме радиусов шариков (рис. 25). Площадь круга с радиусом, равным сумме радиусов шариков, и есть в этом случае эффективное сечение рассеяния:

$$\sigma = \pi (R_1 + R_2)^2.$$

Всякий налетающий шарик, «метящий» в такую площадь вокруг рассеивающего шарика, обязательно отклонится. Если же шарик не попадает в указанную мишень, он может пролететь, даже «не почувствовав» присутствия рассеивающего шарика. Другое дело — заряженные частицы. Они будут рассеиваться не только при непосредственном столкновении с рассеивающим центром, но даже проходя далеко от него. Ведь заряженные частицы взаимодействуют через свои электрические поля, совершенно не соприкасаясь друг с другом. Но так как в плазме кулоновское поле заряда обрывается (экранируется) на расстоянии, равном дебаевскому радиусу, то при изучении рассеяния заряженных частиц в плазме рассматривают три характерные области: 1) область близких столкновений, 2) область далеких столкновений и 3) область, расположенную вне дебаевского радиуса.

В области «близких» столкновений сила взаимодействия частиц велика и происходит резкое искривление траектории. В области же «далеких» столкновений сила взаимодействия частиц мала и траектория мало искривляется, но и в этом случае окончательное изменение направления вектора скорости может быть большим, так как действие слабой силы происходит на протяжении большого промежутка времени.

Граница между областью «близких» и «далеких» столкновений очень условна. За верхнюю границу области «далеких» столкновений принимают дебаевский радиус.

Вне дебаевского радиуса кулоновского взаимодействия между частицами нет, и там начинается третья область — область коллективных, или плазменных, взаимодействий.

Вы, должно быть, заметили небольшую неточность. Мы говорили о столкновениях, хотя частицы взаимодействуют на расстояниях и поэтому о столкновениях можно говорить только условно. Так как заряженные частицы, рассеиваемые кулоновским центром, не изменяются при рассеянии, то это рассеяние можно рассматривать как упругое.

Чем больше скорость заряда (его кинетическая энергия), тем меньше эффективное сечение. Полю, рассеивающему заряженные частицы, «труднее» отклонить быстро движущиеся частицы, чем частицы, движущиеся медленно.

Эффективное сечение «далеких» столкновений в плазме примерно в 10 раз больше эффективного сечения «близких» столкновений. Это означает, что в плазме «далекие» столкновения дают больший эффект, чем «близкие». Поэтому при изучении плазмы «близкие» столкновения часто совсем не учитывают.

§ 4. «УБЕГАЮЩИЕ» ЭЛЕКТРОНЫ

Электроны и ионы, помещенные в одно и то же электрическое поле, двигаются с разными скоростями. И на электрон, и на однозарядный ион действуют в электрическом поле одинаковые по модулю силы. Но масса электрона почти в 2000 раз меньше массы иона. Поэтому из второго закона Ньютона следует, что ускорение электрона почти в 2000 раз больше ускорения иона. За один и тот же промежуток времени электрон приобретает гораздо большую скорость, чем ион. Значит, электрон более подвижен, чем ион. Движению электронов препятствуют столкновения с ионами. Но, как мы видели, чем больше скорость движущейся частицы (электрона), тем меньше сечение столкновений. Другими словами, электроны с большими скоростями почти не испытывают столкнове-

ний с ионами. В плазме электроны совершают тепловое движение. Поэтому имеет место определенное распределение электронов по скоростям. Это означает, что большая часть электронов движется с примерно одинаковыми скоростями, в то время как скорости остальных электронов имеют самые разнообразные значения.

В «хвосте» максвелловского распределения найдутся электроны, движущиеся с такой большой скоростью, при которой столкновения электронов с ионами не играют большой роли. Тогда, освободившись от сил, препятствующих движению, электрон начинает ускоряться электрическим полем. И чем большую скорость приобретают электроны, тем меньшее сопротивление своему движению они испытывают и, следовательно, ускоряются еще больше: они все дальше и дальше «убегают» из «хвоста» максвелловского распределения. В этом и состоит явление «убегающих» электронов, или «просвиста» электронов в плазме.

ПЛАЗМА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

§ 1. ЗАРЯД В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Движение заряженной частицы в магнитном поле намного сложнее, чем в электрическом поле.

Магнитное поле на находящийся в нем неподвижный заряд совсем не действует. Если же заряд q движется со скоростью \vec{v} , то магнитное поле действует на него с силой Лоренца:

$$F = qvB \sin \alpha,$$

где q — заряд частицы, v — ее скорость, B — индукция магнитного поля, α — угол между направлением линий магнитной индукции и направлением скорости частицы. В случае движения заряда параллельно линиям индукции ($\alpha=0$ или 180°) сила Лоренца оказывается равной нулю, т. е. в этом случае магнитное поле не действует на заряд. Наибольшая сила действует на заряженную частицу, когда она движется перпендикулярно линиям индукции магнитного поля ($\alpha=90^\circ$). Итак, значение силы Лоренца зависит не только от модуля скорости движения заряженной частицы, но и от направления этой скорости. А какое направление имеет сила Лоренца? Оказывается, эта сила всегда перпендикулярна и направлению магнитной индукции, и направлению скорости частицы! Направление силы Лоренца, действующей на положительный заряд, определяется правилом правого винта: если поворачивать головку винта от направления скорости к направлению магнитной индукции, то направление движения винта укажет направление силы Лоренца. На рисунке 26 линии индукции перпендикулярны плоскости страницы и направлены к нам. Вектор скорости перпендикулярен ли-

ниям индукции магнитного поля. Следовательно, сила Лоренца имеет максимальное значение, она перпендикулярна вектору скорости и лежит в плоскости страницы. При тех же условиях на отрицательно заряженную частицу действует сила Лоренца, имеющая противоположное направление.

Какова же будет траектория движения заряда в магнитном поле? Проследим сначала за движением положительного заряда, влетающего в однородное и постоянное магнитное поле в плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции. Так как сила Лоренца перпендикулярна вектору скорости движения, то эта сила не изменяет модуля скорости, а вызывает лишь искривление траектории, которая имеет форму окружности (рис. 26). По второму закону Ньютона

$$\frac{mv^2}{R} = qvB.$$

Отсюда получается выражение для радиуса окружности, по которой движется заряд:

$$R = \frac{mv}{qB}.$$

Из этой формулы видно, что: 1) чем больше скорость движения частицы, тем больше радиус окружности (магнитному полю «труднее» искривить траекторию быстро движущейся частицы, чем частицы, движущейся медленно);

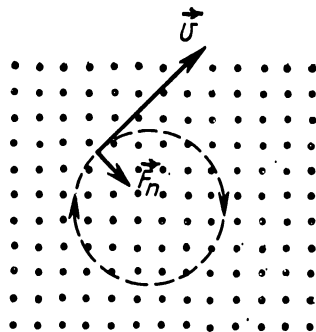


Рис. 26. Действие силы Лоренца в однородном магнитном поле (линии магнитной индукции направлены к нам; они изображены точками).

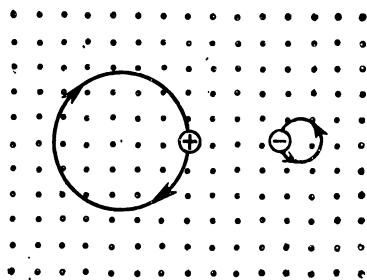


Рис. 27. Траектории положительных ионов и электронов в однородном магнитном поле.

2) чем больше индукция магнитного поля, тем радиус окружности, по которой движется заряд, меньше (магнитное поле большей индукции действует на заряд с большей силой); 3) чем больше масса частицы, тем больше радиус окружности (частицы большей массы обладают большей инертностью, и магнитному полю «труднее» искривить их траекторию); 4) чем больше заряд q , тем радиус окружности меньше (на больший заряд магнитное поле действует с большей силой).

Подставляя приведенное выражение для радиуса окружности, по которой обращается заряд в магнитном поле, в формулу частоты вращения, получаем:

$$\omega_{\text{ц}} = \frac{v}{R} = \frac{qB}{m},$$

где величину $\omega_{\text{ц}}$ называют циклотронной частотой (с такой частотой обращаются заряженные частицы в специальных ускорителях — циклотронах). Радиус обращения частицы в магнитном поле также часто называют циклотронным радиусом, а круговую траекторию частицы — циклотронной окружностью.

Как видно из формулы, циклотронная частота не зависит от скорости частицы. Это означает, что все одинаковые частицы, имеющие разные линейные скорости, в одном и том же магнитном поле обращаются с одинаковой частотой.

Отметим, однако, что этот вывод верен лишь, пока скорости движения частиц малы по сравнению со скоростью света (приблизительно 300 000 км/с). Только в этом случае масса частицы не зависит от ее скорости. Если же скорость частицы сравнима со скоростью света, то масса ее зависит от скорости движения и тогда циклотронная частота также будет зависеть от скорости.

Мы рассмотрели, как ведет себя положительный заряд, движущийся перпендикулярно линиям индукции магнитного поля. Но в плазме имеются не только положительно заряженные ионы, но и отрицательно заряженные частицы — электроны и ионы. Для ионов, имеющих массу M и заряд Ze (где Z — целое число), циклотронная частота определяется формулой

$$\omega_{\text{и}} = \frac{ZeB}{M}.$$

Для электронов же (масса m и заряд e) циклотронная частота ω_e выражается так:

$$\omega_e = \frac{eB}{m}.$$

Электроны и положительные ионы обращаются в противоположные стороны (действующие на положительные и отрицательные заряды силы Лоренца имеют противоположные направления). Если, как показано на рисунке 27, положительные ионы обращаются по часовой стрелке, то электроны обращаются против часовой стрелки. Значения циклотронной частоты для электронов и ионов неодинаковы. Так как масса ионов почти в 2000 раз больше массы электронов, то электроны обращаются в магнитном поле гораздо быстрее (с большей циклотронной частотой), чем ионы. По этой же причине различны и радиусы обращения электронов и ионов.

Если линейные скорости v электронов и ионов одинаковы, то циклотронный радиус ионов в $\frac{M}{Zm}$ раз (т.е. почти в 2000 раз) больше циклотронного радиуса электронов. Так как в термодинамически равновесной плазме средняя скорость теплового движения электронов в $\sqrt{\frac{M}{m}}$ раз больше скорости ионов, то в этом случае циклотронный радиус ионов в $\frac{1}{Z} \sqrt{\frac{M}{m}}$ раз больше циклотронного радиуса электронов. Это схематически изображено на рисунке 27.

Но в плазме лишь отдельные электроны и ионы движутся в плоскостях, перпендикулярных к линиям индукции магнитного поля. Вообще же частицы плазмы до «включения» магнитного поля движутся хаотически во всевозможных направлениях. Если скорость частицы параллельна или антипараллельна направлению линий индукции однородного магнитного поля, то сила Лоренца равна нулю и частица будет двигаться с постоянной скоростью (равномерно и прямолинейно). Если же скорость частицы не параллельна магнитной индукции, то на нее действует сила Лоренца, направленная перпендикулярно как направлению скорости, так и направлению индукции магнитного поля. Движение частицы становится сложным.

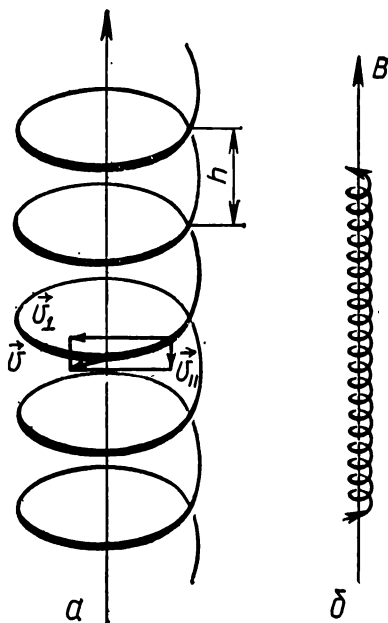


Рис. 28. Винтовые траектории заряженных частиц в однородном магнитном поле: а) траектория иона, б) траектория электрона.

Пусть v_{\parallel} — составляющая скорости частицы по направлению магнитной индукции (продольная скорость), а v_{\perp} — составляющая скорости частицы, перпендикулярная направлению магнитной индукции (поперечная скорость). Так как на движение частицы вдоль линий индукции магнитное поле не влияет, то продольная скорость частицы v_{\parallel} не меняется ни по модулю, ни по направлению. Это значит, что частица вдоль линий индукции магнитного поля движется равномерно со скоростью v_{\parallel} . Поперечная же скорость v_{\perp} изменяется только по направлению. Это значит, что в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, траекторией частицы является окружность. Таким образом, сложное движение частицы состоит из равномерного движения вдоль линий индукции магнитного поля и равномерного движения по окружности в плоскости, перпендикулярной линиям индукции магнитного поля. Поэтому траекторией частицы является винтовая линия (рис. 28). Расстояние, которое частица проходит вдоль линий индукции за один полный оборот по винтовой линии, называется шагом винтовой линии. Шаг h винтовой траектории частицы определяется так:

$$h = v_{\parallel} T_{\text{ц}} = \frac{2\pi}{\omega_{\text{ц}}} v_{\parallel} = \frac{2\pi m}{qB} v_{\parallel}.$$

Очевидно, что при одной и той же продольной скорости шаг винтовой траектории электронов намного меньше шага винтовой траектории ионов.

§ 2. ДРЕЙФ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Выясним теперь, как ведет себя заряженная частица в более сложных условиях, когда, кроме магнитного поля, на нее действуют еще какие-нибудь поля или когда магнитное поле является неоднородным. Оказывается, что в таких условиях центр циклотронного кружка — его часто называют ведущим центром — начинает перемещаться в направлении, перпендикулярном магнитному полю. Такое движение ведущего центра называют дрейфовым движением или просто дрейфом.

Электрический дрейф. Допустим, что, кроме однородного постоянного магнитного поля, на частицу действует постоянное однородное электрическое поле, линии напряженности которого перпендикулярны линиям индукции магнитного поля. Такие поля называют скрещенными. Пусть магнитное поле перпендикулярно плоскости рисунка и направлено к нам, а электрическое поле направлено вдоль оси Y (рис. 29). Поместим в начало координат (точка 0) неподвижный положительный заряд. Магнитное поле на такой заряд не действует, и он под действием электрического поля начинает двигаться ускоренно вдоль оси Y . После того как он придет в движение, на него магнитное поле уже будет действовать. Пока скорость частицы мала, она движется в основном вдоль линий напряженности электрического поля (магнитное поле только немного искривляет ее траекторию). С увеличением скорости частицы (под действием электрического поля) увеличивается и сила Лоренца, которая все более и более закручивает траекторию частицы. Наконец, когда скорость становится настолько большой, что сила Лоренца преобладает над ускоряющей силой электрического поля, движение становится замедленным. Через некоторое время частица останавливается, и все повторяется сначала. Точный математический анализ показывает, что траекторией частицы является кривая, изображенная на рисунке 29, а; это так называемая циклоида. Такую кривую описывает, например, точка обода колеса велосипеда при его движении. В зависимости от того, какую скорость имеет частица в начальный момент времени и где она в этот момент находится, траекторией частицы будет или циклоида, или так называемая трохоида (см. рис. 29, б, в). Таким образом, движение заряженной ча-

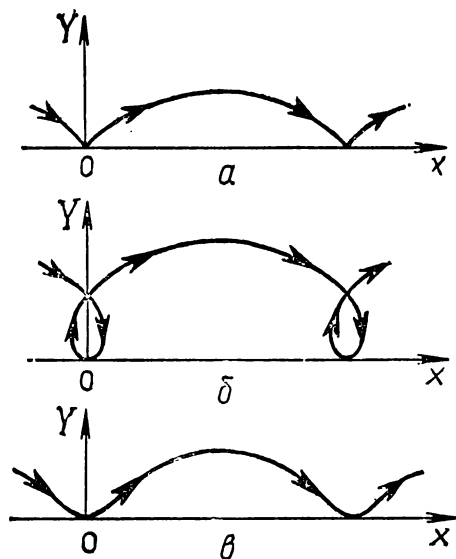


Рис. 29. Траектории положительно заряженных частиц в скрещенных однородных электрическом и магнитном полях (электрическое поле направлено вдоль оси Y , а магнитное поле — перпендикулярно плоскости рисунка, к нам), когда начальная скорость частицы перпендикулярна магнитному полю.

стицы в скрещенных электрическом и магнитном полях является сложным. Его можно представить в виде вращения частицы по циклотронной окружности и движения центра этой окружности в направлении, перпендикулярном векторам \vec{E} и \vec{B} . Это и есть дрейф. Скорость дрейфа не зависит от заряда и определяется лишь напряженностью электрического поля и магнитной индукцией.

В общем случае, когда начальная скорость частицы не перпендикулярна магнитному полю, траекторией движения частицы является спираль, выходящая около параболы (рис. 30).

До сих пор мы говорили о дрейфовом движении положительно заряженной частицы. А как ведут себя электроны в скрещенных полях?

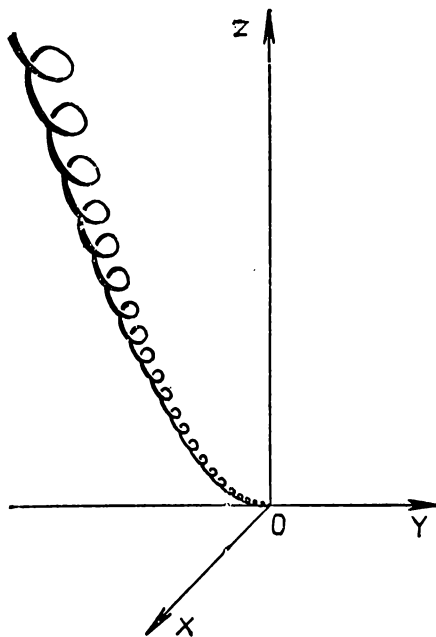


Рис. 30. Траектория заряженной частицы в скрещенных полях, когда начальная скорость не перпендикулярна магнитному полю.

Заметим, что модуль и направление скорости дрейфового движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях не зависят от заряда. Стало быть, электроны дрейфуют в том же направлении, что и положительные ионы. Но траектория движения электронов, конечно, отличается от траектории ионов. Во-первых, электроны обращаются в направлении, противоположном обращению ионов; во-вторых, циклотронный радиус электронов намного меньше циклотронного радиуса ионов. Если начальная скорость электронов и ионов перпендикулярна направлению магнитного поля, то траектории электронов и ионов похожи на кривые, приведенные на рисунке 31. Дрейф электронов и ионов происходит в одну и ту же сторону и с одной и той же дрейфовой скоростью. Таким образом, электрический дрейф приводит

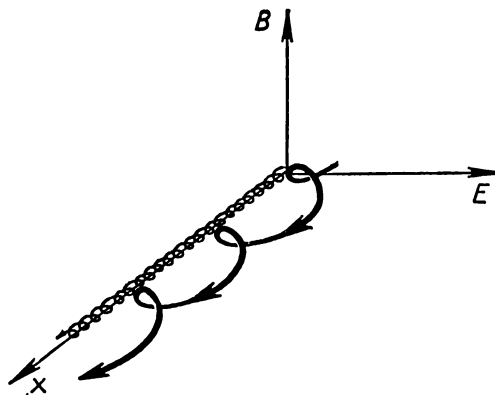


Рис. 31. Электрический дрейф электронов и положительных ионов, когда их начальные скорости перпендикулярны магнитному полю.

к движению плазмы как целого. Но так как ток связан с движением зарядов одного знака относительно зарядов другого знака, то, следовательно, в этом случае электрическое поле не вызывает электрического тока! Неожиданный вывод!

Градиентный и центробежный дрейфы. Дрейф заряженных частиц происходит также в неоднородном магнитном поле. Рассмотрим случаи, когда индукция магнитного поля изменяется только по модулю или только по направлению.

Допустим, что индукция магнитного поля изменяется только по модулю, оставаясь перпендикулярной плоскости рисунка и направленной к нам (рис. 32). Пусть поле изменяется (увеличивается) только вдоль оси Y (точки на рисунке, представляющие следы линий магнитной индукции, располагаются все гуще по направлению оси Y). Если бы поле было однородным, то положительный заряд вращался бы по циклотронной окружности, причем по часовой стрелке (см. рис. 32, а, справа). А что происходит в неоднородном поле? В области, где магнитная индукция больше, там радиус обращения частицы меньше; наоборот, где B меньше, там радиус обращения больше. Таким образом, частица описывает незамкнутую траекторию такого вида, как показано на рисунке 32, а. Следовательно

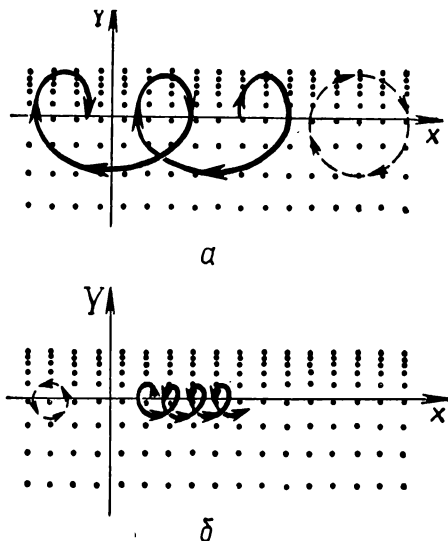


Рис. 32. Градиентный дрейф в неоднородном магнитном поле: а) положительных ионов, б) электронов.

по, в неоднородном магнитном поле возникает дополнительное движение частицы, перпендикулярное как линиям магнитной индукции, так и направлению вектора приращения магнитной индукции. Это дополнительное движение называется градиентным дрейфом, потому что он определяется изменением магнитного поля в направлении, перпендикулярном линиям индукции¹. Таким образом, положительные ионы в рассматриваемом случае дрейфуют влево, а отрицательные частицы приобретают дрейфовое движение вправо (рис. 32, б). Такой дрейф приводит к возникновению электрического тока. Парадоксально! При дрейфе, который вызывается электрической силой, электрический ток не возникает, а в градиентном дрейфе, вызванном силой неэлектрического происхождения, возникает электрический ток!

¹ В математике градиент некоторой величины — это вектор, направленный в сторону максимального возрастания этой величины и численно равный ее изменению на единице длины.

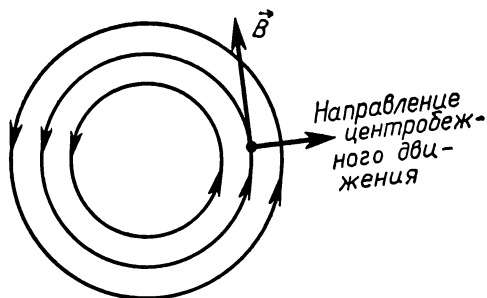


Рис. 33. Заряженная частица в магнитном поле, изменяющемся только по направлению.

Точно так же возникает электрический ток из-за дрейфового движения частиц плазмы в магнитном поле, которое изменяется только по направлению. В таком поле линии индукции являются окружностями, расположенными на одинаковых расстояниях друг от друга.

Чтобы понять, как в таком поле возникает дрейфовое движение, представьте себе, что вы находитесь... на быстро вращающемся «колесе смеха». Вы видели (или сами чувствовали), как трудно удержаться на таком колесе. Это центробежный эффект.

Точно так же «чувствует» себя заряженная частица, движущаяся по винтовой траектории вдоль круговой линии индукции магнитного поля. Центробежный эффект здесь проявляется в том, что частица стремится двигаться по радиусу от центра, перпендикулярно линиям индукции. Тогда под действием силы Лоренца частица начинает двигаться в направлении, перпендикулярном и линиям магнитной индукции, и направлению центробежного движения, т. е. частица приобретает дрейфовое движение. Такой дрейф называют центробежным. На рисунке дрейф положительно заряженной частицы перпендикулярен плоскости рисунка и направлен к нам (рис. 33). В этом можно убедиться, применив правило правого винта. Электроны дрейфуют в направлении, противоположном направлению дрейфа положительно заряженных частиц. Таким образом, и в этом случае дрейфового движения заряженных частиц, вызванного эффектом неэлектрического происхождения, возникает электрический ток.

Таковы основные виды дрейфовых движений плазмы (возможны и другие их виды, например под действием силы тяжести).

§ 3. КАК УДЕРЖАТЬ ПЛАЗМУ

Когда в 30-х годах нашего столетия астрофизики раскрыли тайну происхождения солнечной и звездной энергии, они не подозревали, к каким «земным» надеждам и огорчениям приведет это открытие. Источником колоссальной энергии Солнца и звезд являются термоядерные реакции, которые происходят там «сами собой». Физики загорелись мечтой — осуществить термоядерные реакции, которые протекают при очень высоких температурах (порядка десятков и сотен миллионов градусов!), в земных условиях и сделать их управляемыми. При таких высоких температурах вещество находится в состоянии полностью ионизированной плазмы. Но как удерживать высокотемпературную плазму в ограниченном объеме, в котором бы протекали термоядерные реакции. Так как плазма состоит из заряженных частиц, то действовать на нее можно или электрическим, или магнитным полями. Но как оказалось, удержать плазму электрическим полем практически невозможно.

А может ли справиться с этой задачей магнитное поле?

Если создать однородное магнитное поле внутри прямой трубы, заполненной плазмой, то заряды будут виться вокруг линий индукции магнитного поля, перемещаясь только вдоль трубы (рис. 34).

