

METROLOGICAL REFORM IN THE USSR (1917—1927)

KOSLOV B. I.

The article retraces the process of preparation and implementation of a metrology reform in the USSR (1917—1927). The author emphasizes relationship between the metrology reform and the economic development of the country.

XVI МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС ПО ИСТОРИИ НАУКИ

С 26 августа по 3 сентября 1981 г. в Бухаресте состоится очередной XVI Международный конгресс по истории науки.

Его девиз: «Наука и техника. Гуманизм и прогресс».

Ниже публикуется программа конгресса.

НАУЧНАЯ ПРОГРАММА КОНГРЕССА

А. Секции

1. Наука и техника древнего мира.
2. Наука и техника с древнейших времен до 1600 г.
3. Математика и механика после 1600 г.
4. Физика и астрономия после 1600 г.
5. Химия после 1600 г.
6. Биологические науки после 1600 г.
7. Медицинские и фармацевтические науки после 1600 г.
8. Сельскохозяйственные науки после 1600 г.
9. Науки о Земле после 1600 г.
10. Техника и инженерное дело после 1600 г.
11. Наука о человеке после 1600 г.
12. Наука и общество после 1600 г.
13. Методологические проблемы истории и философии науки.
14. История транспорта и телекоммуникаций в XIX и XX вв.

В. Симпозиумы

1. Роль стандартных единиц в истории науки и техники.
2. Техника, гуманизм и мир — исторические аспекты.
3. Наука, техника и проблемы общественного развития — сравнительный анализ и исторические перспективы.
4. Наука и университеты в эпоху Возрождения.
5. Научное творчество и проблемы прогресса.
6. Роль женщин в развитии науки и техники.
7. Роль научных инструментов в развитии науки.
8. Революция в биологии XX в.
9. Развитие научных исследований и образования в области истории науки и техники.
10. Охрана и освоение культурного и природного наследия.
11. Публикации по истории науки и техники.
12. История музыкальной акустики.
13. Типы первоисточников по истории науки и техники.

В. Тематические заседания

1. Проблемы взаимодействия естественных, технических и общественных наук.
2. Необходимость и случайность в научном открытии.
3. Взаимосвязь между математикой и физикой, начиная с XVIII в.
4. Развитие науки и техники в странах Дальнего Востока.
5. Физико-математические науки в арабских странах в средние века.

Г. Памятные даты

1. 1000 лет со дня рождения Ибн Сины (Авиценны).
2. 200 лет со дня рождения математика Симеона Дени Пуассона.
3. 100-летие со дня рождения инженера Джеордже (Гогу) Константинеску.

ОЧЕРК ПРЕДЫСТОРИИ И РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

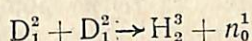
Академик КАДОМЦЕВ Б. Б.,
СМИРНОВ С. А.

1. Первые идеи

Первыми сведениями о процессах взаимодействия дейтронов физика обязана великому основателю современного учения об атомном ядре — Эрнесту Резерфорду (1871—1937). Проверая гипотезу о том, что наименьшей энергией отталкивания при сближении должны обладать ядра самого легкого элемента, он по ряду соображений выбрал ядра тяжелого изотопа водорода — дейтерия. В эксперименте, проведенном им совместно с Олифантом и Хартеком [1, с. 413], [2, с. 692], пучок дейтронов с энергией 10—20 кэВ направлялся на мишени, состоящие из соединения NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, H_3PO_4 , где водород был заменен на дейтерий. По обнаруженным в результате реакции протонам и нейтронам, вылетающим, по подсчетам авторов, с энергиями 3,6 МэВ и 2 МэВ соответственно, ими были предложены, в частности, следующие схемы реакций



и



Как известно, мысль о практическом использовании внутриядерных сил была в то время отвергнута Резерфордом.

Астрофизиков долгое время занимал вопрос о неисчерпаемых энергетических ресурсах Солнца и звезд. В 1929 г. Аткинсон и Хаутерман высказали предположение о том, что источником звездной энергии являются термоядерные реакции [3, с. 656]. В 1938-39 гг. были выдвинуты предположения о двух естественных циклах термоядерных реакций — протонно-протонном (цикл Бете—Кричфилда) и углеродно-азотном (цикл Бете—Гамова), в результате которых 4 протона образуют ядро гелия-4 с выделением энергии 25,6 МэВ на 1 ядро. Огромное энерговыделение за счет дефекта массы ядер гелия возбудили интерес к реакциям превращения водорода в гелий, однако только в 40-х годах после тщательного измерения сечений целого ряда реакций синтеза легких элементов и выяснения необходимых условий их осуществления стали серьезно обсуждаться практические пути использования этих реакций.

Чтобы лучше представить, чего добилось бы человечество, овладев термоядерным синтезом, сравним количество энергии, выделяемое в трех основных реакциях, используемых для получения тепла. При сжигании водорода в кислороде на грамм сгорающих веществ выделяется всего 4,4 Вт/ч. При распаде атомов урановых элементов на грамм вещества можно получить 22,5 млн. Вт/ч. При синтезе же ядер дейтерия и дейтерия эта цифра доходит примерно до 100 млн. Вт/ч. Если бы сейчас все электростанции мира перевести на термоядерный

режим, то даже с учетом КПД 30% для непрерывной работы в сутки им понадобилось бы не более тонны дейтерий — тритиевого топлива [4, с. 13].

Каковы же необходимые условия проведения реакций синтеза?

