

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ЭНЕРГИЯ СЛИЯНИЯ ЯДЕР*)

Р. Пост

Попытки «усмирения» реакции, происходящей в водородной бомбе, с целью использования энергии слияния ядер в качестве контролируемой силы делаются во многих странах мира. Хотя эти попытки совершаются без особого шума, за завесой официальной секретности, тем не менее весьма энергично и с широким размахом. Во всех странах отчетливо сознают, что эти исследования могут явиться самыми важными за всю историю человечества. Конечный выигрыш от решения проблемы столь велик для каждой страны в отдельности и для человечества в целом, что нарастающее чувство неотложности и решимости довести дело до конца непрерывно вдохновляет работу многих стран над этой проблемой.

Прогресс нашей промышленной цивилизации в первой половине XX века был основан на ископаемых горючих — угле и нефти. Многие страны вообще не обладают запасами этих ископаемых; страны, располагавшие достаточными запасами, к настоящему времени обнаруживают быструю их убыль. При таком положении дел на помощь пришел уран, подавший определенные надежды на будущее. Электрический ток уже пошел от первых электростанций, работающих на ядерном делении. В Англии предлагают перейти на ядерное топливо, работающее на делении, в такой степени, чтобы обеспечить основные энергетические потребности страны за счет этого топлива в течение ближайших десятилетий; во многих других странах приняты аналогичные планы. Даже в Соединенных Штатах, располагающих колоссальными запасами угля, расходуются сотни миллионов долларов для того, чтобы обеспечить переход к энергетике ядерного деления в не слишком далеком будущем.

Мировые запасы урана и тория, как это показывают подсчеты, содержат в себе запас энергии, заключенный в интервале между десяти- и стократным запасом энергии оставшихся запасов угля. Следовательно, горючее, использующее деление ядер, также может быть исчерпано в ближайшее время. При том темпе, с которым возрастают мировые энергетические потребности (в Соединенных Штатах, например, приходится удваивать мощность электрических станций примерно через восемь лет), практически все экономически доступные запасы урана, а также угля будут исчерпаны в течение ближайшего столетия. Однако использование энергии деления ядер вызывает некоторые проблемы уже и в настоящее время: речь

*) R. Post, Scientific American 197, № 6, 73 (1957). В оригинале подзаголовок: «Если бы удалось управлять реакциями, в которых атомные ядра чаще сливались, чем расщеплялись, мы получили бы почти неисчерпаемый источник энергии. Этой задачей заняты в настоящее время многочисленные научные учреждения во всем мире». Настоящая статья является сильно сокращенным и упрощенным вариантом обзора автора, опубликованного в УФН 61, 491 (1957). Там же приведена советская и иностранная литература. См. также статьи настоящего выпуска на стр. 182—205.

идет о размещении радиоактивных отходов. Если современные энергетические нужды Соединенных Штатов будут покрываться за счет реакторов деления, то каждый год необходимо будет размещать такое количество радиоактивных продуктов деления, которое эквивалентно количеству радиоактивных продуктов, получаемому при взрыве 200 000 атомных бомб; к 2 000 году, с учетом возрастающих мощностей, годовые радиоактивные отбросы станут уже эквивалентны радиоактивным отходам восьми миллио-

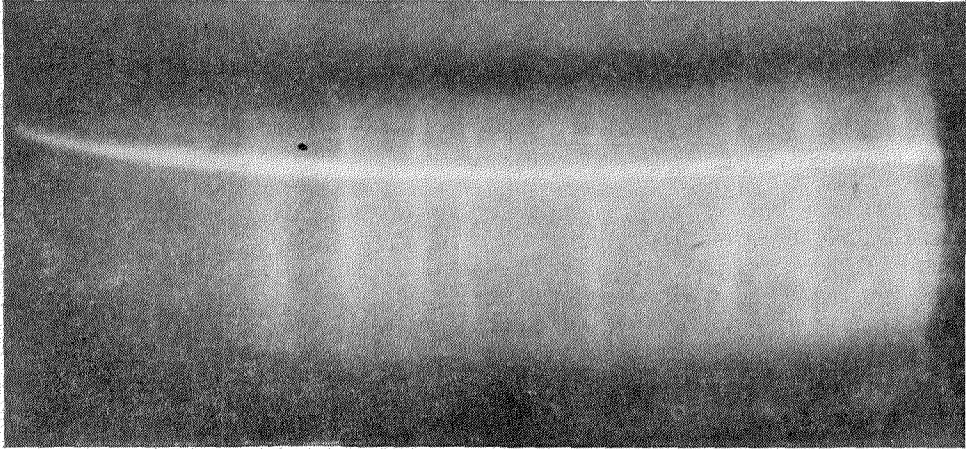


Рис. 1. Горячая плазма (электрически нейтральная смесь положительных ионов и электронов) представлена на этой увеличенной фотографии в виде яркой горизонтальной линии. Газ нагрет и сжат за счет «пинч-эффекта», производимого током силой 8000 а. Этот эксперимент, где использован газообразный криптон при давлении 0,0002 атм, был выполнен в Лос-Аламосской научной лаборатории.

нов атомных взрывов, производимых в течение одного года! Очевидно, что задача безопасного отвода радиоактивных зол и газов в наступающем веке энергетических устройств, основанных на делении ядер, весьма скоро станет чрезвычайно сложной.

Все эти соображения позволяют объяснить ту поспешность, с которой повсюду стремятся решить вопрос о том, можно ли использовать энергию термоядерной реакции, чтобы превратить ее в работу. Если реакция слияния будет приспособлена для получения энергии, то этим самым будут решены сразу обе проблемы — проблема энергетических запасов и проблема радиоактивных отходов. Основное горючее, необходимое для реакций слияния, — дейтерий — так же неисчерпаем, как и океан; продукты слияния не влекут за собой сколько-нибудь заметных количеств побочных радиоактивных продуктов.

РЕАКЦИЯ СЛИЯНИЯ

Ядерные слияния являются отнюдь не новым явлением. Именно этим реакциям обязаны своей энергией в течение миллиардов лет солнце и звезды. Физики в своих лабораториях уже знали о реакциях слияния до того, как они открыли реакции деления. Но осуществить и контролировать процесс ядерного слияния на земле — задача совсем другого порядка, чем использование энергии ядерного деления. Совершенно несомненно, что эта задача является наиболее сложной из всех задач, когда-либо поставленных перед учеными и инженерами. В предлагаемой статье рассказывается об успехах в этом направлении, которые достигнуты в настоящее время.

В 20-х и 30-х годах физики, работавшие на ускорителях атомных частиц, обнаружили, что, ускоряя протоны (ядра водорода) и другие легкие ядра до достаточно высоких энергий (порядка многих тысяч электрон-вольт), можно сделать их способными к преодолению сил электрического отталкивания ядер и заставить соединиться с легкими ядрами мишени. Такое слияние высвобождает некоторую энергию, потому что часть массы сливающихся ядер превращается в энергию, согласно знаменитому соотношению Эйнштейна $E=mc^2$. Но при бомбардировке такого рода, для того чтобы получить несколько ядерных слияний, необходимо затратить очень большое количество энергии. Таким образом, указанным путем никакого выигрыша энергии от реакции слияния получить нельзя, если только реакция слияния не станет самоподдерживающейся, как это имеет место, например, во внутренних частях Солнца.