Чтобы предотвратить уход частиц через концы трубы, надо — первое, что приходит в голову — соединить оба конца трубы, т. е. согнуть трубу в «бублик». Труба такой

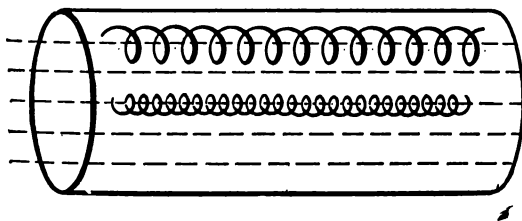


Рис. 34. Движение электронов и протонов в однородном магнитном поле, внутри прямой трубы.

формы называется тором. Казалось бы, вот и найдена ловушка заряженных частиц плазмы! Но не будем спешить. Давайте приглядимся внимательнее к такой тороидальной магнитной ловушке.

Прежде всего линии индукции в этой ловушке являются не прямыми линиями, а окружностями. Это значит, что можно ожидать центробежного дрейфа частиц к стенкам ловушки. Далее, магнитное поле создается внутри тора с помощью намотанной на него проволоочной катушки, по которой пропускается ток. По необходимости на внутренней окружности тора витки с током располагаются ближе друг к другу, чем на внешней. Поэтому индукция магнитного поля увеличивается по направлению от внешней стенки тора к внутренней, т. е. индукция магнитного поля изменяется в направлении, перпендикулярном линиям индукции. Из-за этого возникнет градиентный дрейф частиц к стенкам ловушки.

Как видно из рисунка 35, на котором изображен разрез тороидальной ловушки, градиентный и центробежный дрейфы вызывают движение зарядов одного знака в одну сторону, а зарядов другого знака в противоположную сторону (положительные заряды дрейфуют вниз, а отрицательные — вверх), в результате чего происходит разделение зарядов: вверху образуется избыток отрицательных зарядов, а внизу — положительных. Это приводит к появлению электрического поля, которое перпендикулярно магнитному полю. А возникшее электрическое поле вызы-

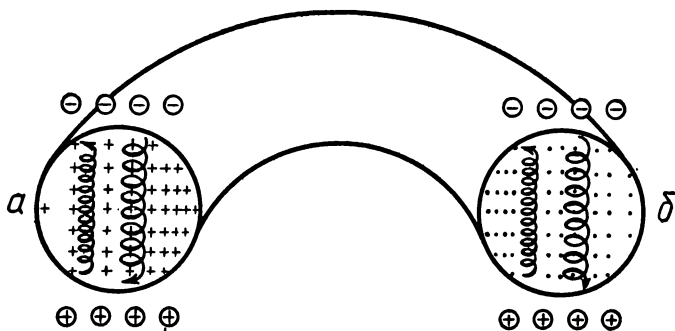


Рис. 35. Разделение зарядов в тороидальной ловушке из-за градиентного и центробежного дрейфов.

вает электрический дрейф частиц, и плазма как целое устремляется к наружной стенке и «гибнет».

Однако дрейф в тороидальной ловушке удается компенсировать, если в ней создать магнитное поле специального типа, такое, у которого линии индукции представляют собой не окружности (см. рис. 35), а винтовые линии, навивающиеся на тороидальную поверхность (рис. 36). Такое магнитное поле создают либо с помощью специальной системы катушек с током, либо путем возбуждения внутри тора кольцевого тока. Устройства первого типа носят название стеллараторов (от слова «стеллар» — звездный). Систему с кольцевым током называют токамак (от слов «токовая камера», «магнитные катушки»).

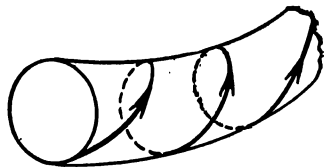


Рис. 36. Винтовая линия на тороидальной поверхности.

§ 4. МАГНИТНЫЕ «БУТЫЛКИ» И «ПРОБКИ»

Итак, чтобы плазма не ускользала через концы прямой трубы, надо ее согнуть в «бублик» и создать в ней винтовое магнитное поле. А нельзя ли в прямой трубе просто «заткнуть» ее концы какими-нибудь «пробками»? Ясно, что ни один материал для этой цели не подойдет, потому что при колоссальных плазменных температурах он мгновенно испарится. Значит, нужно подобрать невидимые, но крепкие магнитные «пробки». Такие «пробки» действительно найдены. Ловушку с магнитными «пробками» называют «пробкотроном».

Представьте себе магнитное поле с линиями индукции, напоминающими горлышко бутылки (рис. 37). Пусть Z — ось симметрии магнитного поля. Разложим вектор индукции \vec{B} магнитного поля в некоторой точке A на две составляющие: \vec{B}_{\parallel} , параллельную оси Z , и \vec{B}_{\perp} , перпендикулярную этой оси. Если положительно заряженная частица движется перпендикулярно оси Z , то под действием составляющей магнитного поля \vec{B}_{\parallel} она будет вращаться по циклотронной окружности. Но вращающийся заряд представляет собой круговой ток, на который составляющая магнитного поля \vec{B}_{\perp} действует по закону

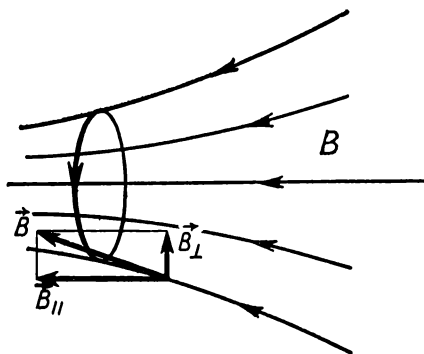


Рис. 37. Бутылкообразное магнитное поле.

Ампера с силой, направление которой можно определить по правилу правого винта (см. рис. 37). Так как в точке *A* ток направлен внутрь страницы, то сила Ампера направлена вправо, т. е. в сторону уменьшения магнитной индукции. Так же вправо направлена сила, действующая на круговой ток в любой другой точке. Таким образом, неоднородное магнитное поле стремится вы-

толкнуть циклотронный кружок в сторону ослабления поля.

Так как в магнитном поле электроны и положительные ионы обращаются в противоположные стороны и соответствующие этим движениям токи имеют одинаковые направления (движению электрона в каком-то направлении соответствует электрический ток противоположного направления), то и электронный, и ионный циклотронные кружки выталкиваются в одну и ту же сторону.

Всякий круговой ток создает вокруг себя собственное магнитное поле, направление которого определяется по правилу правого винта. Значит, и циклотронный кружок, создавая такое поле, обладает свойствами магнита, которые можно характеризовать магнитным моментом. Оказывается, что магнитный момент циклотронного кружка равен отношению поперечной кинетической энергии частицы к индукции магнитного поля:

$$M = \frac{mv_{\perp}^2}{2B},$$

где v_{\perp} — «поперечная» (по отношению к магнитному полю) составляющая скорости частицы (см. рис. 38)

$$v_{\perp} = v \sin \alpha.$$

«Продольная» составляющая скорости

$$v_{\parallel} = v \cos \alpha$$

представляет собой скорость движения заряда вдоль линий индукции магнитного поля.

Оказывается, что если неоднородность магнитного поля незначительна (см. рис. 37), то магнитный момент частицы, движущейся в таком поле, остается постоянным. Из этого вытекают интересные и очень важные выводы.

Представьте себе, что частица движется в слабо неоднородном магнитном поле в сторону увеличения его индукции. Тогда из-за того, что магнитный момент остается постоянным, «поперечная» составляющая вектора скорости v_{\perp} должна увеличиваться. Но в магнитном поле модуль полной скорости частицы v не изменяется. Поэтому должен увеличиваться угол α . Но тогда «продольная» составляющая скорости v_{\parallel} будет уменьшаться ($\cos \alpha$ уменьшается с увеличением угла α). Следовательно, когда заряженная частица движется в магнитном поле в сторону увеличения его индукции, ее поперечная скорость увеличивается, а продольная скорость v_{\parallel} уменьшается. При этом в каком-то месте магнитного поля продольная скорость v_{\parallel} может стать равной нулю. Это произойдет при $\alpha = 90^\circ$, т. е. когда $\cos \alpha = 0$. При этом $\sin \alpha = 1$ и поперечная скорость становится максимальной: $v_{\perp} = v$. Обращение продольной скорости в нуль означает, что частица перестает двигаться вдоль линий индукции магнитного поля, а только обращается по циклотронной окружности со скоростью v . Но ведь в неоднородном магнитном поле циклотронный кружок выталкивается в область, где индукция магнитного поля меньше. Таким образом, бутылкообразное магнитное поле оказывается «закупоренным» магнитной «пробкой»: частицы не могут выскочить через «горлышко» этой «бутылки». Если с обеих сторон прямой трубы создать магнитное поле бутылкообразного типа, то она будет «закупорена» магнитными «пробками». Получается магнитная ловушка заряженных частиц (пробкотрон). Магнитные «пробки» иногда называют магнитными зеркалами. От них, как от зеркала, отражаются заряженные частицы.

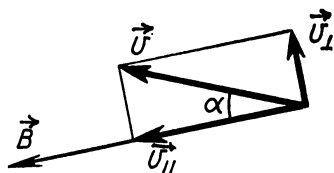


Рис. 38. Разложение вектора скорости частицы на продольную и поперечную составляющие.

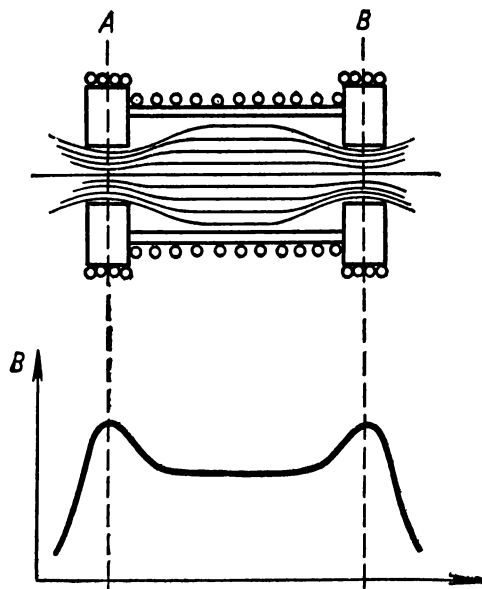


Рис. 39. Ловушка с магнитными пробками.

А как получить магнитное поле бутылкообразного типа? Вспомним, что для получения однородного магнитного поля нужно взять длинную катушку с равномерным распределением витков и пропустить по ней ток. А чтобы получить магнитное поле, какое необходимо в пробкотроне, берут катушку с неравномерным распределением витков: на концах катушки витки проволоки располагаются гуще, чем в середине. Можно также на концы длинной катушки посадить две дополнительные катушки для усиления там магнитного поля (рис. 39).

Итак, магнитное поле в пробкотроне способно удерживать заряженные частицы. Но все ли частицы оно удерживает? Ясно, что если какая-то частица имеет только продольную скорость v_{\parallel} , а поперечная скорость v_{\perp} равна нулю, то магнитные пробки ее не удержат! Она беспрепятственно покинет ловушку. Ведь на частицу, движущуюся вдоль силовых линий, магнитное поле не действует! Таким образом, магнитное поле «закупорено» неодинаково для частиц с разными направлениями скорости.

Чем больше поперечная скорость частицы по сравнению с продольной, тем лучше действуют в отношении этих частиц магнитные «пробки». Другими словами, пробочное действие магнитного поля зависит не только от структуры магнитного поля, но и от соотношения между v_{\perp} и v_{\parallel} , т. е. от угла α между скоростью частицы и направлением линий индукции поля.

Анализ показывает, что все частицы, для которых

$$\sin \alpha > \sqrt{\frac{B}{B_m}}$$

(где B_m — наибольшее значение индукции магнитного поля), хорошо «закупорены» в ловушке, а частицы, для которых

$$\sin \alpha < \sqrt{\frac{B}{B_m}},$$

могут просачиваться через магнитные пробки.

Если бы частицы не сталкивались друг с другом, то те из них, которые удовлетворяют второму из приведенных неравенств, покинули бы поле и в ловушке остались бы лишь частицы, которые она прочно удерживает. В действительности же из-за столкновений между частицами среди них со временем то и дело появляются такие, которые удовлетворяют второму неравенству. Это приводит к непрерывному (хотя и постепенному) уходу частиц из ловушки. В конце концов ловушку должны покинуть все частицы. Имеются и другие трудности удержания плазмы в пробкотроне. О некоторых из них мы расскажем дальше.

§ 5. ПЛАЗМЕННОЕ ПОКРЫВАЛО ЗЕМЛИ

С помощью первых искусственных спутников Земли было обнаружено, что вокруг Земли имеется слой (пояс), содержащий большое число заряженных частиц (см. рис. 1 на цветной вклейке). Существование этого пояса можно объяснить примерно так. Земля представляет собой гигантский магнит; в космическом пространстве вокруг нее имеется магнитное поле, линии индукции которого схематически изображены на рисунке 40. Такое поле очень похоже на поле в магнитной ловушке. Заряженные частицы космического происхождения, ле-

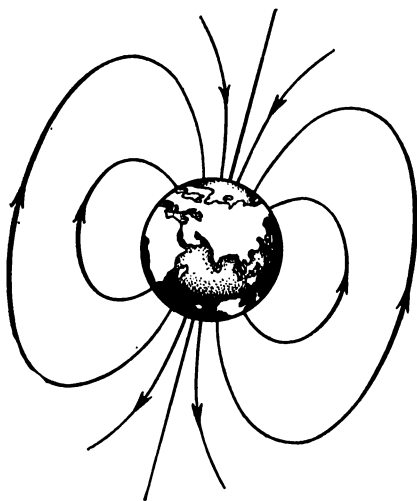


Рис. 40. Линии индукции магнитного поля Земли, рассматриваемой как магнитный диполь.

тящие к Земле, захватываются ее магнитным полем, как ловушкой, и там довольно долго удерживаются. Возможно, так и образовался этот пояс. Следовательно, магнитное поле Земли служит как бы гигантским покрывалом, оберегающим жизнь на Земле от очень вредного космического излучения. С другой стороны, радиационный пояс очень опасен для космических полетов человека.

С помощью искусственных спутников было обнаружено, что вокруг Земли имеются две зоны с повышенной интенсивностью излучения: внутренняя и внешняя. Внутренняя зона начинается на высоте 500—600 км и простирается до расстояний порядка радиуса Земли (около 6000 км). Внешняя зона в экваториальной плоскости начинается на расстоянии около 20 000 км от центра Земли и простирается до 60 000 км. Границы зон совпадают с соответствующими линиями индукции магнитного поля Земли.

Из чего состоят эти зоны? Как показали исследования, проведенные с помощью искусственных спутников, состав их различен: внутреннюю зону в основном составляют протоны с высокой энергией, а внешнюю — высокоэнергетические электроны. Заряженные частицы, двигаясь по винтовым линиям вокруг линий индукции магнитного поля Земли, совершают колебания от одного магнитного полюса Земли к другому (вблизи магнитных полюсов Земли находятся магнитные пробки). Кроме того, из-за неоднородности магнитного поля Земли частицы испытывают дрейф вокруг Земли по широте. Положительно заряженные частицы отклоняются к западу, а отрицательно заря-

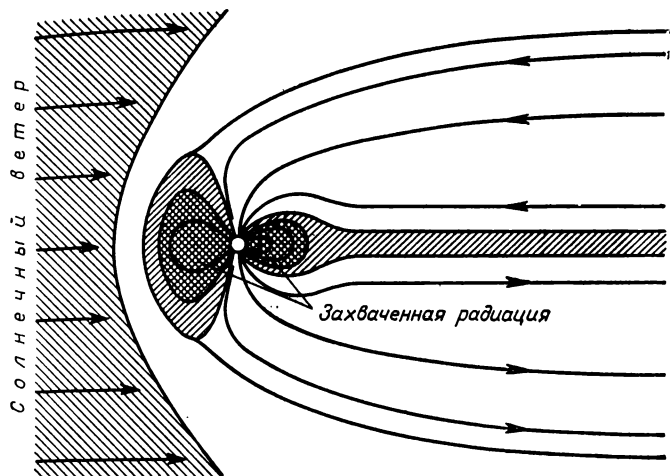


Рис. 41. Магнитосфера Земли.

женные — к востоку. Электроны с энергией 5 МэВ проходят путь между пробками за десятые доли секунды, а время их обращения вокруг Земли по широте в дрейфовом движении измеряется сотнями секунд.

До 1958 г. считалось, что магнитное поле Земли (геомагнитное поле) имеет вид, показанный на рисунке 40, т. е. считалось, что магнитное поле Земли простирается во всем пространстве и исчезает лишь на бесконечно большом расстоянии от Земли. Однако полеты спутников и космических ракет показали, что это не так. Оказалось, что геомагнитное поле изменяет свою форму под действием потока заряженных частиц, испускаемых Солнцем, так называемого «солнечного ветра». Геомагнитное поле искажается также электрическими токами, циркулирующими в радиационном поясе, и изменениями межпланетного магнитного поля. Поэтому геомагнитное поле существует лишь в определенном объеме пространства, который называется магнитосферой. Более близкая к действительности картина линий индукции магнитного поля Земли изображена на рисунке 41.

В том, что образование радиационного пояса связано именно с магнитным полем Земли, ученые еще раз убедились, когда советская космическая станция установила отсутствие радиационного пояса вокруг Луны. Ведь у Лу-

ны магнитное поле отсутствует или по крайней мере очень мало. Об этом свидетельствуют измерения, проведенные с помощью первого в мире искусственного спутника Луны — советской автоматической станции «Луна-10».

§ 6. КАК КОСМИЧЕСКИЕ ЧАСТИЦЫ УСКОРЯЮТСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

При колоссальных взрывах на Солнце из его верхних слоев вырываются потоки заряженных частиц. В межзвездном пространстве эти частицы каким-то образом ускоряются так, что, подлетая к Земле, они обладают огромной энергией. Каким образом ускоряются космические частицы? Одно из возможных объяснений механизма ускорения космических частиц было предложено выдающимся итальянским физиком Э. Ферми. Суть его состоит в следующем.

Вы помните, что постоянное магнитное поле изменяет только направление скорости движущейся частицы, а модуль скорости остается постоянным. Это означает, что кинетическая энергия частицы в постоянном магнитном поле не изменяется. Представьте себе теперь частицу, находящуюся в магнитной ловушке между «зеркалами» *A* и *B*. Такими «зеркалами» в космическом пространстве являются области с повышенной индукцией магнитного поля. Допустим, что «зеркало» *A* медленно движется навстречу «зеркалу» *B* со скоростью u . При отражении от «зеркала» *A* поперечная скорость частицы не изменяется. Это происходит из-за того, что магнитный момент постоянен и частица после отражения попадает в то же поле, в котором она была до отражения. Продольная же скорость частицы при отражении от «зеркала» *A* увеличивается на $2u$. Следовательно, если «зеркала» *A* и *B* движутся навстречу друг другу, то при каждом отражении от них продольная скорость заряженной частицы увеличивается и частица покинет ловушку, имея большую кинетическую энергию, чем в момент ее захвата ловушкой. В этом и состоит объяснение механизма ускорения заряженных частиц в космосе, предложенное Ферми. Таким образом, магнитное поле играет большую роль в процессах, происходящих в космическом пространстве.

§ 7. ДИФФУЗИЯ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Как мы видели, в постоянном и однородном магнитном поле заряженные частицы движутся по винтовым линиям. Если бы частицы не сталкивались друг с другом, то они передвигались бы вдоль линий магнитной индукции. В действительности же частицы, конечно, сталкиваются друг с другом. Такие столкновения приводят к тому, что частицы перескакивают с одной линии индукции на другую. Другими словами, из-за столкновений друг с другом частицы перемещаются поперек линий индукции. Такое явление называют поперечной диффузией плазмы в магнитном поле. Анализ показывает, что скорость поперечной диффузии частиц тем больше, чем меньше индукция магнитного поля и ниже температура плазмы. Таким образом, в сильном магнитном поле и при высоких температурах поперечная диффузия должна быть незначительной. Однако в действительности этот вывод оказывается справедливым только при очень ограниченных условиях.

Приближенная теория показывает, что основную роль в поперечной диффузии в сильно ионизованном газе играют столкновения электронов с ионами. Значение же столкновения ионов с ионами и электронов с электронами незначительно.

Так как ионы движутся в магнитном поле по окружностям большего радиуса, чем электроны, то им «легче» (чем электронам) переходить в результате соударений к вращению вокруг других линий индукции. Другими словами, ионы диффундируют поперек магнитного поля быстрее, чем электроны. Однако в плазме всегда должно быть выполнено условие квазинейтральности. Это означает, что уже при незначительном разделении положительных и отрицательных зарядов возникают сильные электростатические (кулоновские) поля, которые препятствуют дальнейшему разделению зарядов. Но при поперечной диффузии разделение зарядов происходит из-за разных скоростей диффузии электронов и ионов. Это значит, что с разделением зарядов возникающее сильное электростатическое поле препятствует образованию большой разности скоростей диффузии этих частиц. Ионы увлекают за собой электроны, а электроны, наоборот, тормозят диффузию ионов. Такая совместная диффузия разномыменно заряженных частиц называется амбиполярной.

Вспомним теперь о магнитных ловушках. Мы говорили, что в пробкотроне столкновения между частицами приводят к их уходу из ловушки. Теперь же мы узнали, что такие столкновения приводят еще и к поперечной диффузии частиц, являющейся причиной их ухода на стенки ловушки.

§ 8. О ТОМ, КАК ПЛАЗМА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПРОВОДИТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

От обычного газа, состоящего из нейтральных частиц, плазма отличается способностью хорошо проводить электрический ток.

В отсутствие магнитного поля, чем реже сталкиваются электроны с ионами, тем удельное сопротивление плазмы меньше. Если же электроны очень часто сталкиваются с ионами, то электропроводность мала.

В магнитном поле поведение плазмы резко изменяется. Ее свойства в разных направлениях оказываются различными. Действительно, если ток в плазме протекает параллельно магнитному полю, то на него магнитное поле не оказывает никакого воздействия.

Иначе обстоит дело, когда ток течет под некоторым углом к направлению линий индукции магнитного поля. В однородном магнитном поле частицы перемещаются по винтовым линиям. Если за время свободного пробега электрон успевает сделать много циклотронных оборотов (такую плазму называют замагниченной), то за это время среднее смещение электрона в направлении, перпендикулярном магнитному полю, оказывается меньшим, чем по направлению магнитного поля. Другими словами, средняя скорость электронов в направлении, перпендикулярном линиям индукции магнитного поля, меньше, чем вдоль линий индукции. Это означает, что электропроводность плазмы поперек поля меньше электропроводности вдоль поля (с увеличением скорости частиц эффективное сечение столкновений уменьшается). Таким образом, плазма в магнитном поле должна описываться двумя коэффициентами проводимости: продольной проводимостью σ_{\parallel} и поперечной проводимостью σ_{\perp} . При этом у замагниченной плазмы $\sigma_{\perp} < \sigma_{\parallel}$. Можно сказать, что плазма в магнитном поле является анизотропной¹ средой.

¹ Анизотропия какой-нибудь среды означает, что некоторые ее свойства по разным направлениям выражены неодинаково.

ПЛАЗМА КАК ЖИДКОСТЬ

§ 1. О ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ПЛАЗМЫ

До сих пор мы рассматривали свойства плазмы, исходя из поведения отдельных ее заряженных частиц. Такое описание допустимо, когда плазма сильно разрежена, т. е. когда концентрация частиц в ней мала и можно пренебречь взаимодействием между частицами, рассматривая движение каждой частицы независимо от других (модель независимых частиц). Если же концентрация частиц в плазме достаточно велика, то более правильно представлять себе плазму как сплошную среду, подобную жидкости. Но жидкость эта необыкновенная: она является очень хорошим проводником электрического тока.

Из теоретического рассмотрения следует, что проводимость плазмы близка к проводимости металлов. Поэтому на нее сильно влияет магнитное поле. Представление плазмы в виде жидкости называют гидродинамической моделью плазмы, а учение о поведении проводящей жидкости в магнитном поле называется магнитной гидродинамикой.

Полностью ионизованную плазму часто целесообразно представить в виде совокупности двух жидкостей — электронной и ионной, которые при движении проникают друг в друга.

Не полностью ионизованную плазму можно считать трехкомпонентной жидкостью, которая состоит из электронной, ионной и нейтральной жидкостей, взаимно проникающих друг в друга. При этом из-за условия квазинейтральности концентрации разноименно заряженных жидкостей должны быть одинаковы.

§ 2. ПРОВОДЯЩАЯ ЖИДКОСТЬ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Представьте себе плазменный бесконечный круговой цилиндр (рис. 42), помещенный в однородное магнитное поле. Если магнитное поле возрастает со временем, то возникает ЭДС индукции. Индукционный ток создает магнитное поле, которое в соответствии с правилом Ленца направлено против внешнего магнитного поля. Допустим, что возрастающее со временем магнитное поле направлено к нам, как это показано на рисунке 42, б. Индуцированное электрическое поле в этом случае лежит в плоскости рисунка и направлено по часовой стрелке (штриховая окружность). Индукционные токи также направлены по часовой стрелке. Они создают магнитное поле, перпендикулярное плоскости рисунка и направленное от нас. Следовательно, магнитное поле в плазме слабее, чем вне ее. Чем меньше сопротивление плазмы, тем больше индукционные токи и, следовательно, тем больше создаваемое ими магнитное поле. И наоборот, чем больше сопротивление плазмы, тем меньше индукционные токи и слабее магнитное поле, направленное противоположно внешнему магнитному полю.

