

ПРИРОДА

№ 11 - 1999 г.

С.В. Мирнов

Токамаки: триумф или поражение?

© Природа

*Использование или распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск
VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!

<http://www.accessnet.ru/vivovoco>

Токамаки: триумф или поражение?

С.В.Мирнов

*Говорят, говорят, скоро будет термояд,
Будет мирный, будет смирный, управляемый.
Нам об этом термояде говорили в детстве дяди.
Говорят, говорят, скоро будет термояд!
А теперь мы сами дяди, сами то же говорим
И мечтой о термояде все горим, горим, горим...*

Из поздравления И.Е.Тамму в день его 75-летия, народное творчество¹.

ГОРИМ... Да и как не гореть, если точно известно, что в каждом полулитре любой окружающей нас воды заключена потенциальная энергия термоядерного синтеза, эквивалентная энергии сгорания бочки бензина!

Речь идет о двух почти равновероятных реакциях: $D + D = He^3 + n$ и $D + D = T + p$ с выделением в каждом акте синтеза 3.25 либо 4 МэВ энергии (1 МэВ = $1.6 \cdot 10^{-13}$ Дж). Напомним, здесь: p — протон, D — дейтрон, ядро тяжелого изотопа водорода (дейтерия) с одним нейтроном (n) в ядре, а T — тритон, ядро сверхтяжелого (трития) — с двумя.

Образовавшийся тритон вступит в реакцию $D + T = He^4$ (3.6 МэВ) + n (14 МэВ).

В итоге: $5D \rightarrow He^3 + He^4 + p + 2n + (24.85 \text{ МэВ})$.

Дейтерий составляет одну семитысячную добавку к природному водороду, а потому является практически безграничным источником энергии.

НА БЕРЕГУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

Наиболее энергоемкие продукты реакции синтеза — быстрые нейтроны — могут быть использованы в традиционном энергетическом пароводяном цикле («чистый» синтез) или, что значительно эффективней, в цикле деления урана либо тория, для создания глубоко

Сергей Васильевич Мирнов, доктор физико-математических наук, профессор, начальник отдела экспериментальной физики токамаков Троицкого института инновационных и термоядерных исследований. Область научных интересов — физика управляемого термоядерного синтеза, проблемы термоизоляции и устойчивости плазмы в токамаках. Лауреат Государственной премии (1971). Автор монографии «Физические процессы в плазме токамака» (М., 1983).

© С.В.Мирнов

¹ См.: Чирков Ю.Г. Любимое дитя электрохимии. М., 1985.

подкритического, а потому безопасного реактора деления на быстрых нейтронах (гибридный вариант). В таком случае речь пойдет уже о десяти и более бочках бензина... Правда, при этом мы основательно забираемся в область реакторов деления с их традиционными проблемами. Хотя и «чистый» синтез до конца не чист, коль скоро в нем фигурируют нейтроны и тритий, но, по оценкам специалистов, уровень экологических проблем может быть снижен для него в десятки раз по сравнению с энергетикой деления. Его главное преимущество — отсутствие жидких и газообразных радиоактивных отходов. Наведенная активность конструкций может быть существенно уменьшена (если возникнет такая необходимость) применением ванадиевых сплавов. Дабы не терять столь важные преимущества, ограничимся далее темой «чистого» синтеза, реакциями D+D и D+T.

Практическая неисчерпаемость источника энергии придает проблеме управляемого термоядерного синтеза (УТС) некоторую мессианскую окраску «освобождения человечества от энергетической зависимости». Отсюда периодическое возбуждение общественности и громогласные обвинения в адрес официальной науки, которая недопустимо «медлит». (Свежий пример — недавняя шумиха вокруг «холодного синтеза».)

К сожалению, неисчерпаемость энергетического резервуара сама по себе ничего не решает: себестоимость электроэнергии складывается не только из цены горючего, но и из амортизационных расходов, которые сопровождают ее производство. То есть окажись термоядерный реактор чрезмерно дорогим либо с коротким временем эксплуатационной жизни, его не спасет дешевизна горючего. Но, чтобы определить фактическую себестоимость производства энергии, такой реактор нужно сначала создать, затем испытать, устранить или хотя бы выявить его «скрытые дефекты», оценить потенциальные возможности аварий и т.д. Процесс этот, следуя, например, оценкам одного из лидеров УТС — индийского ученого П.Кау,

— при самых благоприятных обстоятельствах займет первую четверть XXI в. и может стоить около 20 млрд амер. долл.

Насколько сегодня, к концу XX в., мир приблизился к созданию реального реактора УТС? Ответить кратко на этот вопрос можно было бы так: найдены эффективные средства нагрева и теплоизоляции термоядерного горючего, получены первые шестнадцать мегаватт мощности управляемого синтеза, центр тяжести исследовательских работ практически смещается из области физических в сферу физико-технических проблем. Однако, как и все краткие ответы, такой был бы полуправдой. Почему — автор попытается объяснить ниже на примере развития токамаков — систем, представляющих собой кольцевой газовый разряд, стабилизированный сильным кольцевым (его называют тороидальным) магнитным полем. Сегодня они наиболее уверенно претендуют на роль сердцевин будущего реактора.

ПРЕПЯТСТВИЯ НА ПУТИ

Главное физическое препятствие для синтеза — кулоновские барьеры, затрудняющие сближение ядер на расстояние действия ядерных сил. Преодоление их требует существенного «подогрева горючего». В частности, для DD-реакций примерно до 100 кэВ ($1 \text{ кэВ} \approx 10^7 \text{ К}$), а в DT-случае — вследствие реализации специфического внутриядерного резонанса — только до 10 кэВ.