Но что требуется для того, чтобы вызвать самоподдерживающуюся реакцию? Здесь будет вполне уместно сравнить процессы слияния и деления. Цепная реакция деления аналогична взрыву любого взрывчатого вещества. Вполне достаточно механического удара, чтобы во взрывчатом веществе начался процесс взрыва; ударная волна, вызванная разрывом нестабильных молекул, быстро распространяется от одной молекулы к другой. Аналогично ударной волне, в цепной реакции деления причиной последующего деления ядер являются нейтроны; каждый акт деления высвобождает нейтроны, способные вызвать деление большего числа атомов урана. Коротко говоря, в развитии цепной реакции тепловая энергия (кинетическая энергия частиц) не играет существенной роли.

Непрерывная реакция слияния, напротив, аналогична хорошо известному процессу воспламенения. При обычном горении происходит соединение молекул (например, соединение водорода с кислородом, образующее молекулы воды), и такая химическая реакция ведет к высвобождению энергии. Для того чтобы соединиться или слиться, молекулы должны сталкиваться весьма энергично, откуда вытекает необходимость нагревания материала. Необходимы три условия для того, чтобы вызвать горение химического топлива и превратить в работу получаемое при этом тепло;

1) температура топлива должна быть поднята до температуры воспламенения,

2) необходимо иметь достаточное количество топлива, чтобы поддерживать непрерывную реакцию,

3) выделяемая энергия должна быть переведена в определенную контролируемую форму (например, она должна нагревать воду или перемещать поршень).

Эти же самые условия необходимы, чтобы вызвать реакцию ядерного слияния и использовать получаемую при этом энергию. Существенным отличием является то, что для реакций слияния температура воспламенения значительно выше температуры воспламенения обычного топлива; эта температура составляет сотни миллионов градусов Цельсия*).

Именно это обстоятельство — выполнение которого в земных условиях вплоть до последнего времени было просто невыполнимым — лежит в основе всех наших трудностей. Именно отсюда проистекает целая вереница сложнейших вопросов. К несчастью, по-видимому, не существует ни одного решающего эксперимента, который указывал бы на то, что решение поставленной задачи возможно; в случае реакций деления ядер такой эксперимент был. Мы должны пройти через большое количество экспериментов, чтобы решать одну проблему за другой. Большинство проблем имеет

*) Как это будет ясно из дальнейшего, это значение температуры в случае реакций слияния существенно зависит от объема, в котором происходит реакция.

дело с количественными величинами, т. е. с некоторыми числами. Никогда не было еще такой области исследования, в которой числа были бы столь внушительны и вместе с тем столь важны.

ГОРЮЧЕЕ РЕАКЦИЙ ЯДЕРНОГО СЛИЯНИЯ

Первое, на чем мы должны остановиться, — это горючее. Наиболее интересным кандидатом является дейтерий, тяжелый изотоп водорода, содержащийся в обычной воде. Ядра атомов дейтерия состоят из одного протона и одного нейтрона. Когда два ядра дейтерия (дейтона) сталкиваются, обладая энергией, достаточной для слияния, один из дейтонов захватывает либо протон, либо нейтрон другого дейтона, причем вероятности обоих захватов одинаковы. Если происходит слияние с протоном (причем высвобождается нейтрон), то образуется гелий-III и высвобождается около 3,25 миллиона электрон-вольт энергии. Если происходит слияние с нейтроном (в этом случае высвобождается протон), то высвобождается около 4 миллионов электрон-вольт энергии и образуется водород-III, называемый тритием, который является радиоактивным изотопом водорода. Дейтон и ядро трития (тритон) сливаются более охотно, чем два дейтона, причем эта реакция высвобождает большую энергию, чем предыдущая. Таким образом, тритий может служить другим возможным топливом для термоядерных реакторов. Однако тритий необходимо получать искусственным путем, подобно плутонию, поскольку в природе имеются лишь незначительные следы этого элемента. Один из возможных способов получения трития состоит в том, что литий бомбардируется медленными нейтронами: захватывая нейтрон, литий распадается на тритий и гелий-IV.

Полное «сжигание» дейтонов и продуктов реакции между ними (трития и гелия-III) в термоядерном цикле позволяет получить энергию около 7 миллионов электрон-вольт на один сожженный дейтон. Это соответствует 95 миллионам киловатт-часов на 1 кг топлива. Для сравнения укажем, что бензин, являющийся одним из лучших химических топлив, дает 13 киловатт-часов на 1 кг. Хотя дейтерий составляет весьма малую часть

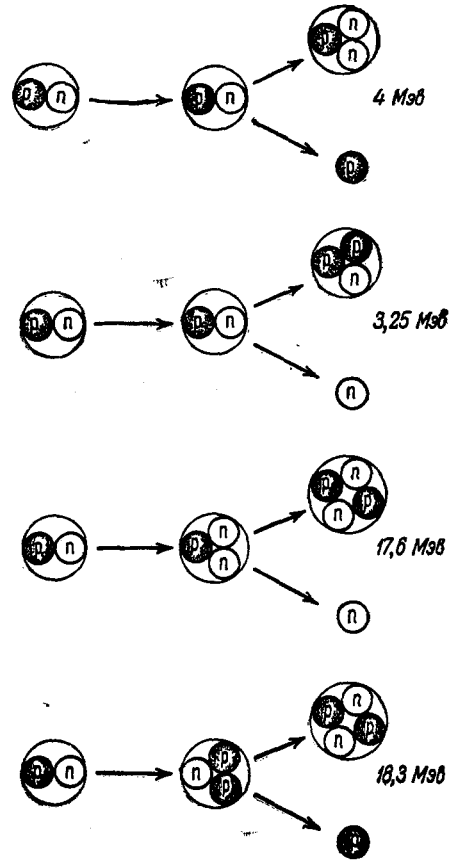


Рис. 2. Реакции слияния, которые могут оказаться полезными для получения ядерной энергии, показаны в схематическом виде. В верхней части рисунка два дейтона, сливаясь, образуют ядро трития (тритон) и протон. Ниже приведена реакция, идущая с такой же вероятностью, как и первая, в которой дейтоны образуют гелий-III и нейтрон. Третья сверху реакция показывает, как сочетание дейтона и тритона приводит к образованию гелия-IV и нейтрона. Внизу дейтон сливается с ядром гелия-III, образуя гелий-IV и протон. Энергия высвобождается в каждой реакции, указана справа от каждого рисунка. Протон и нейтрон обозначены соответственно как p и n.

водорода, содержащегося в естественной воде, запас энергии, заключенной в дейтерии, содержащемся в одном литре обыкновенной воды, эквивалентен энергии, заключенной в 350 литрах бензина! В океанах содержится вполне достаточное количество дейтерия, для того чтобы обеспечить человечество горючим на миллиарды лет, даже если потребляемая энергия вырастет в тысячу раз по сравнению с энергией, потребляемой сегодня. Согласно программе работ по атомной энергии в Соединенных Штатах Америки, по данным, опубликованным в печати, уже в настоящее время производится такое количество дейтерия, сжигание которого было бы достаточно для того, чтобы выработать такое количество энергии, которое в несколько раз перекроет энергетические потребности страны. Стоимость извлечения дейтерия из воды не слишком высока, так что дейтерий будет стоить примерно одну сотую того, что стоит уголь как топливо. И наконец, ядерное сжигание дейтерия и трития ведет только к образованию инертных газов, снимая вопрос о размещении отходов реакции.