Если бы сопротивление плазмы было равно нулю (идеально проводящая плазма), то в ней даже самая малая

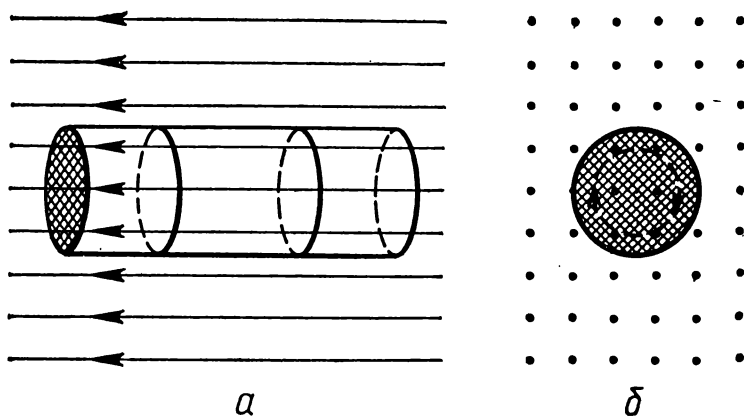


Рис. 42. Проводящий жидкий круговой цилиндр в продольном однородном магнитном поле.

ЭДС индукции должна была бы вызвать бесконечно большой индукционный ток. Но это невозможно. Следовательно, внутри идеально проводящей плазмы ЭДС индукции должна быть равна нулю. А это значит, что внешнее магнитное поле внутрь идеально проводящей плазмы не проникает. Если в идеальном проводнике имеется магнитное поле, то оно не может изменяться со временем, так как переменное поле вызывало бы бесконечно большой вихревой ток, что невозможно.

Реальная плазма, конечно, не является идеальным проводником, и магнитное поле проникает внутрь плазмы. Скорость проникновения магнитного поля в плазму определяется ее удельным сопротивлением (удельной электропроводностью).

Чем меньше электропроводность плазмы, т. е. чем больше ее сопротивление, тем быстрее магнитное поле проникает в плазму. Со временем поле проникает на все большую глубину и может занять весь объем плазмы.

Действительная картина оказывается более сложной. Ведь и плазма диффундирует поперек линий индукции магнитного поля, так что граница размывается. Другими словами, одновременно происходит взаимное проникновение плазмы в магнитное поле и магнитного поля в плазму.

§ 3. «ВМОРОЖЕННОСТЬ» МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Рассмотрим теперь движущуюся проводящую жидкость, внутри которой имеется магнитное поле. Будем считать жидкость идеально проводящей. При движении плазмы относительно магнитного поля или магнитного поля относительно плазмы в последней должна возникнуть ЭДС индукции. Но эта ЭДС вызывала бы в идеально проводящей плазме бесконечно большой ток, что невозможно. Это значит, что магнитное поле не может перемещаться относительно идеально проводящей плазмы; оно, следовательно, должно перемещаться вместе с плазмой так, как если бы оно было «приклеено» или «вморожено» в плазму.

Если жидкость расширяется, то индукция «вмороженного» в нее магнитного поля уменьшается (увеличивается расстояние между линиями индукции). Если же жидкость сжимается, то магнитное поле усиливается.

§ 4. «ОТТАИВАНИЕ» МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В действительности, конечно, сопротивление плазмы не равно нулю и магнитное поле может перемещаться относительно плазмы. Образно говоря, магнитное поле как бы «отклеивается» от вещества, «оттаивает» и просачивается сквозь вещество. Это просачивание происходит тем быстрее, чем больше сопротивление плазмы.

Таким образом, при небольшом значении сопротивления плазмы в ней происходит «борьба» между «вмороженностью» магнитного поля в вещество и его «оттаиванием». Какой эффект «победит», зависит от конкретных условий. В лабораторных условиях почти всегда просачивание поля (диффузия) преобладает над переносом поля вместе с движущимся веществом — «вмороженностью». В космических масштабах, наоборот, «вмороженность» магнитного поля преобладает над его «оттаиванием».

На явлении «вмороженности» магнитного поля в проводящие среды основана идея о создании сверхсильных магнитных полей.

Представьте себе хорошо проводящую трубку, находящуюся в магнитном поле.

Будем очень быстро сжимать эту трубку, с помощью каких-нибудь внешних сил, например с помощью взрыва пороха, окружающего трубку.

Если время сжатия трубки намного меньше времени «оттаивания» поля, можно магнитное поле считать «вмороженным» в трубку. Если B_0, S_0 — значения магнитной индукции и площади поперечного сечения трубки до сжатия, а B, S — значения этих величин после сжатия, то

$$B_0 S_0 = BS$$

(магнитный поток через сечение трубки при сжатии остается постоянным). Если при этом сечение S трубки уменьшается в k раз, то индукция магнитного поля B в k раз увеличивается. Этот принцип используется для получения очень сильных магнитных полей.

§ 5. МАГНИТНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Вернемся к идеально проводящей жидкости, занимающей объем бесконечного кругового цилиндра (рис. 43). Если вдоль цилиндра течет ток I , то он создает магнитное

поле, линии индукции которого представляют собой концентрические окружности.

Применяя правило левой руки, легко убедиться в том, что на любую линию тока в плазменном цилиндре (в том числе и на расположенные по образующим боковой поверхности) действует со стороны магнитного поля сила, направленная к оси цилиндра. Рассчитанная на единицу поверхности эта сила называется магнитным давлением. Значение магнитного давления p_m определяется формулой

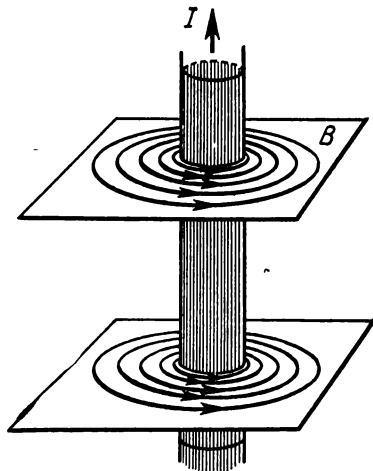


Рис. 43. Возникновение магнитного давления на жидкий проводящий цилиндр с током.

$$p_m = \frac{B^2}{2\mu},$$

где μ — магнитная проницаемость среды.

Если плазма граничит с вакуумом, то магнитное давление p_m^0 , действующее на поверхность плазмы извне, уравнивается газокинетическим давлением плазмы p и давлением магнитного поля в плазме p_m :

$$p_m^0 = p + p_m.$$

Из этого соотношения следует, что индукция магнитного поля B в плазме меньше индукции магнитного поля B_0 вне плазмы (рис. 44). Материальные среды, имеющие такое свойство, называют диамагнитными.

Диамагнетизм плазмы легко также понять на основе модели независимых частиц. Действительно, во внешнем магнитном поле электроны и ионы плазмы обращаются по циклотронным окружностям так, что создаваемые при таком обращении магнитные поля направлены против внешнего магнитного поля (рис. 45). Следовательно, магнитное поле в плазме слабее внешнего магнитного поля, т. е. плазма является диамагнетиком.

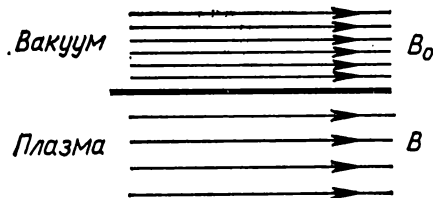


Рис. 44. Диамагнетизм плазмы.

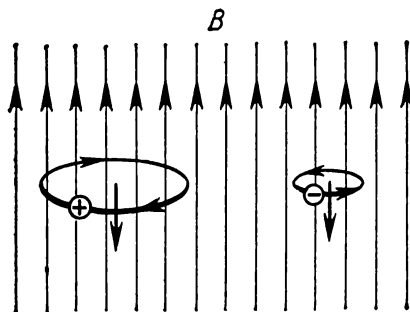


Рис. 45. Объяснение диамагнетизма плазмы на основе модели независимых частиц.

Итак, помещенная в магнитное поле плазма находится под действием магнитного давления. В связи с этим уместно поставить вопрос: может ли магнитное поле сжимать плазму подобно поршню? Для идеально проводящей среды магнитное давление, конечно, великолепный поршень. Для реальной же плазмы магнитный поршень оказывается «дырявым». Это можно объяснить следующим образом. Если плазма не обладает идеальной проводимостью, то, как мы уже знаем, плазма диффундирует поперек магнитного поля и граница плазмы размывается, становится размытой. В течение промежутков

времени, малых по сравнению со временем размытия границы, магнитный поршень еще хорошо действует на плазму. Но спустя большой промежуток времени граница плазмы становится размытой и магнитное давление практически не действует, подобно тому как не может проявиться давление газа на крупное решето.

§ 6. ПИНЧ-ЭФФЕКТ

Этот эффект состоит в том, что при пропускании через плазму быстро нарастающего тока она под действием собственного магнитного поля сжимается. Отсюда название — «пинч» (по-английски глагол to pinch означает «сжимать»). Разберем, как происходит это явление. Пусть через плазму, занимающую бесконечный круговой цилиндр, пропускают быстро возрастающий со временем ток (рис. 46). Так как сила тока увеличивается со временем,

то возрастает и индукция создаваемого этим током магнитного поля. Это значит, что увеличивается магнитный поток, пронизывающий площадку, расположенную перпендикулярно линиям индукции. Тогда в контуре, ограничивающем эту площадку, возникает ЭДС индукции (штриховые линии на рис. 46). Согласно правилу Ленца создаваемое индукционным током магнитное поле уменьшает первичное магнитное поле. В этих условиях ток протекает в основном в узком поверхностном слое плазмы — скин-слое. Этот ток создает магнитное поле, индукция которого возрастает. Увеличивающееся давление этого поля заставляет плазменный шнур сжиматься. При этом электроны и ионы плазмы, сталкиваясь с движущейся магнитной стенкой, увеличивают свою скорость в радиальном направлении. Движение кольцевого цилиндра с током под действием собственного магнитного поля продолжается, и, наконец, весь ток концентрируется вблизи оси цилиндра. В этот момент частицы плазмы приобретают огромные скорости и температура плазмы сильно возрастает — до значений порядка 10 млн. К! Дальше шнур расширяется и плазма охлаждается. Потом снова начинается сжатие и т. д. В этом и состоит проявление пинч-эффекта (рис. 47). Часто пинчем называют сам сжатый плазменный шнур. Вы много раз видели пинч, создаваемый самой природой, — это молнии. Физики научились получать разные плазменные шнуры — пинчи.

Так как при математическом анализе явлений в пинче ось Z обычно направляется по оси цилиндра, вдоль которого течет ток, то такой пинч называют еще Z -пинчем или линейным пинчем. В случае Z -пинча плазменный шнур сжимается собственным магнитным полем тока, текущего вдоль оси плазменного цилиндра (продольный ток).

Можно, однако, осуществить быстрое сжатие плазмы быстро нарастающим внешним магнитным полем, направ-

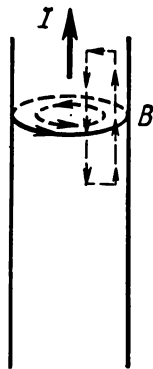


Рис. 46.
Возникновение скин-эффекта.

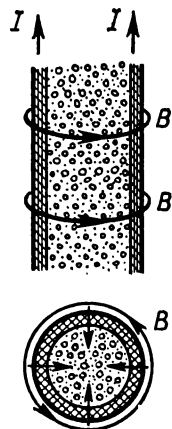


Рис. 47.
Пинч-эффект.

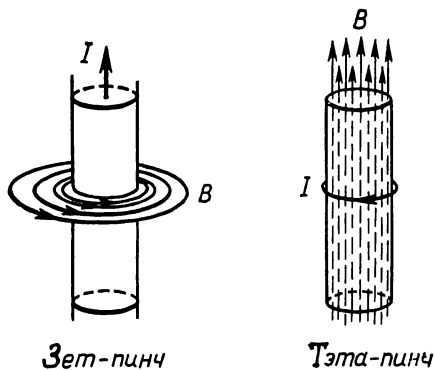


Рис. 48. Два случая самосжатия плазменных шнуров.

ленным вдоль оси плазменного цилиндра (рис. 48). В этом случае на поверхности плазменного цилиндра индуцируется вихревой ток, на который магнитное поле действует с силой, направленной к оси цилиндра. Так образуется магнитное давление, сжимающее плазму. В рассмотренном случае токи текут в плоскости, перпендикулярной оси плазменного цилиндра, т. е. в так называемой

азимутальной плоскости. Это Θ -пинч (тэта-пинч)¹.

§ 7. УСТОЙЧИВА ЛИ ПЛАЗМА

Для осуществления управляемых термоядерных реакций большое значение имеет устойчивость плазмы. Нужно, чтобы плазма хорошо удерживалась ловушкой в течение таких промежутков времени, за которые частицы плазмы успели бы вступить в реакцию. Однако на практике оказалось, что плазменные конфигурации из-за различных неустойчивостей «разваливаются» скорее, чем успевают в плазме произойти реакции между частицами. И теперь усиленно изучаются способы борьбы с неустойчивостью плазмы, ученые надеются во что бы то ни стало «укротить» «строптивую» плазму. Неустойчивость плазмы еще не означает, что ее нельзя заставить служить людям. Ведь совсем неустойчив, например, одноколесный велосипед. Но многие видели, как на таком велосипеде артисты цирка не только ездят, но и выделывают сложные трюки. Все дело в умении! Вот и исследователи плазмы изучают разнообразные свойства ее, надеясь, в конце концов, «оседлать» ее и заставить еще активнее служить людям.

¹ Название обусловлено тем, что в азимутальной плоскости направление задается углом Θ .

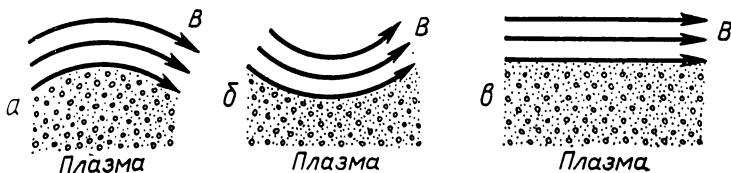


рис. 49. Равновесные конфигурации плазмы и магнитного поля:
а) неустойчивая, б) устойчивая, в) безразличная.

Представьте себе, что плазма, в которой совсем нет магнитного поля, удерживается в равновесии внешним магнитным полем. При этом возможны три случая конфигурации магнитного поля: линии индукции могут быть выпуклыми, вогнутыми или прямыми (рис. 49). Характер действия магнитного поля на проводящую жидкость (плазму) таков, как если бы это действие вызывалось стремлением линий индукции сокращаться подобно натянутым резиновым жгутам. Плазма же, как и всякий газ, стремится увеличить свой объем.

Когда магнитные линии индукции выпуклы наружу (рис. 49, а), магнитное поле не проникает в плазму. Стремлению линий индукции сократиться мешает стремление плазмы увеличить свой объем. Но если только по каким-нибудь причинам магнитное поле освобождает часть занимаемого им пространства, плазма тотчас же туда устремляется. Наоборот, место, освобождаемое плазмой, занимает магнитное поле. Магнитное поле и плазма меняются местами. Плазма как бы «раздвигает» линии индукции и просачивается через магнитное поле. Это порождает неустойчивость, которая называется перестановочной или обменной.

В случае, когда выпуклость линий индукции обращена к плазме (рис. 49, б) их стремление сократиться совершенно не препятствует плазме занять больший объем, а, наоборот, способствует этому. Такая равновесная конфигурация плазмы в магнитном поле является устойчивой.

Наконец, конфигурация плазмы, показанная на рисунке 49, в, является безразличной.

Итак, не всякая равновесная конфигурация плазмы является устойчивой. Вспомним ловушки с магнитными пробками и тороидальные магнитные ловушки. В обоих

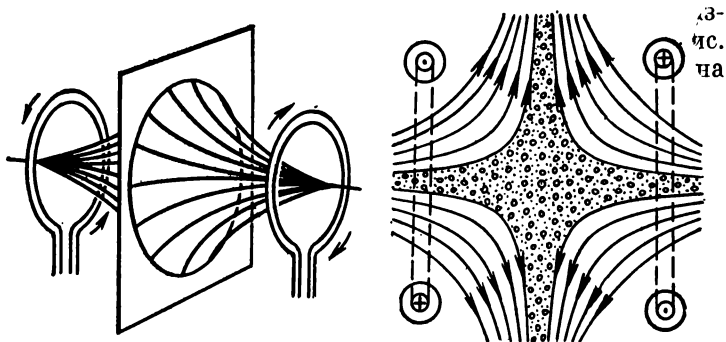


Рис. 50. Магнитная ловушка со встречными полями (антипробкотрон).

случаях можно указать такие области, в которых линии индукции магнитного поля являются выпуклыми; эти области опасны из-за обменной неустойчивости.

Как же бороться с неустойчивостью плазмы?

Перестановочной неустойчивости можно избежать, создавая магнитное поле, линии индукции которого везде выпуклы в сторону плазмы (рис. 50). Ловушки такого типа называются магнитными ловушками со встречными полями. Надо отметить, что через места «встречи» линий индукции плазменные частицы покидают и такие ловушки.

§ 8. А УСТОЙЧИВ ЛИ ПИНЧ?

Представьте себе, что по каким-нибудь случайным причинам плазменный шнур немного изогнулся (рис. 51, а). Тогда в области изгиба магнитная индукция оказывается слева (по рисунку) большей, чем справа (линии индукции слева от изгиба располагаются ближе друг к другу, чем справа). Другими словами, магнитное давление слева от изгиба больше, чем справа. Под действием этой разности давлений случайно возникший малый изгиб будет расти все больше, пока шнур не распадется. Таким образом, небольшой изгиб таит в себе «смертельную опасность» для пинча. Это неустойчивость изгиба (или, как еще говорят, неустойчивость типа «змейки»). Но она не единственная «опасность», подстерегающая

пинч. Допустим, что в каком-то месте произошло случайное сужение (перетяжка) плазменного шнура (рис. 51, б). В области сужения магнитная индукция больше, чем в других местах, и поэтому здесь плазменный шнур под действием повышенного магнитного давления продолжает сжиматься; поперечное сечение «шейки» уменьшается, пока шнур не «разорвется» (это неустойчивость типа «шейки»). Таковы лишь некоторые тяжелые «болезни», которыми страдает пинч.

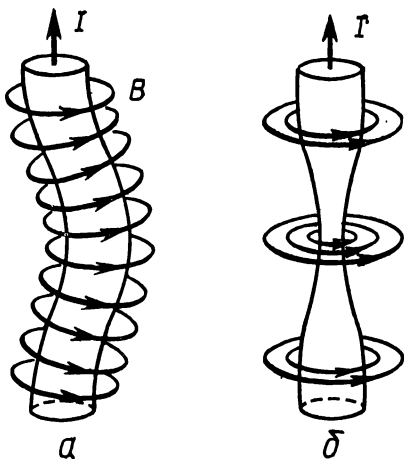


Рис. 51. Неустойчивость пинча: а) типа «змейки» (неустойчивость изгиба), б) типа «шейки» (неустойчивость перетяжки)

§ 9. КАК БОРОТЬСЯ С НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ ПИНЧА

Когда мы говорили о неустойчивостях плазмы, то считали, что внутри плазменного шнура магнитного поля нет. А что, если в нем будет магнитное поле, которое из-за высокой проводимости плазмы можно считать «вмороженным»? Рассмотрим, например, «шейку» пинча (рис. 52, а). В месте сужения шнура линии индукции магнитного поля, «вмороженного» в плазму, сгущаются. Следовательно, в этом месте внутреннее магнитное давление повышается, а это препятствует сужению пинча. Таким образом, стоит только «вморозить» в плазму магнитное поле, как мы «вылечим» шнур от неустойчивости типа «шейки»! Одновременно это же «магнитное лечение» помогает и при неустойчивости изгиба (рис. 52, б). Ведь при изгибе линии индукции «вмороженного» поля растягиваются и, стремясь затем сократиться, препятствуют изгибу плазменного шнура. Стабилизировать пинч можно также, поместив его в металлическую трубу (рис. 52, в).

В таком случае магнитное поле пинча, помещенного в металлическую трубу, «зажато» между шнуром и трубой,

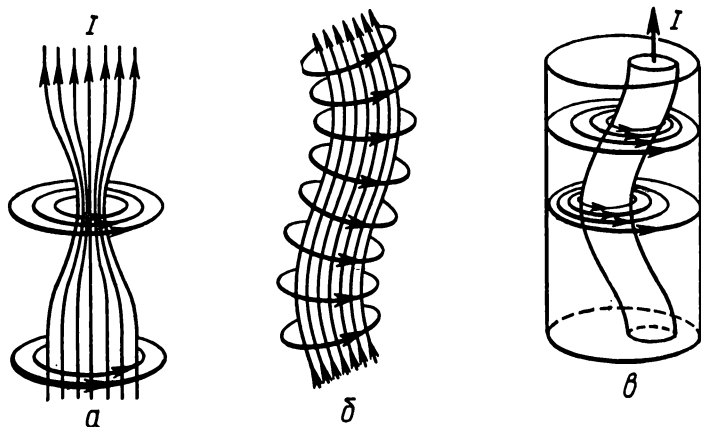


Рис. 52. Стабилизация пинча «вмороженным» магнитным полем.

Как только шнур изгибается, на стороне его выпуклости линии магнитной индукции сгущаются; здесь магнитное давление увеличивается, что должно способствовать выпрямлению пинча. Итак, казалось бы, с помощью «вмороженного» магнитного поля и металлической трубы можно получить устойчивый пинч. В действительности же проблема оказалась сложнее: из-за конечной проводимости плазмы «вмороженное» поле начинает «оттаивать»; расширяясь вследствие диффузии, оно смешивается с кольцевым магнитным полем шнура. В свою очередь кольцевое магнитное поле проникает в плазму. В результате этих процессов границы плазмы размываются. Но все-таки с помощью «вмороженного» магнитного поля и металлической трубки можно добиться устойчивости пинча в течение таких промежутков времени, которые гораздо меньше времени взаимной диффузии магнитных полей. Скорость этой диффузии сильно зависит от температуры: чем выше температура плазмы, тем медленнее протекает диффузия полей и, следовательно, тем дольше существует устойчивый пинч. При температуре около 100 млн. К устойчивый пинч должен существовать в течение нескольких секунд. Таким образом, магнитное поле хорошо «вылечивает» плазму от неустойчивостей, когда ее температура выше, чем в недрах Солнца. Но как достичь таких температур?

Оказывается, что хотя диффузия полей приводит к неустойчивости, но в самом процессе диффузии плазма очень сильно нагревается.

§ 10. ЧТО ПРОИСХОДИТ ПРИ ДИФФУЗИИ ПОЛЕЙ

В плазменном шнуре содержится как энергия плазмы, так и энергия «вмороженного» магнитного поля. Если в процессе диффузии магнитного поля энергия не сообщается плазме извне, то полная энергия шнура (сумма энергии плазмы и энергии магнитного поля) не меняется. Но, «оттаивая» при диффузии, магнитное поле расширяется и, следовательно, его индукция уменьшается. Это значит, что уменьшается энергия магнитного поля. А поскольку полная энергия шнура не изменяется, то энергия плазмы при этом увеличивается. Это значит, что она нагревается. Если бы при этом энергия плазмы терялась только на излучение, то вполне можно было бы достичь внутризвездных температур! Но в реальных условиях имеются и другие потери энергии. Поэтому получить столь высокие температуры плазмы практически не удастся.

Совершенно аналогично плазма нагревается при взаимной диффузии противоположно направленных полей. Допустим, что направление магнитного поля вне плазмы противоположно направлению поля, «вмороженного» в плазму (рис. 53). Взаимная диффузия полей приводит к тому, что поля гасят друг друга (если их индукции одинаковы по модулю) или ослабляют друг друга (если модули их индукции неодинаковы). Но с уменьшением модуля магнитной индукции уменьшается и энергия магнитного поля и, следовательно, увеличивается энергия плазмы — она нагревается. При диффузии противоположных полей с одинаковой по модулю индукцией образуется нейтральный слой, в котором магнитное давление равно нулю. Под действием магнитных давлений полей этот слой быстро сжимается и сильно повышаются плотность и температура плазмы.

Область, в которой магнитные поля взаимно погасились

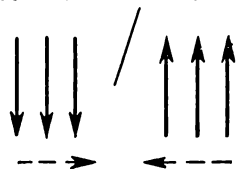


Рис. 53. Диффузия противоположных магнитных полей (горизонтальные стрелки показывают направление диффузии).

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОЛЕБАНИЯХ И ВОЛНАХ

Система может совершать колебания, если при ее отклонении из положения равновесия возникают силы, стремящиеся вернуть ее обратно в это положение. Колебательное движение характеризуется тремя величинами: амплитудой, периодом (или частотой) и фазой колебаний. Если бы в системе не было сил трения, то колебания могли бы продолжаться бесконечно долго. Но в реальных условиях всегда имеются силы трения. Поэтому колебания становятся затухающими. Чем больше силы трения, тем быстрее колебания затухают. Если на систему не действуют внешние силы, то колебания системы полностью определяются свойствами самой системы. Такие колебания называются собственными. Колебания же системы под действием внешней силы, которая периодически изменяется со временем, являются вынужденными. Если период изменения внешней силы приблизительно совпадает с периодом собственных колебаний системы, то амплитуда колебаний системы резко возрастает. Это явление резонанса. Система сильнее всего откликается на те внешние воздействия, частота которых близка к частоте собственных колебаний системы.

Колебания могут происходить и в сплошной упругой среде. Только в сплошной среде возможно бесконечное число собственных колебаний, частоты которых кратны наименьшей из них — основной частоте. Собственные колебания более высоких частот называются гармониками.

Очень часто колебания, начавшиеся в каком-то месте, распространяются в среде к другим точкам. Этот процесс распространения колебаний называют волновым процес-

сом. Если периодичность во времени описывается периодом колебаний, то периодичность в пространстве описывается длиной волны. Длина волны λ и период T связаны соотношением

$$\lambda = vT,$$

где v — скорость распространения волны.