Предварительные расчеты, выполненные в начале исследований по управляемым термоядерным реакциям, показывали, что для создания самоподдерживающейся управляемой термоядерной реакции ядерное горючее на основе дейтерия или его смеси с тритием должно быть доведено до состояния высокотемпературной плазмы, удовлетворяющего двум основным требованиям: 1) температура плазмы (или, точнее говоря, температура ее ионной компоненты) должна быть порядка $\sim (1 \div 5) \cdot 10^4$ эВ*, т. е. $\sim (1 \div 5) \cdot 10^8$ градусов; 2) необходимо, чтобы выполнялось условие $n\tau > A$, называемое критерием Лоусона, первым опубликовавшим свои расчеты в работе [5, с. 6], в 1957 г. Здесь n — концентрация плазмы (число ионов в 1 см^3), τ — среднее время сохранения энергии (отношение запаса тепловой энергии к тепловому потоку из плазмы). Константа A зависит от состава ядерного горючего. Для чистого дейтерия при оптимальных предположениях она составляет $\sim 1 \cdot 10^{16}$, а для смеси дейтерия и трития (с равным содержанием обеих компонент) — около $2 \cdot 10^{14} \text{ с/см}^3$.

Наиболее легко осуществимой является реакция слияния ядер дейтерия и трития ($t \sim 100$ млн. градусов, $n\tau = 10^{14} \text{ с/см}^3$), в результате которой образуются ядро гелия и нейтрон с выделением 17,6 МэВ энергии в виде кинетической энергии разлета продуктов реакции, причем 80% энергии уносит нейтрон, а 20% — ядро гелия.

Температура в 100 млн градусов — если вспомнить, что на поверхности Солнца «всего» 6 тыс. градусов — должна приводить вещество в какое-то непривычное для земных условий состояние. В физике это состояние принято называть плазмой.

Термин плазма был заимствован в 1923 г. из физиологии американскими физиками Ленгмюром и Тонксом для обозначения газа в электропроводящем состоянии. До начала термоядерных исследований физики имели дело в основном с плазмой газовых разрядов, температура которой не превышала несколько тысяч или десятков тысяч градусов. Доля ионизованных частиц в такой низкотемпературной плазме увеличивается с ростом температуры. Как указывает Л. Спитцер, «хотя ионизация, конечно, никогда не бывает полной, в определенных условиях доля присутствующих нейтральных частиц может быть меньше нескольких процентов, и поэтому при исследовании большинства физических процессов их влиянием можно пренебречь» [6, с. 9]. При ядерных температурах плазму можно считать практически полностью ионизованной.

Наша Вселенная, как известно, состоит на 99% из вещества в четвертом состоянии — состоянии плазмы. На рис. 1 представлены параметры плазмы в различных установках и естественных условиях [7, с. 6].

Хотя до 1950 г. никто не пытался создавать полностью ионизованную чистую высокотемпературную плазму, еще в 30-х годах работами А. А. Власова (1908—1975) и Л. Д. Ландау (1908—1968) были заложены основы теории полностью ионизованной плазмы. Разреженная и в особенности полностью ионизованная плазма постоянно интересовала теоретиков как наиболее простое возможное состояние вещества — система заряженных частиц, взаимодействующих по классическому закону Кулона посредством слабых, но дальнodelствующих сил [8, с. 239].

В те же годы возник интерес к явлениям в плазме, помещенной в магнитные поля. В 1935–38 гг. были опубликованы работы Г. В. Спивака, Э. М. Рейхруделя, В. А. Фабриканта, Г. Н. Рохлина, которые впер-

* $1 \text{ эВ} = 11 600^\circ \text{C}$.

вые наблюдали и изучали явление отжатия магнитным полем плазмы от стенок, изменение электронной температуры, градиента потенциала в положительном столбе и другие явления, вызванные магнитным полем [9, с. 167].

Бурное развитие атомной физики в послевоенные годы и, в частности, работ по электромагнитному разделению изотопов, которые были развернуты в Институте атомной энергии в 40-х годах под руководством Л. А. Арцимовича (1909—1973), послужили толчком для развития физики плазмы. При разработке ионных источников для электромагнитного разделения впервые пришлось столкнуться с необычной сложностью физических процессов в плазме, находящейся в сильном магнитном поле [8, с. 240].

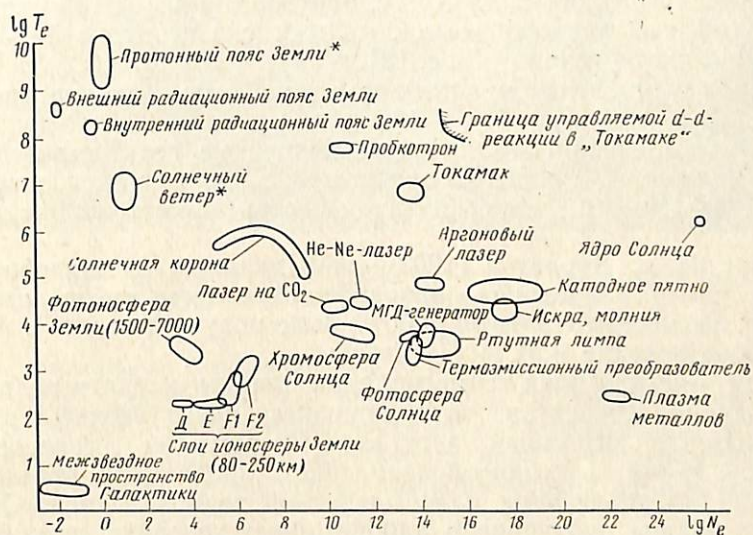


Рис. 1. Параметры плазмы: T_e — температура электронов (в $^{\circ}\text{K}$), звездочкой отмечены случаи, соответствующие температуре ионов T_i , N_e — плотность электронов (в см^{-3})

В 40-х годах среди ученых стали впервые обсуждаться вопросы управляемого термоядерного синтеза и были даже предприняты некоторые попытки проведения экспериментов.

