

# ЭНЕРГИЯ



Государственный  
научный центр  
Институт ядерной физики  
им. Г.И.Будкера  
№2-3, февраль, 1997г.

С праздником,  
милые женщины!

# Импульс

Древние мудрецы считали, что во все времена женщина являла собой все лучшее в жизни людей — любовь, красоту, доброту, надежду. Она должна была уметь найти разумный компромисс, погасить ненужные страсти и чувства высокие в душах пробуждать — таково ее жизненное предназначение. А помочь ей в этом призван мужчина — олицетворяющий собой рациональное начало нашей жизни, умеющий найти разумное решение и готовый взять за него ответственность. И тогда в мире воцарит гармония — то, к чему мы тщетно стремимся в наше суетное время...

8 Марта — это праздник, когда каждой женщине хочется почувствовать себя Прекрасной Дамой и поверить в то, что рядом — верный и надежный Рыцарь. Пусть будет так всегда, ибо — чего хочет Женщина, того хочет Бог.

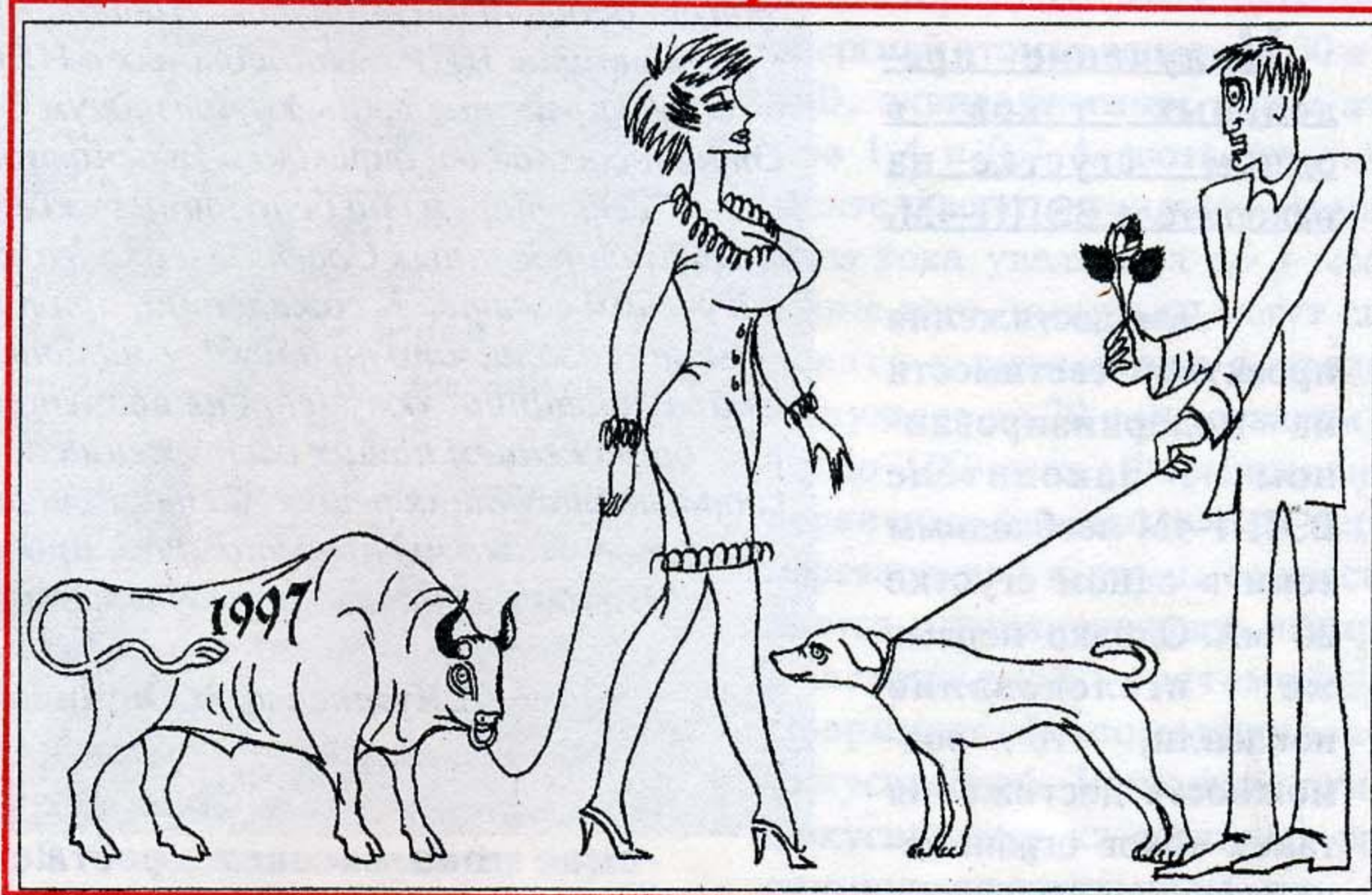


Рис. Е. Бендера.

В. Тельнов

## На пути к фотонным коллайдерам

О фотонных коллайдерах уже была одна статья в “Энергии-Импульс” (№11, ноябрь 1994). За последние два года в этой области произошел заметный прогресс. Подробно об этом рассказывалось на недавнем институтском семинаре. Здесь я остановлюсь только на основных моментах.

Физика элементарных частиц в последние годы переживает трудное время. Остановка строительства самого большого в мире ускорителя SSC (США) была шоком для всех. Фактически этот “звонок” известил, что то прекрасное для нас время, когда были “физики в почете”, прошло, и удовлетворять собственное любо-

пытство за казенный счет стало проблематично. “Налогоплательщики” быстро забыли, что человечеству дала физика (от электричества, телевизора, компьютера... до ядерного оружия, обеспечившего прекращение глобальных войн). В нашей стране отмеченная тенденция усугубилась общим кризисом.

Наилучший метод исправить положение и поднять престиж физики высоких энергий — это сделать новые фундаментальные открытия, существенно расширяющие знания о природе, которые произвели бы впечатление даже на человека, далекого от физики. Открытия такого уровня ожидаются на следующем

поколении коллайдеров. В частности, в этой области энергий предсказывается существование Хиггсовского бозона — недостающего звена в Стандартной модели, который обеспечивает появление масс у частиц. Также с некоторой вероятностью может быть открыта суперсимметрия материи, в соответствии с которой у каждой “обычной” частицы есть двойник, причем, частице с целым спином соответствует частица с полуцелым спином и наоборот. Это нужно для объяснения того факта, что суммарная энергия вакуума, наполненного различными виртуальными частицами, равна нулю.