Наряду с длиной волны λ рассматривают волновое число k , которое связано с частотой колебаний ω соотношением

$$\omega = kv.$$

Это соотношение вытекает из связи между длиной волны и периодом. Направление распространения волны характеризуется волновым вектором, равным по модулю волновому числу. Если направление распространения волны совпадает с направлением колебаний в волне, то волну называют продольной. Когда же волна распространяется перпендикулярно направлению колебаний, она называется поперечной.

Скорость распространения волн во многих случаях зависит от длины волны. Это явление называют дисперсией волн. Хорошо известна дисперсия света при его прохождении через стеклянную призму.

§ 2. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Когда в обычном нейтральном газе по каким-нибудь причинам в каком-то месте возникает уплотнение, то оно распространяется внутри газа от точки к точке. Это звуковая волна. Звуковые волны могут существовать и в плазме. Но плазма — особая среда, состоящая из одинакового количества положительных и отрицательных зарядов, и свойства ее во многом отличаются от свойств газа, состоящего из нейтральных частиц. Поэтому в плазме могут возникнуть такие колебания и волны, которых совсем нет в обычном газе. Для плазмы характерны особые колебания, которые так и называются — плазменными. Часто их называют еще электростатическими или ленгмюровскими колебаниями (по имени американского физика Ленгмюра, который первый изучал такие колебания). Значительные результаты в изучении плазменных колебаний получены советским физиком А. А. Власовым.

В чем же состоят плазменные колебания? Представьте

себе, что отрицательный заряд вышел по каким-то причинам из того положения, в котором электрические поля всех частиц взаимно скомпенсированы. Тогда возникает сильное электрическое поле, стремящееся восстановить нарушенное равновесие. Возвращаясь в положение равновесия, заряд по инерции «проскакивает» это положение, что опять приводит к возникновению сильного электрического поля и т. д. Таким образом, возникают колебания заряда. Это и есть плазменные колебания. В плазме их распространение представляет собой плазменные волны, которые, как и звуковые волны, являются продольными. Если считать, что перемещаются только электроны, а ионы неподвижны, и не учитывать тепловое движение электронов, то частота плазменных колебаний электронов определяется следующей формулой:

$$\omega_p \approx \sqrt{\frac{ne^2}{m}},$$

где n — концентрация электронов, e — заряд электрона, m — масса электрона. Частоту ω_p называют электронной плазменной частотой. Плазменная частота достаточно велика даже в плазме невысокой плотности: при концентрации частиц $n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ она равна $\omega_p = 5,6 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$.

Из приведенной формулы следует, что частота плазменных колебаний не зависит от волнового числа k . На самом же деле тепловое движение приводит к тому, что частота колебаний оказывается зависящей от волнового числа. Это дисперсия волн в плазме. Если не пренебрегать движением ионов, то в отсутствие магнитного поля возможны в плазме как колебания электронов, так и колебания ионов. Колебания электронов являются высокочастотными, а колебания ионов — низкочастотными.

Всякие колебания с течением времени затухают, и их энергия постепенно переходит в тепло. Это явление называют рассеянием энергии колебаний. В плотной плазме рассеяние энергии колебаний происходит в основном из-за столкновений между частицами, в результате которых энергия упорядоченного колебательного движения частиц переходит в энергию их беспорядочного движения. В разреженной же плазме столкновения между частицами очень редки, поэтому можно было бы ожидать, что плазменные колебания в такой плазме затухают мед-

ленно. Но оказывается, что и в разреженной плазме затухание волн весьма значительно. Но причина этого затухания уже иная. Чтобы выяснить его происхождение, рассмотрим, как осуществляется взаимодействие плазменной волны с электронами. Допустим, что в данной области плазмы произошло разделение зарядов. Тогда возникнут колебания заряда и, следовательно, электрического поля, которые будут распространяться от места их возникновения в виде продольной волны.

Если на пути волны окажется неподвижная заряженная частица, то электрическое поле волны будет действовать на нее с силой, направленной то в одну, то в другую сторону, и обмена энергией между частицей и волной не происходит. Если же частица движется в направлении распространения волны со скоростью, немного меньшей скорости волны, то частица все время находится в электрическом поле одного направления, которое и ускоряет ее движение. Энергия волны уменьшается. Если же частица движется в направлении волны, обгоняя ее, то она попадает в электрическое поле другого направления и при торможении отдает свою энергию волне. Таким образом, волна ускоряет те частицы, скорость которых несколько меньше скорости волны, и замедляет частицы, которые движутся со скоростью, немного превосходящей скорость распространения волны. В первом случае волна отдает свою энергию частицам, а во втором она от них получает энергию. Когда число медленных частиц больше числа быстрых частиц, волна отдает энергии больше, чем получает и, следовательно, затухает. Затухание это обусловлено не столкновением частиц, а взаимодействием электрических полей в плазменной волне с электронами. Это интересное явление было открыто советским физиком Л. Д. Ландау.

§ 3. МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ

Картина волнового движения в плазме сильно усложняется при наличии магнитного поля. Считая плазму жидкостью с идеальной проводимостью, допустим, что в ней линии индукции магнитного поля в каком-то месте оказались смещенными в поперечном направлении (на рисунке 54, a — штриховые линии). Тогда магнитное по-

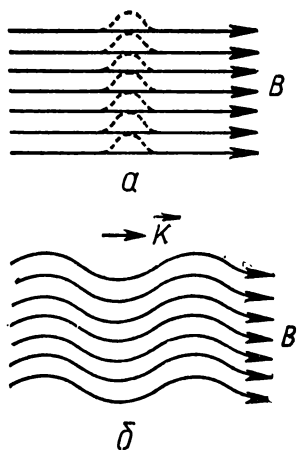


Рис. 54. Образование магнитогидродинамической волны.

больше, чем больше индукция магнитного поля и чем меньше плотность плазмы. В лабораторных условиях она обычно намного меньше скорости звука. В космических же условиях, когда плотность плазмы очень мала, эта скорость может быть большой. Магнитогидродинамические волны являются поперечными: направление колебаний в них перпендикулярно направлению распространения волны.

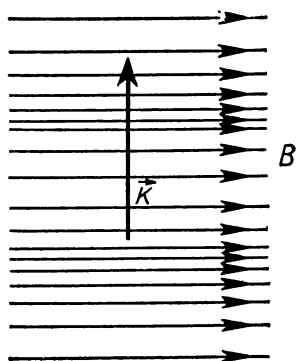


Рис. 55. Образование магнитозвуковой волны.

ле будет далее изменять свою конфигурацию таким образом, будто в линиях индукции действуют силы упругости, стремящиеся их выпрямить. Двигаясь вместе с магнитным полем (из-за его «вмороженности»), плазма по инерции «проскакивает» прямолинейное положение. Линии индукции снова оказываются искривленными. Поэтому процесс повторяется, но в обратном направлении. Таким образом, в данном месте возникают колебания, которые, распространяясь вдоль линий магнитной индукции, приводят к волновому движению (рис. 54, б). Такие волны называются магнитогидродинамическими. Скорость их распространения тем

Представим себе теперь, что линии магнитной индукции, не изменив своей прямолинейной формы, сгустились в каком-то месте. Из-за «вмороженности» поля в веществе это приведет к уплотнению плазмы в этом месте. В обычном газе распространение такого уплотнения привело бы к звуковым волнам. В плазме же распространение уплотнения связано также с распространением сгущения линий индукции «вмороженного» маг-



▲
Рис. I. Радиацион-
ный пояс Земли.



►
Рис. II. Хромосфе-
ра и корона во вре-
мя полного сол-
нечного затмения.



▲
Рис. III. Полярное сияние.



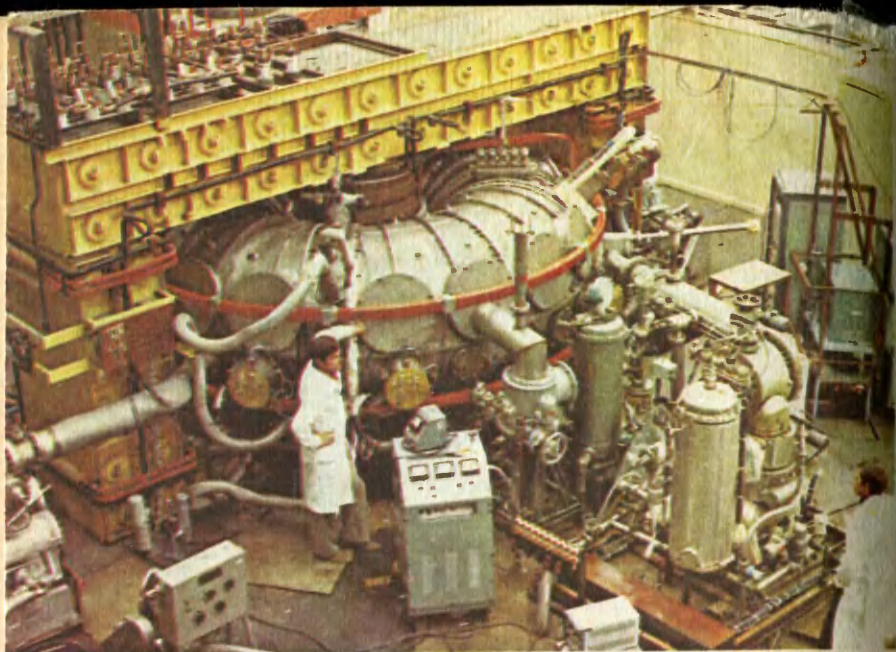
◀
Рис. IV. Светящийся след
пульсирующей шаровой
молнии.

Рис. V. Струя «холодной»
плазмы, бьющая из сопла
плазмотрона. ►



Рис. VI. Вид поверхности
Солнца. ▼





▲ Рис. VII. Токамак-7.



▲ Рис. VIII. Крабовидная туманность.

нитного поля (рис. 55). В результате образуется волна, которую называют магнитозвуковой (магнитоакустической). Она распространяется перпендикулярно направлению индукции магнитного поля и, так же как и звук, является продольной.

Рассматривая плазму как идеально проводящую жидкость и не учитывая при этом вязкость, мы тем самым пренебрегали затуханием колебаний. В реальных же условиях затухание, конечно, существует. Оказывается, что если сопротивление и вязкость проводящей жидкости малы, то магнитогидродинамическая волна затухает тем сильнее, чем больше частота колебаний и меньше индукция магнитного поля. Если же сопротивление и вязкость велики, то эта волна затухает очень быстро независимо от значения индукции магнитного поля.

§ 4. ЗАТУХАНИЕ И РАСКАЧКА КОЛЕБАНИЙ

Как уже было выяснено, затухание в плазме электростатических колебаний возможно не только из-за столкновения частиц плазмы друг с другом, но и по другой причине — из-за передачи волной своей энергии электронам и ионам. Такое затухание наблюдается в условиях, когда плазма находится в состоянии полного термодинамического равновесия. В неравновесной же плазме взаимодействие волны с заряженными частицами может привести не только к затуханию, но иногда и к раскачке колебаний. Это будет наблюдаться, когда число частиц, отбирающих энергию у плазменной волны, меньше числа частиц, отдающих ей свою энергию. Такие условия возникают, когда в плазме по каким-нибудь причинам образуется группа частиц с большой скоростью (большой энергией).

В этом случае функция распределения приобретает «горб» (рис. 56). Если скорость распространения волны соответствует точке под левым (по рисунку) склоном этого «горба», то число частиц плазмы, скорости которых немного мень-

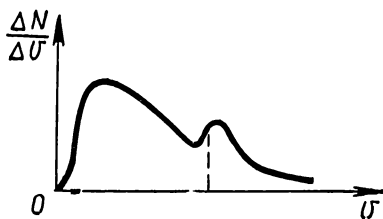


Рис. 56. «Горб» на функции распределения.

ше скорости волны, меньше числа частиц, скорости которых немного больше скорости волны. А это и есть условие раскачки! В этих условиях (при такой скорости распространения) волна не будет затухать, а, наоборот, будет усиливаться!

В реальных условиях «горб» на функции распределения возникает, когда в плазме появляются очень быстрые частицы. Это может произойти либо за счет процессов внутри самой плазмы, например вследствие явления «убегающих» электронов, либо за счет пучка быстрых заряженных частиц, пропизывающих плазму. Раскачка колебаний может также происходить из-за замечательного явления, открытого С. И. Вавиловым и П. Черенковым в 1937 г. и носящего название эффекта Вавилова — Черенкова. Эффект Вавилова — Черенкова был объяснен советскими физиками И. Е. Таммом и И. М. Франком. Это явление состоит в следующем. Когда заряженная частица летит в какой-нибудь среде равномерно со скоростью, большей фазовой скорости света в этой среде, то она возбуждает в среде световую волну (так называемое черенковское излучение). Если же скорость движения частицы в плазме немного меньше скорости света, плазма поглощает свет. За открытие и объяснение этого эффекта П. Черенков, И. Е. Тамм и И. М. Франк были удостоены Нобелевской премии.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН В ПЛАЗМЕ

§ 1. «ОТНОШЕНИЕ» ПЛАЗМЫ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЛНАМ

Рассмотрим, могут ли в плазме свободно распространяться электромагнитные волны (в частности, радиоволны), образованные каким-нибудь внешним источником (излучателем). Если скорость электромагнитных волн в вакууме равна c (скорость света), то в веществе скорость распространения этих волн определяется формулой

$$v = \frac{c}{n},$$

где n — показатель преломления среды. Для достаточно разреженной плазмы в отсутствие магнитного поля показатель преломления находится по формуле

$$n = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}},$$

где ω_p — частота электронных плазменных колебаний, ω — частота колебаний в электромагнитной волне. Зависимость показателя преломления от частоты графически изображена на рисунке 57. Если частота ω намного больше плазменной частоты, то показатель преломления очень близок к единице. С уменьшением частоты ω показатель преломления уменьшается и обращается в нуль при $\omega = \omega_p$. При $\omega < \omega_p$ электромагнитная волна вообще не может распространяться в плазме (этому случаю соответствует мнимое значение показателя преломления). Электромагнитные волны, частоты которых меньше плазменной частоты, проникают только в тонкий поверхностный слой плазмы.

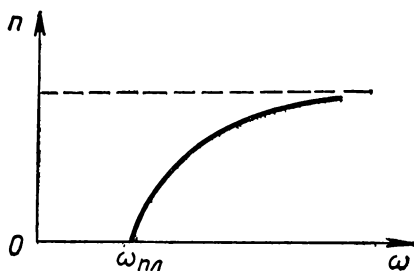


Рис. 57. Зависимость показателя преломления плазмы от частоты.

Почему же плазма так «негостеприимно» относится к волнам с частотой, меньшей плазменной. Дело в том, что в таких волнах колебания являются «медленными» ($\omega < \omega_p$). За период колебаний T заряженные частицы плазмы «успевают» распределиться таким образом, что продвижение волны становится невоз-

можным. В случае же «быстрых» колебаний ($\omega > \omega_p$) такое перераспределение не успевает произойти и волна свободно распространяется в плазме. Так как плазменная частота зависит от концентрации частиц в плазме, то может оказаться, что при одной концентрации волна распространяется в плазме, а при другой концентрации она распространяться в плазме не может. Из формулы для плазменной частоты (§ 2 предыдущей главы) видно, что при большой концентрации электронов (превосходящей некоторое предельное значение) плазменная частота ω_p столь велика, что $\omega < \omega_p$ и волна распространяться не может. Наоборот, при малой концентрации электронов (меньше предельной) волна в плазме распространяется.

Если плазма находится в магнитном поле, то картина распространения электромагнитных волн в ней усложняется. Однако в частном случае, когда в электромагнитной волне электрические колебания происходят вдоль направления внешнего магнитного поля, то волна ведет себя так же, как и в отсутствие магнитного поля.

§ 2. РАДИОСВЯЗЬ НА КОРОТКИХ ВОЛНАХ

В наше время даже маленьким детям кажется не удивительным, что с помощью радиоприемника можно слушать сообщения не только из близких городов, но и из мест, очень далеких от нас. Но не все знают, что радиосвязь между Москвой и Владивостоком, между Москвой и Гаваной оказывается возможной благодаря плазме, которая окружает нашу Землю. Верхний слой

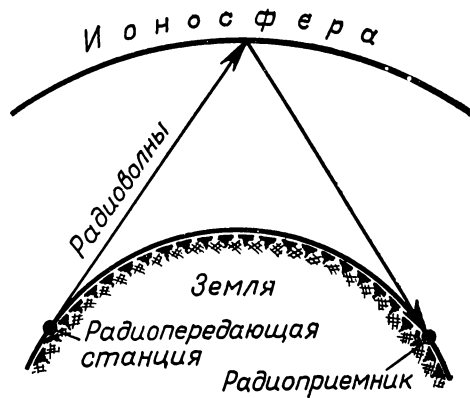


Рис. 58. Отражение радиоволны от ионосферы.

атмосферы из-за действия на него солнечного излучения ионизован, т.е. представляет собой плазму. Этот слой называется ионосферой. В настоящее время еще неясно, где кончается ионосфера и где начинается межпланетная среда. В ионосферной плазме имеются три вида частиц: нейтральные частицы, ионы и электроны. Огромное влияние на физические процессы в ионосфере оказывает магнитное поле Земли, которое собирает заряженные частицы в радиационный пояс.

Падающая на ионосферу от какой-нибудь радиостанции радиоволна может отразиться от ионосферы. Отраженная же волна может быть принята радиоприемником на очень больших расстояниях от передающей радиостанции (рис. 58).

Но отражательные свойства плазмы зависят от концентрации в ней заряженных частиц: чем больше концентрация, тем более короткие волны (волны с большей частотой) отражаются плазмой. Концентрация заряженных частиц в ионосфере на не очень больших высотах сильно изменяется в течение года и даже в течение суток. Днем из-за солнечного излучения ионосфера сильно ионизируется. Значит, концентрация заряженных частиц днем достаточно велика и ионосфера хорошо отражает короткие волны на малой высоте над поверхностью Земли. Ночью же солнечного излучения нет, частицы рекомбини-

руги друг с другом и плотность заряженных частиц в нижних слоях сильно уменьшается. Поэтому ночью волны глубоко проникают в ионосферу и отражаются от ее более высоких слоев. Короткие радиоволны могут многократно отражаться от ионосферы и поверхности Земли.

В 1946—1947 гг. радиотехника коротких волн обогатилась очень важным открытием, сделанным советским ученым Н. И. Кабановым. Он обнаружил, что наряду с прямым сигналом, идущим от радиопередатчика и принятым после отражения от ионосферы радиоприемником, можно зарегистрировать также обратный сигнал. Он образуется при рассеянии прямого сигнала неровностями Земли вблизи приемника. Рассеянный сигнал отражается от ионосферы и возвращается к передатчику. Это явление получило название эффекта Кабанова. Эффект Кабанова может быть использован для контроля за прохождением сигнала от передатчика к приемнику. Если обратного сигнала нет, то нельзя быть уверенным, что прямой сигнал достиг приемника (при связи на очень коротких волнах идущая от радиопередатчика волна могла не отразиться от ионосферы, а пройти сквозь нее).

Открытие Кабанова привело также к новому методу исследования ионосферы, так как обратный сигнал содержит в себе много ценной информации о физическом состоянии ионосферы, через которую он проходит.

С эффектом Кабанова связано возникновение коротковолновой радиолокации. Недостатком первых радиолокаторов, работавших на ультракоротких волнах (УКВ), было то, что они плохо «видели» очень удаленные предметы. Использование в радиолокаторах коротких волн привело благодаря эффекту Кабанова к значительному увеличению дальности действия радиолокационной станции. Такие станции позволяют обнаруживать межконтинентальные баллистические ракеты и ядерные взрывы. При разгоне ракеты или при ядерном взрыве образуется ионизированное облако. Это и «выдает» их. Электромагнитный сигнал, отраженный от такого облака, позволяет обнаружить взлетающую ракету или ядерный взрыв.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПЛАЗМЕ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

§ 1. НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ. СОЛИТОНЫ

Рассмотренные в восьмой главе ленгмюровские, магнитозвуковые, магнитогидродинамические волны связаны с небольшими отклонениями параметров плазмы от их равновесных (стационарных) значений. В таком случае волны называют линейными. Несколько линейных волн могут распространяться в одном и том же объеме плазмы независимо одна от другой (принцип суперпозиций). Если же отклонения параметров являются достаточно большими, то возникают гораздо более сложные волновые движения, которые называют нелинейными.

Оказывается, что характер волновых процессов существенно зависит от того, обладает среда дисперсией или нет. Напомним, что под дисперсией понимают зависимость фазовой скорости волны от ее частоты (или длины волны). Если фазовая скорость волны не зависит от частоты колебаний, то среда называется недиспергирующей. В недиспергирующих средах при распространении в них гармонического возмущения (например, синусоидального) с конечной амплитудой происходит «генерация» высших гармоник, т. е. волн с удвоенным, утроенным и т. д. волновым числом. В отсутствие дисперсии все эти волны распространяются с одинаковой скоростью и могут длительное время взаимодействовать друг с другом. Поэтому возможна сильная перекачка энергии от одних гармоник к другим. В результате этого начальное синусоидальное возмущение (штриховая линия на рисунке 59) деформируется таким образом, что его профиль становится более крутым (сплошная линия на рисунке 59), и в последующем происходит опрокидывание волны (рис. 60).

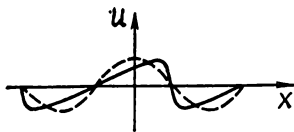


Рис. 59. Укрупнение
профиля волны.

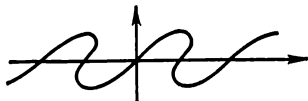


Рис. 60. Опрокидывание
волны.



Рис. 61. Гармоническая
волна.

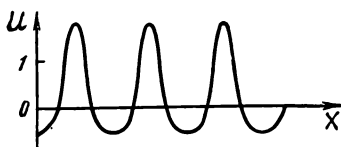


Рис. 62. Слабо нелинейная
волна.

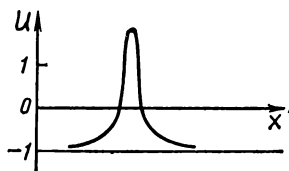


Рис. 63. Солитон.

В диспергирующих средах картина существенно изменяется. В этом случае фазовая скорость волн с различными волновыми числами неодинакова и гармоники, порожденные нелинейными эффектами при распространении волны конечной амплитуды, будут распространяться с различными скоростями. Поэтому еще до опрокидывания волна может «расползтись» на отдельные, как говорят, волновые пакеты.

Характер нелинейного волнового процесса в диспергирующей среде существенно зависит от амплитуды волны. При малой амплитуде волна является гармонической (изменяющейся по закону синуса или косинуса). Это линейная волна (рис. 61). С увеличением амплитуды волна остается периодической, но в ней уже обнаруживается влияние нелинейных эффектов (рис. 62). Наконец, когда амплитуда достигает некоторого предельного значения, возникает так называемая уединенная волна, или солитон (рис. 63).

Образование солитона связано с уравниванием нелинейности и дисперсии: из-за нелинейности волновой импульс должен опрокинуться, но вследствие дисперсии высшие гармоники отстают от основной и в результате сохраняется во времени постоян-

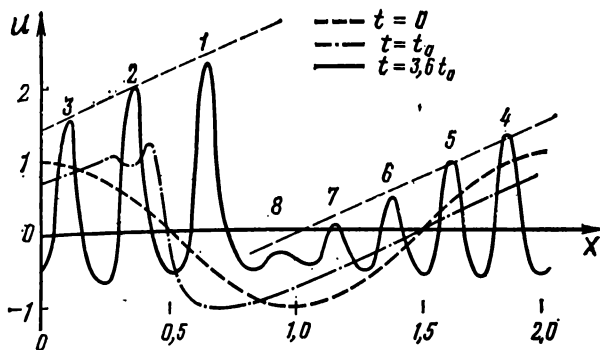


Рис. 64. Эволюция гармонического возмущения.

ный профиль солитона. При этом оказывается, что ширина солитона связана с его амплитудой: чем больше амплитуда солитона, тем меньше его ширина (тем он уже). В некоторых случаях нелинейность проявляется очень сильно. Тогда она не останавливается дисперсией и происходит опрокидывание волны. Такие опрокидывающиеся волны можно наблюдать на море.

Если в среде в начальный момент времени имеется возмущение в виде импульса с большими амплитудой и шириной, то оказывается, что по прошествии достаточно большого промежутка времени этот импульс распадается на совокупность солитонов с уменьшающейся амплитудой. На солитоны распадается также начальное синусоидальное возмущение большой амплитуды (на рисунке 64 — штриховая линия). Сначала деформация возмущения происходит под влиянием нелинейных эффектов: профиль возмущения увеличивает свою крутизну и приближается к опрокидыванию (штрих-пунктирная линия на рисунке 64). Но перед опрокидыванием начинает проявляться дисперсия (на гребнях волн возникают осцилляции). Тогда от переднего фронта волны отделяется первый солитон. Затем к фронту набегает волна слева и образуется второй солитон. Этот процесс продолжается до тех пор, пока волна не распадается на совокупность солитонов (сплошная линия на рисунке 64). Были изучены также процессы нелинейного взаимодействия солитонов друг с другом.

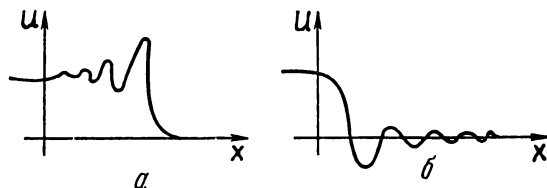


Рис. 65. Скачок с осциллирующей структурой.