Как указывает Грауль [10, с. 11] со ссылкой на частное сообщение Тирринга, немецкий физик Р. Рихтер в 1942 г. исследовал цикл термоядерных реакций, в основу которого положил комбинацию реакций $T(T, \alpha)2n + 11,3 \text{ МэВ}$ и $\text{Li}_3^6(n, \alpha)\text{T} + 4,8 \text{ МэВ}$. «Воспламенение» и управление реакциями были опробованы на «неспециальном электромагнитном устройстве». Эти исследования проводились в хорошо оборудованной лаборатории на острове Хьюэмель при поддержке аргентинского правительства.

Первым официальным сообщением об экспериментах по осуществлению управляемой термоядерной реакции, однако, следует считать заявление президента Аргентины Перона в 1951 году о том, что Рихтеру якобы удалось осуществить управляемую термоядерную реакцию 16 февраля 1951 г. [11, с. 18].

В числе других попыток можно указать безуспешные эксперименты по осуществлению теоретически исследованной в США Таким и Уламом идеи, заключавшейся в нагревании и удержании дейтериевой плазмы в результате соударения дейтериевых струй, обладающих высокими скоростями [12, с. 17].

2. Начало исследований

Систематические исследования по созданию управляемых термоядерных реакторов начались приблизительно одновременно в США, Великобритании и СССР. В 1950 г. Тамм И. Е. (1895—1971) с сотрудниками выдвинули идею магнитной термоизоляции высокотемпературной плазмы для получения управляемой термоядерной реакции и дали расчет первой модели установки, названной магнитным термоядерным реактором (МТР) [13, с. 3].

По расчетам И. Е. Тамма, магнитные силовые линии, изолирующие плазменный сгусток от стенок камеры, позволяют на много порядков снизить перенос энергии к стенкам, испаряющимся при отсутствии магнитной термоизоляции под действием мощного теплового потока из плазмы. Для магнитного поля 10^4 Гс, плотности плазмы 10^{14} см $^{-3}$ и температуре 100 кэВ тепловой поток должен снизиться до $1,4 \cdot 10^{-17}$ от «незамагнитченного» потока [13, с. 12].

Примерно в это же время идея магнитной термоизоляции возникла в США и Великобритании.

Поскольку предполагалось, что термоядерные реакторы будут служить для получения трития и делящихся элементов, используемых в военных целях, то все работы велись в обстановке строжайшей секретности.

В 1951 г. И. В. Курчатов (1903—1960) включил термоядерную программу в число важнейших направлений работы руководимого им Института. Экспериментальные работы было поручено вести Л. А. Арцимовичу, теоретические — М. А. Леонтовичу.

Простая и четкая идея термоизоляции плазмы магнитным полем и захватывающие перспективы, открывавшиеся перед учеными в случае успеха, вызвали огромный энтузиазм первых ее исследователей. За короткое время было предложено много конкретных практических конструкций по реализации идеи магнитной термоизоляции. Смелость постановки задачи получения в лабораторных условиях звездных температур в какой-то мере была результатом ошеломляющего успеха в освоении ядерной энергии для военных целей. Однако исследователи сразу же столкнулись с непреодолимым на первых порах препятствием — неустойчивостью высокотемпературной плазмы, борьба с которой длится уже почти тридцать лет. На международной конференции в Зальцбурге в 1961 г. Л. А. Арцимович сказал: «Сейчас всем ясно, что первоначальные предположения о том, что двери в желанную область сверхвысоких температур откроются без скрипа при первом же мощном импульсе творческой энергии физиков, оказались столь же необоснованными, как и надежда грешника войти в царство небесное, минуя чистилище» [14, с. 19].

Мощный импульс получили работы после установления международных контактов.

Здесь надо сказать, что еще в 1955 г. на совещании в Институте атомной энергии при обсуждении итогов и перспектив работ по управляемому термоядерному синтезу в СССР И. В. Курчатов предложил рассекретить ведущиеся в нашей стране термоядерные исследования. Он уже в то время понимал, что для дальнейшего продвижения и создания термоядерного реактора необходимы огромные средства и что эта задача может быть успешно и значительно быстрее решена только коллективными усилиями ученых многих стран мира.

В 1956 году руководитель советской программы И. В. Курчатов выступил в английском научно-исследовательском атомном центре в Харуэлле с докладом о ведущихся в Советском Союзе работах в этом направлении. Уже через два года в Женеве на Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии в обсуждении



Рис. 2. А. П. Александров, И. Е. Тамм, Нильс Бор и Л. А. Арцимович в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова 5 мая 1961 г.

проблем управляемого термоядерного синтеза приняли участие ученые 12 стран. Было прослушано 115 докладов и сообщений. Как пишут Б. Б. Кадомцев и М. А. Леонтович [8, с. 242], «Конференция продемонстрировала огромное богатство физических идей и экспериментальных разработок. Советские исследования были на уровне лучших зарубежных работ».

В обзорном докладе на этой конференции Л. А. Арцимовича сказано: «...в проблеме управляемых реакций синтеза ни одна из известных идей не обнаружила еще решающего преимущества перед другими. Поэтому на ближайшем этапе исследования должны развиваться по возможно более широкому фронту. Важнейшим условием для успешного хода этих исследований является сохранение и дальнейшее развитие этого международного научного сотрудничества, начало которому положила наша конференция» [15, с. 23].

В настоящее время исследования по управляемому термоядерному синтезу (УТС) ведутся на самых различных направлениях, показанных на схеме. Большинство из них основано на двух принципиально разных подходах — магнитном и инерционном удержании. Не все пути являются равноценными, ниже будут рассмотрены только основные.