Окончание на стр. 6-7



## Наиболее значимые результаты научно-исследовательских работ, выполненных в ИЯФ в 1996 году (продолжение)

### Физика ускорителей

#### Получение предельных токов в одном сгустке на накопителе ВЭПП-4М.

Для достижения проектной светимости на модернизированном накопителе ВЭПП-4М необходимы токи в одном сгустке 20 мА. Однако первые же исследования показали, что возможность достижения таких токов ограничена развитием неустойчивости, в данном случае по вертикали, возникающей из-за взаимодействия сгустка с полями, наведенными им на неоднородностях вакуумной камеры. Это хорошо изученное сейчас явление, названное быстрым head-tail эффектом со связью мод колебаний, присуще и современным установкам с большим периметром, таким как LEP, PEP. Эффект характеризуется большим когерентным сдвигом частоты и наличием порогового тока, составлявшим при первых включениях всего 5 мА. Анализ показал, что один из путей повышения порогового тока — это увеличение доступными способами длины сгустка и синхротронной частоты. Были задействованы трехполюсные змейки с максимальным полем 18 кГс и увеличено поле вигглера для перераспределения декрементов затухания, что дало увеличение тока с 5 до 12 мА. Для дальнейшего под-

*В прошлом выпуске нашей газеты опубликован текст отчета института "Наиболее значимые результаты НИР, выполненных в ИЯФ в 1996 году", представленный в президиум СО РАН. Отчет составлен дирекцией (в основном, ученым секретарем) на основании суждений специализированных Советов и излагался тезисно на ученом совете. К сожалению, при публикации мы не указали, что по ряду формальных причин этот "внешний" документ не является полным отражением наших достижений за год и соответствующих решений специализированных советов. Ниже мы представляем продолжение "Наиболее значимых результатов..."*

*А. Кудрявцев, И. Онучина*

ема тока за счет роста синхротронной частоты потребовалось в 1.5 раза увеличить радиальную динамическую апертуру, однако проблемы с током это не решило: он вырос только на 15%. Кардинальным решением оказалось создание системы обратной связи, состоящей из полоскового пикапа, исполнительной электроники, усилителя мощности и селективного кикера на бегущей волне. Система, охваченная отрицательной обратной связью, подавляет дипольную моду колебаний пучка, тем самым предотвращая развитие неустойчивости. С помощью этой системы удалось превысить пороговое значение тока почти в два раза и достичь 25 мА в одном сгустке, необходимых для получения расчетной светимости. В настоящее время готовится четырехканальный вариант этой системы.

#### ВЧ генераторы непрерывной мощности модульной конструкции на частоту 180 МГц с выходной мощностью до 1 МВт

В 1985 году возникла необходимость создания мощных непрерывных генераторов на 180 МГц для ВЧ систем ряда ускорительных установок:

ВЭПП-4; накопителей-источников СИ - ТНК, Сибирь-2; микротрона-рекуператора для ЛСЭ. Суммарная ВЧ мощность всех генераторов для этих установок планировалась на уровне 6 МВт. К этому времени на заводе "Светлана" в Ленинграде был разработан генераторный тетрод с предельной частотой 200 МГц и мощностью рассеяния на аноде 250 кВт. Было принято решение при разработке генератора ориентироваться на эту лампу. Для того, чтобы решить задачу обеспечения работы разных по потреблению ВЧ мощности установок, был предложен оригинальный принцип модульного исполнения мощного выходного каскада ВЧ генератора. Разработаны три модуля: ламповый модуль, модуль связи с нагрузкой и модуль перестройки частоты. В один ламповый модуль каскада устанавливается один тетрод



## Наиболее значимые результаты научно-исследовательских работ, выполненных в ИЯФ в 1996 году (продолжение)

ГУ-101А. В зависимости от необходимой ВЧ мощности выходной каскад может быть собран из модуля связи с нагрузкой, модуля перестройки частоты и одного, двух, трех или четырех ламповых модулей. При этом может быть получена выходная мощность генератора 150, 300, 450 или 600 Вт соответственно в непрерывном режиме. Подобное техническое решение при построении мощных ВЧ генераторов метрового диапазона волн ранее нигде в мире не применялось. Модульность конструкции позволила организовать серийное производство модулей выходного каскада для применения в различных электрофизических установках. Выходной каскад с двумя ламповыми модулями был собран на комплексе ВЭПП-4. На нем получена ВЧ мощность в нагрузке 300 кВт. Этот генератор в течение двух лет обеспечивал работу ускорителя. Два таких же генератора установлены на накопителе Сибирь-2 в РИЦ "Курчатовский институт", один из них работает в течение года. Для накопителя ВЭПП-4 собран генератор с выходной мощностью 1 МВт. Мощность генерируется двумя каскадами с четырьмя ламповыми модулями каждый и затем суммируется в выходном волноводе. Один каскад с четырьмя ламповыми модулями в настоящее время подключен к ускоряющей системе ВЭПП-4, на нем получена мощность 500 кВт. Он в течение последнего года обеспечивает работу накопителя. В ИЯФ СО РАН продолжаются работы по созданию ВЧ системы микротрона-рекуператора для ЛСЭ на основе этой разработки. Успешная реализация предложенной идеи построения мощного

генератора позволяет создавать ВЧ системы для новых ускорителей на высоком техническом уровне.

### Физика плазмы

#### Работы на установке АМБАЛ-М.

Закончены экспериментальные исследования характеристик и механизмов генерации МГД-устойчивой горячей стартовой плазмы в концевой системе осесимметричной амбиполярной ловушки АМБАЛ-М. В получаемой плазме развиваются электростатические флуктуации с широким спектром, которые приводят к стохастическому нагреву ионов до температуры в 200 эВ. Относительно высокая электронная температура (около 50 эВ) поддерживается протекающим от источника плазмы килоамперным током электронов, ускоряющихся во входной пробке до 100 эВ, а также вследствие торможения горячих ионов на электронах. Подавление теплообмена между горячей плазмой в концевой системе из 2-х последовательных пробкотронов и за пробочным дуговым источником холодной плазмы обеспечивается минимумом потенциала плазмы во входной пробке и высокой средней скоростью потока электронов в пробкотроне. При исследовании турбулентности плазмы установлено, что наиболее интенсивной является турбулентность, вызываемая развитием неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, возникающей вследствие сильной неоднородности радиального электрического поля, в полосе частот от десятков кГц до нескольких сотен кГц и азимутальных мод до примерно десятой. Для диагностики плазмы в установке АМБАЛ-М и в то-

камаках средних размеров закончены испытания разработанных диагностических атомарных инжекторов ДИНА-6 и ДИНА-7 с энергией атомов водорода 30 и 40 кэВ, эквивалентным током атомов 1,4 и 0,7 А соответственно. Длительность импульсов атомарного тока увеличена до 1 мсек; кроме того, импульсы могут следовать в виде серии с числом импульсов до 20 с интервалом от 15 до 100 мсек. Формирование первичных ионных пучков перед перезарядкой в атомы осуществляется многоапертурной четырехэлектродной системой со сферической геометрической фокусировкой. Атомарные пучки фокусируются на заданных расстояниях в несколько метров.