Рассказывая о волновых движениях, мы молчаливо предполагали, что затухание волн, вызванное, например, вязкостью среды, отсутствует. Оказывается, что из-за затухания появляется возможность распространения ударной волны — скачка с осциллирующей структурой (рис. 65).

Особенности различных профилей ударных волн определяются характером дисперсии среды. Заметим, что при достаточно большом затухании осциллирующий «хвост» ударной волны сглаживается.

§ 2. САМОФОКУСИРОВКА И САМОСЖАТИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ВОЛНЫ

Явление самофокусировки было предсказано советским физиком Г. Аскарьяном. Рассмотрим, в чем оно состоит. Пусть в некоторой среде распространяется мощный луч лазера, имеющий определенную ширину. По оси пучка вследствие нелинейных эффектов увеличивается показатель преломления среды. Поэтому пучок сжимается, концентрируясь вблизи оси.

В сужении пучка по мере его распространения и состоит самофокусировка (сжатие волны в поперечном направлении).

Помимо поперечного сжатия, может происходить также и продольное сжатие волны. Допустим, что амплитуда рассматриваемой волны невелика. В этом случае нелинейные эффекты незначительны и волна мало отличается от синусоидальной. Нелинейность проявляется лишь в том, что фазовая скорость оказывается зависящей от энергии волны (квадрата ее амплитуды). Если амплитуда и волновое число волны изменяются (модулируются) по гармоническому закону (рис. 66), то при некоторых

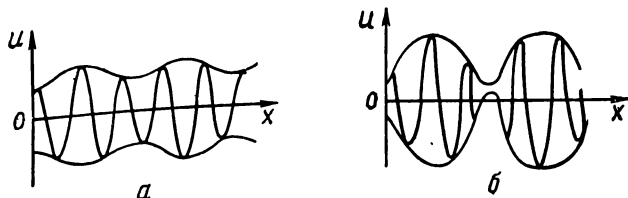


Рис. 66. Модуляционная неустойчивость.

условиях уровень сигнала на участках с минимумом амплитуды убывает со временем, а участки с максимумом амплитуды возрастают. Происходит разбиение волны на отдельные волновые пакеты и их самосжатие в продольном направлении (рис. 66, б). Такое явление называют модуляционной неустойчивостью нелинейной волны. Впервые примеры модуляционной неустойчивости рассмотрели советские физики Р. З. Сагдеев и Т. Ф. Волков.

Самофокусировка и модуляционная неустойчивость представляют собой примеры общего, так называемого нелинейного взаимодействия *волна — волна*. В простейшем случае в таком процессе участвуют три волны с частотами $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ и волновыми векторами $\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3$, которые удовлетворяют условиям резонанса:

$$\omega_1 = \omega_2 \pm \omega_3, \quad k_1 = k_2 \pm k_3.$$

Эти условия соответствуют распаду волны (ω_1, k_1) на две другие или слиянию двух волн в одну.

Одним из своеобразных свойств плазмы является возможность существования в ней волн с отрицательной энергией. На это впервые обратили внимание Б. Б. Кадомцев, А. Б. Михайловский, А. В. Тимофеев. Термин «отрицательная энергия» означает, что полная энергия среды (кинетическая и электромагнитная) уменьшается с ростом амплитуды волны. Такие волны возможны в плазме, не находящейся в состоянии термодинамического равновесия вследствие ее неизотермичности или неоднородности.

Оказывается, что если волна с отрицательной энергией отдает энергию волне с положительной энергией, то амплитуды обеих волн нарастают до бесконечно больших значений за конечный промежуток времени. Это явление называют взрывной неустойчивостью.

§ 3. КВАЗИЛИНЕЙНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛНА — ЧАСТИЦА

Заряженная частица в плазме сильно взаимодействует с волной, если выполняется условие резонанса: скорость частицы равна (или близка) скорости волны. Тогда, как уже говорилось в главе 8, в плазме, находящейся в состоянии термодинамического равновесия, происходит затухание волны (затухание Ландау), а в термодинамически неравновесной плазме волна усиливается. Однако анализ нелинейного движения частицы в электрическом поле волны показывает, что затухание (или нарастание) амплитуды волны не может происходить бесконечно долго: по истечении некоторого промежутка времени амплитуда волны перестает изменяться (увеличиваться или уменьшаться).

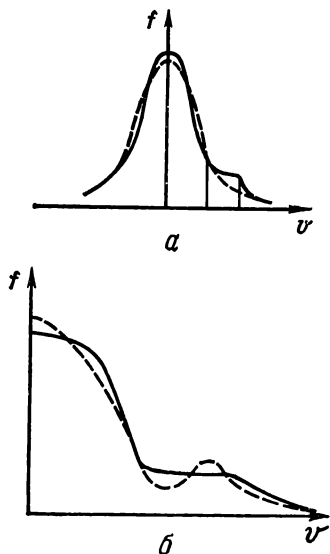


Рис. 67. Образование плато на функции распределения: а) в случае затухания волны, б) в случае усиления волны. (Штриховой линией изображена функция распределения в начальный момент времени, а сплошной — функция распределения через достаточно большой промежуток времени.)

При этом претерпевает изменение и функция распределения частиц по скоростям: ведь если амплитуда волны не изменяется, то это значит, что число частиц, немного обгоняющих волну, в точности равно числу частиц, немного отстающих от волны. Тогда на функции распределения частиц по скоростям образуется «плато» (рис. 67) на малом интервале скоростей вблизи скорости волны (как в случае затухания волны, так и в случае ее усиления). Это изменение в характере функции распределения называют квазилинейной диффузией.

Одно из своеобразных свойств плазмы заключается в том, что в ней могут сами собой возбуждаться различные колебания. Если этих колебаний в плазме очень много и они становятся нерегулярными, хаотическими, то говорят о турбулентном состоянии плазмы. Обычно турбулентность возникает в результате развития в плазме неустойчивости. В этом случае в плазме возбуждается много различных волновых движений, сильно взаимодействующих между собой и оказывающих влияние на макроскопические свойства плазмы (на ее диффузию, теплопроводность, электрическое сопротивление и т. д.).

Самым простым примером турбулентного состояния плазмы служит возбуждение ленгмюровских колебаний электронным пучком, проходящим через плазму. В этом случае функция распределения имеет «горб на хвосте» (рис. 67, б — штриховые линии). Если энергия колебаний, возникающих вследствие неустойчивости на левом склоне «горба», мала, то можно считать, что отдельные колебания почти не взаимодействуют друг с другом, но каждая из них воздействует на плазму: на функции распределения частиц по скоростям образуется плато. Вследствие этого дальнейшее нарастание колебаний прекращается. Такое квазилинейное приближение в описании неустойчивостей в плазме было рассмотрено советскими физиками А. А. Веденовым, Е. П. Велиховым, Р. З. Сагдеевым и американскими — Драммондом и Пайнсом.

Помимо резонансного взаимодействия волна — частица, приводящего к затуханию Ландау, в плазме возможно еще явление так называемого нелинейного затухания Ландау. Оно определяется резонансным взаимодействием частицы с двумя волнами (их биениями). Под биениями двух волн понимают волну, частота и волновой вектор которой определяются разностью (или суммой) частот и волновых векторов исходных волн. Это явление становится существенным, если число частиц, резонансно взаимодействующих с одной волной, гораздо меньше числа частиц, попавших в резонанс с биением. В результате такого взаимодействия в плазме развивается ленгмюровская и ионно-звуковая турбулентность.

Под ленгмюровской турбулентностью понимают электронные ленгмюровские колебания, принимающие со вре-

менем нерегулярный характер. Такие колебания возбуждаются при прохождении через плазму электронных пучков или при взаимодействии с неоднородной плазмой лазерного излучения.

Ионно-звуковая турбулентность связана с возбуждением колебаний с частотами вблизи ионной плазменной частоты при протекании очень сильного электрического тока через разреженную плазму. При этом часто наблюдается резкое увеличение сопротивления плазмы, которое становится значительно превышающим сопротивление, определяемое кулоновскими столкновениями заряженных частиц друг с другом. Такое явление аномального сопротивления плазмы используется для ее быстрого нагрева.

В заключение отметим, что турбулентность существенно отличается от молекулярного движения, так как турбулентность — это нерегулярное движение некоторого макроскопического объема жидкости (или плазмы), содержащего большое число макрочастиц.

ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ

§ 1. «РАДУЖНЫЙ НАРЯД» ПЛАЗМЫ

Плазма, нагретая до достаточно высокой температуры, оказывается очень мощным источником излучения. Основной причиной испускания плазмой лучистой энергии являются различные виды столкновений между ее частицами. При всяком изменении скорости движения заряженные частицы излучают электромагнитные волны.

Процессы излучения играют важную роль в поведении и свойствах плазмы. Так, в образовании плазмы очень важны процессы фотоионизации: фотоны разбивают нейтральные атомы на электроны и ионы. Излучение же уносит часть энергии плазмы.

Газовые разряды излучают электромагнитные волны в диапазоне от инфракрасного излучения с длиной волны в несколько сот микронов до крайне жесткого ультрафиолетового излучения. Северное сияние, молнии, свечение световых реклам на улицах большого города — все это излучение газоразрядной плазмы.

Высокотемпературная плазма испускает, кроме ультрафиолетовых лучей, также и рентгеновские лучи.

Все перечисленные типы излучений плазмы имеют одинаковую природу и отличаются друг от друга только по частоте или длине волны. По существу излучение плазмы, как отметил профессор В. А. Фабрикант, представляет собой рождение в недрах вещества новых частиц — фотонов.

Какие же процессы в плазме приводят к рождению фотонов?

По характеру механизма испускания лучистой энергии плазмой различают три типа излучения: дискретное (линейчатое), рекомбинационное и тормозное.

Излучение возбужденных атомов и ионов плазмы. Спектр излучения возбужденных атомов и ионов является линейчатым. Он состоит из ряда линий, которые соответствуют различным состояниям возбужденных атомов и ионов плазмы. Каждая из спектральных линий возникает в результате перехода электронов в атоме с одного энергетического уровня на другой уровень энергии. С возрастанием температуры электронного газа в плазме спектр линейчатого излучения плазмы испытывает изменения. При низкой электронной температуре плазмы нейтральные атомы, имеющиеся в плазме, либо остаются нейтральными, либо теряют внешний, слабо связанный с ядром электрон. Таким образом, появляются однозарядные ионы. С повышением электронной температуры T_e начинается отрыв от электронной оболочки атомов более прочно связанных с ядром электронов. Это приводит к увеличению среднего значения заряда положительных ионов. Вместе с тем растет и энергия возбуждения ионов. В результате наблюдается сдвиг линейчатого спектра в сторону ультрафиолетовых и рентгеновских лучей. Испускание электромагнитного излучения возбужденными атомами и ионами плазмы при не очень высокой электронной температуре T_e является одной из главных причин утечки энергии из плазмы.

Появление даже небольшой примеси, загрязняющей плазму, резко увеличивает потери энергии на излучение. Так, если к водородной плазме при температуре электронов 10^5 К и их концентрации 10^{19} м^{-3} добавить в качестве примеси кислород (на 100 атомов водорода один атом кислорода), то общая интенсивность излучения плазмы возрастет примерно в 10 000 раз.

Рекомбинационное излучение. Рекомбинационное излучение испускается при захвате электрона ионом. В процессе захвата освобождается энергия, равная сумме кинетической энергии свободного электрона и той энергии, которая была затрачена на отрыв электрона при ионизации. Например, если электрон захватывается протоном, то в результате образуется атом водорода. Освобождаемая при этом энергия, составляющая 13,6 эВ, уносится фотоном.

Так как свободные электроны имеют непрерывно меняющиеся значения энергии, то излучаемые в процессе рекомбинации фотоны образуют сплошной спектр. На

этот спектр накладывается линейчатый спектр возбужденных атомов.

Тормозное излучение. При движении свободного электрона в электрическом поле положительного иона происходит изменение модуля и направления его скорости. Резкое изменение скорости заряженной частицы приводит к возникновению электромагнитного излучения. Энергия этого излучения заимствуется из кинетической энергии заряженной частицы. Это означает, что в результате столкновения электрона с тяжелым ионом электрон может потерять часть своей энергии, которая переходит в энергию кванта света — фотона. При этом электрон остается свободным. Излучение, испускаемое при таком столкновении электрона с атомом или тяжелым положительным ионом, называется тормозным излучением.

При очень высокой температуре тормозное излучение является важным источником потерь энергии плазмой. В плазме с электронной температурой $T_e = 1000$ К тормозное излучение будет в основном принадлежать к инфракрасной и видимой частям спектра. При электронной температуре $T_e \cdot 10^7$ К главная доля излучения плазмы приходится на область рентгеновских лучей.

Остановимся теперь несколько подробнее на механизме тормозного излучения плазмы. Энергия испускаемого фотона $h\nu$ может составлять любую долю кинетической энергии, которую имеет электрон до столкновения. Наибольшая возможная энергия фотона $h\nu$ равна кинетической энергии сталкивающегося электрона W_k . Появление такого фотона должно означать, что вся кинетическая энергия W_k быстрого электрона перешла в энергию электромагнитного излучения. Излучение, возникающее при торможении электронов, образует сплошной спектр. Оно содержит непрерывный набор частот от нуля до $\frac{W_k}{h}$.

Общая интенсивность тормозного излучения плазмы пропорциональна числу соударений между электронами и ионами за 1 с, т.е. произведению концентраций электронов и ионов. Интенсивность излучения сильно зависит еще от заряда ионов. Доля числа столкновений электронов с ионами, при которых возникают фотоны, должна быть тем больше, чем сильнее на электрон действует электрическое поле иона.

Пусть удалось, например, создать водородную плазму с электронной температурой в 10^8K и концентрацией электронов, равной 10^{19}м^{-3} . Мощность рентгеновского излучения каждого литра такой плазмы составляет около 150 кВт. Это излучение эквивалентно суммарной мощности нескольких тысяч одновременно работающих рентгеновских трубок. Еще большей будет мощность рентгеновского излучения при той же концентрации и той же электронной температуре, если плазма будет содержать атомы тяжелых элементов.

Тормозное излучение в отличие от излучения при рекомбинации оказывается тем более интенсивным, чем выше энергия электронов. Следовательно, оно усиливается с повышением электронной температуры. Рекомбинационное излучение превышает по интенсивности тормозное излучение плазмы до температур порядка 10^7K . Но в более горячей плазме основным видом излучения является тормозное излучение.

При повышении температуры плазмы возрастает значение непрерывного спектра излучения (сначала рекомбинационного, а при достижении достаточно высоких температур — сплошного спектра тормозного излучения). При достижении полной ионизации плазмы (отрыв всех электронов от ядер во всех атомах) дискретные линии в спектре излучения плазмы должны полностью исчезнуть. Это проще всего осуществить в водородной плазме, так как у каждого атома водорода имеется лишь по одному электрону.

Примеси заметно увеличивают потери энергии плазмы на излучение. Даже при очень высоких температурах присутствие в плазме атомов тяжелых элементов приводит к тому, что в ней остаются многоразрядные ионы с сохранившимися внутренними электронными оболочками. Эти ионы излучают очень много энергии в области жестких ультрафиолетовых лучей. Например, предположим, что к дейтериевой плазме добавлены в качестве примеси всего лишь «голые» ядра кислорода, плотность которых составляет 3% от плотности дейтонов. Тогда тормозное излучение увеличивается в 3,6 раза. Для предотвращения столь больших потерь энергии необходимо при получении высокотемпературной плазмы удерживать последнюю вдали от стенок трубки. В противном случае заряженные плазменные частицы выбивали бы из стенок

тяжелые атомы, которые попадали бы в плазму; вследствие их возбуждения происходило бы испускание очень мощного потока энергии. А это привело бы к дальнейшему испарению материала трубки. Таким образом, с одной стороны, происходило бы охлаждение плазмы, а с другой — все большее насыщение плазмы загрязняющими примесями тяжелых атомов. По мере загрязнения плазмы атомами тяжелых элементов резко возрастает излучение за счет рекомбинации и тормозное излучение.

§ 2. БЕТАТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ

Если плазма находится в магнитном поле, то возникают совершенно новые типы ее излучения. Под действием магнитного поля электроны совершают круговое движение в плоскостях, перпендикулярных магнитной индукции. Это движение, как и всякое ускоренное движение заряженной частицы, приводит к появлению излучения. Интенсивность этого излучения для отдельного электрона пропорциональна индукции магнитного поля и зависит от скорости циклотронного вращения электрона. Рассматриваемый тип излучения обычно называют бетатронным, поскольку оно наблюдается в ускорителях заряженных частиц — бетатронах. Бетатронное излучение оказывается существенным в технике ускорителей, где электроны разгоняются до высоких энергий. Энергия, которая затрачивается на разгон электронов, в основном расходуется на то, чтобы компенсировать потери энергии на это излучение.

Спектр бетатронного излучения линейчатый. Основная частота соответствует частоте обращения электрона по циклотронной орбите вокруг линий индукции. Имеются также частоты, кратные основной частоте. Доля этих дополнительных частот в общей интенсивности излучения возрастает с увеличением энергии электронов. Бетатронное излучение в основном относится к области высоких радиочастот (диапазон сантиметровых и миллиметровых волн).

Излучение, испускаемое плазмой, складывается из излучения отдельных электронов. Общая интенсивность бетатронного излучения единицы объема плазмы пропорциональна концентрации электронов n_e . Длинноволновое излучение основной частоты и ее первых гармоник очень

сильно поглощается самой плазмой. Поэтому общий поток лучистой энергии, выходящей через поверхность плазмы наружу, составляет лишь малую долю той энергии, которая генерируется в объеме плазмы. Это имеет место при температуре, превышающей 10^7K .

В такой горячей плазме должны быть электроны, скорость движения которых уже нельзя считать пренебрежимо малой в сравнении со скоростью света в пустоте. Столь быстрые электроны называют релятивистскими. До релятивистских скоростей электроны разгоняются в ускорителе, называемом синхротроном. По этой причине тормозное излучение релятивистских электронов, возникающее в магнитном поле, иногда называют синхротронным излучением. Радиоизлучение, приходящее на Землю из межзвездного пространства, также представляет собой излучение релятивистских электронов. Преобладающим в космическом радиоизлучении является синхротронное излучение газовых туманностей. Астрофизикам хорошо известно радиоизлучение указанного типа, приходящее к Земле от знаменитой Крабовидной туманности (см. рис. VIII на цветной вклейке). Эта туманность осталась после взрыва звезды, зарегистрированного в 1054 г.

Если бы удалось получить полностью ионизированную горячую плазму, в которой нет многозарядных ионов, то потери энергии были бы у нее связаны только с синхротронным излучением. Однако возможности дальнейшего повышения температуры плазмы ограничены именно быстрым возрастанием потерь энергии на бетатронное излучение. Дело в том, что при очень высокой температуре плазмы (более 10^8K) возрастает доля энергии, соответствующая коротковолновому бетатронному излучению. Поэтому бетатронное излучение может оказаться значительным препятствием на пути получения высокотемпературной плазмы.

§ 3. ИЗЛУЧЕНИЕ АБСОЛЮТНО ЧЕРНОГО ТЕЛА

Тело, поверхность которого поглощает все падающие на него лучи независимо от их частоты, называется абсолютно черным. Моделью абсолютно черного тела может служить полость внутри замкнутой оболочки, имеющей постоянную температуру T . Внутри такой оболочки излучение находится в равновесии со средой. Это означает,

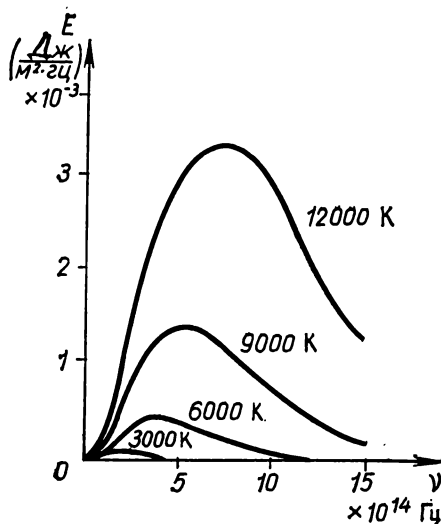


Рис. 68. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела при разных температурах.

что любой участок внутренней поверхности оболочки абсолютно черного тела излучает на каждой длине волны в точности столько же энергии, сколько он ее поглощает. Теория и опыт показывают, что полная интенсивность излучения абсолютно черного тела возрастает пропорционально четвертой степени абсолютной температуры тела. Это закон Стефана — Больцмана для полной интенсивности излучения черного тела. Распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела показано на рисунке 68. По оси абсцисс отложены частоты световых колебаний ν , а по оси ординат — энергия излучения в единичном интервале частот с 1 м^2 поверхности черного тела.

Длина волны λ_m , при которой интенсивность испускаемого излучения достигает своего максимального значения, соответствует так называемому закону смещения Вина:

$$\lambda_m T = 0,289715 \text{ м} \cdot \text{К}.$$

С увеличением температуры максимальная интенсивность излучения перемещается в область все более высоких

частот. Так, при температурах от 7500 до 15 000 К максимум интенсивности излучения находится в области видимого света. При температуре в несколько десятков тысяч кельвинов абсолютно черное тело наиболее интенсивно излучает ультрафиолетовые лучи с длиной волны около 0,1 мкм. Дальнейшее повышение температуры в конце концов приведет к тому, что черное тело превратится в сверхмощный источник рентгеновских лучей.

§ 4. ПРОЗРАЧНОСТЬ И НЕПРОЗРАЧНОСТЬ ПЛАЗМЫ

Известно, что всякое тело тем сильнее поглощает излучение, чем в большей степени оно способно к испусканию излучения той же частоты. Для каждого дискретного или линейчатого спектра испускания имеется обратный процесс дискретного поглощения излучения, соответствующего тем же линиям. Процессом, обратным испусканию света при рекомбинации, служит поглощение света в результате производимой им ионизации атомов. Как уже отмечалось выше, этот процесс носит название фотоэффекта или фотопоглощения. Тормозному испусканию света плазмой отвечает обратный процесс тормозного поглощения света.

При не слишком большой концентрации электронов плазма способна сильно поглощать только радиоволны, имеющие сравнительно большие длины волн. Для видимого и ультрафиолетового излучения такая плазма оказывается, напротив, почти совершенно прозрачной.

Перенос энергии излучения через плазму, а также образование линий поглощения или линий испускания в ее спектрах происходят в результате взаимодействия ионизованного вещества с излучением. Пучок света, проходя через поглощающую среду, испытывает ослабление интенсивности, которое зависит от толщины слоя, пройденного пучком, плотности вещества и от коэффициента поглощения излучения данной частоты. Энергия света, поглощенного плазмой, воспринимается электронами, которые способны вновь испускать излучение, но уже в другом направлении. Такое поглощение света с последующим испусканием называется переизлучением. Оно эквивалентно рассеянию света и приводит к диффузии излучения в плазме. Чем больше коэффициент погло-

щения плазмы, тем медленнее происходит в ней диффузия излучения. Поглощение света очень сильно зависит от частоты колебаний, в то время как истинное рассеяние практически от частоты не зависит. Поглощение и рассеяние света совместно характеризуются специальной величиной, носящей название непрозрачности плазмы. Проведение же непрозрачности плазмы на геометрическую толщину слоя называется оптической толщиной. Чем больше оптическая толщина, тем большее количество энергии излучения поглощает слой плазмы. Поэтому слой плазмы достаточной оптической толщины вообще непрозрачен для излучения. Излучение может выходить из такого слоя лишь в результате медленного процесса многократного переизлучения и рассеяния. Излучение такого типа называют запертым. Оно находится в тепловом равновесии с веществом.

Слой плазмы малой оптической толщины прозрачен для излучения. Излучение из такого слоя может свободно выходить.

Непрозрачность плазмы зависит от ее плотности. Чем больше плотность плазмы, тем больше ее непрозрачность. В плотной плазме даже очень тонкий слой обладает большой оптической толщиной. Напротив, в случае значительного разрежения плазмы даже толстый слой будет иметь малую оптическую толщину.

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ

§ 1. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ГАЗАХ

Ударной волной называют движущуюся поверхность, на которой происходит резкое внезапное изменение характера движения и состояния газа. В газе ударные волны могут распространяться только со сверхзвуковой скоростью. Для возникновения ударной волны в данной области газа изменение давления, плотности и скорости газа должно происходить за промежуток времени, очень малый по сравнению со временем распространения через эту область звуковой волны. Процессы, приводящие к образованию ударной волны, протекают скачкообразно. Если в газе на какой-нибудь поверхности возникает скачок какой-либо одной из характеризующих газ величин, например плотности, то на той же поверхности образуются скачки всех других величин — давления, температуры и скорости газа. Поверхность, на которой образуются скачки уплотнения, называют фронтом ударной волны. Скачки давления, плотности и скорости газового потока происходят на очень малой длине. Эта длина называется шириной фронта ударной волны. Ширина фронта зависит от вязкости и теплопроводности газа. Поток газа через фронт ударной волны должен быть непрерывным.

Между состояниями газа перед фронтом ударной волны и позади него существует определенная связь. Если известны значения всех характеризующих газ величин перед фронтом ударной волны, то можно найти значения этих величин позади фронта волны, а также скачки всех величин в ударной волне.

Ударные волны в газах появляются при скоростях движения, превышающих скорость звука. Возникновение

ударных волн представляет собой одну из наиболее существенных особенностей сверхзвукового течения газа. По мере возрастания скорости потока плотность газа в нем постепенно увеличивается. Возрастание плотности происходит до тех пор, пока скорость движения газа остается дозвуковой. В области сверхзвукового течения плотность газа с увеличением скорости течения уменьшается. Плотность газа достигает наибольшего значения, когда скорость газа оказывается равной «местной» скорости звука, т. е. скорости звука внутри данного небольшого объема газа.