3. Развитие исследований пинчевых систем

На первой стадии исследований в СССР основное внимание уделялось импульсным сильноточным разрядам (зет-пинчам) в прямых трубах. В этих экспериментах надеялись одновременно осуществить нагрев плазмы за счет омического сопротивления и сжатия собственным магнитным полем разрядного тока и тем термоизолировать ее от стенок сосуда. Теоретически эффект самофокусировки разряда был предсказан Уиллардом Беннетом еще в 1933 г. [16, с. 890].

В середине 1952 г. были обнаружены нейтроны и жесткое рентгеновское излучение, наличие которых связывали с высокой температурой плазмы, достаточной для термоядерного процесса. Однако детальный

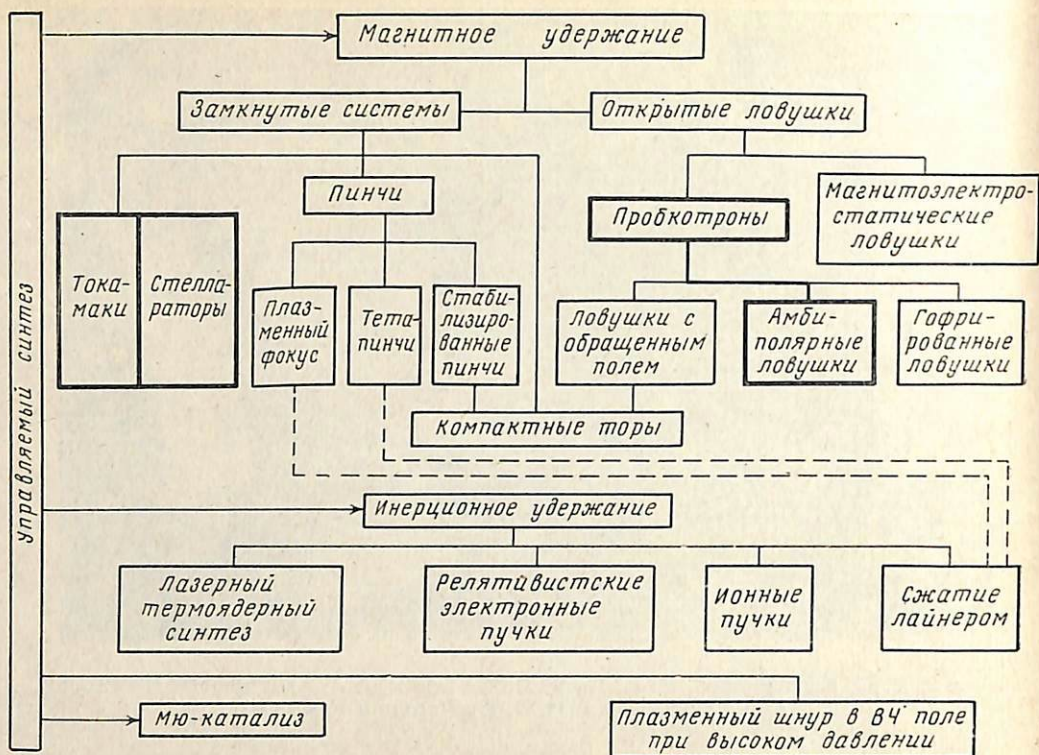


Рис. 3. Схема основных направлений исследований по управляемому синтезу

критический анализ и контрольные эксперименты, предложенные Л. А. Арцимовичем, показали, что нейтроны являются лишь следствием ускорительных процессов, сопровождающих возникновение целого ряда неустойчивостей. Эти неустойчивости проявлялись в виде разрывов и изгибов плазменного шнура и выбросов плазмы на стенки. Температура плазмы достигала миллиона градусов, однако время существования плазменного шнура из-за развития неустойчивостей оставалось ничтожным ~ 1 мкс. Как вспоминает один из участников работ, С. Ю. Лукьянов: «Теперь, спустя десятилетия, мы понимаем, что эффект, обнаруженный 4 июля 1952 г.—это, вероятно, самое крупное открытие в физике горячей плазмы, сделанное во второй половине века. С этого дня начинается счет физики неустойчивостей плазмы. Это открытие стимулировало экспериментальный поиск все новых и новых плазменных систем и устройств и вызвало лавину теоретических исследований».

Важным шагом для всей термоядерной программы явились теоретические работы о стабилизирующем действии проводящего кожуха и стабилизации плазмы сильным продольным магнитным полем, выполненные М. А. Леонтовичем и В. Д. Шафрановым. С использованием сильного продольного поля температура плазмы оставалась на более низком уровне—около 70 тыс. градусов, но зато время устойчивого удержания возросло в 10 раз и определялось лишь длительностью протекания тока через плазму [17, с. 208]. Попытки увеличить температуру плазменного шнура за счет увеличения разрядного тока ни к чему не привели, так как шнур разваливался гораздо быстрее, чем ток успевал достичь максимума.

Поэтому интересы, как отмечал Л. А. Арцимович, естественным образом, переместились в сторону изучения систем несколько иного типа, в которых сжатие плазмы происходит под действием быстро-нарастающего внешнего поля. Речь идет о процессах, получивших название тета-пинч. При тета-пинч-эффекте достигается максимальная

концентрация магнитной энергии в малых объемах. Поэтому сжатие плазмы внешним полем представляет значительно более эффективный метод создания высоких температур, чем линейный разряд. На американских установках удавалось на время порядка нескольких микросекунд получать сгустки плазмы с концентрацией 10^{19} и температурой порядка 10^3 эВ [14, с. 14].