### Теоретическая физика

Впервые разработана модель перемежаемости в развитой гидродинамической турбулентности (В.М.Малкин), объясняющая с высокой точностью реально измеренные экспоненты перемежаемости и дающая новые предсказания, допускающие прямую экспериментальную проверку. Проблема интенсивно исследовалась начиная с известного замечания Ландау о необходимости учитывать в Колмогоровской модели развитой турбулентности перемежаемость, т.е. сильную пространственную неоднородность поглощения энергии. Предлагавшиеся до настоящего времени модели перемежаемости относились лишь к масштабно-независимым экспонентам перемежаемости, соответствующим бесконечно широкому инерционному интервалу, недостижимому в реальных экспериментах.



В. Волосов

## Источник тяжело-ионной плазмы — простые и эффективные технологии

В нашем институте давно ведутся исследования в области управляемого термоядерного синтеза. Одно из направлений УТС — исследование открытых ловушек с вращающейся плазмой. В 1986-1987 годах был завершен ряд экспериментов по ловушке ПСП-2, где была получена МГД-устойчивая вращающаяся плазма с энергией ионов 15-20 кэВ и плотностью до  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> в объеме порядка 0,1 м<sup>3</sup>.

Одна из особенностей работы состояла в том, что в процессе этих исследований был найден, на первый взгляд, странный разряд, в котором образовывалась не водородная, а металлическая плазма. Это было своего рода "ответвление" от основной работы, которое, в конце концов, вылилось в создание своеобразного источника тяжело-ионной плазмы, простого и очень эффективно.

Об особенностях этих исследований и практическом их применении наш корреспондент беседует с заведующим лабораторией 9-2 Вадимом Ивановичем Волосовым.

— Эта работа пошла по нескольким направлениям. Базировалась она, в основном, на тяжело-ионном источнике, работающем в ловушке со скрещенными полями. В этой системе в очень простой геометрии зажигается разряд, в котором основной компонент состоит из тяжелых ионов, распыленных с катода. Следует подчеркнуть, что на самом деле это не только создание технологических установок, а довольно своеобразные и интересные физические исследования.

Одна из возможностей, которая при этом появляется, использование быстрых тяжелых атомов, образующихся после того, как ускоряемые тяжелые ионы перезаряжаются на нейтральном газе,

окружающем катод. В результате этого получается очень мощный веерный пучок быстрых тяжелых атомов, который может быть использован для разных технологических целей. Такого рода установок практически не было раньше. Мы получаем здесь близкие к килоамперу токи быстрых тяжелых атомов. Сегодня это фантастические цифры, так как нормальный источник тяжелых ионов дает в стационарном режиме десятки, в редчайших случаях — что-то близкое к сотне миллиампер. Здесь же речь идет о сотнях ампер, то есть это на несколько порядков выше.

Еще одна особенность этого источника — он работает с любым веществом: с титаном, с никелем, с вольфрамом, с тугоплавкими и неиспаряемыми веществами. Это возможно потому, что плазменное облако создается за счет самораспыления, и любое вещество, как показал эксперимент, нормально работает в этом разряде. Это очень большое преимущество этой системы.

Другое применение источника — получение струи тяжело-ионной плазмы диаметром несколько сантиметров. Эта струя выводится вдоль магнитного поля и дальше может использоваться как довольно мощный источник вещества для разделения изотопов. Он не требует никаких специальных устройств для получения плазмы, для ускорения ионов и для их перезарядки — все получается в этой системе естественным путем. В принципе, могут быть получены токи того же порядка, что и в источнике атомарных потоков. Первые же эксперименты подтвердили это предположение.

— Вадим Иванович, расскажите, пожалуйста, о технологических использованиях

источника.

— Во-первых, по поводу источника быстрых тяжелых атомов. Когда мы начали его использовать, возникли некоторые проблемы. Энергия атомов в том источнике, который мы сейчас имеем, была равна примерно нескольким киловольтам (от двух до пяти киловольт). В традиционных методах обработки поверхностей потоками ионов используются энергии в десятки киловольт — тридцать, пятьдесят, сто. Возникал такой вопрос: будет ли при таких низких энергиях имплантация материалов идти так же, как и при пятидесяти-ста киловольтах. До сих пор надежного ответа на этот вопрос не было. Мы поставили задачу проверить этот эффект, и оказалось, что все получается очень хорошо: работают режимы глубинной имплантации, а это означает, что глубина заполнения много больше, чем проективный пробег частицы на поверхности. Этот факт надежно проверен многими способами, показавшими, что в мишени имеется глубокое легирование. Это говорит о том, что метод низкоэнергичной атомарной имплантации работает, и достаточно надежно. Эти факты были проверены нашим молодым сотрудником И.Н. Чуркиным. Сейчас мы предлагаем использовать эту установку как очень активный имплантер — интенсивность потоков здесь выше, чем в известных установках.

Другая особенность — использование атомарных потоков. Это означает, что не возникает проблемы с объемным зарядом в ионных пучках, определяющей необходимость использования пучков с высокой энергией для того, чтобы можно было получить достаточно большие плотности токов. Это одно направление наших исследований, которое продолжается, и которое, как мы считаем, уже близко к техническому воплощению.

— В чем состоит преимущество этого метода?



— Главное преимущество метода в том, что он позволяет достичь очень высокой интенсивности и вести обработку в крупномасштабном производстве деталей, причем в больших количествах и без каких-либо трудностей. Эффективен он и в менее крупномасштабном производстве. Есть два режима обработки: если скорость обработки ограничена перегревом деталей, то, так как мы работаем при более низких напряжениях, интенсивность обработки повышается в двадцать-тридцать раз. Если же мы удаляем детали достаточно далеко и снимаем ограничение по теплу, можно поднять интегральную интенсивность обработки в сотни, и даже тысячи раз.

Пока мы исследовали и подтвердили основные принципы этого метода, но технического применения мы, к сожалению, не находим: заказчиков в стране найти трудно.