Существование ударной волны в газе возможно только при условии, что на ширине фронта волны происходят необратимые процессы рассеяния энергии. Распространение в газе ударной волны сопровождается выделением большого количества тепла. В результате температура газа в ударной волне возрастает во много раз всего лишь на длине свободного пробега молекул. Если газ образован нейтральными молекулами, то рассеяние энергии может происходить только при соударениях между молекулами. Поэтому ширина фронта ударной волны, на которой происходит рассеяние энергии, в этом случае оказывается приблизительно равной длине свободного пробега. В сильно разреженных газах, где длина свободного пробега велика по сравнению с размерами области пространства, заполненной газом, ширина фронта ударной волны постепенно увеличивается, т. е. ударная волна в разреженном газе «расплывается».

Уравнения, устанавливающие связь между параметрами состояния газа по обе стороны фронта ударной волны, могут быть получены из законов сохранения массы, импульса и энергии. В частности, может быть получено соотношение между давлением и удельным объемом по обе стороны фронта ударной волны, называемое ударной адиабатой.

Газ, нагретый в ударной волне до высокой температуры, излучает. Поэтому поверхность фронта и слой газа за ней светятся. Яркость свечения зависит от амплитуды ударной волны и размеров нагретой области. Для достаточно протяженной, оптически толстой области с почти постоянной температурой, близкой к температуре за фронтом ударной волны, нагретый газ, ограниченный поверхностью фронта ударной волны, излучает с поверхности

как абсолютно черное тело. По свечению устанавливается температура вещества за фронтом ударной волны. Свечение газа позволяет получить фотографии волн.

§ 2. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ИОНИЗОВАННЫХ ГАЗАХ

Ударная волна в плазме носит колебательный характер. В отсутствие магнитного поля колебания плазмы в ударной волне являются электростатическими, или ленгмюровскими. Они возникают под влиянием сил, обусловленных разделением зарядов.

Фронт ударной волны в ионизованных газах обладает интересными особенностями, которые связаны с замедленным обменом энергией между ионами и электронами и большой подвижностью электронов, из-за чего электронная теплопроводность во много раз больше теплопроводности ионов. В электронном и ионном газах максвелловское распределение по скоростям устанавливается весьма быстро; длительность этого процесса по порядку величины равна промежутку времени между «соударениями» частиц. Однако выравнивание температур обоих газов из-за большого различия масс электронов и ионов происходит гораздо медленнее. Длительность этого релаксационного процесса определяет ширину фронта ударной волны.

В плазме, находящейся в магнитном поле, возможны также магнитогидродинамические ударные волны. В этом случае в образовании ударных волн, кроме обычного давления газа, большую роль играет также магнитное давление. Вместо скорости распространения звука приходится учитывать скорость распространения магнитогидродинамических волн. Колебания плазмы в магнитном поле обуславливают периодическую структуру магнитогидродинамических ударных волн.

Рассеяние энергии в плазме, как мы уже знаем, может происходить и без участия столкновений (затухание Ландау); в разреженной плазме этот процесс обуславливает образование и распространение в плазме ударных волн. Именно так ударные волны образуются в межпланетной сильно разреженной плазме.

Магнитогидродинамические ударные волны в плазме, находящейся в магнитном поле, используются для нагрева плазмы.

Глава 13

О БУДУЩЕМ ПЛАЗМЫ...

§ 1. ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ БЕЗ ТУРБИН...

В наше время очень трудно представить себе жизнь людей без электрической энергии. Все, наверное, знают, что электричество для нашего хозяйства вырабатывают тепловые электростанции и гидроэлектростанции. В последнее время появились атомные электростанции. Однако более 70% электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях.

Вспомним схему тепловой электростанции. В топке парового котла сжигается топливо (уголь, торф, нефть). Образовавшийся водяной пар приводит во вращение ротор турбины, который соединен с ротором электрического генератора. На зажимах электрического генератора возникает разность потенциалов (напряжение). Из турбины отработанный пар направляется в конденсатор, где он превращается в воду (конденсируется) и эта вода насосом подается снова в котел. По такой же схеме работает и атомная электростанция. Атомные электростанции отличаются от обычных тепловых электростанций лишь тем, что в них для нагрева парового котла используется тепло, выделяющееся при делении тяжелых ядер в ядерном реакторе.

Главным недостатком тепловой электростанции является ее недостаточно высокий коэффициент полезного действия (КПД). Его можно повысить, сильно перегревая пар. Но при высоких температурах значительно уменьшается механическая прочность быстро вращающегося ротора турбины. Поэтому использовать чрезмерно высокие температуры опасно. Практически не удается получить КПД тепловых электростанций выше 40 про-

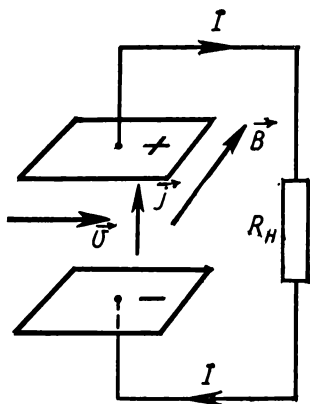


Рис. 69. Простейшая схема МГД-генератора.

ентов. А нельзя ли прямо превратить теплоту в электрическую энергию, не используя для этого турбины и генераторы с вращающимися роторами? Оказывается, что это в принципе возможно.

Если пропускать струю плазмы, имеющую большую скорость v , через магнитное поле с большой индукцией (рис. 69), то возникает электрический ток I , который протекает через плазму и внешнюю нагрузку R_H . Почему возникает электрический ток?

Суть явления электромагнитной индукции, открытого Фарадеем, состоит в том, что если проводник перемещается перпендикулярно линиям магнитной индукции, то на его концах возникает разность потенциалов. Если присоединить к концам такого движущегося проводника какую-нибудь нагрузку, то в замкнутой цепи будет протекать ток.

Аналогично при движении плазмы поперек линий магнитной индукции между металлическими пластинами (см. рис. 69) возникает разность потенциалов. На этом принципе основано действие специальных плазменных генераторов.

Плазма, необходимая для работы плазменного генератора электрического тока, образуется в камере сгорания. Вырываясь с большой скоростью из сопла этой камеры, плазменная струя проходит через магнитное поле. На электродах при этом образуется разность потенциалов, вызывающая ток в цепи.

Процессы, происходящие в плазменных генераторах электрической энергии, описываются магнитной гидродинамикой. Именно поэтому их называют магнитогидродинамическими генераторами, или сокращенно МГДГ.

Для повышения КПД МГДГ надо по возможности увеличивать электропроводность плазмы. Это достигается повышением рабочей температуры и, следовательно, степени ионизации. При данной температуре можно повы-

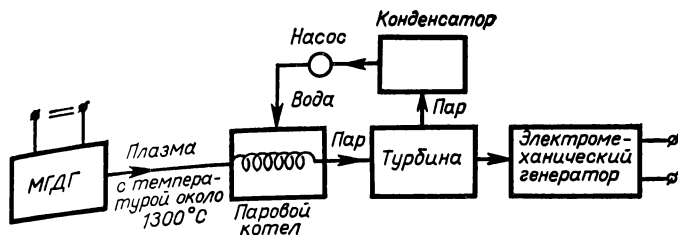


Рис. 70. Схема совместной работы магнитоэлектродинамического и электро-механического генераторов на тепловой электростанции.

снять электропроводность добавлением в камеру сгорания щелочных металлов. Но повышению рабочей температуры плазмы в МГДГ ставят известный предел свойства используемых материалов. Ведь при температуре 1536°C плавится железо, а при температуре 3380°C — вольфрам. Понятно, что рабочая температура плазмы в МГДГ должна быть гораздо меньше этих температур: в противном случае расплавились бы стенки камеры и электроды.

С другой стороны, рабочие температуры не могут быть меньше $1500\text{—}1800\text{ K}$, потому что при меньших темпе-

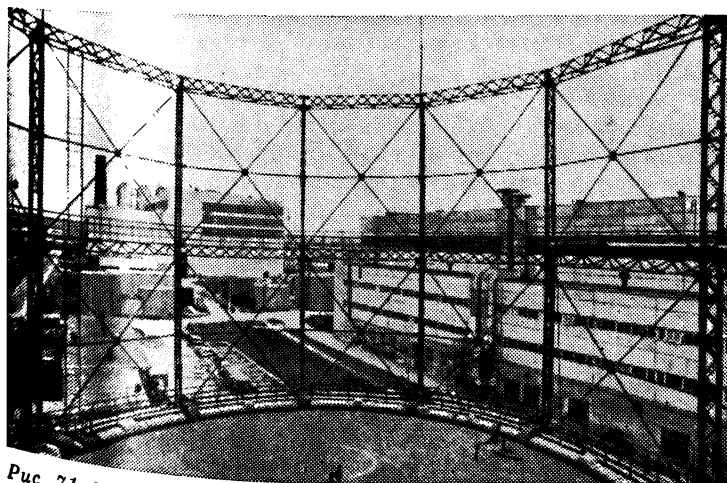


Рис. 71. Первая в мире советская МГД-электростанция (общий вид).



Рис. 72. Первая в мире советская МГД-электростанция (вид со стороны камер сгорания).

ратурах электропроводность плазмы становится очень малой.

В связи с этим плазма, выходящая из рабочего канала МГДГ, еще имеет высокую температуру (около 1500—1800 К). Тепло этой плазмы можно дальше использовать для нагрева паровых котлов; вырабатываемый пар будет вращать ротор турбины, связанный с ротором электрического генератора. Другими словами, экономное использование энергии достигается при совместной работе МГДГ и обычной тепловой электростанции с электромеханическим генератором (рис. 70).

Советские ученые и инженеры уже достигли больших успехов в прямом преобразовании тепла в электрическую энергию. Ими построена экспериментальная энергетическая установка с МГД-генератором, которая работает в сети Мосэнерго (рис. 71 и 72). Можно ожидать, что в недалеком будущем появятся и крупные электростанции с МГД-генераторами.

Уже в 1979 г. в г. Рязани начато сооружение первого промышленного МГД энергетического блока мощностью 500 МВт. В 1985 г. эта электростанция даст ток.

Еще не так давно мысли об искусственных спутниках Земли, Солнца, Луны, о полетах человека в космос казались дерзко фантастическими. В наши же дни слова «спутник», «космос», имена героев-космонавтов известны всем, даже самым маленьким. Такие колоссальные успехи человечества стали возможны благодаря блестящему развитию ракетной техники.

Общеизвестен принцип реактивного движения: продукты сгорания внутри ракеты какого-нибудь топлива с огромной скоростью вылетают из нее, а сама ракета по третьему закону Ньютона движется в противоположную сторону.

Большинство современных реактивных двигателей можно назвать химическими, потому что в них используется энергия, выделяющаяся при химической реакции сгорания топлива. Такие двигатели развивают огромную силу тяги, но для достижения космических скоростей необходимо сжигать большое количество топлива. Расход топлива можно уменьшить, если обеспечить увеличение скорости истечения продуктов сгорания из реактивного сопла.

Но как ускорить движение струи газов, вытекающей из реактивного сопла? Так как эти газы, имея высокую температуру, представляют собой плазму, то задача сводится к ускорению плазмы.

В главе VI мы уже рассматривали движение плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Плазма в этом случае движется как целое со скоростью, направленной перпендикулярно к электрическому и магнитному полям. Помня это, можно составить самую простую схему плазменной ракеты (рис. 73). В разрядную камеру, изображенную на рисунке слева, подводят газ, который ионизируется электрическим полем, создаваемым приложенной к электродам разностью потенциалов. Вылетев через круглое отверстие в катоде, ионизированный газ (плазма) попадает в область с взаимно перпендикулярными электрическим и магнитным полями. Эта область работает как своеобразный «плазменный насос», выбрасывая с большой скоростью струю плазмы. В результате создается реактивная сила тяги.

Рассмотренная схема плазменного двигателя — это по существу простейшая схема плазмотрона. Пока что плаз-

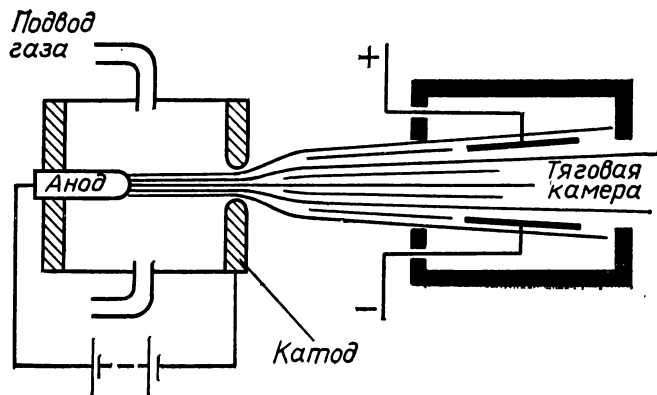


Рис. 73. Схема плазменного двигателя со скрещенными электрическим и магнитным полями (в тяговой камере магнитное поле перпендикулярно плоскости рисунка).

менные двигатели имеют небольшую силу тяги. Но уже сейчас они начинают применяться. Впервые в мире советские ученые и инженеры применили плазменные двигатели в системе ориентирования космического корабля-спутника. Это большой успех нашей науки и техники, и нет сомнения в том, что в недалеком будущем будут созданы и более совершенные, мощные плазменные двигатели.

§ 3. УПРАВЛЯЕМЫЕ ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Прогресс человечества связан с возрастанием используемой им энергии. Обычно подсчет мировых запасов энергии производят в так называемых условных единицах. Одной такой единице соответствует энергия, содержащаяся в 33 млрд. т каменного угля. За две тысячи лет до 1850 г. человечество израсходовало примерно 9 таких единиц, а только за последующие сто лет (с 1850 до 1950 г.) — пять условных единиц. Сейчас темпы роста потребления энергии еще более стремительны. Встает вопрос: на сколько хватит человечеству разведанных им запасов топлива на Земле? Оказывается, что запасы химического топлива на Земле оцениваются в 100 условных единиц — его хватит очень ненадолго. Разведанные запасы

ядерного горючего (урана, тория) также ограничены. Так неужели же человечество обречено на энергетический голод? Нет. Почти неиссякаемый источник энергии для человечества даст покоренная им плазма, с помощью которой можно будет овладеть управляемыми термоядерными реакциями. Запасы термоядерного горючего — дейтерия мирового океана — оцениваются в 30 млрд. условных единиц энергии. Ведь в 1 л обычной воды содержится около 0,03 г дейтерия. А это эквивалентно в энергетическом отношении 300 л бензина. Вот почему ученые так упорно и настойчиво добиваются покорения «капризной» плазмы и хотят заставить ее служить людям!

Двадцатый век часто называют «атомным веком». И это неспроста. Ученые разгадали многие тайны атома и его ядра, научились использовать атомную энергию. Первое применение атомной энергии было ужасным и бесчеловечным — это атомная бомба, несущая страшные разрушения и смерть. В нашей стране атомная энергия все больше применяется в мирных целях. Вспомните наши атомные ледоколы, атомные электростанции. Источником атомной энергии служат реакции деления ядер тяжелых элементов.

Но кроме реакций деления ядер, реализуются и реакции синтеза (соединения), в которых из легких ядер образуются более тяжелые ядра. Такие реакции в естественных условиях происходят на Солнце: ядра водорода (протоны) соединяются друг с другом, образуя ядра гелия.

Использование реакций синтеза началось также с бомбы. На этот раз — водородной. Она еще более разрушительна, чем атомная. В водородной бомбе используется взрыв атомной бомбы. При этом взрыве возникают огромные температуры, при которых начинают происходить реакции синтеза ядер водорода и выделяется еще большая энергия.

Известно, что ядро атома водорода представляет собой протон p . Такого водорода очень много в природе — в воздухе, в воде. Кроме этого, существуют более тяжелые изотопы водорода. Ядро одного из них содержит, кроме протона p , еще и нейтрон n . Называется этот изотоп дейтерием D . Ядро другого изотопа содержит, кроме протона p , два нейтрона n и называется тритием T . На рисунке 74 представлены схемы реакций синтеза этих ядер. В реакции синтеза выделяется энергия, которая в расчете на

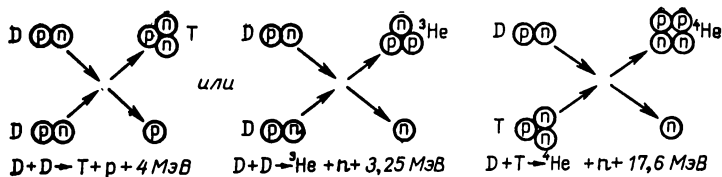


Рис. 74. Реакции синтеза дейтерия и трития.

1 кг вещества значительно больше энергии, выделяющейся в реакции деления урана. (Здесь под выделяющейся энергией понимается кинетическая энергия частиц, образующихся в результате реакции.)

Таким образом, если бы удалось осуществить управляемые реакции синтеза, то человечество получило бы новый мощный источник энергии.

Если бы все ядра, находящиеся в каком-то устройстве, одновременно могли вступить в реакцию друг с другом, то быстро выделившаяся энергия была бы столь велика, что произошел бы колоссальный взрыв. Это, собственно, и происходит в водородной бомбе. В термоядерном же реакторе реакция синтеза должна происходить медленно, должна быть возможность управлять ею.

А как практически использовать выделяющуюся энергию? Хотя это дело будущего, но уже сейчас можно кое-что об этом сказать. При синтезе дейтерия с тритием основная часть выделившейся энергии (около 80%) проявляется в форме кинетической энергии нейтронов. Если вне магнитной ловушки замедлить эти нейтроны с помощью подходящего замедлителя, то можно получить теплоту и затем превратить ее в электрическую энергию. При реакции синтеза в дейтерии примерно $\frac{2}{3}$ высвобождаемой энергии несут заряженные частицы — продукты реакции и только около $\frac{1}{3}$ энергии — нейтроны. А кинетическую энергию заряженных частиц можно в принципе непосредственно преобразовать в электрическую энергию.

Какие же надо создать условия, чтобы осуществились реакции синтеза? В этих реакциях ядра должны соединиться друг с другом. Но ведь каждое ядро заряжено положительно, и, следовательно, между ними действуют силы отталкивания, которые определяются законом Кулона:

$$F \sim \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r^2},$$

где Z_1e — заряд одного ядра, Z_2e — заряд второго ядра, а e — модуль заряда электрона. Для того чтобы соединиться друг с другом, ядра должны преодолеть кулоновские силы отталкивания. Эти силы становятся очень большими, когда ядра сближаются. Понятно, что наименьшими силы отталкивания будут в случае ядер водорода, имеющих наименьший заряд ($Z=1$). Именно поэтому для реакций синтеза наиболее важны дейтерий и тритий. Оказывается, чтобы преодолеть силы кулоновского отталкивания и соединиться, ядра должны обладать кинетической энергией примерно 0,01—0,1 МэВ. Такой средней кинетической энергии частиц соответствует температура порядка 10^8 — 10^9 К. А это больше, чем температура даже в недрах Солнца! Из-за того, что реакции синтеза происходят при очень высоких температурах, их называют термоядерными. (Реакции же деления тяжелых ядер происходят при обычных, комнатных температурах.)

При температурах в миллионы и сотни миллионов градусов нейтральные атомы или молекулы уже не могут существовать, они полностью ионизируются. Таким образом, термоядерные реакции могут проходить только в высокотемпературной плазме.

Термоядерные реакции могут быть источником энергии, если выделение энергии будет превосходить затраты энергии. Тогда, как говорят, процесс синтеза будет самоподдерживающимся.

Температуру, при которой это происходит, называют температурой зажигания или критической температурой. Для реакции DT (дейтерий — тритий) температура зажигания составляет около 45 млн. К, а для реакции DD (дейтерий — дейтерий) — около 400 млн. К. Таким образом, для протекания реакций DT нужны гораздо меньшие температуры, чем для реакций DD. Поэтому исследователи плазмы отдают предпочтение реакциям DT, хотя тритий в природе не встречается, а для его воспроизводства в термоядерном реакторе надо создавать особые условия.

Теперь встает вопрос о том, как удерживать плазму в какой-то установке — термоядерном реакторе — и нагреть ее так, чтобы начался процесс синтеза. Мы уже знаем о способах удержания плазмы магнитным полем и об основных типах ловушек плазмы (прямая труба, в которой частицы удерживаются собственным магнитным полем, —

пинч; ловушки с магнитными пробками; тороидальные ловушки — токамаки и стеллараторы).

Ясно, что, чем выше концентрация частиц, тем чаще они сталкиваются друг с другом. Поэтому может показаться, что для осуществления термоядерных реакций надо использовать плазму с большой концентрацией частиц. Однако если концентрация частиц будет такой, как концентрация молекул в газах при нормальных условиях (10^{25} м^{-3}), то при термоядерных температурах давление в плазме было бы колоссальным — порядка 10^{12} Па. Такое давление не сможет выдержать ни одно техническое устройство! Чтобы давление составляло величину порядка 10^6 Па и соответствовало прочности материалов, термоядерная плазма должна быть сильно разреженной (концентрация частиц должна быть порядка 10^{21} м^{-3}). Однако в разреженной плазме соударения частиц друг с другом происходят реже. Чтобы в этих условиях могла поддерживаться термоядерная реакция, надо увеличить время пребывания частиц в реакторе. В связи с этим удержательная способность ловушки характеризуется произведением концентрации n частиц на время t их удержания в ловушке.

Оказывается, что для реакции DD

$$nt > 10^{22} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с},$$

а для реакций DT

$$nt > 10^{20} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}.$$

Отсюда видно, что для реакции DD при $n = 10^{21} \text{ м}^{-3}$ время удержания должно быть больше 10 с; если же $n = 10^{24} \text{ м}^{-3}$, то достаточно, чтобы время удержания превышало 0,01 с.

Для смеси дейтерия с тритием при $n = 10^{21} \text{ м}^{-3}$ термоядерная реакция синтеза может начаться, если время удержания плазмы больше 0,1 с, а при $n = 10^{24} \text{ м}^{-3}$ достаточно, чтобы это время было больше 10^{-4} с. Таким образом, при одинаковых условиях необходимое время удержания в реакциях DT может быть значительно меньше, чем в реакциях DD. В этом смысле реакцию DT легче осуществить, чем реакцию DD.

Физики настойчиво ищут путей овладения энергией термоядерных реакций синтеза. Уже сейчас такие реакции реализуются в различных термоядерных установках,

но выделяющаяся в них энергия еще не оправдывает затраты средств и труда. Другими словами, существующие термоядерные реакторы пока экономически не выгодны. Среди различных программ термоядерных исследований в настоящее время наиболее перспективной считается программа, основанная на реакторах типа токамак. Первые исследования кольцевых электрических разрядов в сильном продольном магнитном поле были начаты в 1955 г. под руководством советских физиков И. Н. Головина и Н. А. Явлинского. Построенная ими тороидальная установка была довольно крупной даже по современным масштабам: она была рассчитана на разряды с силой тока до 250 кА. И. Н. Головин предложил для таких установок название «токамак» (токовая камера, магнитная катушка). Это название используется теперь физиками всего мира.

До 1968 г. исследования на токамаках развивались главным образом в Советском Союзе. Сейчас в мире около 50 установок типа токамак.

На рисунке 75 изображена типичная конструкция токамака. Продольное магнитное поле в нем создается катушками с током, охватывающими тороидальную камеру. Кольцевой ток в плазме возбуждается в камере как во вторичной обмотке трансформатора при разрядке батареи конденсаторов через первичную обмотку 2. Плазменный шнур заключен в тороидальную камеру — лайнер 4, изготовленный из тонкой нержавеющей стали толщиной в несколько миллиметров. Лайнер окружен медным кожухом 5 толщиной в несколько сантиметров. Назначение кожуха — стабилизировать медленные длинноволновые изгибы плазменного шнура.

Эксперименты на токамаках позволили установить, что время удержания плазмы (величина, характеризующая длительность сохранения плазмой необходимой высо-

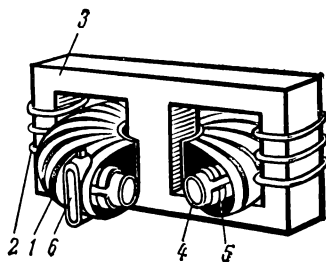


Рис. 75. Схема токамака (1 — катушки тороидального поля, 2 — первичная обмотка, 3 — сердечник трансформатора, 4 — лайнер, 5 — медный кожух, 6 — окна для диагностики плазмы).

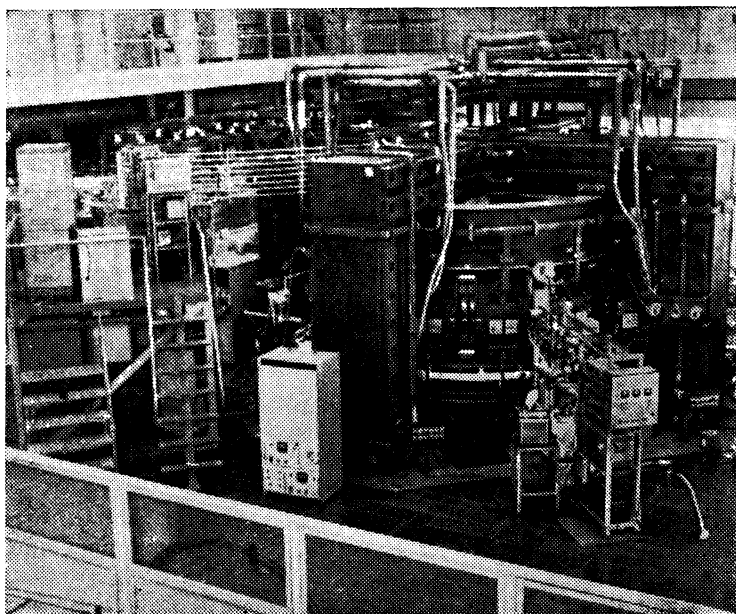


Рис. 76. Токамак 10.