Следовательно, дейтерий представляет собой «исходное топливо». Однако, большие возможности, заключенные в нем, сочетаются одновременно с немалыми трудностями при подыскании способа его воспламенения.

Воспламенение термоядерного горючего без последующего контроля реакции было успешно осуществлено, как это всем хорошо известно, в водородной бомбе. Однако задача осуществления контролируемой реакции слияния — дело совсем иного рода. Постараемся уяснить себе, каковы необходимые для этого условия. Лучшим способом для этого является рассмотрение некоторого воображаемого эксперимента.

ПЛАЗМА

Возьмем литр газообразного дейтерия и поместим его в закрытый сосуд, сделанный из некоего мифического материала, способного противостоять чудовищным температурам и давлениям, которые возникнут в процессе эксперимента. При комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении молекулы газообразного дейтерия движутся в сосуде со средней кинетической энергией, равной примерно 0,04 электрон-вольт, или — что то же самое — со средней скоростью около 5000 км/час. Разумеется, ни о каких реакциях слияния в этих условиях не может быть и речи. Нагреем теперь этот газ до температуры 5000° С. При этой температуре молекулы существовать уже не могут; энергичные столкновения между молекулами разбивают их на отдельные атомы дейтерия. Давление поднимается уже до 40 атмосфер, а средняя скорость атомов достигает около 60 000 км/час. Но мы тем не менее все еще очень далеки от тех скоростей, которые необходимы для того, чтобы два ядра могли слиться.

Повысим еще температуру и сделаем ее равной 100 000° С. Удивительные свойства примененного нами мифического материала сейчас пригодятся как нельзя кстати: всякий реальный материал уже давно превратился бы в пар. Теперь уже атомы газообразного дейтерия расщепились на электрически заряженные ядра (дейтоны) и электрически заряженные электроны; одним словом, газ превратился в то, что принято называть п л а з м о й. Давление газа возросло до 1500 атмосфер. Средняя скорость электронов стала равной 16 миллионам километров в час, и даже значительно более тяжелые дейтоны движутся с колоссальной скоростью 270 000 км/час. Но все же у дейтонов не хватает энергии, чтобы преодолеть их взаимное электрическое отталкивание. При этой температуре в литре плазмы будет только одно слияние в течение 500 лет. Нам предстоит еще проделать длительный путь, чтобы добраться до температуры воспламенения основной массы дейтонов.

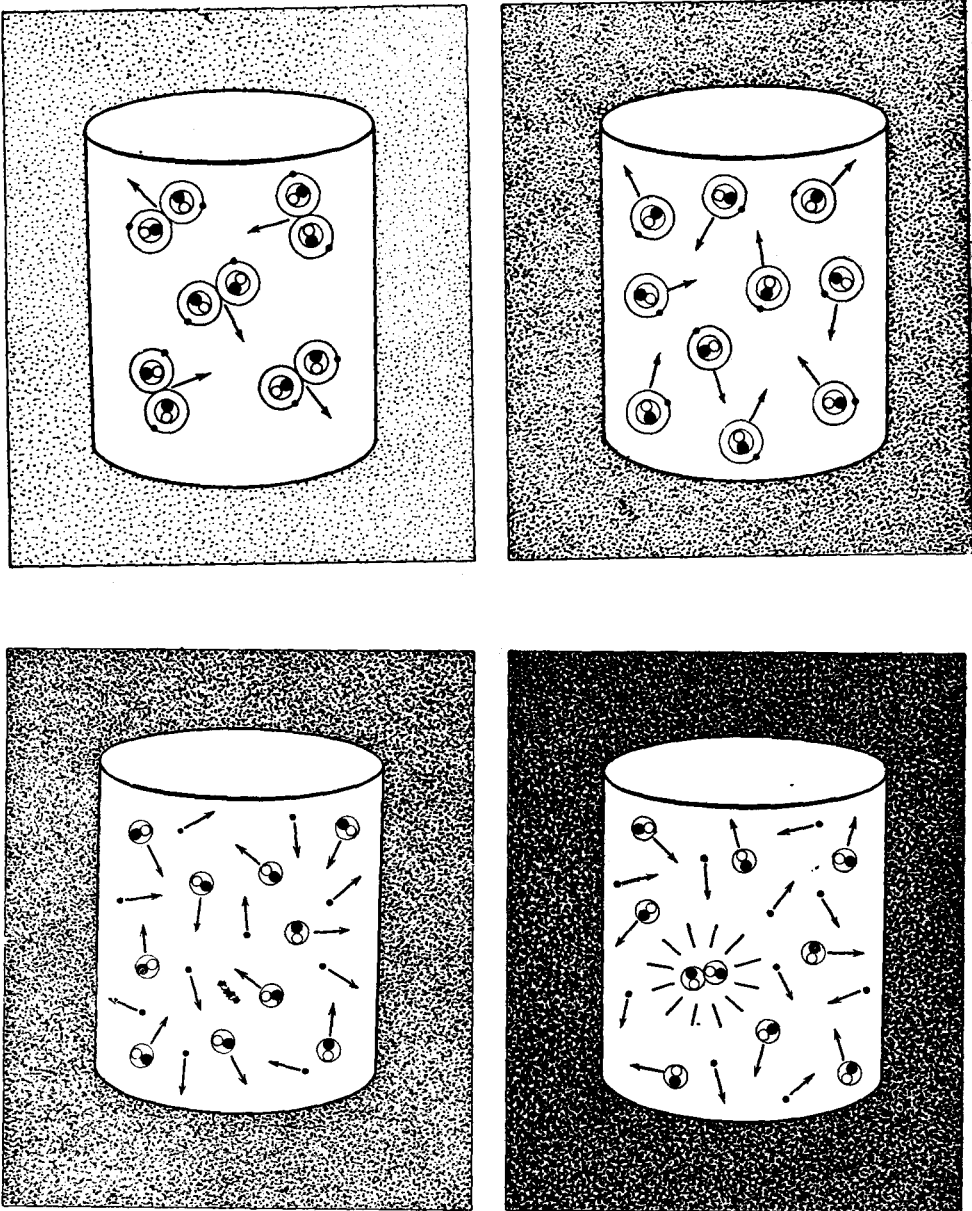


Рис. 3. Воображаемый эксперимент показывает результат нагревания газообразного дейтерия. Вверху слева газ взят при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении. Нагретые до 5000°C двухатомные молекулы расщепляются, образуя атомы дейтерия (справа вверху), давление становится равным 40 атмосферам. Когда температура достигает $100\,000^{\circ}\text{C}$, атомы ионизируются, образуя плазму, состоящую из электронов и дейтронов (внизу слева); давление становится равным 1500 атмосфер. При температуре $100\,000\,000^{\circ}\text{C}$ (и давлении 1 500 000 атмосфер) некоторые дейтроны могут сливаться, высвобождая энергию; однако реакция все еще не является самоподдерживающейся (внизу справа).

При температуре, равной $1\,000\,000^\circ\text{C}$, скорость реакции слияния увеличится в миллиард миллиардов раз, но полный энергетический выход будет все же еще столь мал, что его будет невозможно обнаружить: всего лишь несколько миллионных долей ватта на кубический сантиметр. При 100 миллионах градусов скорость реакции будет более осязаемой. Давление теперь достигнет потрясающей цифры 1,5 миллиона атмосфер. Электроны будут двигаться со скоростью $140\,000\text{ км/сек}$, а дейтоны — со скоростью 2400 км/сек (это значит, что вокруг земного шара они обойдут за 16 сек). Основная масса дейтонов прореагирует друг с другом за короткий промежуток времени (за доли секунды), и эти реакции высвободят фантастическую мощность: около 100 миллионов киловатт. Но мы все-таки еще не достигли момента воспламенения: для поддержания реакции пока нужно ввести энергии больше, чем высвободится при слияниях. И лишь при температурах около 350 миллионов градусов появится «огонь»; другими словами, термоядерная реакция станет самоподдерживающейся.