Есть еще одна технологическая возможность — использование потоков плазмы, которая здесь образуется, для разделения изотопов. В установке для разделения изотопов одна из проблем заключается в получении больших потоков плазмы из тяжелых ионов. Мы получаем сейчас потоки порядка ампер. В принципе, можно будет получать и более мощные потоки. Используя простоту этого источника, мы надеемся получить достаточно хорошие системы для разделения изотопов. Мы, как физики, изучили также процесс нагрева плазмы в этом разделителе, показали, что он должен быть немного другим, чем это делалось до сих пор — эта работа выполнена нами совместно с группой И.А. Котельникова. В скором времени появится публикация, и мы надеемся, что наш опыт физиков-плазмистов будет полезен при создании установок для разделения изотопов — совершенно уникальных, достаточно мощных и производительных. К сожалению, пока эта работа идет недо-

статочно результативно, хотя ведется во многих зарубежных странах и в России. Финансирования до сих пор нет.

— Вадим Иванович, я знаю, что есть еще одна интересная возможность использования этого источника, в частности, для получения пленок с высокой адгезией.

— Да, действительно, с помощью источника можно получить адгезионностойкие пленки на любом материале и при любых требованиях к ним. При этом мы используем тот же атомарный поток, но в нем стремимся сохранить большую часть не участвующих в процессе образования плазмы распыленных атомов с энергией несколько электронвольт, которые идут с катода. Сочетание этого потока атомов с быстрыми атомами перезарядки создает двухкомпонентный поток, который образует пленку на поверхности любого вещества. Наличие же при этом быстрых атомов приводит к тому, что эта пленка как бы “пришивается” к подложке, образуется своего рода переходной слой, обеспечивающий ей высокую прочность. Особенность этих пленочных технологий состоит в следующем: вся обработка производится атомарным потоком, ионы не участвуют в ней, при этом мы можем работать, например, с изоляционными материалами — такую пленку можно нанести на поверхность тефлона или любого другого изоляционного материала. С помощью же ионных потоков сделать это невозможно, или необходимо использовать специальные нейтраллизаторы.

— В какой сфере могли бы найти практическое применение эти интересные исследования?

— Первая технология, о которой я рассказывал, представляет большой интерес для крупномасштабной промышленности — автомобильной или авиационной, прежде всего потому, что высока производительность этого метода. Правда, наша установка несколько дороже, чем те, которые используются обычно, но ее эф-

фективность на многие порядки выше. Уже сейчас заинтересованность в нашей установке проявили фирмы Тойота, АвтоВАЗ. Несколько лет назад Институт авиационных технологий тоже интересовался нашей установкой, но, к сожалению, ни до чего реального не дошло: они развалились раньше, чем что-то удалось сделать. Есть менее крупные производства, где тоже можно применять нашу установку, но там сейчас используются имплантеры, которые производятся в Томске, Екатеринбурге. И здесь нам конкурировать трудно, так как наша установка по стоимости такая же, как у них, хотя производительность, повторюсь, много выше. Думаю, что представляют интерес возможности получения изотопов с помощью нашей установки. Сейчас обсуждается проблема некоторого улучшения работы атомных реакторов за счет введения специальных добавок. В частности, одна из них — добавка гадолиния-157 — это вещество с сечением поглощения нейтронов масштаба 250 тысяч барн. Такие добавки в твэлах реакторов позволяют существенно улучшить эксплуатационные качества реактора. Но получение таких изотопов невозможно известными сегодня методами. Правда, можно использовать электромагнитные методы, но они дают всего миллиамперные токи, а этого очень мало. Если необходимы амперные токи, то надежных способов пока не было. Использование источника, о котором я говорил, позволяет достаточно эффективно решить эту проблему. Но это лишь часть проблемы, другая ее сторона — системы нагрева и сбор изотопов. Этим мы могли бы заняться, если кто-нибудь нам помог в финансовом плане. Пленочные же технологии представляют интерес для многих потребителей, и даже в ИЯФе, например, для создания сверхпроводящих резонаторов с пленочным ниобиевым покрытием.



В. Тельнов

## На пути к фотонным коллайдерам

*Окончание. Начало на стр. 1*

Пока такие частицы не наблюдались. Теория не дает точных предсказаний их масс, но вероятнее всего наиболее легкие из них имеют массы в районе нескольких сот ГэВ.

Некоторые свидетельства названных явлений можно будет увидеть на сооружаемом сейчас в ЦЕРНе протон-протонном коллайдере LHC с энергией  $2 \cdot 7$  ТэВ, который вступит в строй в 2004 году. Однако, для детального исследования явлений более подходят линейные  $e^+e^-$  коллайдеры, на базе которых можно получить также  $\mu e$  и  $\gamma\gamma$  столкновения с высокими энергиями и светимостями — предмет этой статьи.

Первый проект ТэВного линейного коллайдера был разработан в ИЯФ более десяти лет назад, и было принято решение о его строительстве в Протвино. Если бы не перестройка, то, может быть, строительство уже шло бы к завершению (здесь могут быть различные мнения).

В остальном мире разработкой линейных коллайдеров вплотную занялись с 1988 года. Работа проходила в тесном сотрудничестве физиков России, США, Японии, Германии, ЦЕРНа. Разработка одновременно шести различных по параметрам и схемам коллайдеров позволила более четко высветить достоинства и недостатки проектов. Почти ежегодные конференции позволяли быстро доводить до всеобщего сведения любую интересную находку. Надо сказать, что в идейном отношении ИЯФ внес бесспорно наибольший вклад.

Перечислю только некоторые ияфовские разработки, наиболее часто упоминающиеся на конфе-

ренциях (и пришедшие на память): ограничения на светимость  $e^+e^-$  столкновений, связанные с излучением и неустойчивостью в поле встречного сгустка; плоские пучки; БНС (Балакин-Новохатский-Смирнов) затухание; автоподстройка геометрии коллайдера по асимметрии СВЧ излучения, получение поляризованных пучков с помощью конверсии ондуляторного излучения; изучение основных источников фона, в том числе: некогерентное и когерентное рождение электрон-позитронных пар, рассеяние  $e^+(e^-)$  на большой угол в поле встречного  $e^-(e^+)$  пучка; наконец, практически все основные моменты, касающиеся фотон-фотонных и фотон-электронных коллайдеров: схемы столкновений, электрон-фотонная конверсия, требования к лазеру, возможность применения лазера на свободных электронах, монохроматизация, эффекты встречи, оптимизация светимости, вывод отработанных пучков, фоны, ожидаемая физика.

Перечисленное выше говорит о том, что, хотя в России в обозримом будущем и не будет линейного коллайдера, мы можем достойно участвовать в международных проектах.