Некоторые модификации геометрии зет-пинча привели Н. В. Филиппова в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова к созданию «плазменного фокуса» — весьма миниатюрного плазменного образования, в котором уже получена плазма с плотностью до 10^{20} см $^{-3}$ с температурой ионов и электронов около 3 кэВ в объеме менее 1 мм 3 при времени жизни 0,2—0,3 мкс [18, с. 40].

Недавние теоретические исследования явления пинчевания в плазменном фокусе показывают, что при увеличении разрядного тока до 10^7 А возможно явление радиационного коллапса, связанное с увеличением потерь на излучение. Это явление может привести к значительному увеличению нейтронной эмиссии [19, с. 39].

В пинчевых установках удалось также осуществить режим стабилизированного пинча, изучаемый в настоящее время в ряде стран. В этом режиме под действием электрического разряда газ, пронизанный слабым продольным магнитным полем, превращается в плазму и, сходясь к оси объема, увлекает магнитные силовые линии, собирая их в пучок. Магнитное поле в середине плазменного столба за счет действия поля проходящего по плазме тока усиливается, а с наружной стороны снижается до нуля и может принять результирующее обратное направление. Процесс перераспределения магнитного поля происходит неконтролируемым образом. Совсем недавно Т. Окава (США) высказал идею об обращении продольного поля контролируемым путем — наложением извне специально подобранного магнитного поля винтовых (стеллараторных) обмоток.

4. Квазистационарные замкнутые магнитные системы — токамаки и стеллараторы

Первоначальные идеи по осуществлению МТР с квазистационарным магнитным полем были воплощены в построенном по инициативе И. Н. Головина и при поддержке И. В. Курчатова в 1954 г. в Институте атомной энергии токамаке — тороидальной установке для исследования кольцевых электрических разрядов в сильном продольном магнитном поле.

Переход к исследованиям на безэлектродных тороидальных системах позволял исключить потери энергии из плазмы, характерные для пинчевых систем и происходившие за счет утечки частиц вдоль магнитного поля на электроды. Стабилизация плазменного шнура, возбуждаемого индукционным разрядом, обеспечивалась сильным продольным магнитным полем, создаваемым обмотками, а равновесие его достигалось за счет применения проводящего кожуха, окружавшего тороид.

В результате первых экспериментов, проведенных под руководством Н. А. Явлинского (1912—1962) и И. Н. Головина на установке с тороидальным магнитным полем до 15 кэ, были выявлены основные причины, препятствовавшие получению устойчивого высокотемпературного разряда — чрезмерно высокий приток примесей со стенок камеры в плазму и нарушение условий равновесия плазменного витка при недостаточно точной регулировке поперечного магнитного поля [20, с. 10]. Поскольку степень ионизации примесных атомов может быть неполной, то по мере нагрева плазмы происходит возбуждение, ионизация и рекомбинация этих атомов, в результате чего плазменный шнур теряет энергию в виде линейчатого, тормозного и рекомбинационного излуче-

ния примесных атомов, причем потери энергии резко возрастают с ростом атомного веса. Поэтому даже наличие небольшого числа атомов примесей оказывается достаточным для того, чтобы остудить плазму.

Для уменьшения притока примесей необходимо было улучшать вакуумные условия в камере, разрабатывать специальные устройства для удаления примесей — диверторы.

Для борьбы с перемещениями шнура из-за влияния поперечной компоненты рассеянного магнитного поля внешних электрических контуров, проникавшей внутрь камеры, все вновь сооружаемые установки снабжались специальными корректирующими и управляющими обмотками.

Весной 1962 г. на установке ТМ-2 был впервые получен плазменный шнур, сохранявший макроскопическую устойчивость на протяжении всего разрядного импульса. Устойчивые разряды получались лишь при максимальной для установки величине продольного поля 22 кЭ [20, с. 14].

До 1970 г. исследования на токамаках проводились только в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова. В США основное внимание уделялось стеллараторам — магнитным ловушкам с винтовым магнитным полем, предложенным в 1951 г. американским астрофизиком Л. Спитцером.

Токамак работает только в токовом режиме, тогда как стелларатор позволяет исследовать и бестоковую плазму. Однако при омическом методе создания и нагрева плазмы токамак обладает тем бесспорным преимуществом, что при прочих равных условиях позволяет работать при больших величинах разрядного тока и, следовательно, вкладывать в плазму большую мощность. Кроме того, токамак более прост в конструктивном отношении; отсутствие в нем винтовой обмотки давало возможность с самого начала проводить эксперименты с довольно толстыми плазменными шнурами (диаметром 20 см и больше), что позволяло снизить влияние стенок камеры на плазму [20, с. 12].

На пути дальнейших исследований как на советских установках, так и за рубежом возникали непредвиденные барьеры.

В США в течение длительного времени проводились эксперименты на крупной термоядерной установке стелларатор С. В них регулярно наблюдалась усиленная диффузия плазмы в магнитном поле, которая впервые была обнаружена в исследованиях дуговых разрядов в магнитном поле и описана американским физиком Д. Бомом еще в 1949 г. Неблагоприятная зависимость бомовской диффузии от температуры плазмы и магнитного поля не позволяла осуществить разработку стационарного термоядерного реактора.

Опираясь на результаты, полученные на стеллараторе С, американские ученые объявили бомовскую диффузию универсальной [21, с. 352]. В своих докладах на II международной конференции по физике плазмы и УТС в Калэме в 1965 г. они показали, что в этой установке в широком диапазоне изменения плотности и температуры электронов, при наличии продольного тока и без него, при высокочастотных методах нагрева и в отсутствие всякого нагрева измеренное время жизни плазмы с высокой точностью соответствует формуле Бома [20, с. 23].