При столь высоких температурах все вещества оказываются в состоянии полной ионизации, т.е. представляют собой как бы двухкомпонентную жидкость слабо взаимодействующих свободных электронов и ионов, получившую название «высокотемпературная плазма». Хотя эти компоненты обладают противоположной электрической полярностью, в целом плазма электронейтральна: плотности электронов и ионов почти равны. Но их температуры могут различаться. Отсюда иногда и деление температуры на ионную (T_i) и электронную (T_e).

В силу относительно низкого энергетического барьера реакция DT-выглядит сегодня наиболее практичной, ее с успехом используют в водородных бомбах, а также в различных нейтронных источниках. Некоторую трудность для энергетических приложений представляет то обстоятельство, что тритий распадается с характерным временем 12 лет, а потому отсутствует в природе. Его получают, облучая нейтронами Li^6 — последнего же, по оценкам, в природе достаточно много. Практически это означает, что реактор DT-синтеза должен быть снабжен дополнительным устройством (оно получило название «blanket» — «одеяло»), содержащим литий, который, превращаясь под действием нейтронов синтеза в тритий, будет воспроизводить необходимое горючее. Там же попутно энергия нейтронов будет трансформироваться в тепло.

В итоге физической основой DT-реактора становятся две ядерные реакции: $\text{D} + \text{T} \rightarrow \text{He}^4 + \text{n}$ и $\text{Li}^6 + \text{n} \rightarrow \text{T} + \text{He}^4$. Уже беглого взгляда на них достаточно, чтобы усмотреть некоторое противоречие в концепции замкнутого стационарного реактора. А именно: каждому акту синтеза соответствует один нейтрон и, следовательно, один атом нового трития. При его выделении неизбежны потери и нейтронов, и трития. Тогда оказывается, что цикл незамкнут, для замыкания необходимы нейтронные размножители. И хотя человечество накопило солидный опыт (в основном секретный) их создания и эксплуатации, коммерческий реактор, очевидно, потребует серьезной адаптации имеющихся решений к новой реальности. Задача тем самым распадается на три: поджиг DT-реакции, поддержание стационарного термоядерного горения (с вводом топлива и удалением образовавшегося He) и воспроизводство горючего.

Очевидно, что для поджига DT-смеси потребуется некоторое устройство ее предварительного внешнего нагрева. Обозначим его мощность $P_{\text{вн}}$. Процесс нагрева будет описываться в общем виде простым уравнением:

$$dW/dt = -W/\tau_E + P_{\text{вн}},$$

где W — энергия образовавшейся плазмы, dW/dt — скорость ее изменения, W/τ_E — полная мощность тепловых плазменных потерь, τ_E — характерное время «остывания» плазмы, или, как принято его называть, энергетическое время жизни. Фактически оно несет всю интегральную информацию о плазменных потерях тепла: с горячими частицами, с излучением и т.д. Его не следует путать с длительностью горения, между ними такая же разница, как, скажем, между длительностью жизни среднего римлянина и временем существования Римской империи — τ_E может составлять секунды, а длительность горения — десятки минут. Такое горение называют стационарным. Его условие:

$$W/\tau_E = P_{\text{вн}}.$$

Горение будет выгодно энергетически, если охлаждение плазмы удастся скомпенсировать выделившейся энергией синтеза $P_{\text{яд}}$. Это в принципе возможно, если $P_{\text{яд}}$ превосходит $P_{\text{вн}}$. Отношение $P_{\text{яд}}$ к $P_{\text{вн}}$ (в стационаре — к мощности потерь W/τ_E) обозначают Q .

Забегая вперед, отметим, что 30 октября 1997 г. на токамаке JET (Великобритания) в условиях реального DT-синтеза (смесь 50% дейтерия и 50% трития) был достигнут режим с $Q=1$. Это самое серьезное достижение за всю историю УТС. Но уровень $Q=1$ (breakeven, или режим «перевала») еще маловат для реактора «чистого» синтеза. Очевидно, что преобразование выделившейся энергии в нагрев будет идти с коэффициентом полезного действия, меньшим 1, в лучшем случае — 0.2÷0.3. И для замыкания энергетической цепи (реактор с «нулевым» выходом) потребуется выйти на режим с $Q>5$.

Наконец, хорошо бы сконструировать реактор так, чтобы стационарное горение поддерживалось не внешними источниками, а самими продуктами синтеза ($P_{\text{вн}}=0$). Это реализовано, например, в водородной бомбе. В управляемом синтезе мы можем рассчитывать

только на заряженную часть продуктов — α -частицы, поскольку нейтроны «плохо управляемы». Мощность энерговыделения, приходящаяся на α -частицы, составляет $0.2P_{\text{яд}}$. Баланс будет достигнут при $P_{\text{яд}} \approx 5 W/\tau_E$ ($Q=\infty$).

Диапазон оптимальных температур ионов (T_i) для DT-синтеза — от 5 до 15 кэВ. В этом интервале мощность $P_{\text{яд}}$ пропорциональна $n^2 T_i^2 V \sim p^2 V$, где $n = n_D = n_T$ — средние плотности дейтерия и трития, V — объем, а p — давление плазмы. Выход за указанный интервал температур при фиксированном энерговыделении реактора неминуемо ведет к росту p . Энергозатраты же, как показал опыт, прогрессивно растут именно с p . Учитывая, что $W \sim nTV$ ($T = T_i \cong T_e$), легко найти условие самоподдерживающегося DT-синтеза, получившее название универсального или модернизированного критерия Лоусона:

$$nT\tau_E = C \quad (C = 5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3} \cdot \text{кэВ} \cdot \text{с}, \text{ если } n \text{ измеряется в м}^{-3}, T \text{ в кэВ}, \tau_E \text{ в с}).$$

Отсюда видны два альтернативных пути — сжатие до высоких плотностей при малых τ_E (водородные бомбы) либо нагрев плазмы при малых плотностях и высоких τ_E (плазменные ловушки).