В 1995 году совместными усилиями был подготовлен труд "International Linear Collider. Technical Review Committee Report", в котором проведено сравнение различных проектов и подходов. Планируемая энергия коллайдеров  $2E = 500$  ГэВ с возможностью дальнейшего ее повышения. Какие из проектов будут приняты, пока еще не решено. Скорее всего будет два коллайдера.

В 1995 году Япония (КЕК) за-

явила о своем желании построить у себя линейный коллайдер JLC и пригласила остальных присоединиться к ним. Американцы (в основном, SLAC) разработали проект NLC, очень близкий по параметрам к японскому проекту, и могут с ними объединиться на взаимоприемлемых условиях (пока официальных разговоров на эту тему не было).

Другой центр притяжения — Германия (DESY). Здесь работы ведутся сразу по двум направлениям: один коллайдер, SBLC — обычный теплый, другой, TESLA — сверхпроводящий.

В 1996-97 г. все из названных лабораторий опубликуют свои "концептуальные" проекты. Проект NLC уже вышел в свет. Пока он идет как калифорнийский проект, выдвинутый тремя лабораториями SLAC, LBNL и LLNL (доля иностранцев составляет всего 5%). От России всего один участник. Я помогал (в основном из Новосибирска по электронной почте) консультациями по фотонным коллайдерам и с помощью специальной программы моделирования рассчитал их основные характеристики.

Два "германских" проекта также скоро будут опубликованы. Главы проектов, посвященные организации второго места встречи для фотон-фотонных и фотон-электронных столкновений, были написаны полностью сотрудниками ИЯФ в рамках R&D контракта (120 тыс. DM). Эти проекты носят более интернациональный характер. Соответствующая комиссия должна будет выбрать один из проектов для дальнейшей проработки.

На сегодняшний день все проекты линейных коллайдеров предусматривают второе место встречи для фотон-фотонных или



фотон-электронных столкновений. Это важный этап. Фактически признана важность и осуществимость данного направления.

Идея создания фотонного коллайдера на базе линейного  $e^+e^-$  коллайдера путем рассеяния света лазера на высокоэнергичных электронах впервые прозвучала в конце 1980 года на первом совещании по физике на ВЛЭПП. Однако, первая статья на эту тему (И. Гинзбург, Г. Коткин, В. Сербо, В. Тельнов) была дважды отражена в Письмах ЖЭТФ и дважды в Phys.Lett. Только после убедительного разговора (четверо на одного) с И. Собельманом (зам. редактора Писем в ЖЭТФ) во время его визита в Академгородок статья была опубликована. Интересно, что сейчас количество ссылок только на первые три статьи на эту тему приближается к тысяче.

До 1988 года особой активности в этом направлении не было, поскольку в мире линейными коллайдерами (кроме ВЛЭПП) вообще почти никто не занимался. На конференциях по линейным коллайдерам в 1988 (США), 1990 (Япония), 1991 (Россия) мои доклады были единственными на эту тему, хотя и встречали их с большим интересом.

В это же время (1988) появилось ясное понимание двух важных проблем: как вывести разрушенные пучки электронов и фотоны из места встречи (кроссинг) и какие эффекты определяют максимальную светимость фотонных коллайдеров (превращение фотона в электрон-позитронную пару в поле встречного сгустка). Кроме того, в конце восьмидесятых лазерщиками был изобретен изящный способ получения пикосекундных тераваттных (и выше) лазерных импульсов — то, что нужно для фотонных коллайдеров. Короткий лазерный импульс сначала растягивается по времени с помощью дифракционной

решетки в тысячи раз, усиливается, а затем сжимается с помощью другой дифракционной решетки. Это позволяет избежать нелинейных эффектов в среде.

Важная поддержка была оказана физиками, теоретиками и экспериментаторами после первого совещания по физике и экспериментам на линейных коллайдерах, прошедшем в 1991 году в Финляндии. Именно с этого момента на два порядка возрос поток публикаций. На всех последующих конференциях по линейным коллайдерам и по физике на линейных коллайдерах организовывались секции и рабочие группы по этому направлению.

Наконец, в марте 1994 года в Беркли прошло первое международное совещание по гамма-гамма коллайдерам, где и теоретики, и экспериментаторы, и лазерщики были едины во мнении, что фотонные коллайдеры можно сделать, и они значительно расширят возможности линейных коллайдеров по изучению физики элементарных частиц. Приведу только три примера.

1) Упомянутый в начале статьи Хиггсовский бозон будет рождаться в фотон-фотонных столкновениях как одиночный резонанс, а сечение этой реакции несет информацию о существовании тяжелых частиц, которые прямо не могут родиться на коллайдере из-за недостатка энергии.

2) Фотонный коллайдер будет фабрикой  $W$  бозонов,  $10^6-10^7$  в год. Сечение рождения  $WW$  пар на порядок выше, чем в  $e^+e^-$  столкновениях. Также на фотонных коллайдерах выше в несколько раз сечение рождения пар других заряженных частиц.

3) В столкновениях фотонов с электронами могут рождаться заряженные суперсимметричные частицы с массой больше, чем это возможно в  $e^+e^-$  столкновениях (здесь они рождаются парами).

Если в фотонных коллайдерах использовать те же электронные пучки, что и для  $e^+e^-$  столкно-

вений, то фотон-фотонная светимость вблизи жесткого края спектра будет примерно в четыре раза меньше, чем в  $e^+e^-$  столкновениях. Но в фотон-фотонных столкновениях нет излучения при столкновении пучков, поэтому отношение горизонтального и вертикального размеров исходных электронных пучков может быть существенно меньше. Предельная светимость при

$2E = 500$  ГэВ может быть на порядок выше, чем в  $e^+e^-$  столкновениях. Повышение "геометрической" светимости электронных пучков может быть достигнуто путем оптимизации охлаждающих колец, использованием лазерных источников электронов с малым эмиттансом (еще лучше сложение пучков от нескольких малоточных источников) или путем применения лазерного охлаждения, позволяющего получить очень малые эмиттансы электронных пучков. Последний метод был рассмотрен автором всего полгода назад. Для этого требуется лазер с весьма большой энергией вспышки (около 10-15 Дж) и высокой частотой повторения. Это непростая задача, но, учитывая то, что линейные коллайдеры будут продолжать работать еще и через 15 лет, можно надеяться, что такая модернизация инжектора со значительным повышением светимости будет возможна.

Через год-два определяются места строительства линейных коллайдеров, будут созданы международные коллаборации. Являясь лидерами (пока) в области разработки фотонных коллайдеров (как впрочем, и по многим другим системам линейных коллайдеров), мы можем принять активное участие в этом интересном деле. К этому нужно быть готовыми и организационно и морально.