На той же конференции советской стороной были представлены результаты первых экспериментов на установке Токамак-3, из которых следовало, что в этой установке даже при осторожных оценках время диффузии превышает бомовское время в несколько раз. Однако американские ученые не придали значения этому факту и довольно пессимистично оценивали общее состояние проблемы магнитной термоизоляции плазмы. Отсутствие полного понимания многих процессов в плазме и, в частности, причины бомовской диффузии, а также безуспешные попытки бороться с некоторыми видами неустойчивости не могли раз-

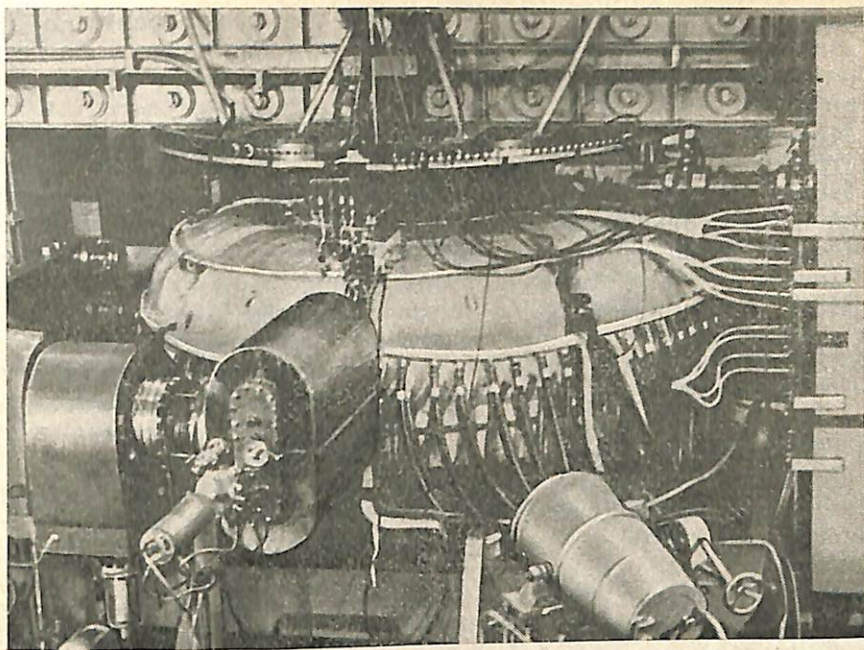


Рис. 4. Токамак Т-3

велять в то время определенного пессимизма в отношении осуществления управляемых термоядерных реакций.

Однако дальнейшие исследования, проведенные в СССР под руководством Л. А. Арцимовича на токамаках, вновь вселили надежду в достижимость конечной цели.

В 1968 г. в Новосибирске на III международной конференции по физике плазмы и УТС были доложены результаты, полученные на Т-3. На этом токамаке при напряженности продольного магнитного поля 37 кЭ была получена плазма с плотностью электронов $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и временем удержания 0,01 с, что в 30 раз превышало значение, соответствующее бомовской диффузии. Температура достигала 0,7 кэВ для электронов и 0,5 кэВ для ионов. Температуру ионов стало возможным определять по интенсивности ядерных реакций, происходящих в плазме.

Главным итогом конференции Л. А. Арцимович назвал то, что «мы освободились от мрачного призрака громадных потерь, воплощенного в формуле Бома, и открыли путь для дальнейшего повышения температуры плазмы с выходом на физический термоядерный уровень» [20, с. 24].

Иностранным ученым трудно было принять результаты, подрывавшие их веру в справедливость формулы Бома. Для объективной проверки результатов, полученных на Т-3, по инициативе академика Л. А. Арцимовича в Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова были приглашены английские физики со своей уникальной диагностической аппаратурой.

В течение 1969-70 гг. эта совместная работа полностью подтвердила результаты, доложенные ранее советскими физиками. С этого времени токамаки получают широкое распространение.

Исследования по программе токамак являются в настоящее время лидирующими в большинстве национальных программ. Сейчас в мире насчитывается более пятидесяти различных действующих токамаков в СССР, США, Франции, Англии, ФРГ, Италии, Японии, Бельгии, Нидер-

ландах, Австралии, Канаде, Южной Африке и других странах. В Советском Союзе эта программа ориентируется примерно на полтора десятка различных установок, которые по своим целям можно разделить на пять групп:

- 1) Прямой путь повышения параметров плазмы путем увеличения параметров установок.
- 2) Поиск новых конфигураций, позволяющих снизить затраты на создание и удержание термоядерной плазмы.
- 3) Ограничение поступления примесей.
- 4) Дополнительный нагрев и стабилизация.
- 5) Новые принципы создания магнитных систем [22, с. 348].

На крупнейшем советском токамаке Т-10, введенном в строй в 1975 г., к настоящему времени получены максимальная плотность плазмы более $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, температура электронов около 20 млн. градусов, ионов — 13 млн. градусов. Величина времени удержания энергии 0,06 с. Поток термоядерных нейтронов составляет $(4 \div 8) \cdot 10^9$ нейтронов/с. До осуществления критерия Лоусона необходимо в 30 раз увеличить параметр удержания ηt и в 10 раз температуру [23, с. 79].

Для достижения более высоких температур необходимо привлекать дополнительные к джоулеву методу способы нагрева плазмы. Наиболее реальными являются нагрев плазмы за счет инжекции в плазму извне быстрых атомов и нагрев ВЧ и СВЧ-волнами.

На крупнейшей в США термоядерной установке РЛТ в Принстоне в 1980 г. при плотности плазмы $2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ достигнута рекордная температура плазмы 7 кэВ (~ 80 млн. градусов) с использованием инжекции нейтральных атомов дейтерия с температурой 40 кэВ. Мощность инжекции 2,5 МВт.