БОМБЫ И МИКРОВЗРЫВЫ

Достижения первого, инерционного, направления общеизвестны. 1 ноября 1952 г. на атолле Эниветок в Тихом океане ученые США с помощью атомной бомбы подорвали огромный объем (50 т) жидкого дейтерия и трития, получив при этом взрыв ранее невиданной мощности, эквивалентный взрыву 500 бомб, сброшенных на Хиросиму и Нагасаки. Таким образом было отмечено вступление человечества в термоядерную эру.

Очевидный недостаток этого и всех последующих термоядерных взрывов — сверхмощное, неуправляемое выделение энергии с использованием в качестве поджигателя (или, как говорят сегодня, драйвера) атомного взрыва. Основные исследования в области уп-

равляемого инерционного синтеза — лабораторного аналога бомбы — сосредоточились на поиске менее разрушительного и более дешевого драйвера. Суть в том, что сжатие горючего необходимо осуществлять быстро (10—30 нс) и предельно равномерно, чтобы по возможности задержать развитие релей—тейлоровской неустойчивости. На сегодня наиболее популярный драйвер — лазерное излучение². Из расчетов и некоторых экспериментов известно, что поджиг ($Q=100$) лабораторных DT-микробомб может быть реализован, если им удастся передать энергию излучения масштаба 10 МДж. Лучшие сегодняшние эксперименты с лазерным драйвером находятся на границе 100—150 кДж. Планируемый в США на ближайшее пятилетие³ грандиозный проект по лазерному сжатию (NIF) предполагает поднять эту величину на порядок — до уровня 1.5 МДж ($Q=10$), что обойдется примерно в 1.2 млрд долл. Если считать стоимость пропорциональной подводимой энергии, необходимый для УТС лазерный поджиг можно оценить примерно в 10 млрд долл. — цена чуть не десяти атомных субмарин! И тем не менее рано или поздно эти деньги могут быть выделены. Сегодня уже не принято скрывать, что основная цель исследований по лазерному УТС — уточнение механизма «работы» водородного оружия, а отнюдь не создание энергетического реактора. Очевидно, что на эти цели средства есть и будут, поэтому на перспективы лазерного синтеза можно смотреть с оптимизмом.

Что происходит в области плазменных ловушек, ориентированных на реактор?

В наиболее распространенных из них горячую плазму удерживают от разлета и охлаждения с помощью магнитных полей. Последние должны создаваться сверхпроводниками, требующими на свое обслуживание сравнительно

² Дюдерштадт Дж., Мюзес Г. Инерциальный термоядерный синтез. М., 1984.

³ Lawer A. // Science. 1997. V.275. P.1253.

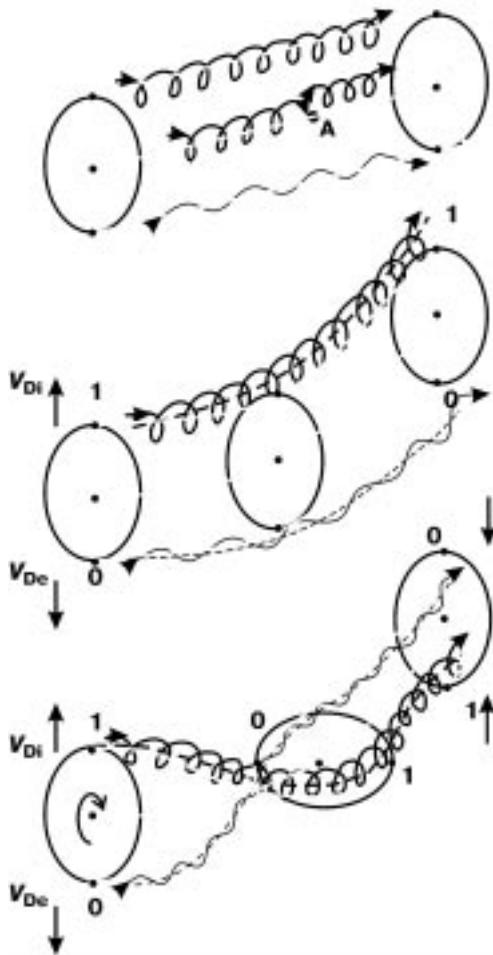


Рис. 1. Схематическое изображение движения заряженных частиц (траектории ионов даны жирными линиями, электронов — тонкими) в магнитных полях различной конфигурации (силовые линии магнитного поля показаны цветом).

Вверху — в цилиндрической магнитной трубке. Событие А — столкновение иона водорода с тяжелым ионом примесей (черный кружок). В результате столкновения орбита иона смещается поперек магнитного поля примерно на радиус Лармора. Заметим, что ларморовский радиус ионов существенно превышает электронный.

В середине — в изогнутой (тороидальной) магнитной трубке. Пунктир — траектории центров ларморовских кружков. $V_{De,i}$ — дрейфовые скорости электронов и ионов. Тороидальный дрейф уводит частицы из шнура.

Внизу — в той же трубке, но с вращательным преобразованием (стетла-ратор). Ранее уходившие из шнура частицы могут, напротив, оказаться в центре.

небольшое энергообеспечение. Иначе вся энергия уходила бы на поддержание магнитного поля (проще говоря — в тепло). Предельное давление плазмы в итоге ограничивается максимальной магнитной индукцией существующих сверхпроводников (10—15 Т). Тем самым ограничивается и предельное давление плазмы. Это означает, что для достижения поджига необходимо всемерно увеличивать τ_E — совершенствовать плазменную термоизоляцию.