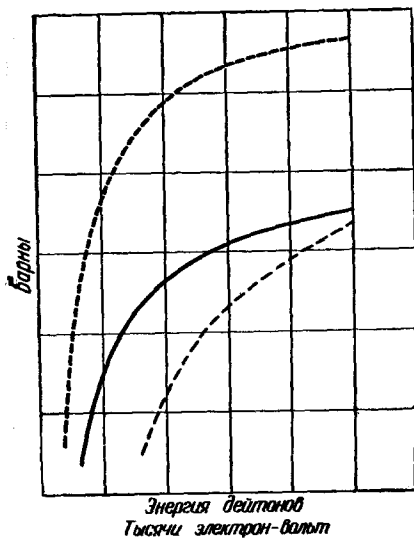


Рис. 4. Сечения или вероятности реакций слияния в зависимости от энергий частиц для слияния дейтрона и трития (верхняя кривая), дейтрона с дейтерием (средняя кривая) и дейтрона и гелия (нижняя кривая). Барн представляет собой площадь размером 10^{-24} см^2 .

нибудь порядка плотности, соответствующей одной десятитысячной атмосферы. Однако что же это за эфемерное топливо! При таких плотностях в лаборатории газы рассматриваются практически как вакуум.

Одним из очень интересных следствий использования весьма малых плотностей является то, что, хотя плазма и очень горяча, если рассматривать скорости движения ее частиц, тем не менее количество тепла, которое она содержит, фактически очень мало. Литр дейтериевой плазмы, имеющей плотность, которая соответствует при комнатной температуре давлению 0,0001 атмосферы, и кинетическую температуру 350 миллионов градусов, обладает количеством теплоты, равным 18 000 калорий. Этого количества едва хватит для того, чтобы нагреть небольшую чашку кофе.

Для того чтобы подсчитать мощность, выделяемую при реакциях слияния в горячей плазме, нужно знать только сечения реакций и ввести их в качестве известных данных в теорию термоядерных реакций в горячей газе (см. рис. 4). Однако такого рода подсчеты, весьма важные сами по себе, поскольку они позволяют установить требуемые физические условия, не могут пролить свет на вопросы о том, как можно нагреть газ до

Этот воображаемый эксперимент указывает на несколько важных обстоятельств. Во-первых, нам необходимы чрезвычайно высокие температуры, хотя, когда мы говорим здесь о высоких температурах, мы подразумеваем не тепло в обычном понимании этого слова, а кинетическую энергию частиц газа. Во-вторых, мы даже не можем думать об использовании горючего при обычных концентрациях газов. Если мы хотим иметь энергетический выход и рабочие давления газа в пределах, допускающих контроль с нашей стороны, то мы должны начинать с разреженного газа, имеющего плотность значительно ниже, чем плотность при атмосферном давлении, плотность что-

температур, соответствующих термоядерным реакциям, и при каких условиях начавшаяся термоядерная реакция окажется самоподдерживающейся. Ответ на последний вопрос зависит от того, какая доля энергии теряется через излучение и другие механизмы, ведущие к потерям. На Солнце энергия, производимая внутри его громадного объема, достаточна для того, чтобы поддерживать происходящие реакции, несмотря на огромные потери на излучение, идущие через его поверхность. Если бы мы смогли построить реактор слияния размером с Луну, нам не пришлось бы особенно беспокоиться о потерях энергии. Однако для реактора практически достижимых размеров потери энергии являются одной из ключевых проблем.

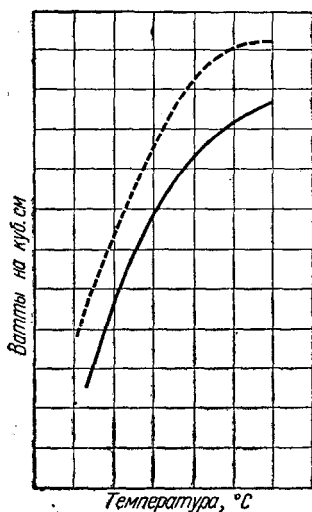


Рис. 5. Мощность, выделяемая плазмой при плотности, соответствующей давлению 0,0001 атмосферы, показана в зависимости от температуры. Верхняя кривая относится к слиянию дейтерия и трития; нижняя — к слиянию дейтерия с дейтерием.

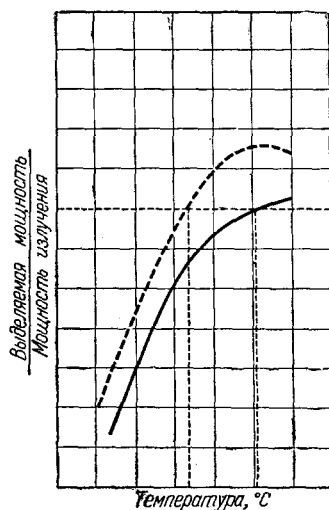


Рис. 6. Температура воспламенения, определяемая условием равенства выделяемой мощности и мощности излучения, отмечена вертикальным пунктиром для дейтерия — трития (верхняя кривая) и дейтерия — дейтерия (нижняя кривая).

Позвольте начать с неизбежных потерь, которые всегда будут существовать. Речь идет о потерях на излучение плазмы; излучение возникает в форме рентгеновских лучей, испускаемых при столкновениях электронов с ядрами. При температуре 100 миллионов градусов один кубический сантиметр плотного вещества излучает энергию в неправдоподобном количестве — три миллиона миллионов миллионов киловатт! Но, к счастью, мощность радиации очень быстро убывает по мере убывания плотности вещества. При малых плотностях, о которых шла речь выше, потери на излучение становятся сравнительно небольшими. Энергетический же выход реакций слияния быстро возрастает при возрастании температуры и превосходит потери на излучение при температуре около 50 миллионов градусов в случае дейтон-тритонной реакции и около 370 миллионов градусов в случае дейтон-дейтонной реакции. Эти температуры, следовательно, и являются температурами воспламенения соответствующих горючих.

Однако плазма должна быть очень чистой, так как ядра более тяжелых элементов (более тяжелых, чем водород и гелий) весьма существенно уве-

личивают мощность излучения. Поразительно малое количество примесей может испортить весьма значительный объем плазмы. Например, металла, содержащегося в головке французской булавки и превращенного в пар, вполне достаточно, чтобы отравить несколько железнодорожных цистерн, наполненных плазмой. Совершенно очевидно, что чистота газа является важнейшим требованием для всякой контролируемой реакции слияния.

Из потерь энергии другого класса, потерь, которые мы можем и должны снизить, наиболее серьезными являются потери энергии частицами на стенках реактора. Мы должны пользоваться закрытой камерой, чтобы сдерживать атмосферное давление и держать газ при малой плотности. Присмотримся к отдельным частицам этого газа. Эти частицы настолько сильно удалены друг от друга в газе, весьма близком по своему состоянию к вакууму, что каждый дейтон в своем непрерывном хаотическом движении проходит много километров, прежде чем он столкнется с другим дейтоном (или тритоном). У дейтона гораздо больше шансов столкнуться со стенкой реактора, чем с другой частицей газа. А если дейтон сталкивается со стенкой, то он немедленно теряет часть своей энергии. Очевидно, мы должны воспрепятствовать соударениям частиц плазмы со стенками реактора. Это нужно сделать не потому, что горячая плазма вызовет испарение стенок реактора, как это может показаться с первого взгляда, а просто потому, что контакт со стенками приводит к немедленному охлаждению плазмы и прекращению реакции.