А. Усов

## Подробно о яблоне

*так называется серия бесед о садоводстве, которые проводятся в садовом обществе "Родник". Беседы ведет не профессионал, а обычный садовод-любитель, который за более чем двадцатилетний период садоводческой деятельности накопил и осмыслил некоторый опыт "мелко-поместного садоводства"*

Заканчивается лекторий по яблоням, который проходил в обществе "Родник" с ноября прошлого года. Прослушано шесть лекций-бесед. Перечень тем, относящихся к предмету "Яблоня культурная", оказался весьма пестрым: от исторических экскурсов до систематики растительного мира морфологии растения. Конечно, нельзя объять необъятное, тем более в семи лекциях, но знать ближайших родственников яблони (нет, не грушу!) иргу и рябину, если собираешься свободно экспериментировать на своих "сотках" — просто необходимо, чтобы "не изобретать велосипед". Полезно также знать, что очень многое из садовой практики было знакомо нашим "пращурам-садоводам" более двух тысяч лет тому назад.

Сибирское садоводство весьма специфично, и оно только начинается. Даже агротехника еще в поиске, сортимент не очень богат, но уже есть определенные сорта, нормы и правила, которые обеспечивают успех. Но они существенно отличаются от европейского садоводства, у которого за плечами тысячелетняя практика зон умеренного и теплого климата, десятки и сотни районированных и "обкатанных" сортов, чего еще нет у нас. Что касается крупноплодных товарных сортов, то их вообще бессмысленно внедрять как товарные в Сибири.

Наш путь (если уж говорить о товарном плодоводстве, даже на любительском уровне) это —

культура штамбовых зимостойких гибридов типа ранеток, полукультурок, особенно местной селекции.

Для того, чтобы объективно оценить многообразие "сортов", выбрать применительно к нашим условиям, а при необходимости и размножить их, и были затеяны эти лекции-беседы о сибирской яблоне.

Условия, которые предъявляла природа сортам, претендовавшим на звание "сибирских", требовали определенной защитной реакции растений. Невольно приходилось знакомиться и с клеткой, и с клеточными структурами. Понятие "зимостойкость" рассматривалось как сложный наследственный комплекс свойств, который бессмысленно искать у сортов, происходящих из теплых краев.

Клеточные ткани, их многообразие и специфика, их функции в организме растения — все это обязан знать садовод, особенно, если он хочет сам, своими руками сделать яблоню (грушу) для своего сада. Управление развитием любого деревца, отклонения ветвей, углы "отхождения", "расхождения", корректирующие подрезки ветвей — эти манипуляции с кроной вашего питомца просто необходимо знать и уметь садоводу не только с позиции "так надо!", но и с точки зрения физиологии растения. А выбор сорта... Конечно, мы выбираем, что покрупнее да послаще, но это выбор не сорта для культуры в местных условиях..., а выбор товарного яблока из Киргизии, Казах-

стана. Долголетним и продуктивным растением будет то, у которого фенологический цикл (от раскрытия почек до сброса листа) укладывается в "прокрустово ложе" нашего вегетативного периода 155-160 дней (со 2 мая по 5-10 октября). Не лишне садоводу запомнить несколько понятий и цифр. Вегетативный период — количество теплых дней между датами со среднесуточной температурой плюс пять градусов. А почему — не ниже? Да потому, что при температуре ниже плюс пять градусов растение прекращает синтез, в первую очередь углеводов, то есть не растет. Не лишне помнить и такой параметр как сумма среднесуточных температур за тот же вегетативный период. У нас она составляет 2183 градуса (среднестатистическое). Для справки: винограду, крупноплодному яблоку "Ренет Семиренко" для того, чтобы набрать оптимальный сахар, необходима сумма температур 2300-2400 градусов как минимум. А наши местные зимостойкие интенсивные гибриды ЦСБС укладываются в 2100-2150 градусов. Так что же, господа "землевладельцы", мы будем возделывать на своих сотках? Культуру "бананов в приполярной тундре" или реальные, продуктивные, сибирские яблони? А сорта эти есть, они давно ждут своих садоводов. Сорта, в первую очередь, местной интродукции и селекции, затем Восточные, Алтайские, некоторые западные. Вот в такой реальной тональности и проходят занятия в клубе "Родник". На очередном занятии мы займемся прививками, регенеративным соединением частей разных растений, хирургией на растительной ткани, а также применением этого древнего приема для размножения яблонь, груш и прочих садовых растений.



# $E, \vec{p}$ — SCIENCE

Из истории физики

## Основные события истории создания водородной бомбы в СССР и США

Г.А. Гончаров

Герман Арсентьевич Гончаров — руководитель отдела лаборатории теоретической физики Российского федерального ядерного центра — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ — ВНИИЭФ).

До 1952 года непосредственно участвовал в советском термоядерном проекте. Сначала он работал в группе Тамма-Сахарова. Он уча-

ствовал в конструировании и испытаниях RDS-37 — первой советской двухступенчатой водородной бомбы. Этот материал основывается на докладе Германа Гончарова, представленном на конференции по истории советского атомного проекта (40-е, 50-е годы), прошедшей в Дубне в 1996 году.

Редакция "Э.-И." предполагает опубликовать серию материалов на эту тему.

Успехи физических наук, Октябрь 1996 г., том 166, N10 (английский вариант материалов на эту тему доступен в WWW по адресу <http://www.aip.org/pt/>.)

Рассмотрены истоки и ключевые события истории создания водородной бомбы в США и СССР. Представлена картина возникновения и развития физических идей, приведших к открытию в США и СССР базового принципа конструирования термоядерных зарядов.

### Введение

Создание атомного, а затем термоядерного оружия явилось настолько значительным событием XX века, что его история привлекает внимание и исследователей, и общественности всего мира. Не остаются и не могут остаться в стороне от участия в раскрытии фактов этой истории и непосредственные участники

работ над созданием ядерного оружия. Особый интерес вызывает история разработки термоядерного оружия в США и СССР — странах, которые первыми создали это наиболее грозное ядерное оружие.