МАГНИТНЫЕ ЛОВУШКИ

Идея магнитной термоизоляции горячей плазмы от стенок реактора,

предложенная независимо А.Д.Сахаровым, И.Е.Таммом в СССР и Л.Спитценом в США, в принципе проста: магнитное поле обязано ограничивать поперечный разлет заряженных частиц из зоны реакции. Являясь переносчиками электрического тока поперек магнитного поля, они под действием силы Лоренца должны закручиваться вокруг магнитных силовых линий в спирали (рис.1, вверху) с характерным поперечным размером — «ларморовским радиусом» — $r_L \sim V_{\perp}/B$, где V_{\perp} — поперечная скорость частицы, а B — величина (индукция) продольного магнитного поля. В условиях типичных магнитных полей характерные r_L для ионов термо-

ядерного диапазона температур составляют примерно 0.5—0.3 см.

Пока магнитная силовая линия не искривлена, заряженная частица может покинуть ее лишь в результате столкновений, смещаясь поперек магнитного поля всякий раз не более чем на r_L (событие А на рис.1, вверху). Тем самым характерная длина свободного пробега таких частиц (для типичных термоядерных условий 3—10 км) заменяется в поперечном направлении на величину порядка 1 см, что радикальным образом подавляет их поперечный перенос. Правда, так будет лишь до тех пор, пока давление плазмы не превысит давления магнитного поля. Если это произойдет, магнитное поле может быть «снесено» плазменным потоком. (Как случается, например, когда солнечная плазма — результат вспышек нашего природного термоядерного реактора — врывается в магнитное поле Земли, вызывая магнитные бури.) Отношение давления плазмы к давлению магнитного поля обозначают параметром β . Он не может превышать 1 (реально же заметно ниже).

Но магнитное поле сдерживает только поперечное перемещение заряженных частиц. Их движение вдоль поля ограничено лишь столкновениями, т.е. практически свободно. Ограничение продольного движения, «запирание» торцов — ключевой элемент всех магнитных ловушек. Например, нужного эффекта можно достичь, создавая на пути частиц магнитный барьер — область с повышенным магнитным полем, что предложили параллельно Г.И.Будкер (СССР) и Р.Пост (США). Если пренебречь столкновениями, магнитный поток внутри ларморовской спирали должен сохраняться («первый магнитный инвариант»), но при этом должна сохраняться и полная энергия частиц. Одновременное выполнение этих двух требований приводит к тому, что существенная доля заряженных частиц отражается от магнитного барьера, как от зеркала, а некоторые все же преодолевают его, оказавшись в пределах так называемого «конуса потерь». Зеркальные ловушки были очень популярны у нас и за

рубежом в начале шестидесятых, но сегодня почти сошли на нет. Дело в том, что акт синтеза происходит почти в сто раз реже, чем кулоновские столкновения между теми же частицами. В итоге высока вероятность того, что задолго до слияния частицы попадут в «конус потерь», преодолеют магнитный барьер и уйдут из ловушки. Сегодня такие системы сохранились лишь в Японии и у нас в Новосибирске. Изучается возможность дополнительного запираания торцов электрическими полями. На этом пути есть обнадеживающие результаты; не исключено, что такие ловушки ждет серьезное будущее.

Другой способ устранить торцы — замкнуть магнитное поле в кольцо (тор). Если r_L много меньше поперечного размера кольца a , движение частиц поперек поля примет характер диффузионного с длиной свободного пробега r_L . То есть, увеличивая a , можно на первый взгляд получить любое время жизни захваченных частиц, пока этот процесс не выйдет за рамки технически разумного. Но к сожалению, в чисто кольцевом магнитном поле заряженные частицы подстерегает другая опасность — они могут быстро выйти на стенку и без столкновений. Законы электромагнетизма предписывают тороидальному магнитному полю B_T спадать обратно пропорционально его радиусу кривизны R . В итоге траектория ларморовского вращения искривляется, возникает прецессия поперек B_T и R . Результатом этого становится хотя и сравнительно медленный ($V_{\perp} \cdot r_L / R$), но вполне заметный вертикальный уход электронов и ионов из ловушки (тороидальный дрейф, рис.1, в середине).

В 1950 г. А.Д.Сахаров и И.Е.Тамм предложили замкнуть это движение внутри плазменного объема, пустив вдоль тора дополнительный электрический ток. Отсюда и пошли токамаки. Композиция сильного тороидального магнитного поля B_T и перпендикулярного ему более слабого (полоидального) поля тока B_p создает внутри плазмы некоторую винтовую конструкцию магнитных силовых линий, навивающихся на

тор. Каждая из этих линий, если не замыкается после нескольких обходов сама на себя, описывает в пространстве своеобразную псевдоповерхность («магнитную поверхность»), к которой оказывается привязано движение заряженных частиц. Перемещаясь вдоль тора, они попеременно оказываются то в верхней, то в нижней части шнура. Тороидальный дрейф при этом становится знакопеременным по отношению к продольному движению частицы, проявляясь при обходе вдоль тора лишь в небольших поперечных смещениях ее траектории относительно магнитной поверхности.

Другая идея — заставить заряженные частицы навиваться на тор с помощью одних только внешних магнитных обмоток — принадлежит Спитцеру. Он предложил деформировать поперечное сечение плазменного шнура (например, в эллипс) и вращать его по винту вдоль тора, осуществляя тем самым так называемое «вращательное преобразование». Тороидальный дрейф частицы оказывается при этом также скомпенсирован. Подобные системы получили название «стеллараторы» (рис.1, внизу). К сожалению, технологические сложности, с одной стороны, и явный успех токамаков — с другой, замедлили их развитие. Сегодня они серьезно исследуются в Японии и Германии и пока отстают от токамаков, но, как и открытые ловушки, имеют вполне отчетливые перспективы.