В этом и заключается вся соль проблемы. Как заключить очень горячий газ внутрь материальной камеры (хотя бы на время порядка долей секунды) так, чтобы основная масса этого газа не могла достигать стенок камеры. Поставленная в такой форме задача звучит как научно-фантастическая проблема, совершенно неразрешимая в любой реальной ситуации. Но, как это хорошо известно сейчас, примерно лет десять тому назад было предложено остроумное решение этой задачи: плазма может быть удержана в магнитном поле, которое будет служить как бы внутренней печью в камере, причем эта печь предотвращает столкновения частиц со стенками реактора.

МАГНИТНАЯ БУТЫЛКА

Идея этого метода в основном опирается на тот простой факт, что сильное магнитное поле отклоняет заряженные частицы от прямолинейного движения (рис. 7). Горячая плазма, находящаяся под высоким давлением, при определенных условиях может создать собственное магнитное поле, достаточно сильное, чтобы скомпенсировать внешнее давление. Внутри плазмы частицы будут двигаться прямолинейно, так как магнитного поля там нет. Но на границах плазмы частицы будут отклоняться внешним магнитным полем назад в плазму (рис. 8). Магнитные силовые линии, действующие подобно упругим резиновым шнурам, могут противостоять значительным давлениям. Если сделать магнитное поле достаточно сильным, оно может образовать магнитную «стенку», способную выдерживать плазму высокого давления, совершенно аналогично тому, как стальной цилиндр сдерживает высокое давление газа. Согласно теоретическим подсчетам, поле с напряженностью 50 000 гаусс, например, может противостоять давлению плазмы около 100 атмосфер, а поле в десять раз сильнее (такое поле было достигнуто в лабораторных условиях) может выдерживать давление до 10 000 атмосфер.

Реакция слияния, происходящая в такой магнитной бутылке, никогда не может «вырваться», как это может произойти в случае цепной реакции деления. Если давление плазмы делается сильнее сдерживающего магнитного поля, то оно разрывает магнитную стенку и плазма приходит

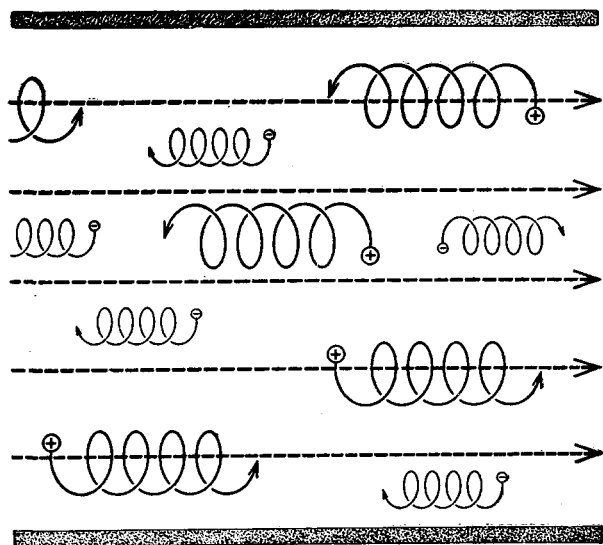


Рис. 7. Траектория частиц плазмы в магнитном поле представляет собой спираль. Положительные частицы вращаются против часовой стрелки; отрицательные — по часовой, если смотреть по направлению магнитного поля.

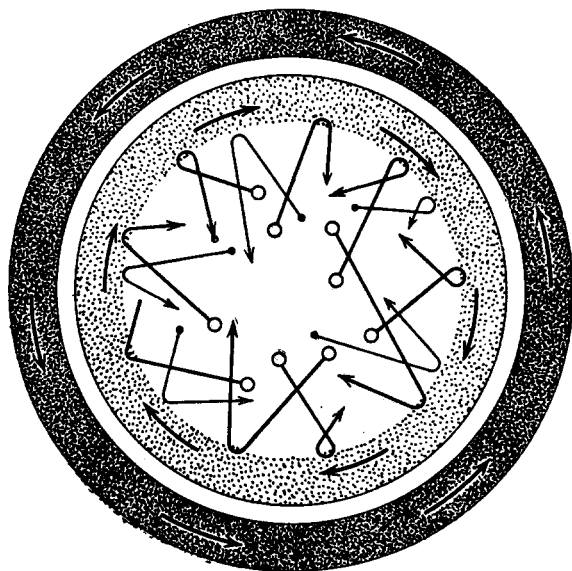


Рис. 8. Плазма сдерживается магнитным полем (кольцо из точек), которое предотвращает уход частиц. Внешние стрелки указывают направление тока во внешней обмотке; внутренние стрелки — ток, образуемый отклоняемыми частицами.

в соприкосновение со стенками камеры, от чего реакция слияния немедленно прекращается. По своей природе, следовательно, реактор слияния никогда не может взорваться; он может только прекратить свою деятельность.

Упрощенная картина, рассмотренная нами, упускала из виду то, что магнитная бутылка будет не совсем герметической. На самом деле плазма

и магнитное поле будут постепенно проникать друг в друга и перемешиваться; плазма в конце концов может ускользнуть полностью, если ее не пополнять. К счастью, утечка плазмы происходит сравнительно медленно и, как показывает теория, позволяет осуществить самоподдерживающуюся реакцию слияния. Но, как мы увидим, магнитная бутылка вовсе не всегда ведет себя так, как это предсказывает простейшая теория. Взаимодействие между высокотемпературной плазмой и магнитным полем представляет собой трудную задачу теоретической физики; изучение этого взаимодействия открыло новую область исследований, которую можно не без основания назвать «экспериментальной астрофизикой».

СЖАТИЕ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА (ПИНЧ-ЭФФЕКТ)

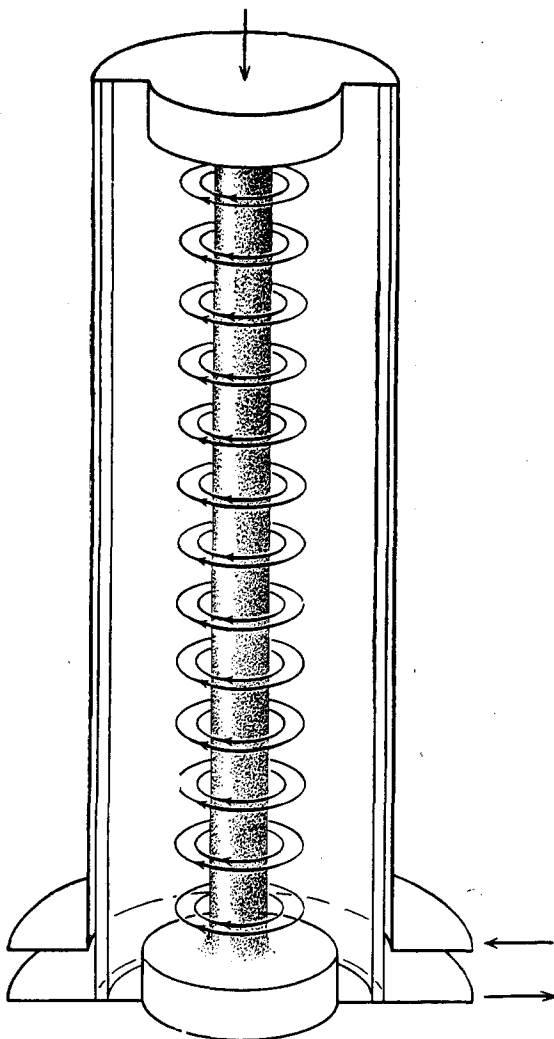


Рис. 9. Пинч-эффект (сжатие) осуществляется пропусканием сильного электрического тока через плазму, помещенную в цилиндре. Силовые линии магнитного поля в виде окружностей, возникающие в результате прохождения тока, сокращаясь, сдвигают плазму в узкий шнур (серый цвет на рисунке). Прямые стрелки показывают направление тока.