Дальнейший прогресс в исследованиях по магнитному удержанию будет обеспечен установками следующего поколения: Т-15 (СССР), TFTR (США), JET (Евратом) и JT-60 (Япония). На этих установках предполагается получить плазму с параметрами, близкими к тем, которые необходимы для термоядерного реактора. Ожидаемые параметры плазмы: температура $(70 \div 100) \cdot 10^6 \text{ К}$, плотность ионов $(5 \div 10) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, параметр удержания близок к 10^{14} с/см^3 . Установки должны вступить в строй после 1982 г. [24, с. 59].

Следует отметить, что уже в настоящее время достигнутые пороги на разных токамаках параметры плазмы, будучи сведенными вместе, были бы достаточны для создания гибридного термоядерного реактора системы «синтез—деление». В этих реакторах, наряду с воспроизводством трития из лития с помощью термоядерных нейтронов может осуществляться получение энергии из достаточно широко распространенных делящихся материалов урана—238 или тория—232 в виде высокотемпературного тепла, а также воспроизводство дефицитных плутония или урана—233 для использования его в обычных ядерных реакторах, работающих на тепловых нейтронах. Гибридные реакторы могут представить собой одно из первых практических применений термоядерного синтеза.

Уверенность в осуществлении управляемых термоядерных реакций в обозримом будущем ставит вопрос о необходимости инженерной проработки термоядерного реактора-токамака. В настоящее время регулярно проводятся международные совещания по различным инженерным и технологическим проблемам, таким как создание материала первой стенки, конструкция бланкета, использование сверхпроводящих магнитных систем, развитие систем нагрева плазмы мощностью в десятки и сотни мегаватт, разработка систем контроля параметров плазмы, подачи топлива и отвода шлаков и примесей, вакуумная технология, автоматическое дистанционное управление всеми процессами реактора и т. д. Важным шагом в решении этих проблем явилось созда-

ние в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова первого в мире токамака Т-7 со сверхпроводящими обмотками магнитного поля.

По предложению Советского Союза ученые СССР, США, Евратома и Японии приступили к разработке проекта Международного реактора-токамака ИНТОР. В программе токамаков ИНТОР является промежуточным между установками Т-15, TFTR, JET, JT-60 и демонстрационным энергетическим реактором ДЕМО для производства электричества. В ИНТОРе должны быть использованы основные технологические решения, пригодные для реактора, предусмотрены модули blankets для проведения инженерных испытаний. Он должен продемонстрировать возможность производства электричества и воспроизводства трития и способность термоядерного реактора к устойчивой продолжительной работе.

Главные видимые опасности, грозящие реактору-токамаку — это дестабилизирующая неустойчивость (опасность для первой стенки реакторов), нестационарность (влияние на сроки службы конструкционных материалов) и малость аспектного отношения (отношение большого радиуса тора к малому), приводящая к большим технологическим сложностям. Если эти опасности окажутся трудно преодолимыми, то можно рассчитывать на использование стелларатора, которому не грозят указанные опасности [25, с. 1082].

За последнее время на стеллараторах второго поколения в СССР, ФРГ, Англии и Японии достигнуты определенные успехи в удержании плазмы. Недавно в ФРГ с помощью инжекции нейтральных атомов на стеллараторе W-VIIA получена плазма с температурой ионов 700 эВ с хорошим удержанием в бестоковом, чисто стеллараторном режиме. Это позволяет надеяться, что в дальнейшем стеллараторы могут быть использованы для создания термоядерных реакторов.

Успешно развиваются исследования и по ряду других направлений как в магнитном удержании, так и в так называемом инерционном синтезе. О них мы расскажем во второй части обзора.

Литература

1. Oliphant M. L., Harteck P., Rutherford. Transmutation Effects Observed with Heavy Hydrogen.— *Nature*, v. 133, N 3359, 1934, p. 41.
2. Oliphant M. L. E., Harteck P. and Lord Rutherford. Transmutation Effects Observed with Heavy Hydrogen.— *Proc. Roy. Soc.*, v. 144, Ser. A, 1934, pp. 692—703.
3. Atkinson R. d'E und Houtermans F. G. Zur Frage der Aufbaumöglichkeit der Elemente in Sternen — *Zeit. f. Phys.*, LIV, N 9—10, 1929, s. 656—665.
4. Велихов Е. П. Управляемое солнце. Смена, № 6, 1980, с. 12—13.
5. Lawson J. D. Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor — *Proc. Phys. Soc.*, v. 70, Sect. B, Part 1, 1957, pp. 6—10.
6. Спитцер Л. Физика полностью ионизованного газа. М.: Мир, 1965.
7. Смирнов Б. М. Введение в физику плазмы. М.: Наука, 1975.
8. Кадомцев Б. Б., Леонтович М. А. Физика плазмы.— В кн.: «Октябрь и научный прогресс». Т. I, М.: АПН, 1967, с. 237—247.
9. Спивак Г. В. Плазма в магнитном поле. В кн. Развитие физики в СССР, т. I, М.: Наука, 1967, с. 167—169.
10. Грауль. Управляемые термоядерные реакции как возможный источник энергии в будущем, перевод из ж-ла «Atompraxis», 2, (62) (1956). В сб.: Управляемые термоядерные реакции. М., Атомиздат, 1957, с. 3—18.
11. И. Г. О проводимых в США работах по осуществлению управляемой термоядерной реакции.— *Атомная энергия*, № 1, 1956, с. 117—118.
12. Бишоп Амаза С. Проект Шервуд. Программа США по управляемому термоядерному синтезу. М.: Атомиздат, 1960.
13. Тамм И. Е. Теория магнитного термоядерного реактора, ч. I, с. 3—19; ч. III, с. 31—41; ч. II, с. 20—30.— В кн.: «Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций», т. I, М.; АН СССР, 1958.
14. Арцимович Л. А. О состоянии исследований по управляемым термоядерным реакциям. Заключительный доклад на Международной конференции в Зальцбурге.— *Успехи физических наук*, т. 76.— Вып. I, 1962, с. 11—20.
15. Арцимович Л. А. Исследования по управляемым термоядерным реакциям в СССР, в кн. Труды 2 Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии. Т. I. Доклады советских ученых. М.; Атомиздат, 1959, с. 5—30.