Наконец, существует третий, на первый взгляд самый простой способ компенсации тороидального дрейфа — быстрое вращение шнура вокруг продольной (тороидальной) оси. Это можно сделать, создав в плазме радиальное электрическое поле между ее центром и краем. Такая идея исходила от Будкера и обсуждалась еще в начале 50-х. Но как его создать? Оно может стать следствием разного поперечного переноса электронов и ионов. Сегодня, когда освоена инжекция в плазму быстрых (до 160 кэВ) и сверхбыстрых (до 500 кэВ) дейтонов, идея управляющих радиальных электрических полей стала

реальностью. В этом направлении есть первые экспериментальные успехи. На что можно рассчитывать? Во всяком случае на удвоение или даже утроение τ_E . Уже сегодня экспериментаторы на токамаках умеют увеличивать его на небольшое время — примерно вдвое. Удастся это благодаря образованию так называемых термобарьеров — узких зон с повышенной термоизоляцией. Связь их с радиальными электрическими полями (точнее, с градиентами поля) сегодня полностью установлена. Получение термобарьеров — пока еще искусство. Но не исключено, что через два-три года работы оно превратится в рутинную операцию. В термоядерных исследованиях так происходило неоднократно.

Удивительно, но похожая ситуация почти одновременно была обнаружена и в стеллараторах. Если вспомнить открытые ловушки, где торцы «запирают» продольными электрическими полями, приходится констатировать, что магнитная термоизоляция во всех практически интересных случаях тесно переплетена с явлениями электростатической природы. Их активное освоение и рациональное использование, вероятно, станут главным полем деятельности ученых-термоядерщиков начала XXI в.

Что же происходит сегодня? Наиболее результативными из ловушек оказались токамаки.

ТОКАМАК — ЧЕМПИОН

Осенью 1969 г. в Дубне на Международном совещании по замкнутым ловушкам произошло событие, объявленное зарубежными журналистами ни много ни мало, как «признание Западом лидирующей роли советского токамака в исследованиях по управляемому синтезу». История эта многократно описана и уже обросла легендами. Суть ее состояла в том, что весной того же года к нам на токамак Т-3А (рис.2) в Институт атомной энергии им.И.В. Курчатова прибыла группа английских физиков и инженеров с несколькими тоннами научной аппаратуры, чтобы

Рис. 2. Токамак Т-3А в 1968 г. Л.А.Арцимович обсуждает с сотрудниками последние результаты. (Слева направо — В.С.Мухоматов, С.В.Мирнов, Л.А.Арцимович, В.С.Стрелков.)

методом лазерного зондирования проверить наши диамагнитные измерения электронной температуры, которая по их представлениям получилась у нас «завирально» высокой. Акция эта явилась результатом устной договоренности между научным руководителем работ по токамакам академиком Л.А.Арцимовичем и директором Калэмской лаборатории доктором Р.Пизом — событие, незаурядное даже по современным меркам.

К осени, с честью преодолев различные трудности, совместная советско-английская группа успешно провела лазерные измерения и, как потом было объявлено в газетах, «получила результаты даже более высокие, чем сообщалось русскими». (Мы измеряли среднюю величину температуры по диамагнетизму плазмы, а лазер давал локальную электронную. Реальное совпадение оказалось «глубоко в классе точности».)

Столь скорое и убедительное доказательство достижения в токамаках электронной температуры масштаба 1 кэВ оказалось для западных ученых сенсацией.

Второй, хотя и менее яркой, сенсацией, представленной там же, стали наши измерения ионной температуры в токамаке тремя независимыми методами. Температура, как и следовало ожидать для плазмы, где ионы нагреваются от электронов, оказалась несколько ниже (0.3 кэВ) электронной, но раза в три выше, чем во всех существовавших тогда магнитных ловушках. В ходе этих опытов (на дейтерии) были зарегистрированы пусть еще редкие, но уже первые термоядерные нейтроны — свидетельство DD-синтеза.

После Дубнинской конференции США свернули свою стеллараторную программу. Самый большой в мире стелларатор С был быстро переделан в токамак ST. И уже через год на нем были почти повторены результаты Т-3А. Началась «токамачная» гонка.

Следующий наш ход — токамак Т-4 (1971) — позволил поднять ионную температуру уже до 0.7—0.8 кэВ, а электронную почти до 3 кэВ. Это удалось сделать за счет увеличения тороидального магнитного поля и более рационального использования обнаруженных незадолго до

этого «окон устойчивости» токамака. Нейтронные счетчики из режима регистрации отдельных импульсов перешли в сплошной «поточный режим». «По нейтронам» стало возможным исследовать динамику ионной температуры в ходе разряда. Их термоядерная природа уже ни у кого не вызвала сомнений. Это имело важный психологический резонанс. Дело в том, что предшествующие 15 лет термоядерных исследований были наполнены эпизодами драматических заблуждений именно по поводу природы наблюдаемых нейтронов. Время от времени из разных мест газеты приносили известия о «зажигании термоядерного солнца». Но при ближайшем рассмотрении оказывалось, что наблюдаемые единичные нейтроны имели отнюдь не термоядерную природу, а либо порождались дейтонами и тритонами, ускоренными электрическими полями, иногда возникающими при развитии плазменных неустойчивостей, либо были просто на уровне космического фона. Накал страстей был столь велик, что тема однажды перекочевала в кинематограф («Девять дней одного года»), где герой погибал, облучившись этими самыми единичными «нетермоядерными» нейтронами. На фоне таких переживаний уверенная регистрация «настоящих» термоядерных нейтронов, строго следующих за температурой плазмы, — по существу наблюдение квазистационарной термоядерной реакции — подвело итог эпохе романтизма в УТС. На волне всеобщего воодушевления «авторы» этого события во главе с Арцимовичем в 1971 г. получили Государственную премию (Л.А. Арцимович, В.Д. Шафранов, В.С. Стрелков, Д.П. Иванов, К.А. Разумова, В.С. Мухоматов, Е.П. Горбунов, С.В. Мирнов, А.К. Спиридонов, А.М. Ус, М.П. Петров, Н.А. Монозон), а токамаки — мощную рекламу. Скепсис по отношению к ним сменился восторгом и ощущением легкой победы. Процесс их строительства за рубежом (всего было создано более 100 токамаков) принял обвальный характер.