кой температуры) пропорционально площади сечения плазменного шнура и индукции продольного магнитного поля. Магнитная индукция может быть весьма большой при использовании сверхпроводящих материалов. Другая возможность повышения времени удержания плазмы состоит в увеличении поперечного сечения плазменного шнура. Это значит, что необходимо увеличивать размеры токамаков. Летом в 1975 г. в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова вступил в строй самый крупный пока токамак — Т-10 (рис. 76). На нем получены следующие результаты: температура ионов в центре шнура 0,6—0,8 кэВ, средняя концентрация частиц $8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, энергетическое время удержания плазмы 40—60 мс, основной параметр удержания $nt \sim (2,4—7,2) \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}$.

Более крупными установками будут так называемые демонстрационные токамаки, которые вступят в строй до 1985 г. В Советском Союзе токамаком такого типа будет Т-20. Он будет весьма внушительных размеров: большой радиус тора будет равен 5 м, радиус тороидальной каме-

ры 2 м, объем плазмы около 400 м³. Целью сооружения таких установок является не только проведение физических экспериментов и исследований, но и разработка различных технологических аспектов проблемы — выбор материалов, изучение изменения их свойств при повышенных тепловых и радиационных воздействиях и т. д. Установка Т-20 предназначена для получения реакции в смеси DT. В этой установке предусматривается надежная защита от мощного рентгеновского излучения, потока быстрых ионов и нейтронов. Предполагается использовать энергию потока быстрых нейтронов (10^{17} м⁻²·с), которые в специальной защитной оболочке (бланкете) будут замедляться и отдавать свою энергию теплоносителю. Кроме того, если в бланкете будет содержаться изотоп лития ${}^6_3\text{Li}$, то он под действием нейтронов будет превращаться в тритий Т, который в природе не существует.

Токамаки следующего поколения будут представлять собой уже опытно-промышленные термоядерные электростанции, и они в конечном счете должны будут производить электроэнергию. Эти реакторы будут сооружены до 1990 г. Предполагается, что они будут реакторами «гибридного типа», в которых бланкет будет содержать делящийся материал (уран). Под действием быстрых нейтронов в уране будет происходить реакция деления, что повысит общий энергетический выход установки.

Итак, токамаки представляют собой устройства, в которых плазма нагревается до высоких температур и удерживается. Как осуществляется в токамаках нагрев плазмы? Прежде всего плазма в токамаке нагревается вследствие протекания электрического тока. Это, как говорят, омический нагрев плазмы. Но при очень высоких температурах сопротивление плазмы сильно падает и омический нагрев становится неэффективным, поэтому сейчас исследуются различные методы дополнительного повышения температуры плазмы, такие как инжекция в плазму быстрых нейтральных частиц и высокочастотный нагрев.

Нейтральные частицы не испытывают никакого действия со стороны магнитного поля, удерживающего плазму, и поэтому могут быть легко «впрыснуты», инжестированы в плазму. Если эти частицы обладают большой энергией, то, попав в плазму, они ионизируются и при столкновениях с частицами плазмы передают им часть своей энергии, и плазма нагревается. Сейчас достаточно хорошо разра-

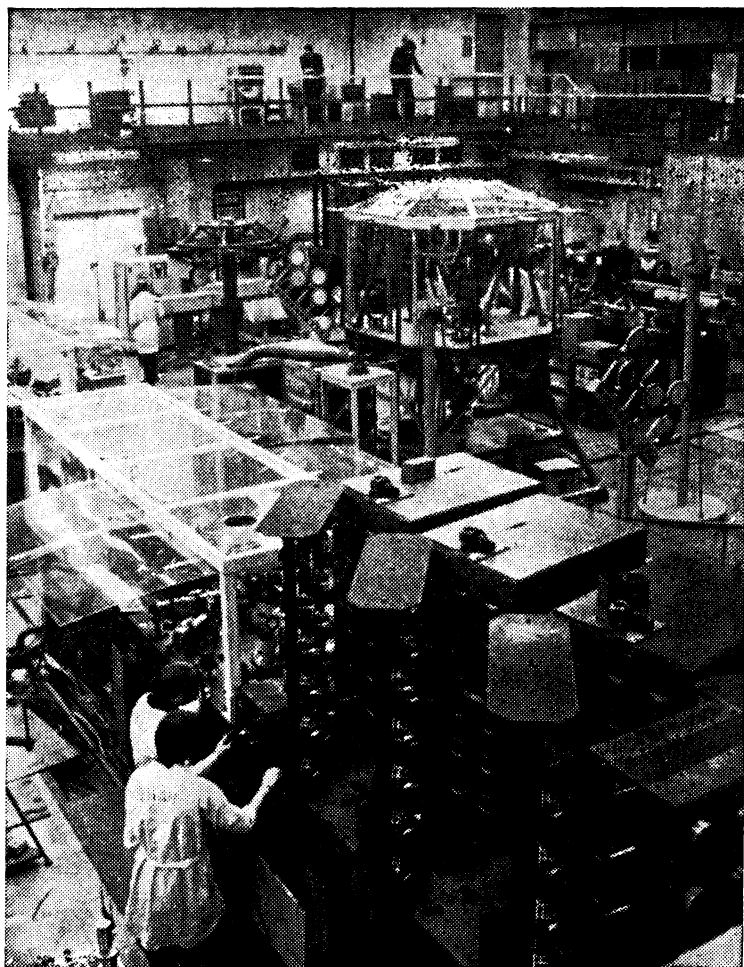


Рис. 77. Установка «Дельфин» для возбуждения реакции термоядерного синтеза в плазме с помощью лазерных пучков.

ботаны методы получения потоков нейтральных частиц (атомов) с большой энергией. С этой целью с помощью специальных устройств — ускорителей — заряженным частицам сообщается очень большая энергия. Затем этот поток заряженных частиц специальными методами нейтрализуют. В результате получается поток высокоэнергетических нейтральных частиц.

Высокочастотный нагрев плазмы может осуществляться с помощью внешнего высокочастотного электромагнитного поля, частота которого совпадает с одной из собственных частот плазмы (условие резонанса). При выполнении этого условия частицы плазмы сильно взаимодействуют с электромагнитным полем и происходит перекачка энергии поля в энергию плазмы (плазма нагревается).

Хотя программа токамаков считается наиболее перспективной для термоядерного синтеза, физики не прекращают исследований и по другим направлениям. Так, последние достижения по удержанию плазмы в прямых системах с магнитными пробками вселяют оптимистические надежды на создание на основе таких систем энергетического термоядерного реактора.

Для устойчивого удержания плазмы с помощью описанных устройств в ловушке создаются условия, при которых магнитное поле нарастает от центра ловушки к ее периферии. Нагрев плазмы осуществляется с помощью инжекции нейтральных атомов.

Как в токамаках, так и в пробкотронах для удержания плазмы необходимо очень сильное магнитное поле. Однако существуют направления решения проблемы термоядерного синтеза, при реализации которых отпадает необходимость создания сильных магнитных полей. Это так называемые лазерный синтез и синтез с помощью релятивистских электронных пучков. Суть этих решений состоит в том, что на твердую «мишень», состоящую из замороженной смеси DT, со всех сторон направляют либо мощное лазерное излучение (рис. 77), либо пучки релятивистских электронов. В результате мишень должна сильно нагреваться, ионизоваться и в ней взрывным образом должна произойти реакция синтеза. Однако практическое воплощение этих идей сопряжено со значительными трудностями, в частности из-за отсутствия лазеров, обладающих необходимой мощностью. Тем не менее в настоящее время интенсивно разрабатываются проекты термоядерного реактора на основе этих направлений.

К решению проблемы могут привести различные проекты. Ученые надеются, что в конце концов удастся осуществить управляемые реакции термоядерного синтеза и тогда человечество получит источник энергии на многие миллионы лет,

ПЛАЗМА ВО ВСЕЛЕННОЙ

§ 1. О МЕТОДАХ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

Знания о звездах, планетах и туманностях пока получают главным образом путем исследования их излучения. Однако такие исследования затруднены тем, что большая доля излучения оказывается недоступной для наблюдения, так как земная атмосфера не пропускает излучение, длина волны которого меньше 0,29 мкм. В инфракрасной же области спектра значительная доля излучения задерживается содержащимися в атмосфере водяными парами. Кроме того, непосредственно удастся наблюдать только самые внешние слои Солнца и звезд. Недра же Солнца и звезд оказываются полностью скрытыми от наблюдателя. Выводы о физических условиях в глубинных слоях небесных светил можно сделать лишь на основании общих физических закономерностей, и в частности закономерностей физики плазмы. Этим путем удастся установить структуру, строение и температуру звездных атмосфер, состояние недр звезд, а также условия, которые существуют в газовых туманностях и в межзвездном пространстве. В настоящее время с развитием астрофизики, и в частности радиоастрономии, открылись новые возможности для изучения природы звезд и межзвездной материи.

§ 2. ВЫСОКИЕ ДАВЛЕНИЯ ЛОМАЮТ АТОМЫ

Во внутренних областях некоторых звезд плотность плазмы становится чрезвычайно большой. Самые большие давления, которые достигаются в лабораториях, несравнимы с теми давлениями, которые имеются, например, внут-

ри Земли, не говоря уже о давлениях в недрах гигантских звезд. Что же происходит с веществом, когда на него действует столь большое давление?

Представим себе, что на некоторое холодное тело будет действовать непрерывно возрастающее давление. В таких условиях от атомов вещества в конце концов начинают отрываться электроны. Под действием давления происходит ионизация вещества. Когда плотность достигнет достаточно большого значения, все электроны оказываются оторванными от своих атомов и образуют газ свободных электронов, в котором распределение электронов по скоростям не является максвелловским. Их распределение по скоростям оказывается таким, что давление электронного газа значительно превышает давление газа, состоящего из эквивалентного числа ядер атомов. Вещество же в целом в подобных условиях обладает свойствами, которые значительно отличаются от присущих ему свойств при обычном давлении.

Возможность «нетемпературной» ионизации газа под действием колоссальных давлений позволяет представить себе сверхплотное состояние вещества, имеющее место, например, в звездах, называемых белыми карликами.

Пусть по порядку величины среднее расстояние между ядрами будет не 10^{-8} см, как в обычном атомарном газе, а в сто раз меньше, т. е. 10^{-10} см. Плотность вещества в этом случае возрастает в 10^6 раз. Современные астрономические исследования показывают, что плотность вещества в белых карликах имеет значение порядка $5 \cdot 10^8$ кг/м³. Средняя же плотность Солнца составляет 1400 кг/м³.

§ 3. ОТКУДА СОЛНЦЕ И ЗВЕЗДЫ ЧЕРПАЮТ СВОЮ ЭНЕРГИЮ

До XVII в. существовало представление, что источником энергии на Солнце и звездах являются химические реакции. Однако это предположение было полностью отвергнуто учеными. В конце прошлого века немецкий ученый Г. Гельмгольц высказал предположение, что очень высокая температура Солнца является результатом действия сил тяготения.

Давайте представим себе громадное газовое облако с

массой, примерно равной массе Солнца, но в миллионы раз превосходящее его по своим размерам. Пусть эта масса достаточно удалена от остальных частей Вселенной. Благодаря силам всемирного тяготения облако будет постепенно сжиматься. Уменьшение его объема должно вызвать повышение температуры и плотности газа. Наконец, в результате очень сильного сжатия в центральной части первоначального облака начнется конденсация, т. е. переход вещества из газообразного в жидкое и затем даже в твердое состояние. С помощью таких простейших рассуждений Г. Гельмгольц показал, что существует возможность объяснения достаточно продолжительного периода существования Солнца.

Впоследствии была обнаружена недостаточность теории Гельмгольца. Дело в том, что по расчетам Гельмгольца Солнце при той интенсивности излучения, которая имеется в настоящее время, могло бы существовать 10—40 млн. лет. Однако после открытия явления радиоактивности был установлен возраст Земли. Эта оценка была выполнена по тому количеству урана и продуктов его распада, которое имеется в земной коре. Оказалось, что Земля существует не менее 5 млрд. лет. Отсюда и вытекает недостаточность объяснения, данного Гельмгольцем.

Вместе с тем попытка рассматривать в качестве источника энергии на Солнце и звездах имеющиеся на них в достаточном количестве радиоактивные вещества также оказалась несостоятельной. После того как был установлен закон радиоактивного распада, стало ясно, что, если бы энергия Солнца была обусловлена радиоактивным распадом, время существования Солнца было бы даже меньше того, которое следовало из теории Гельмгольца.

Проблему источников солнечной и звездной энергии удалось решить лишь на основе достижений физики XX в. Оказалось, что объяснение, данное Гельмгольцем, не является столь уж и плохим. Необходимо было только с помощью новейших данных науки уточнить и дополнить эту теорию.

Благодаря очень высоким температурам и давлениям атомы всех элементов внутри Солнца и звезд должны быть почти полностью ионизованы. Это создает необходимые условия для протекания в недрах Солнца и звезд реакций синтеза легких ядер—термоядерных реакций. Именно термоядерные реакции являются основным источ-

ликом энергии Солнца и звезд. Термоядерные реакции приводят к освобождению огромной энергии и связаны с превращениями одних элементов в другие.

§ 4. РАЗВИТИЕ ЗВЕЗД

Температура поверхности звезд изменяется в достаточно широких пределах — от 1000 до 25 000 К.

Между температурой и так называемой светимостью звезд существует зависимость, установленная на опыте в 1913 г. (см. диаграмму на рисунке 78).

Наибольшая часть наблюдаемых на небосводе звезд попадает на диаграмме светимости в сравнительно узкую полосу, которая называется главной последовательностью. Справа от главной последовательности лежит область красных гигантов — звезд с большой светимостью, но с низкой температурой поверхности. Эти звезды должны обладать очень большими радиусами. Слева от главной последовательности располагается область белых карликов. Это звезды, имеющие очень малую светимость, но весьма высокую температуру поверхности. Такие звезды имеют очень малые диаметры, которые в некоторых случаях не превышают диаметр Земли.

Как образовались звезды, столь отличающиеся друг от друга? На этот вопрос можно ответить, рассмотрев процесс образования и развития звезд на основе модели Гельмгольца.

Благодаря силе тяготения первоначальное горячее газовое облако постепенно сжимается и потенциальная энергия переходит в кинетическую энергию газовых частиц. Этот процесс первоначального сжатия и нагревания газа происходит за отрезок времени, который по порядку величины равен 10^7 — 10^8 лет. К концу процесса сжатия температура газа в центре облака достигает 10^7 К при плотности газа порядка 10^5 кг/м³. При этих условиях становится возможной термоядерная реакция синтеза гелия из водорода. По мере «выгорания» определенного количества ядерного горючего силы тяготения вызывают дальнейшее сжатие газового облака и увеличение плотности и температуры газа. При новой температуре и новой плотности газа продукты ядерной реакции (ядерный «пепел») сами становятся новым ядерным горючим.

Пока первоначальная термоядерная реакция на звезде не вызывает сильного уменьшения количества водорода, звезда остается на главной последовательности диаграммы светимости. Но постепенно в течение 10^9 — 10^{10} лет водород преобразуется в гелий. Когда водородное «горючее» в центре звезды оказывается исчерпанным, на его месте

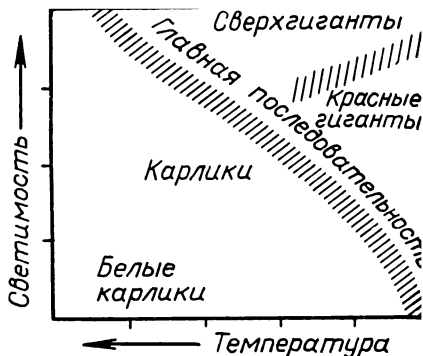


Рис. 78. Диаграмма светимости.

будет ядерный «пепел» — гелий. Ядра гелия с двойным зарядом не могут реагировать друг с другом при температуре порядка 10^7 К, и выделение энергии в объеме звезды прекращается. Исключение представляет лишь сравнительно тонкий слой у поверхности, где благодаря более низкой температуре создаются возможности для сохранения значительного количества водорода. На этом этапе развития звезды основным источником энергии является водород во внешней оболочке звезды. Прекращение выделения энергии в центральной части звезды приводит к ее сильному сжатию, которое сопровождается повышением температуры. Излучение, которое распространяется из внутренней области звезды, вызывает сильное расширение ее внешней оболочки, и звезда переходит в класс красных гигантов.

Из-за сжатия внутренней области звезды температура внутри нее достигает 10^8 К, а плотность повышается до 10^8 кг/м³. При этих условиях становится возможной реакция превращения трех ядер гелия ${}^4_2\text{He}$ в одно возбужденное ядро углерода ${}^{12}_6\text{C}$ с энергией возбуждения в 7,65 МэВ. После этого возбужденное ядро углерода переходит в невозбужденное ядро ${}^{12}_6\text{C}$. Если накапливается достаточное количество углерода, то становится возможной реакция, при которой центральное гелиевое ядро звезды постепенно переводится в ядро, состоящее из ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$ и малого количества ядер магния ${}^{24}\text{Mg}$. По мере «выгорания» ядер гелия выделение энергии за счет термоядерных реак-

ций уменьшается, и это приводит к дальнейшему сжатию центральной области звезды силами тяготения. Это сжатие вновь увеличивает температуру и плотность центральной части звезды.

Реакции между ядрами углерода ^{12}C , кислорода ^{16}O и неона ^{20}Ne при температуре ниже 10^8 К не могут вызвать значительного выделения энергии. Поэтому снова основную роль приобретают силы тяготения. После достижения температуры порядка $5 \cdot 10^{10}$ К вновь начинает преобладать «ядерная энергетика». В столь сильно нагретой плазме существует значительное число фотонов с энергией порядка 5 МэВ. В результате взаимодействия фотонов с ядрами неона ^{20}Ne происходит реакция превращения ядер ^{20}Ne в ядра кислорода ^{16}O и гелия ^4He с поглощением энергии в 4,75 МэВ. Освобождающиеся α -частицы (ядра гелия) вступают в ядерную реакцию с ядрами неона ^{20}Ne , в результате которой появляются ядра магния ^{24}Mg и выделяется энергия в 9,31 МэВ. Таким образом, под действием γ -кванта (фотона) происходит переход α -частицы от одного ядра неона к другому. Этот процесс ядерных превращений называется α -процессом. Освобождающиеся в первой половине α -процесса ядра гелия могут образовать кремний. Постоянное возрастание концентрации кремния может вызвать образование серы, а затем азота, фосфора и кальция. Этот процесс образования все более тяжелых ядер должен завершиться образованием ядер элементов группы железа. После этого выделение энергии за счет ядерных превращений прекращается и вновь начинается преобладающее действие сил тяготения. При этом звезда очень быстро сжимается, в результате чего становятся возможными ядерные реакции превращения элементов группы железа в более легкие элементы. Такие реакции протекают с поглощением энергии.

На этом этапе своего развития звезда принадлежит к классу красных гигантов. Огромные размеры звезды и сравнительно низкая температура ее поверхности связаны с наличием двух разделенных областей: внутренней и наружной. Внутренняя область состоит главным образом из элементов группы железа, имеет плотность порядка 10^{11} кг/м³ и температуру около $4 \cdot 10^9$ К. Наружная оболочка звезды отбрасывается от центральной части звезды при «сгорании» гелия и при α -процессах. В наружной части содержится значительное количество еще не израсхо-

банного водорода. Газ, образующий наружную оболочку звезды на этой фазе ее развития, имеет плотность около 10^4 кг/м³ и температуру около $3 \cdot 10^7$ К.

После прекращения ядерных реакций внутри звезды ее оболочка продолжает удерживаться на большом расстоянии от центральной области. В этот период возможен очень быстрый процесс сжатия внешней оболочки, который должен привести к увеличению плотности оболочки звезды до 10^8 кг/м³ и ее нагреванию до 10^9 К. Такой процесс сжатия развивается со скоростью взрыва, так что звезда может рассматриваться как своеобразная водородная бомба. Яркость звезды при этом может в течение суток измениться на несколько порядков. Подобные взрывы наблюдаются астрономами. Взорвавшиеся звезды получили название «сверхновых».

При возникновении «сверхновой» громадное количество вещества из оболочки и центральной части звезды выбрасывается в межзвездное пространство, где под влиянием тяготения из выброшенного вещества могут образоваться звезды второго поколения. Эти звезды отличаются от звезд первого поколения тем, что в их составе, кроме водорода, имеются и более тяжелые элементы — углерод, кислород и др. Благодаря этому развитие звезд второго поколения может происходить несколько иным путем.

В звездах второго поколения процесс выгорания гелия отличается от того же процесса в звездах первого поколения: в них становится возможным взаимодействие углерода ^{13}C и неона ^{21}Ne с гелием ^4He . Это взаимодействие сопровождается излучением нейтронов, которые в основном должны захватываться тяжелыми ядрами. Если в центральной области звезды имеются элементы группы железа, то они, захватывая нейтроны, будут образовывать более тяжелые элементы. Особенно интенсивным испускание и поглощение нейтронов становится при образовании «сверхновых». Взрыв при рождении «сверхновой» сопровождается выбросом в межзвездное пространство тяжелых элементов, образованных в результате захвата нейтронов ядрами элементов группы железа.

Приведенная картина развития звезд представляет собой лишь одну из возможных схем. В действительности же эволюция звезд в зависимости от их массы, принадлежности к тому или иному поколению и других условий может происходить различными путями.

Наука о процессах, происходящих в звездах, находится в стадии своего бурного развития и должна дать ответ на многие интересные и важные вопросы, относящиеся, в частности, к физике плазмы.

§ 5. КАК «УСТРОЕНО» СОЛНЦЕ

Солнце является единственной звездой, поверхность которой мы можем наблюдать. Все остальные звезды, даже самые большие и ближайšie к нам, настолько удалены от Земли, что и с помощью наиболее совершенных астрономических приборов обнаруживают их лишь в виде светящихся точек.

Солнце представляет собой шарообразное тело, состоящее из сильно ионизованного газа, главным образом водорода. На это указывают спектроскопические исследования солнечного излучения. Несмотря на то что солнечное вещество находится в газообразном состоянии, Солнце не лишено определенной структуры. Солнечный диск оказывается неодинаковым по яркости. Это обусловлено неодинаковостью температуры газа в солнечной атмосфере. Излучение, идущее к наблюдателю, возникает в более высоких и, следовательно, более холодных внешних слоях атмосферы Солнца. В недрах Солнца температура газа значительно выше, чем во внешних его слоях, и равна примерно $2 \cdot 10^7$ К, а плотность его внутренних слоев в 100 раз превышает плотность воды. Плотность и температура вещества Солнца непрерывно уменьшается в направлении от центра к периферии.

Излучаемая Солнцем энергия освобождается в результате термоядерных реакций, происходящих в его недрах, и переносится наружу излучением и отчасти в процессе конвекции.

Внешняя часть Солнца подразделяется на три различных слоя: фотосферу, хромосферу и корону.

Фотосфера. Слой Солнца, от которого непосредственно исходит видимое излучение, называется фотосферой. Это тонкая оболочка прозрачного газа толщиной около 1000 км, расположенная на расстоянии 695 000 км от центра Солнца. Указанный радиус фотосферы принято называть радиусом Солнца. Плотность газа в фотосфере составляет менее 0,001 от плотности земной атмосферы, а температура в этой области 6000 К. Плотность газа в фо-

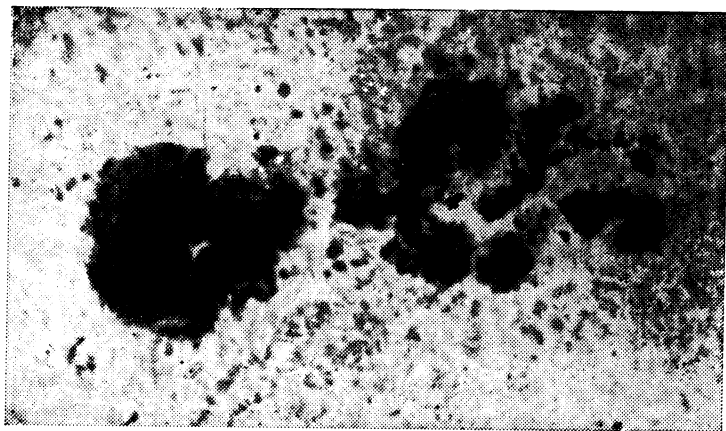


Рис. 79. Солнечные пятна и гранулы.

тосфере довольно быстро уменьшается в направлении от внутренней поверхности этого слоя к его наружной поверхности. Именно по этой причине край Солнца при наблюдениях кажется очень резко выраженным.

При хороших условиях видимости можно обнаружить, что поверхность фотосферы покрыта сетью ярких гранул, похожих по виду на рисовые зерна. Гранулы покрывают 50—60% всей поверхности Солнца.

Наиболее заметными деталями на солнечном диске являются солнечные пятна (рис. 79). Это холодные участки поверхности Солнца, характеризующиеся сильными магнитными полями. В противоположность гранулам, которые могут находиться в любом месте поверхности Солнца, пятна на Солнце появляются только в пределах зоны от 5 до 40° широты по обе стороны от солнечного экватора. Вблизи края солнечного диска в зоне пятен часто наблюдаются большие площади, более яркие, чем окружающая их фотосфера. Они называются факелами.