16. Bennet Willard H. Magnetically Self-Focussing Streams.— Phys. Rev., v. 45, 1934, pp. 890—897.
17. Головин И. Н., Кадомцев Б. Б., Толок В. Т. Исследования по управляемым термоядерным реакциям в СССР. В кн. Советская атомная наука и техника. М.; Атомиздат, 1967, с. 204—219.
18. Проспект ИАЭ. М., Внешторгиздат, 1978 г.
19. Ежегодник ИАЭ 1977—1978. М.: ИАЭ, 1979.
20. Мухоматов В. С. Токамаки. В сб. Итоги науки и техники. Серия «Физика плазмы». Т. 1, ч. I. М.; ВИНТИ, 1980, с. 6—118.
21. Чуянов В. А. Современное состояние исследований по управляемому термоядерному синтезу.— Атомная энергия. Т. 43.— Вып. 5, 1977, с. 351—359.
22. Мирнов С. В., Мухоматов В. С., Стрелков В. С., Шафранов В. Д. Обзор современного состояния работ на токамаках в СССР.— Физика плазмы. Т. 2.— Вып. 2, 1976, с. 348—360.
23. Стрелков В. С. Исследования горячей плазмы на Токамаке-10.— Природа, № 11, 1977, с. 72—79.
24. Велихов Е. П., Кадомцев Б. Б., Орлов В. В. Термоядерный синтез и атомная энергетика.— Теплоэнергетика, № 11, 1977, с. 59—66.
25. Shafranov V. D. Stellarators — Nuclear fusion, v. 20, N 9, 1980, pp. 1075—1083.

REVIEW OF THE PREHISTORY AND DEVELOPMENT OF THE MAIN TRENDS OF THERMONUCLEAR RESEARCH

Academician KADOMTSEV B. B., SMIRNOV S. A.

A short review of the development of the ideas on physical processes in plasma, which lead to the problem of controlled thermonuclear reaction is given. The development of the research on pinched and closed magnetic systems for receiving and keeping plasma with thermonuclear parametra and the construction of thermonuclear reactor is described.

ЭЙНШТЕЙН И ДЕ БРОЙЛЬ

Историко-философские и историко-научные заметки

КУЗНЕЦОВ Б. Г.

1. Критерии истины.

Публикуемая в этом номере переписка Эйнштейна с Луи де Бройлем может служить поводом для обсуждения некоторых весьма общих проблем истории науки. Именно поводом. Сама общность трактуемых в письмах проблем требует сопоставления писем с другими высказываниями ученых. Я позволил себе сослаться подчас не только на статьи и опубликованные речи, но и на личные замечания де Бройля в беседе, происходившей весной 1980 г. Непосредственная связь собственно физических проблем с историко-философскими и историко-научными проблемами характерна и для этой беседы, и для самой переписки, и для всего автобиографического, мемуарного и эпистолярного наследия, которое оставляет будущему наука XX в., особенно его второй половины, начиная с «Автобиографических заметок» Эйнштейна, опубликованных в 1949 г. Связь с историко-философскими и историко-научными проблемами характерна для этого наследия, так как оно включает не только итоги и прогнозы, но и общий ретроспективный пересмотр всего прошлого науки.

В 1923 г. в сентябрьском номере *Comptes Rendus* появилась статья де Бройля, где он рассматривал как нечто связанное одно с другим основные идеи оптики и механики — принцип Ферма и принцип Мопертюа. В следующих номерах была сформулирована волновая механика. Она составила содержание докторской диссертации де Бройля. Последний просил Ланжевена ознакомиться с напечатанным на машинке текстом и дать второй экземпляр Эйнштейну. Эйнштейн прочитал работу де Бройля и написал Ланжевону, что автор «поднял великий Занавес».

Через тридцать лет де Бройль закончил свою речь «Дуализм волн и частиц в работах Альберта Эйнштейна» на собрании Парижской Академии наук заявлением о большой трудности перехода от принятой большинством физиков копенгагенской версии к более глубокому, по его мнению, пониманию корпускулярно-волнового дуализма («Перед вопрошающим ее человеческим духом природа ревниво защищает свои секреты») и затем фразой: «Очень трудно поднять этот великий Занавес» [2, с. 51].

Годом раньше Эйнштейн писал де Бройлю о своей позиции в отношении квантовой механики как о позиции «страуса, зарывающего все время голову в релятивистский песок, чтобы не взглянуть в лицо злым квантам».

В двадцатые годы накануне широкого признания и однозначного подтверждения волновой механики де Бройль послал Эйнштейну свою статью, а Эйнштейн уже несколько лет как получил столь же однозначные астрономические доказательства теории относительности. Это был период «бури и натиска» неклассической науки. Теперь, в пятидесятые годы, де Бройль чувствовал себя одиноким в поисках детерминистской квантовой механики, а Эйнштейн, может быть, еще более одиноким, — в оппозиции принципу неопределенности и в попытках создания единой теории поля.