А причины для скепсиса были, и весьма серьезные. Сегодня они снова обсуждаются на разных уровнях, вплоть до американского Конгресса.

ЛОЖКА ДЕГТЯ, И НЕ ОДНА

Первый, самый очевидный недостаток токамаков — необходимость поддержания тока, текущего по плазме вдоль магнитного поля. Чтобы это происходило, на обходе тора нужно иметь пусть небольшое (0.1—0.3 В), но постоянное электрическое напряжение. В современных импульсных (квазистационарных) установках его получают с помощью обычного трансформатора с железным сердечником или без. Функциональная схема токамака представлена на рис.3. Она напоминает известную из учебников схему импульсного электронного ускорителя — бетатрона. То же вихревое электрическое поле, создаваемое трансформатором, кольцевой ток электронов (I_n), вертикальное магнитное поле равновесия (B_{\perp}), удерживающее токовое кольцо от расширения, и — дополнительно к бетатрону — тороидальное магнитное поле (B_T), необходимое для удержания и стабилизации плазмы. Главное отличие от бетатрона: камера из тонкой гофрированной нержавеющей стали перед импульсом заполняется газом — водородом или его изотопами.

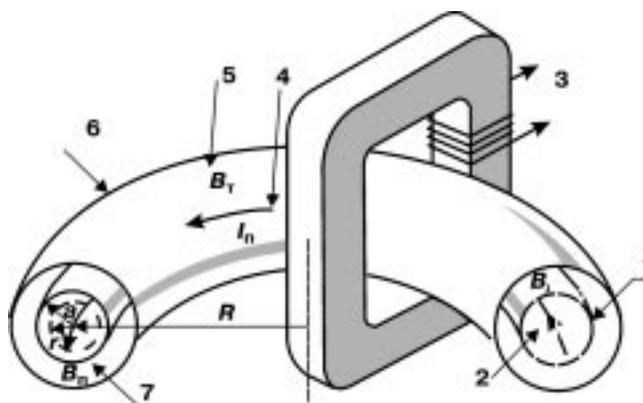
Первой включается обмотка медленного тороидального поля. Затем следует импульс электрического поля, создаваемый обычно разрядом конденсаторных батарей на первичную обмотку трансформатора. Он зажигает кольцевой разряд, происходит ионизация газа и образование плазмы. Ток, текущий по плазме вдоль поля, нагревает ее, и компенсирует тороидальный дрейф. Поле равновесия (оно существенно меньше, чем в бетатроне) удерживает плазму с током от расталкивания. Ток, как в бетатроне, переносится направленным потоком электронов. Рассеиваясь на ионах, они быстро нагревают основную массу электронов плазмы, и уже эти горячие электроны, сталкиваясь с ионами, нагревают их. Путь не близкий. В современных токамаках широко используют дополнительный нагрев плазмы: ионный циклотронный, электронный, с помощью мощных пучков

Рис.3. Принципиальная схема токамака.

1 — тороидальный плазменный токовый виток с малым радиусом a , большим — R , удерживаемый от расширения поперечным (управляющим) магнитным полем B_{\perp} (2).

3 — индуктор — трансформатор для создания плазменного тока I_p (4).

5 — тороидальное магнитное поле B_T , создаваемое магнитными катушками, расположенными снаружи вакуумной камеры (6). B_{\parallel} (7) — магнитное поле тока. Суперпозиция этих магнитных полей создает внутри шнура набор вложенных магнитных поверхностей. Сечение одной из них радиуса r показано штриховой линией.



нейтральных атомов и т.д. В итоге наиболее интересующая нас ионная температура достигает в современных больших токамаках сверхзвездных значений — до 40 кэВ (в центре Солнца только 1.4 кэВ!). DT- и даже DD-плазма становится мощным источником термоядерных реакций, нечто вроде квазистационарно действующей нейтронной бомбы. При этом, однако, длительность тока, т.е. предельная длительность импульса горения, определяется магнитной индукцией центрального трансформатора, которая, как известно, ограничена. Сегодня длительность импульса — 15—30 с. В принципе, существуют методы безындукционного поддержания тока, например пучками ускоренных ионов. Их образуют, инжектируя в тор по касательной те же потоки быстрых нейтральных атомов. Ионизуясь либо перезаряжаясь в плазме, они превращаются в быстрые ионы и помимо нагрева плазмы могут создавать макроскопический ионный ток. В другом варианте бегущее вдоль тора электромагнитное поле захватывает электроны и создает электронный ток увлечения. Оба способа продемонстрированы экспериментально. Небольшой токамак «Триам» (Япония) может работать непрерывно в течение полутора часов! Однако все существующие методы по тем или иным ограничениям пока не годятся для реактора. В частности

поэтому для завершающего шага к зажиганию, который предполагается осуществить в международном проекте токамака-реактора ИТЭР, был выбран индукционный метод поддержания тока с длительностью импульса 1000 с, хотя эксперименты по неиндуктивному поддержанию тока также внесены в его исследовательскую программу. Во всяком случае с рождения и по сей день токамак прочно ассоциируется с трансформатором, вторичная обмотка которого — плазменный виток, и с омическим током, текущим вдоль поля. Иначе говоря, пока токамаки не обеспечивают стационарность. А это для реактора серьезный минус, который ощущался уже первооткрывателями.