Солнечные пятна — это громадные возмущения солнечной плазмы; число и размеры пятен служат наиболее характерным показателем солнечной активности. Число пятен меняется приблизительно циклически со средним периодом в 11 лет. Большие пятна на Солнце можно наблюдать даже невооруженным глазом.

Излучение, идущее от фотосферы, образует непрерывный спектр с узкими линиями поглощения. Эти линии называют фраунгоферовыми линиями. В спектре Солнца зарегистрировано свыше 20 000 линий поглощения.

Хромосфера. Над фотосферой находится хромосфера, которая наблюдается на краю солнечного диска, непосредственно над его границей. Это «окрашенный» слой. Во время полного солнечного затмения, когда яркая фотосфера скрывается за диском Луны, хорошо видна внешняя оболочка Солнца — хромосфера (см. рис. II на цветной вклейке). Она видна как пылающее кольцо красного света с многочисленными выступами, называемыми протуберанцами. Хромосфера в значительной степени состоит из водорода. Наиболее сильной видимой линией водорода является линия, которой соответствует длина волны 0,6563 мкм, попадающая в красную область спектра.

Спектр хромосферы, который можно получить при полном солнечном затмении, состоит исключительно из линий излучения различных длин волн. Это означает, что хромосфера образована горячим газом при низком давлении. Интенсивность спектра хромосферы значительно меньше интенсивности спектра фотосферы.

Хромосфера имеет неправильную структуру, которая очень быстро изменяется. Высота верхней границы хромосферы равна 14 000 км. Температура газа в хромосфере достигает 30 000 К (это значение нельзя считать окончательно установленным).

С помощью специальных астрономических приборов можно наблюдать хромосферу и в периоды между солнечными затмениями.

Солнечная корона. Над хромосферой расположена гораздо более слабая жемчужная солнечная корона (см. рис. II на цветной вклейке). Свет короны настолько слаб, что ее можно видеть невооруженным глазом лишь во время полных затмений Солнца. В эти моменты она видна как великолепный венец белого цвета. Корона простирается до расстояний в несколько солнечных диаметров в виде слабо светящихся лепестков и лучей. Яркие части внутренней короны доступны для наблюдения лишь при исключительно хороших атмосферных условиях с помощью специального прибора — коронографа. Обычно наблюдения внутренней короны ведутся на специальных горных станциях (рис. 80) в ясную погоду. Корона имеет

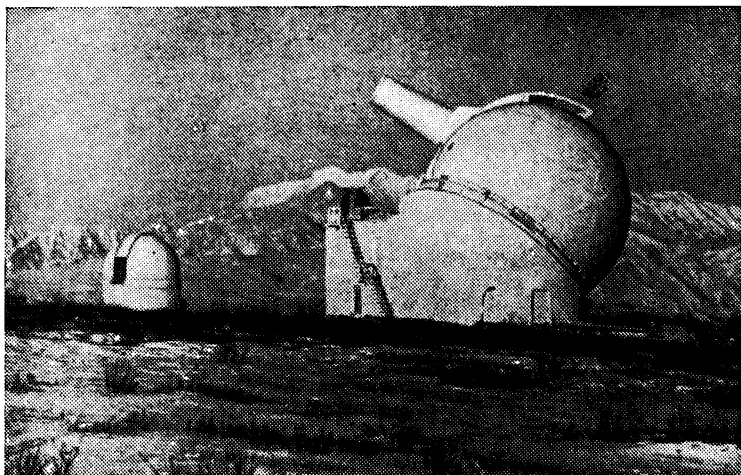


Рис. 80. Солнечная обсерватория.

непрерывный спектр, возникающий из-за рассеяния света, идущего от фотосферы. На непрерывный спектр короны накладывается несколько линий, принадлежащих высокоионизованным атомам. Высокая степень ионизации обусловлена достаточно большой температурой газа — около 1 000 000 К.

Внутренние слои Солнца. Слои, расположенные под фотосферой, называют внутренними. Они недоступны для наблюдения. Удастся лишь получить сведения относительно массы Солнца, его радиуса и излучаемой им энергии. Полагают, что значительная доля энергии Солнца высвобождается вблизи от его центра. Такое допущение основано на том, что интенсивность ядерных реакций, в результате которых освобождается энергия, сильно возрастает с температурой газа.

От источников, расположенных внутри Солнца, энергия передается в фотосферу, которая и излучает ее в окружающее пространство. Внутри Солнца передача энергии от слоя к слою происходит главным образом в виде переизлучения. Энергия поглощается каждым очередным слоем, который затем снова ее испускает. Кроме того, как уже было сказано, определенную роль в передаче энергии играет также конвекция,

Протуберанцы не похожи ни на одно из указанных выше образований. Их нельзя отнести целиком к какому-либо из солнечных слоев: они выходят за пределы хромосферы и проникают далеко в солнечную корону (рис. 81). Протуберанцы представляют собой облака паров, свет которых состоит в основном из линий излучения водорода, гелия и ионизованного кальция. Температура протуберанцев меняется в пределах от 10 000 до 20 000 К. Различают спокойные и взрывные, или эрутивные, протуберанцы. Спокойные протуберанцы устойчивы и могут существовать довольно длительное время (несколько месяцев). Длина таких протуберанцев достигает 40—50 гелиографических градусов.

Взрывные протуберанцы образуются на «свежем месте» и достигают огромной высоты (известен случай, когда взрывной протуберанец поднялся на 1 700 000 км). Их яркость очень велика. Спектр протуберанцев подобен спектру хромосферы.

Протуберанцы являются электрическими разрядами. Необходимая для их образования электродвижущая сила индуцируется при движении ионизованного вещества в общем магнитном поле Солнца, и особенно в сильных магнитных полях пятен. Однако полного объяснения происхождения протуберанцев и явлений в них в настоящее время еще нет.

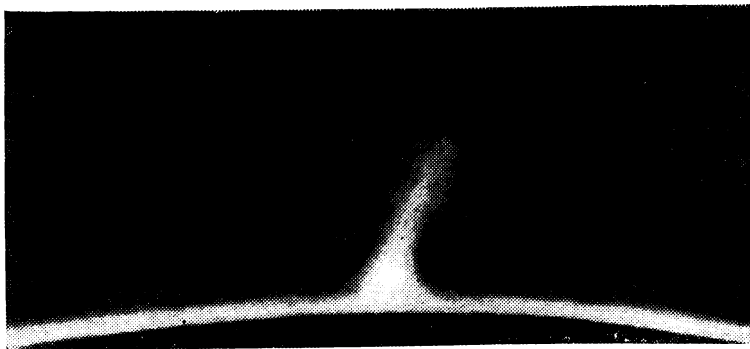


Рис. 81. Протуберанец.

Солнечные пятна — это области фотосферы, имеющие температуру около 4600 К (нормальная температура внешних слоев Солнца составляет около 6000 К). Любое хорошо развитое солнечное пятно состоит из двух отчетливо выраженных областей: темного внутреннего ядра — тени и окаймляющей ядро более светлой полосы — полутени. Ядро занимает около одной пятой всей площади солнечного пятна. Наблюдения, проведенные при благоприятных условиях, показали, что полутень состоит из раскаленных добела нитей, как бы «высеченных» в направлении к центру пятна и окаймляющих ядро.

Несомненно, что большие солнечные пятна являются обширными углублениями в фотосфере. Высказывалось предположение, что тонкие нити полутени — это конвективные потоки.

Зона, в которой появляются пятна, медленно перемещается по направлению к солнечному экватору. На широте 10 или 15° количество солнечных пятен достигает наибольшего значения. Прежде чем цикл пятен исчезнет, около экватора, на широтах $\pm 30^\circ$ уже возникает новый цикл.

Каждое солнечное пятно связано с сильным магнитным полем. Обычно пятна появляются парами. Пятна одной пары обладают противоположными по направлению магнитными полями и располагаются почти на одинаковой широте.

Периодическое появление пятен свидетельствует о том, что конвекция в солнечном ядре не происходит непрерывно. Конвективные потоки передаются из недр Солнца на его поверхность магнитогидродинамическими волнами.

§ 8. ВСПЫШКИ НА СОЛНЦЕ

Активность Солнца в значительной мере выражается в хромосферных вспышках, которые представляют собой внезапные усиления яркости части хромосферы (рис. 82). Вспышки наблюдаются как значительное местное увеличение яркости фотосферы, что свидетельствует о значительном местном возрастании температуры. Чаще всего происходят вспышки, которые длятся 5—10 мин и охватывают часть видимого полушария Солнца. При вспышке

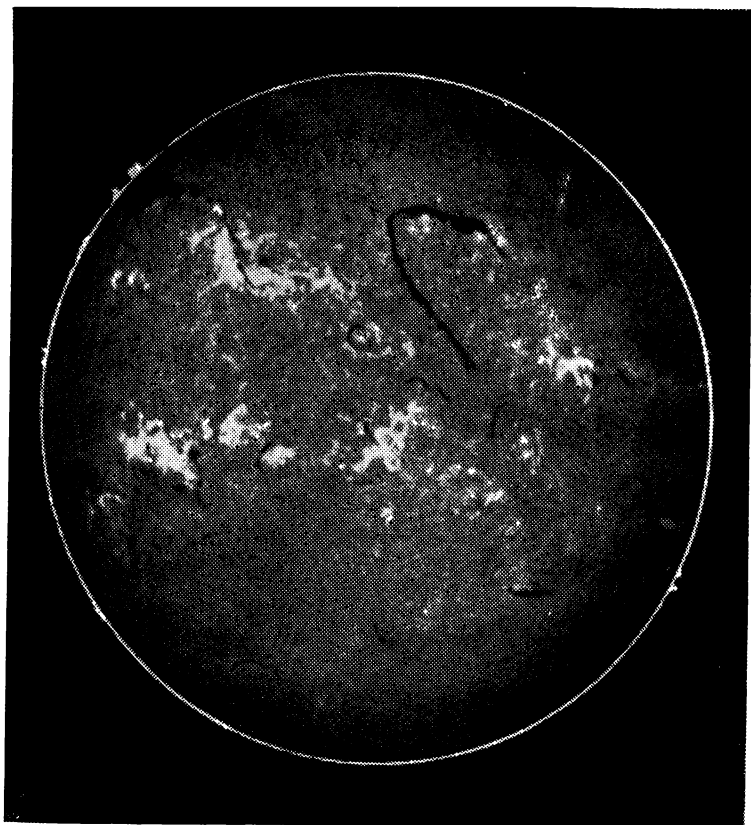


Рис. 82. Вспышки на Солнце.

часть солнечной атмосферы, равная площади большого солнечного пятна, внезапно вспыхивает, увеличивая в десятки раз свою яркость. Через 5—10 мин после возникновения наблюдается максимум интенсивности вспышки. Затем она медленно меркнет в течение 1—2 ч. В своей верхней части вспышка входит в область короны. Нижняя ее часть может быть оторвана от фотосферы. Обычно вспышку на диске через некоторое время сопровождает выброс темного узкого волокна на некотором расстоянии от солнечного пятна. Скорость выброса может достигнуть 500 км/с. Выбросы на краю солнечного диска видны как

узкие протуберанцы. Известны и другие формы хромосферных вспышек. Считают, что вспышки свидетельствуют о том, что термоядерные реакции происходят не только в недрах Солнца, но и в его внешних слоях.

Причиной хромосферных вспышек является то, что в области значительных неоднородностей магнитного поля возникает сильное сжатие ионизованного газа. Это сжатие протекает с огромной скоростью, и в результате образуется ударная волна. Если две такие ударные волны встречаются, то в месте встречи температура может повыситься до миллионов градусов. И здесь становятся возможными термоядерные реакции. Вспышки сопровождаются излучением в видимой, ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра. Кроме того, наблюдается излучение в радиодиапазоне. Во время вспышки усиливается испускание космических лучей.

§ 9. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СОЛНЦА И ЗВЕЗД

Солнце можно рассматривать как огромный хороший проводник. Особенно это относится к слоям, расположенным над фотосферой. В хромосфере и короне электропроводность газа в направлении, параллельном индукции магнитного поля, очень велика. В направлении же, перпендикулярном магнитной индукции, проводимость солнечной плазмы уменьшается по мере уменьшения плотности ионизованного газа. Таким образом, солнечная атмосфера является анизотропной средой.

Форма солнечной короны, особенно в полярных областях, форма и движения протуберанцев и другие особенности цикла солнечных пятен указывают на то, что Солнце и звезды являются большими магнитами. Измерения показывают, что магнитные поля звезд являются слабыми и не остаются постоянными. С помощью специального инструмента для измерения слабых магнитных полей на солнечной поверхности было установлено, что магнитное поле Солнца почти однородно в полярных областях. На остальной части солнечной поверхности его индукция значительно изменяется по модулю и по направлению.

Астрономы предполагают, что звездный магнетизм есть разновидность остаточного магнетизма, возникающего при рождении звезды.

Некоторые данные наблюдений говорят о том, что всю Галактику пронизывает слабое магнитное поле, которое может определенным образом ориентировать мелкие пылевидные частицы. Многие ученые основывают на таком представлении свои гипотезы о происхождении и причинах намагниченности звезд. Другие же связывают магнетизм звезд с теми электрическими токами, которые текут во внешних проводящих слоях звезд. Существуют и иные объяснения. Однако до настоящего времени все же не удалось полностью выяснить происхождение магнетизма Солнца и звезд.

Поскольку Солнце и звезды состоят из электропроводящей среды — плазмы, находящейся в магнитном поле, то в них существуют условия, благоприятствующие возникновению магнитогидродинамических волн.

Электромагнитные явления вместе с магнитогидродинамическими эффектами и неоднородностью вращения создают в солнечной и звездной атмосферах очень сложную картину.

§ 10. МАГНИТНЫЕ БУРИ И ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Магнитные бури. Первое опытное исследование земного магнетизма провел Вильям Гильберт. Результаты опытов Гильберта были опубликованы в 1600 г. Он нашел, что магнитное поле Земли подобно полю, возникающему вокруг намагниченного шара из куска природного магнитного железа. В дальнейшем Гаусс и другие ученые пока-

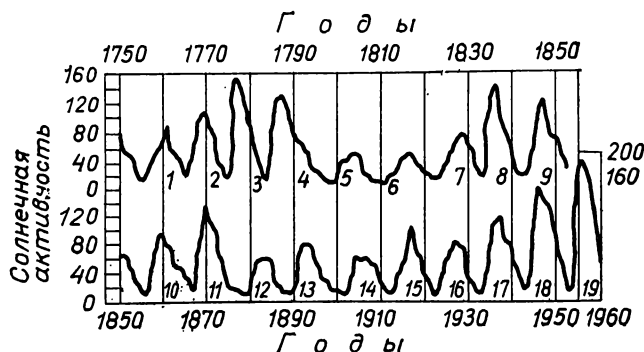


Рис. 83. Изменение солнечной активности за два столетия.

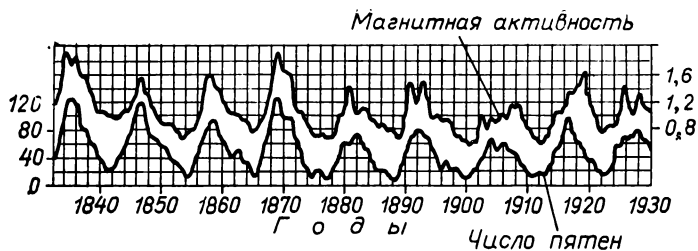


Рис. 84. Связь между числами солнечных пятен и магнитной активностью (с 1835 по 1930 г.).

зали, что магнитное поле Земли подобно полю однородной намагниченной сферы с магнитной осью, наклоненной на $11,5^\circ$ к географической оси Земли.

Свойства магнитного поля Земли периодически меняются. Период одних изменений магнитного поля Земли составляет сто лет, а других — сутки. Эти изменения находятся в тесной зависимости от солнечной активности (рис. 83 и 84).

Внезапно возникающие сильные изменения магнитного поля Земли получили название магнитных бурь. Они обнаруживаются по значительным колебаниям магнитной стрелки. Более слабые колебания магнитной стрелки обусловлены магнитными возмущениями.

Значительные колебания повторяются через 11 лет. Наблюдаются еще годичная периодичность, связанная с расположением Земли относительно солнечного экватора, и 27-дневная периодичность, связанная с вращением Солнца. Возмущения особенно часты в марте и сентябре.

Магнитные бури имеют своей первоначальной причиной возмущения на Солнце. Они часто начинаются на следующий день после хромосферной вспышки, которая сопровождается выбросами облаков ионизованных частиц (рис. 85). Эти облака частиц движутся через межзвездный газ, имеющий очень малую плотность. Частицы межзвездного газа при этом тоже ионизируются. Скорость распространения такого процесса составляет около 1500 км/с. На расстоянии нескольких земных радиусов от Земли движущийся проводящий газ встречает на своем пути магнитное поле Земли. В результате магнитное поле как бы вытесняется из движущейся плазмы и его индукция на Земле внезапно (в течение 1 мин.) возрастает.

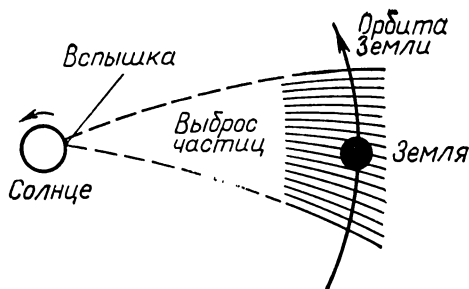


Рис. 85. Выброс частиц во время вспышки на Солнце.

Кривые магнитных бурь имеют одинаковые характерные особенности независимо от места их наблюдения. Во время магнитной бури происходит увеличение горизонтальной составляющей магнитной индукции. Это продолжается несколько часов. Затем индукция магнитного поля уменьшается и достигает значения ниже нормального. В течение последующих нескольких дней наблюдается медленное возвращение индукции магнитного поля Земли к нормальному значению.

Полярные сияния. В отличие от магнитных явлений, которые обнаруживаются только с помощью точных приборов, полярные сияния можно наблюдать визуально. Их редкие и неожиданные появления, загадочное движение, игра цветов и отсутствие объяснений этих явлений — все это привело к тому, что еще с древних времен полярные сияния были отнесены к чудесам.

Полярные сияния представляют собой интенсивное свечение неба, имеющее форму дуг, лучей, полос и занавесей (см. рис. III на цветной вклейке). В низких широтах полярные сияния наблюдаются лишь в периоды очень большой солнечной активности.

В полярных сияниях встречаются почти все цвета. Преобладающим, особенно в сияниях дугообразной формы, является зеленовато-желтый цвет. Сияния, имеющие форму светящихся поверхностей и занавесей, часто бывают красными или темно-красными. Изредка отмечались голубые и фиолетовые сияния.

25 января 1938 г. было отмечено одно из грандиознейших полярных сияний в нашем столетии. В момент, когда

да сияние достигло полного развития, большие области неба представлялись кроваво-красными со столбами бледно-зеленого, желтого, оранжевого, малинового цвета, которые двигались и сверкали. Небо превратилось в купол из ярко окрашенных полос и облаков.

Число почей, в которых наблюдаются полярные сияния, растет с приближением к северному или южному магнитным полюсам. Однако, какова бы ни была широта, изменение от года к году частоты появления полярных сияний тесно связано с солнечной активностью. Было установлено, что полярные сияния возникают особо часто через сутки после прохождения больших солнечных пятен через солнечный меридиан. Аналогичная зависимость была найдена для больших магнитных бурь на Земле.

Полярные сияния вызываются электронами и протонами, которые влетают в верхние, сильно разреженные слои земной атмосферы. Глубина проникновения в атмосферу Земли зависит от энергии этих частиц и тормозящего действия верхних слоев атмосферы. Высоты 80—100 км над Землей, на которой наблюдаются сияния, достигают электроны, имеющие энергию 10 000—100 000 эВ. Потоки электронов и протонов создают в окрестности Земли электрическое поле. В момент, когда разность потенциалов между этими потоками (заряженными «посланцами» Солнца), с одной стороны, и верхними ионизованными слоями земной атмосферы, с другой стороны, достигает достаточного значения, происходит газовый разряд, являющийся причиной сильной магнитной бури. А свечение этого разряда и есть полярное сияние.

Путем сравнения спектра, полученного на опыте в лаборатории, со спектрами полярных сияний было установлено, что полярные сияния возбуждаются электронами, имеющими энергию около 30 эВ.

§ 11. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Заряженные частицы с очень высокими энергиями, приходящие к Земле из межзвездного пространства и от Солнца, называются космическими лучами. Наблюдение космических лучей является одним из наиболее важных методов для изучения электромагнитных свойств межзвездного пространства.

Когда космические лучи входят в верхние слои земной атмосферы, они состоят главным образом из заряженных частиц огромных энергий. Оказывается, что в космических лучах положительно заряженных частиц значительно больше, чем отрицательно заряженных.

Интенсивность проникающих в атмосферу Земли космических лучей зависит от географической широты. Магнитное поле Земли позволяет космическим частицам с данным значением импульса входить в верхние слои земной атмосферы только на тех широтах, которые превышают некоторое критическое значение. Частицы высокой энергии могут достичь Земли даже на экваторе. Изучение взаимосвязи между свойствами космических лучей, солнечной активностью и магнитными бурями на Земле привело ученых к выводу о существовании двух типов космических лучей: галактических и солнечных.

Потоки галактических космических частиц весьма слабо связаны с активными образованиями на Солнце, и их число почти не меняется при изменении числа солнечных пятен. Галактические космические лучи образуются за пределами солнечной системы и состоят из частиц, энергия которых доходит до 10^{19} эВ.

Космические лучи галактического происхождения в основном состоят из протонов. Потоки же солнечных космических частиц тесно связаны с хромосферными вспышками и другими активными образованиями на Солнце. Достигая Земли, они вызывают магнитные бури.

Число потоков солнечных космических лучей сильно меняется в течение цикла солнечной активности. При мощных хромосферных вспышках наблюдается испускание протонов больших энергий. В течение одного года обычно происходит около десяти вспышек, сопровождающихся испусканием больших потоков медленных протонов. Протоны малых энергий вызывают ионизацию газа в верхних слоях атмосферы. Ионизованные молекулы кислорода образуют слои ионосферы, которые поглощают галактическое радиоизлучение и имеют большое значение для распространения радиоволн. Большинство хромосферных вспышек сопровождается испусканием протонов, имеющих малые энергии. Напряженность магнитного поля в этих потоках частиц оказывается в десять раз выше, чем в потоках галактических космических лучей. Скорость движения потоков солнечных космических частиц дости-

гает 1000—2000 км/с. У Земли плотность потока солнечных частиц с энергиями, большими 10^9 эВ, в несколько сот раз превышает нормальный поток галактических космических лучей.

§ 12. СОЛНЕЧНЫЙ И ЗВЕЗДНЫЙ ВЕТЕР

Потоки плазмы, непрерывно испускаемые Солнцем, называются солнечным ветром. Он образуется за счет того, что из Солнца непрерывно вылетают частицы (корпускулы) невысокой энергии, имеющие скорость 300—400 км/с. Концентрация таких частиц в пространстве доходит до $2 \cdot 10^7$ частиц/м³. Солнечный ветер создает межпланетное магнитное поле. Источником солнечного ветра, по-видимому, является неустойчивость короны Солнца, которая непрерывно расширяется. Скорость расширения короны может превзойти скорость звука на больших расстояниях от центра Солнца. Возникая на Солнце, такой водородный ветер дует в солнечной системе, проносясь мимо Земли с огромной скоростью; он достигает самых удаленных планет и уходит в межзвездное пространство.

Такой сверхзвуковой ветер оказывает влияние на встречающиеся препятствия, например на атмосферу планеты и ее магнитное поле. В частности, на дневной стороне Земли радиационный пояс действием солнечного ветра сплюснут, в то время как на ночной стороне он открыт и простирается на расстояние свыше 40 земных радиусов, напоминая по форме кометный хвост. Солнечный ветер вызывает геомагнитные бури и полярные сияния.

Ученые считают, что, кроме солнечного ветра, существует и звездный ветер, дующий от других звезд Вселенной.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

3

Глава 1.

РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ

10

Глава 2.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ

19

Глава 3.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЫ

26

Глава 4.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ЯВЛЕНИЯ ПЕРЕНОСА В ПЛАЗМЕ

37

Глава 5.

ПЛАЗМА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

47

Глава 6.

ПЛАЗМА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

56

Глава 7.

ПЛАЗМА КАК ЖИДКОСТЬ

79

Глава 8.

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ

92

Глава 9.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН В ПЛАЗМЕ

99

Глава 10.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПЛАЗМЕ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

103

Глава 11.

ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ

111

Глава 12.

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ

120

Глава 13.

О БУДУЩЕМ ПЛАЗМЫ

123

Глава 14.

ПЛАЗМА ВО ВСЕЛЕННОЙ

138

Рисунок на обложке:

туманность в созвездии Орiona

Владимир Петрович Милантьев
Спартак Вольфович Темко

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Редактор *Г. Р. Лисенкер*
Художник *С. Ф. Лухин*
Художественный редактор *В. М. Прокофьев*
Технический редактор *Н. Д. Стерина*
Корректоры *Р. С. Збарская, Л. П. Михеева*

●

ИБ № 6937

Сдано в набор 10.03.82. Подписано к печати 03.09.82. А 03784.
84×108¹/₃₂. Бумага — кн. журн.
Гарнитура об. новая. Печать высокая.
Усл. печ. л. 8,04+0,21 вкл. Усл. кр.-отт. 9,66. Уч.-изд. л. 8,03+0,28
Тираж 175 000 экз, Заказ № 1015, Цена 30 коп,

●

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение»
Государственного комитета РСФСР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли.
Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
150014, Ярославль, ул. Свободы, 97,

II.