Настоящая статья посвящена краткому изложению и анализу основных событий, относящихся к истории создания первых термоядерных устройств и бомб в США и СССР. Она охватывает период 1941-1956 г.г. Источниками по ядерной истории США служили опубликованные в США доклады, статьи и книги американских авторов, основными источниками по ядерной истории СССР — оригинальные документальные материалы. Обращение к документальным источникам и сопоставление событий в СССР, США и других зарубежных странах по времени позволяет раскрыть взаимосвязь событий, полнее представить картину драматического заочного соревнования

СССР и США по открытию принципов конструирования термоядерного оружия и получить более полные ответы на многие важные вопросы, связанные с историей создания термоядерного оружия в СССР: что явилось непосредственным стимулом начала исследований возможности создания водородной бомбы в СССР? Когда и при каких обстоятельствах было принято решение Правительства СССР о создании термоядерной бомбы? Как возникли и развивались идеи конструирования термоядерной бомбы? В чем состояла сущность сведений о работах по водородной бомбе в США, полученных СССР по каналам разведки, и когда поступили эти сведения? Какое фактическое влияние на работу советских ученых оказала разведывательная информация? Что было известно в СССР о работах по водородной бомбе в США из открытой печати? Чем был замечателен выбранный советскими



учеными путь разработки термоядерной бомбы, который позволил им, несмотря на то, что исследования возможности создания водородной бомбы были начаты в СССР на четыре года позже, чем в США, достичь в 1955 году уровня, не уступающего уровню США (и даже превзойти США в некоторых технических аспектах конструирования термоядерного оружия и проведения его испытаний?)

В основу статьи положены как непосредственно подтвержденные документами факты, так и представления о ходе событий (особенно событий в США), которые прямо или косвенно следуют из совокупности имеющихся материалов.

Проведенное исследование позволило выявить новые детали картины эволюции идей, которая завершилась блестящими научнотехническими достижениями США и СССР в области разработки термоядерного оружия. Сегодня видно, что эти достижения были во многом основаны на иде-

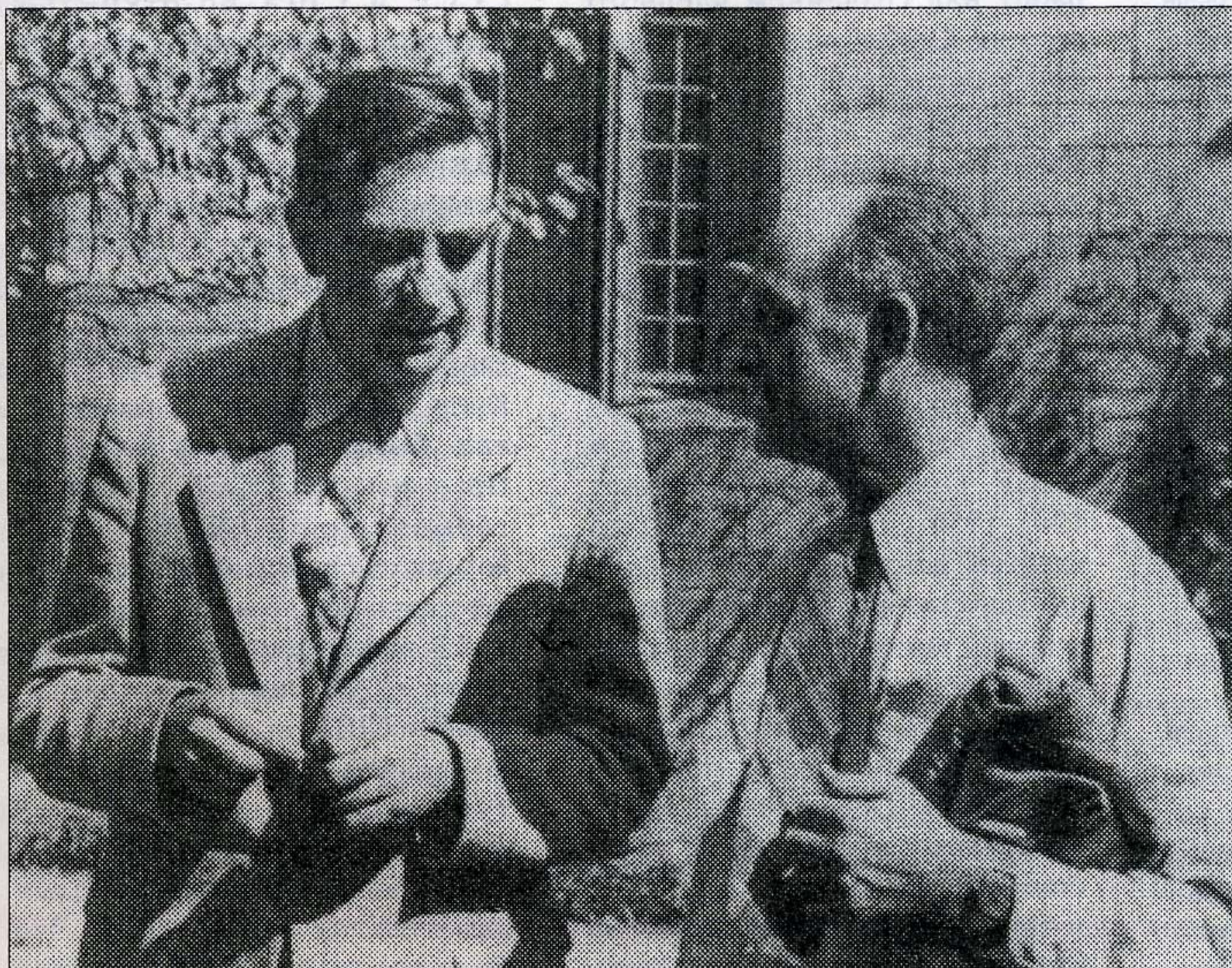
ях и информации, которые имелись уже на раннем этапе работ, но, как может показаться, не были своевременно развиты и реализованы в обеих странах. С такой точкой зрения нельзя согласиться. Ученые обеих стран делали все возможное для решения стоявшей перед ними задачи, оказавшейся одной из самых трудных, которые когда-либо возникали в истории человечества. Необычайная сложность физических процессов, протекающих при взрыве термоядерных зарядов, сделала возможным развитие ранних идей только при достижении достаточно высокого уровня математического моделирования и понимания этих тонких физических процессов. Достижение необходимого уровня потребовало в обеих странах несколько лет напряженной работы. Сегодня, наоборот, должен казаться удивительным фантастически быстрый прогресс, достигнутый в термоядерных разработках в те далекие, но не забываемые для участников работ го-

ды, когда происходили описываемые события.

## Американские усилия

История термоядерных исследований уходит своими корнями в 1941 год. В мае 1941 года японский ученый-физик Токутаро Хагивара из университета в Киото высказал в своей лекции предположение о возможности возбуждения термоядерной реакции между ядрами водорода с помощью взрывной цепной реакции деления ядер урана-235. В сентябре 1941 года Энрико Ферми в Колумбийском университете изложил аналогичную идею Эдварду Теллеру. В обсуждении Э.Ферми и Э.Теллера возникла мысль о возможности инициирования атомным взрывом термоядерных реакций в среде из дейтерия. Дискуссии с Э.Ферми послужили источником десятилетней мессинской одержимости Э.Теллера идеей создания термоядерной сверхбомбы.