Второй потенциальный минус, связанный с протеканием тока, — неустойчивости. Направленный поток электронов, ускоряемых в плазме электрическим полем, принципиально неустойчив: кулоновское трение частиц спадает, как известно, по мере роста их энергии. Это означает, что на «хвосте» максвелловского распределения всегда будут существовать энергичные электроны, для которых ускорение между соударениями окажется выше, чем торможение, как это предсказывал Г.Драйсер (США). В итоге вместо того, чтобы нагревать плазму, ток электронов превратится в релятивистский пучок, для удержания

которого потребуется увеличить B_{\perp} до такой величины ($\approx B_n/2$), когда оно уже способно серьезно разрушить магнитные поверхности и соответственно условия удержания плазмы. Удивительно, но это предсказание и сбылось, и не сбылось. Существуют такие режимы разряда (малая плотность, большое число примесей и т.д.), при которых почти весь разрядный ток в токамаке переносится быстрыми электронами. Токамак превращается в сверхбетатрон с токами порядка нескольких мегаампер на фоне холодной плазмы. Эти его качества пока не нашли применения и, безусловно, оказываются нежелательными в реакторных приложениях. Замечено, что достаточно небольшого магнитного возмущения (например, локальной гофрировки поля B_{\perp}), чтобы подавить ускорение электронов и перевести токамак в «нормальный» режим плазменного нагрева. Это наводит на мысль, что причина электронной турбулентности — какая-то плазменная микротурбулентность, инициируемая, например, неоднородностями магнитного поля. Возникает парадоксальная ситуация: «нормальные» режимы токамака оказываются следствием развития некоторой плазменной микронеустойчивости.

Наконец, заранее можно было предположить, как это сделали независимо В.Д.Шафранов (СССР) и М.Крускал (США), что кольцевой виток с током окажется неустойчивым, если результирующая магнитная силовая линия, проходя вдоль тора, замкнется сама на себя после одного оборота. Действительно, в этом случае магнитная поверхность из плотно намотанного клубка превращается в кучку замкнутых колечек и плазме ничего не стоит, почти не возмущая магнитного поля, «выскользнуть» наружу. Геометрию магнитных силовых линий в токамаке принято описывать параметром q , так называемым запасом устойчивости:

$$q(r) = B_r/B_n R,$$

где r — малый радиус, на котором находится силовая линия (рис.3). Пара-

метр этот допускает простое физическое толкование: целочисленные q означают, сколько оборотов вдоль тора требуется сделать магнитной силовой линии до замыкания самой на себя. Тогда условие устойчивости токового витка в магнитном поле B_r (критерий Шафранова—Крускала) можно записать как $q(a) > 1$, где a — радиус токового шнура, т.е. той магнитной поверхности, вне которой плазменного тока уже нет. Фактически это условие накладывает ограничения на плазменный ток.

Реальность оказалась еще мрачнее. В конце 60-х выяснилось, что опасны не только замыкания силовых линий после одного обхода тора, но и после двух, трех и даже четырех обходов. Их назвали резонансными. Было установлено экспериментально⁴, что макроскопически устойчивое состояние шнура уверенно реализуется в своеобразных «окнах устойчивости» между целочисленными значениями $q(a)$. Например, рабочая область $q(a)$ для ИТЭРа выбрана от трех до четырех. Причина этого в том, что как только силовая линия с целочисленным q оказывается вблизи границы плазмы, граница становится неустойчивой относительно винтовых возмущений, совпадающих с ходом магнитной силовой линии⁵. Возмущения границы легко проникают в центр и могут дестабилизировать внутренние более низкие резонансы⁶. Если это произойдет, может начаться «перемешивание» плазмы внутри шнура. Плотность тока, обычно следующая за температурой, а за ней и $q(r)$ будут стремиться выровняться по сечению шнура. В итоге все магнитные силовые линии на краю и в центре окажутся топологически идентичными. Для целочисленных q становится возможным почти беспрепятственное движение поперек плазменного шнура резонансных винтовых возмущений, которым уже не требуется пересекать, а достаточно

⁴ Мирнов С.В., Семенов И.Б. // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1971. Т.60. С.2105.

⁵ Шафранов В.Д. // Журн. техн. физики. 1970. Т.40. Вып.2. С.241.

⁶ Furth H. Propagation and instabilities in plasma. Stanford, 1973.

«раздвигать» магнитные силовые линии. А это очень опасно. Б.Б.Кадомцев и О.П.Погуце показали, что в таком случае энергетически выгодно формирование на границе и свободный прорыв в центр «вакуумных пузырей» — винтовых жгутов, заполненных холодной граничной плазмой. В итоге произойдет стремительное вытеснение горячей плазмы на границу шнура, очень похожее на его «выворачивание наизнанку». Явление это вначале было обнаружено экспериментально⁷, получив название «большой срыв». Оно дало мощный стимул экспериментальным и теоретическим исследованиям плазменных неустойчивостей, тем более что сопровождающее его проникновение в плазму примесей (продуктов испарения стенок) приводит к ее охлаждению и гашению разряда (срыву тока) — к явлению, недопустимому в условиях реактора. Правда, развитие столь глубоких резонансов граница—центр редки. Обычно все завершается вспышками у границы (малый срыв), похожими на протуберанцы у нашего солнечного реактора.