Но оставим пока теорию. Как практически создать магнитную бутылку? Совершенно независимо многим ученым пришло на ум, что не очень заметное электрическое явление, известное под названием «пинч-эффекта», может дать решение поставленного вопроса. Этот эффект, впервые полученный экспериментально около десяти лет назад, требует весьма значительного электрического тока. Когда такой ток проходит через проводящий

газ в трубке, он образует вокруг себя магнитное поле, которое стремится сжать газ и оттянуть его от стенок трубки (рис. 9). Магнитные силовые линии, окружающие газ, сдвигают его своим натяжением. Так как плазма

является превосходным проводником электричества, пинч-эффект представляется готовым многообещающим средством создания магнитной бутылки.

Теоретические расчеты показывают, что потребуется очень большой ток, что-нибудь около миллиона ампер, для того чтобы удержать плазму высокой температуры и низкого давления. Отнюдь не обескураженные этим обстоятельством, ученые многих стран занялись проведением экспериментов с простейшими трубками (см. рис. 1). Они прикладывали высокое напряжение к газу, находящемуся при низком давлении в изолированной трубке, и вызывали электрический разряд. Этот разряд вызывал ионизацию газа, и по трубке проходил сильный ток. Как и надеялись ученые, пинч-эффект удалось обнаружить, но самым драматическим образом. Обнаружив пинч-эффект, ученые утратили многие надежды, которые на этот эффект возлагались. Сжатие продолжалось всего лишь миллионную долю секунды или что-то около этого; потом плазменный шнур вовсе не сжимался, а бурно скручивался и, наконец, устремлялся к стенкам трубки. Кроме того, оказалось, что чем резче происходило сжатие, тем быстрее распадался плазменный шнур.

Это обстоятельство трудно понять, и фактически оно было предсказано теоретически. Возможны два типа неустойчивости, которые могут развиваться. В первом случае любой незначительный изгиб в сжимаемом шнуре будет быстро нарастать, так как магнитное давление больше на вогнутой стороне изгиба (где силовые линии расположены гуще), чем на его выпуклой стороне (рис. 10).

Вторая разновидность неустойчивости напоминает изготовление сосисок (рис. 11). В плазме появляется тенденция к сжатию или образованию перетяжек в одной или нескольких точках вдоль шнура; таким способом шнур может разбиться на отдельные части.

В связи с только что рассмотренным явлением произошла любопытная история, которая ярко иллюстрирует нередкий случай быстрого взлета надежд и их неожиданного крушения в столь важной, но вместе с тем и совершенно новой области исследований, какой является установка для ядерного слияния. Когда исследователи впервые достигли сильного сжатия

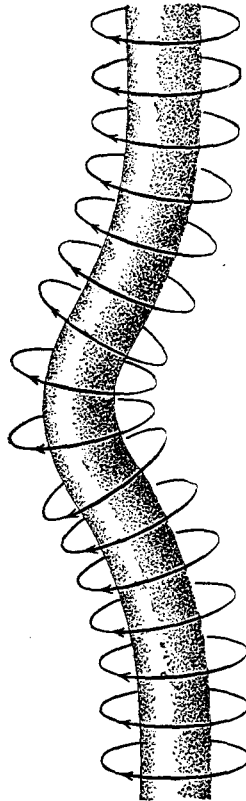


Рис. 10. Неустойчивость плазменного шнура возникает из-за изгибов, когда магнитные силовые линии сгущаются на вогнутой стороне шнура и разрежаются на выпуклой стороне шнура.

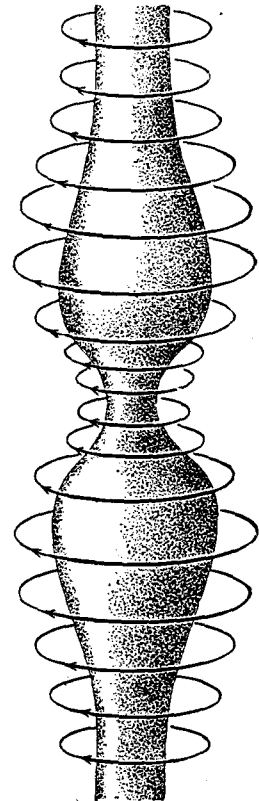


Рис. 11. Неустойчивость плазменного шнура возникает из-за перетяжек, в которых магнитные силовые линии также сгущаются.

в газообразном дейтерии, они были очень обрадованы, обнаружив поток нейтронов: это означало, что в плазме происходит реакция слияния. Ученым показалось, что им на мгновение удалось создать температуру, необходимую для термоядерной реакции. Но при тщательном анализе оказалось, что поток нейтронов был просто следствием некоторых трудно-обнаруживаемых электрических явлений, возникающих при быстром раз-

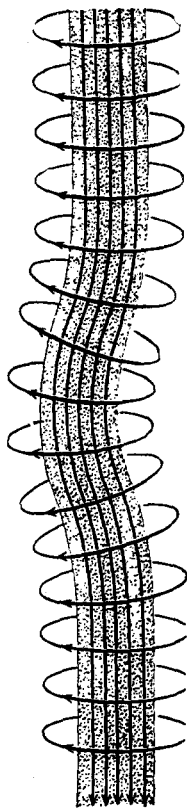


Рис. 12. Устойчивое сжатие может быть достигнуто наложением на плазму продольного магнитного поля (длинные стрелки). Натяжные силовые линии будут распрямлять изгибы.

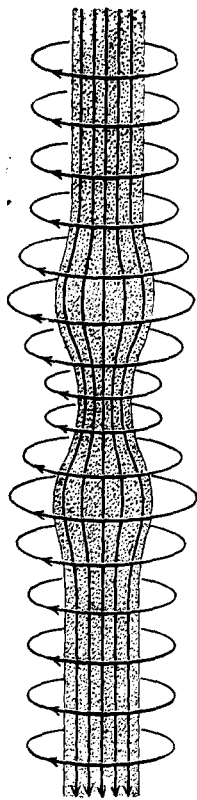


Рис. 13. Устойчивое сжатие может быть достигнуто наложением на плазму продольного магнитного поля (длинные стрелки). Взаимное отталкивание будет противодействовать перетяжкам.