К развитию ближайших к границе резонансов ведет любое охлаждение плазменной периферии: инжекция примесей, напуск холодного газа и т.д. В частности, увеличение плотности плазмы в токамаках сопровождается ростом ее излучения. В итоге шнур сужается, ближайший резонанс оказывается у новой границы, и в результате развивается та же вспышка резонансных возмущений с последующим срывом. Тем самым на плотность плазмы в токамаке накладываемся ограничение сверху. Фактически и ток, и плотность ограничиваются одним механизмом. В реакторе-токамаке, как показывают оценки, предел плотности должен быть около $(1-2) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, а максимальное B_p — около $0.1 B_T$. Тогда минимальное τ_E для зажигания, по Лоусону, должно составить 3—6 с. Какого размера должен быть реактор, отвечающий этому требованию? Малый радиус сахаровской

модели (1950) был около 2 м. Ирония природы, но через 45 лет мощный интернациональный коллектив ученых (Проект ИТЭР), владеющий всей интегральной информацией, касающейся плазменного эксперимента в больших токамаках, после семи лет напряженной работы остановился почти на той же цифре — 2.8 м, но уже не на DD-, а на DT-смеси!

Путь к пониманию механизма термоизоляции плазмы в замкнутых магнитных ловушках был долог. Первая критика прозвучала от Будкера еще в 1952 г. Его анализ показал, что в торе заряженные частицы обязаны отклоняться от магнитных поверхностей на несколько ларморовских радиусов. А значит, столкновения будут перемещать их поперек поля на расстояния, существенно большие, чем предполагалось сначала. В итоге термоизоляция плазмы ухудшится более чем на порядок.

Будкер впервые обратил внимание и на то, что заряженная частица, двигаясь по спирали вдоль тора, попеременно попадает то в область большего (внутри), то меньшего (снаружи) тороидального магнитного поля. В результате для некоторой группы частиц («запертых» частиц) возникает аналог зеркальной ловушки с отражением на внутреннем обводе тора. Траектории таких частиц, не пересекающих ось плазмы, должны еще более отклоняться от магнитных поверхностей.

Эти конструктивные идеи Будкера оказались долгое время не востребованными. Только в 1965 г. два тогда еще молодых физика-экспериментатора М.П.Петров и В.С.Муховатов, пытаясь понять анизотропию корпускулярных потоков из плазмы токамака Т-3 (Курчатовский институт), вынуждены были вернуться к будкеровской модели, о чем, разумеется, поставили в известность начальника. Начальник (Арцимович) чуть ли не за ночь, написав все формулы движения «запертых» и «пролетных» частиц, убедился сам в справедливости их доводов и не преминул сообщить об этом Будкеру. Тот «бросил» на задачу своих лучших теоретиков — Р.З.Сагдее-

⁷ Горбунов Е.П., Разумова К.А. // Атом. энергия. 1963. Т.15. Вып.5. С.363.

ва и А.А.Галеева, которые также «в исторически кратчайшие сроки» создали «столкновительную» модель переноса плазмы в токамаках с учетом «запертых» частиц (неоклассическая модель). В качестве одного из ключевых элементов она вошла позднее в более общую «Теорию термоядерной тороидальной плазмы» (Б.Б.Кадомцев, В.Д.Шафранов О.П.Погуце, Р.З.Сагдеев, А.А.Галеев, Л.А.Коврижных. Ленинская премия 1984 г.), ставшую фундаментальным вкладом нашей теоретической плазменной школы, основы которой были заложены, как известно, еще академиком М.А.Леонтовичем.

Теоретическая активность в области неоклассики была с энтузиазмом поддержана зарубежными учеными. Объединенными усилиями удалось осуществить исключительно важное для любой науки разделение новых явлений на «нормальные» и «аномальные». По-прежнему были заложены основы последу-

ющего международного сотрудничества в области создания токамака-реактора. В частности, почти «нормальным» оказался ионный теплоперенос и аномально высоким — электронный. Тем не менее оценки размеров токамака-реактора оказались вполне разумными, укладывающимися в рамки современной техники. Но это был уже конец 70-х. А в начале 50-х идея создания квазистационарной плазмы в торе с током многим казалась безнадежной. «Это так же наивно, как пытаться получить папиросную бумагу из папиросного дыма», — слова, принадлежащие не кому-нибудь, а самому Арцимовичу, тогдашнему Арцимовичу, начала 50-х. Но в будущем Курчатовском институте (он назывался тогда в целях конспирации «Лаборатория измерительных приборов Академии наук») нашлись-таки храбрые люди, которые приступили к экспериментам.

(Окончание в следующем номере)

В течение 20 лет Х.М.Калафорра Чорди (J.M.Calaforra Chordi; Университет Альмерии, Испания) и П.Форти (P.Forti; Болонский университет, Италия) исследовали гипсовые пещеры, расположенные в районах с очень разным климатом: в Аргентине, Италии, Испании, Кубе, штате Нью-Мехико (США) и на севере России. Установлено, что в

аридных и полуаридных условиях формы нарастания — так называемые спелеотемы (speleothems) — состоят в основном из гипса, а в умеренных гумидных и тропических преобладают карбонатные образования. Механизмы формирования спелеотем в разных климатических условиях отличны друг от друга: кальцитовые образуются путем диффузии

CO₂, а осадки гипса — путем эвапорации. Если в разрезе преобладание кальцита меняется на преобладание гипса (или наоборот), есть основания предполагать, что на определенном этапе климат существенно изменился.

Abstracts of XV INQUA Congress. Durban, 3—11 August 1999. P.35 (IOAP).