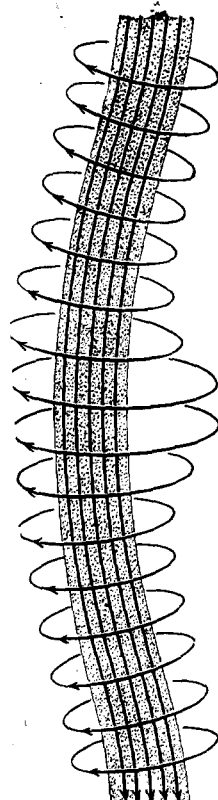


Рис. 14. Устойчивое сжатие может быть достигнуто наложением на плазму продольного магнитного поля (длинные стрелки). Круговые силовые линии удерживают плазму от соприкосновения со стенкой.

рушении сжатия, которое вызывалось образованием неустойчивости «сосискообразного» вида: в результате этих побочных явлений действительно небольшое количество дейтонов ускорится до энергий, при которых слияние становится возможным.

Но как можно сделать сжатие устойчивым? Теоретические исследования, выполненные в Соединенных Штатах, Англии и Советском Союзе, указали на возможное решение вопроса, хотя осталось еще неясным, как

можно достичь необходимых физических условий. Идея состоит в том, чтобы создать не только сжимающее магнитное поле вокруг плазмы, но и сильное продольное магнитное поле в н у т р и плазменного шнура (рис. 12, 13, 14). Внутреннее поле будет действовать подобно продольным упругим натяжениям. Если появится изгиб в шнуре, то он вызовет растяжение внутренних силовых линий и сила их упругого натяжения будет выпрямлять изгиб. Аналогично, если в плазменном шнуре начнет развиваться неустойчивость «сосисочного» типа, то внутренние магнитные силовые линии начнут сжиматься и тем самым будут оказывать сопротивление сжатию шнура; это сопротивление предотвращает деградацию шнура.

Есть еще и третий вид неустойчивости, который может приводить к разрушению плазменного шнура: именно длинные плавные изгибы шнура, которые, нарастая по своим размерам, отталкивают плазменный шнур к стенкам камеры (рис. 14). Однако такой неустойчивости можно противопоставить определенный выбор материала для стенок трубки. В связи с тем, что стенка может действовать как барьер для магнитного поля, магнитные силовые линии вокруг плазменного шнура будут сгущаться в том месте стенки, где изгиб приближается к ней; в результате такого сгущения магнитных силовых линий возникает давление, возвращающее плазменный шнур на середину трубки.

Я хотел бы подчеркнуть, что прямолинейный сжимаемый шнур, о котором все время идет речь, является сильно упрощенной схемой, которая просто позволяет выявить основные особенности явления. Практически, вероятно, осуществлять устойчивое сжатие шнура в прямолинейной трубке будет даже не всегда желательным по ряду причин; одной из таких причин является то, что электроды на концах трубки будут охлаждать плазму (т. е. вести к прекращению реакции). Эксперименты по сжатию уже ставились и в трубках иной формы. Одной из таких форм явилась трубка в виде баранки, в которой индуцировался ток, который мог цир-

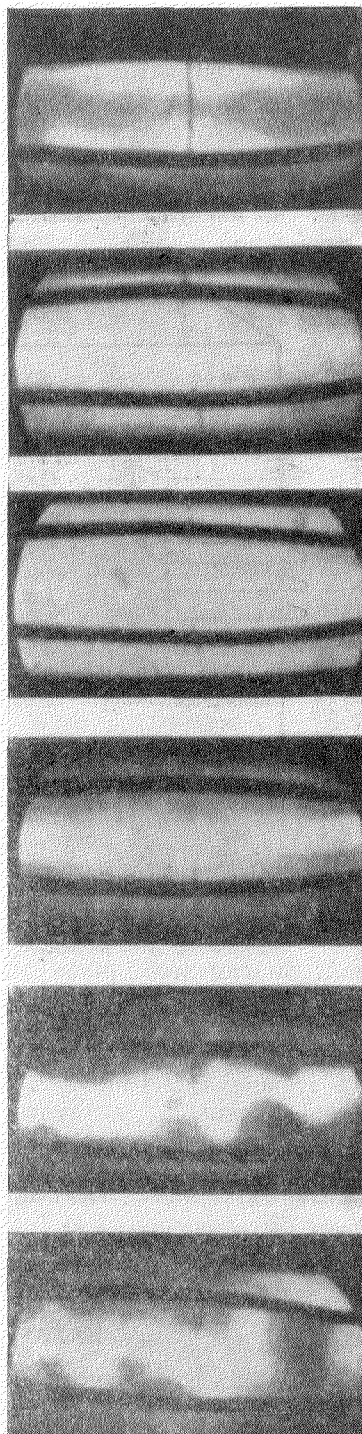


Рис. 15. Развитие сжатия (пинча) изображено на нескольких увеличенных фотографиях. Три верхних фото показывают формирование сжимаемого плазменного шнура (яркая полоса) при пропускании тока через плазму. Остальные показывают разрушение шнура, вызываемое развитием неустойчивости, связанной с изгибом.

кулировать без того, чтобы соприкаться с твердыми поверхностями. Высокое напряжение, приложенное к обмотке железного сердечника большого трансформатора, проходящего через баранку, вызывало электрический разряд в газе, который представлял собой единственный виток вторичной обмотки. Таким путем можно получить в плазме значительные токи.

Кроме сжатия (пинч-эффекта), были исследованы в Соединенных Штатах и, без сомнения, в других странах иные возможные способы формирования магнитной бутылки. Большинство исследований, связанных с проблемой реакции слияния, по изучению свойств тока, протекающего в плазме, включало в себя проведение наблюдений над весьма запутанным

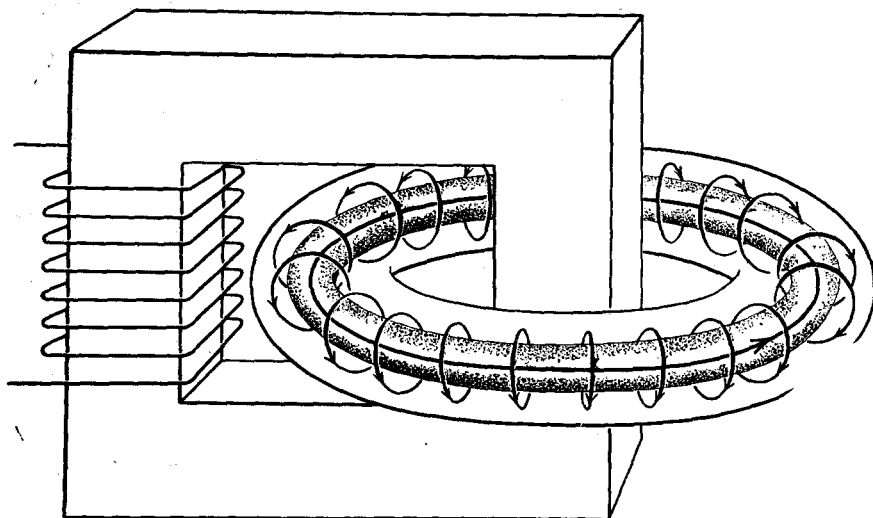


Рис. 16. Пинч-трубка с плазмой, имеющая форму баранки, насажена на сердечник трансформатора. Ток через обмотку, указанную слева, вызывает сильный индукционный ток в плазме, который сжимается им же самым образованным магнитным полем.

электромагнитным процессом — поведением высокотемпературной плазмы в магнитных полях различной конфигурации. Это является крайне трудной задачей, требующей привлечения всех средств современной техники. Как я уже указывал, маловероятно, чтобы произошел неожиданный «выход» к радикально новому, простому подходу к проблеме. В этом случае нужно постепенно мостить широкую дорогу, и можно добиться успеха только на основе многочисленных, взаимно перекрещивающихся исследований, производимых на основе новой техники, разработанной для совершенно необычных условий. Отсюда очевидно, что прогресс в этом направлении может быть значительно более быстрым, если все страны, принимающие участие в работах этого направления, будут взаимно обмениваться информацией на всех стадиях исследования.

НАБЛЮДЕНИЯ НАД ПЛАЗМОЙ

Конечно, прежде всего мы должны научиться держать в руках и управлять значительными количествами электрической энергии, а также строить большие, чрезвычайно чистые вакуумные системы. Но одной из самых сложных проблем являются измерения. Достаточно трудно создать горячую плазму, но разобраться в том, что в ней происходит, после того как она уже создана, во много раз труднее. Для целей наблюдения развита новая специальная техника. Для измерения плотности плазмы используется

новый «микроволновой интерферометр», в котором в качестве «щупа» используются миллиметровые радиоволны. Температура плазмы определяется по наблюдениям над излучением рентгеновских лучей плазмы, по «радишумам» плазмы и продуктам реакции. Несколько удивительно то, что очень горячая плазма испускает очень малое количество видимого света. Но во всяком случае возможно спектроскопическое исследование более прохладной плазмы, когда атомы еще не совсем избавились от своих электронов. Такие измерения позволяют судить не только о температуре плазмы, но и о скоростях движения отдельных ее частей благодаря наличию доплеровского смещения. И, наконец, просто по изменению магнитного поля в течение эксперимента мы тоже можем получить информацию о температуре, плотности, форме и скорости плазмы при ее формировании.

Чтобы оценить всю сложность задачи наблюдения над плазмой, следует наглядно представить себе картину, которую мы должны охватить. Большинство наблюдений, производимых с высокотемпературной плазмой, проводится внутри тщательно очищенной вакуумной системы, окруженной проводниками, несущими большие и быстро меняющиеся токи. А то, что нам нужно обнаружить, есть лишь едва уловимый каприз невидимого, мимолетного плазменного шнура, состоящего почти из ничего и затерявшегося где-то в глубине многочисленной аппаратуры.

УКРОЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ

Очевидно, что пройдет еще несколько лет, прежде чем будет разработан какой-либо ядерный реактор слияния до такой степени, что перед нами встанет конечная проблема — использование полученной энергии. Но, конечно, некоторые соображения вполне уместно привести и сейчас.

Если топливом такого реактора будет смесь дейтерия и трития, то львиная доля (80%) энергии, высвобождаемой при слиянии, будет заключена в нейтронах, возникающих во время реакции. Эта энергия может быть получена путем улавливания энергичных нейтронов и передачей возникающего при этом тепла, скажем, для нагревания пара в системе, вырабатывающей электрический ток обычным методом. Так как в таком реакторе должен порождаться тритий, нейтроны могут улавливаться в литиевой оболочке, окружающей реактор и псрождающей тритий. Часть получаемой электрической энергии должна быть направлена обратно в реактор, для того чтобы поддерживать магнитную бутылку.

Если топливом является только дейтерий, перед нами открывается заманчивая перспектива непосредственного превращения получаемой энергии в электрическую. При дейтон-дейтонном слиянии 66% высвобождаемой энергии делится между заряженными продуктами реакции — ядрами гелия и протонами. Вполне возможно, что могут быть созданы такие условия, что большинство этих частиц будет остановлено внутри плазмы. В этом случае разогретая и расширяющаяся плазма будет стремиться вытолкнуться из магнитного поля; используя подходящим образом приспособленные электрические контуры, в принципе можно вызвать в них ток за счет такого движения. Другими словами, двигаясь против сил магнитного поля, расширяющаяся плазма совершает работу, подобно тому как совершает работу расширяющийся пар, толкая поршень паровой машины. В случае плазмы поршнем служит «стенка» магнитного поля, а промежуточным звеном, превращающим энергию плазмы в работу, служат электрические контуры вместо шатунов и колес. Может оказаться, что эффективность такой машины будет намного больше, чем эффективность обычного цикла, производимого паром, так как общие термодинамические законы, ограничивающие эффективность обычных тепловых машин, в рассматриваемом случае силы не имеют.

В конечном счете фактическая осуществимость реактора слияния, вероятно, будет зависеть еще существенно и от его минимальных размеров. Очень возможно, что многие принципиально допустимые схемы реакторов слияния должны быть отвергнуты по той причине, что их общие размеры будут выходить за рамки практически допустимых размеров. С другой стороны, из общих теоретических соображений ясно, что не может быть и речи о «карманном издании» термоядерного реактора. Если будут осуществлены энергетические сооружения на основе реакции слияния, то они будут похожи по своим размерам на современные крупные электростанции.

БОЛЬШИЕ ОЖИДАНИЯ

Ученые, работающие в Соединенных Штатах над проектами осуществления управляемых реакций слияния, твердо убеждены, что все проблемы будут в конце концов решены, потому что, несмотря на грандиозные трудности, в настоящее время не видно никаких реальных принципиальных преград, закрывающих путь к окончательному успеху.

Мне хотелось бы упомянуть о некоторых этапах пройденного пути настолько, насколько это может быть сделано в рамках ограничений публикуемого материала. Первая группа, рассматривавшая возможность создания управляемой реакции слияния путем магнитного ограничения горячей плазмы, насколько нам известно, состояла из Э. Ферми, Э. Теллера, Дж. Така и некоторых других, работавших в Лос-Аламосской научной лаборатории. Хотя они полностью сформулировали свои идеи примерно к концу второй мировой войны, никакой интенсивной экспериментальной работы в Соединенных Штатах не производилось вплоть до 1951 г., когда под руководством Дж. Така в Лос-Аламосе и Л. Спитцера в Принстоне началось осуществление определенной экспериментальной программы. Ученые Англии, по-видимому, начали аналогичные работы двумя-тремя годами раньше; в то же время начались работы в Советском Союзе. В 1952 г. Комиссия по атомной энергии Соединенных Штатов Америки созвала многочисленную конференцию, посвященную проблеме управляемых реакций слияния. В этом же году началось осуществление Г. Йорком из Радиационной лаборатории Калифорнийского университета своей программы, основанной на новом подходе к проблеме. Некоторые работы были намечены в Окриджской национальной лаборатории в Нью-Йоркском университете. В прошлом году были начаты две группы работ частными средствами в Общей атомной лаборатории, Сан-Диего, Калифорния, и в Лаборатории общих электрических исследований в Шенектеди, Нью-Йорк.

Среди других стран, принимающих участие в решении задачи управляемых реакций слияния, известны Франция, Германия, Нидерланды и Швеция. Более чем очевидно, что во всех частях земного шара на исследования по управляемым термоядерным реакциям смотрят вполне серьезно. Сама природа вопросов, возникающих при этом, время, необходимое для решения поставленных задач, и, наконец, важность цели, к которой мы стремимся, — все это служит стимулирующей причиной для надежды на рост интернационального сотрудничества в этих исследованиях.

Если читатель заканчивает статью с впечатлением, что поиски управляемой термоядерной реакции являются одновременно самыми привлекательными, самыми трудными и потенциально самыми важными из всех научных задач мирного времени, когда-либо поставленных учеными, то он будет разделять это мнение со многими учеными, работающими сейчас над решением этой задачи.