Летом 1942 года когорта блестящих ученых США и Европы, собравшихся в Беркли для обсуждения планов будущей Лос-Аламосской лаборатории, затрагивает в своих дискуссиях и проблему дейтериевой сверхбомбы. Здесь Э.Теллер представляет первые соображения, ставшие основой проекта "классический супер". В результате работ ученых Лос-Аламоса военного периода концепция "классического супера" к концу 1945 года приобрела относительно целостный характер. Основой этой концепции было представление о возможности возбуждения потоком нейтронов, выходящих из первичной атомной бомбы пушечного типа на основе урана-235, ядерной детонации в длинном цилиндре с жидким дей-



Эдвард Теллер (слева) и Энрико Ферми в Чикаго в 1951 году. Американская идея термоядерной бомбы ("супер") родилась в их дискуссиях 1941 года.



терием (через промежуточную камеру с DT-смесью). Отметим, что предложение о добавлении к дейтерию трития для уменьшения температуры зажигания относится к 1942 году и принадлежит Эмилию Конопинскому. Оно было основано на неопубликованных (в то время секретных) данных о сечениях DT-реакции, согласно которым скорость этой реакции в существенной области температур примерно в 100 раз превышает скорость DD-реакции по одному из ее каналов. Отметим также, что работоспособность "классического супера" связывалась с надеждами на возможность осуществления неравновесного режима горения DT-смеси и чистого дейтерия.

## Радиационная ИМПЛОЗИЯ

Весной 1946 года в процессе работ по "классическому суперу" было сделано новое изобретение, оказавшееся, как стало ясным впоследствии, изобретением исключительного значения. Клаус Фукс при участии Джона Фон-Неймана предложил использовать в "классическом супере" новую систему инициирования. Эта система включала в себя дополнительный вторичный узел из жидкой DT-смеси, которая нагревалась, сжималась и в результате зажигалась энергией излучения первичной атомной бомбы. Опубликованные в США материалы позволяют представить вероятную картину эволюции идей, приведших к рождению революционной идеи использования для сжатия энергии излучения.

Участвуя в обсуждении возможных путей создания конструкции атомных бомб повышенной эффективности, Э.Теллер еще в 1942 году выдвинул идею автокаталитической схемы атомной бомбы. Он предложил разместить внутри активного делящегося материала бомбы поглотитель нейтронов из бора-10. Э.Теллер исходил из того, что в

результате возникновения разности давлений при ионизации веществ с различным числом электронов в атомах в процессе ядерного взрыва будет происходить сильное сжатие бора-10. Следствием сжатия будет уменьшение поглощения нейтронов, что будет способствовать увеличению критичности и повышению энерговыделения бомбы. Таким образом, был открыт принцип ионизационной имплозии. В 1944 году Д.Фон-Нейман предложил заменить в автокаталитической системе Э.Теллера бор-10 на DT-смесь, рассчитывая, что в условиях атомного взрыва в результате нагрева и ионизационного сжатия будет происходить термоядерное зажигание DT-смеси, которое приведет к увеличению числа делений в атомной бомбе. Предложение Д.Фон-Неймана было важным шагом на пути создания атомной бомбы с термоядерным усилением. А весной 1946 года К.Фукс, размышляя над улучшением условий инициирования "классического супера" и рассматривая для этой цели применение первичной атомной бомбы пушечного типа, предложил вынести DT-смесь из ура-

на-235 в прогреваемый излучением отражатель из окиси бериллия. Он рассчитывал, что в таких условиях DT-смесь, подобно тому, как это происходит в исходной конструкции, будет подвергаться нагреву и ионизационной имплозии, так что будут обеспечены условия ее термоядерного зажигания. Для удержания излучения в объеме отражателя К.Фукс предложил окружить систему непрозрачным для излучения кожухом. Поскольку ионизационное сжатие DT-смеси в рассматриваемой системе должно происходить в результате переноса излучения из активной зоны атомного заряда в расположенную вне ее зону размещения термоядерного горючего и вызывается этим излучением, то оно является радиационной



Эмиль Конопинский первым высказал предположение (1942 год), о том, что температура возгорания для дейтерий-тритиевой смеси может быть меньше, чем для чистого дейтерия.



имплозией. Так весной 1946 года произошло рождение принципа радиационной имплозии. Конфигурация Клауса Фукса — первая физическая схема, использующая принцип радиационной имплозии, явилась прообразом, прототипом будущей конфигурации Теллера-Улама. Предложение К.Фукса, поразительное по богатству содержащихся в нем идей, сильно опередило время и возможности математического моделирования сложнейших физических процессов, без которых было невозможно дальнейшее развитие этих идей. Только через пять лет в США полностью осознали огромный идейный потенциал предложения К.Фукса, явившегося, в свою очередь, развитием предложения Д.Фон-Неймана. Отметим, что 28 мая 1946 года К.Фукс и Д.Фон-Нейман совместно подали заявку на изобретение новой схемы инициирующего отсека “классического супера” с использованием радиационной имплозии.

## Будильник

После отъезда К.Фукса из Лос-Аламоса 15 июня 1946 года события развивались следующим образом.

В конце августа 1946 года Э.Теллер выпустил отчет, в котором предложил новую, альтернативную “классическому суперу” схему термоядерной бомбы, которую он назвал “будильник”. Предложенная Э.Теллером конструкция состояла из чередующихся сферических слоев делящихся материалов и термоядерного горючего (дейтерий, тритий и, возможно, их химические соединения). Эта система обладала целым рядом потенциальных преимуществ. Быстрые нейтроны, рожденные при термоядерных реакциях в слоях термоядерного горючего, должны были вызывать деления в соседних слоях из делящихся материалов, что должно было

приводить к заметному увеличению энерговыделения. В результате ионизационного сжатия этого горючего в процессе взрыва должно было происходить сильное увеличение плотности термоядерного горючего и резко возрастать скорость термоядерных реакций. В предложенной конструкции отсутствовала необходимость осуществления нерав-

новесного режима термоядерного горения, но эта конструкция требовала для своего инициирования атомного инициатора большой мощности. Требования к мощности атомного инициатора были тем более значительными, что от “будильника”, как альтернативы “классического супера”, считали необходимым получить мегатонную или даже мегатонную мощность. Связанные с этим большие размеры и вес конструкции затрудняли или практически исключали возможность ее обжатия химическими взрывчатыми веществами. С сентября 1946 года теоретические исследования проектов “классического супера” и “будильника” стали проводиться в Лос-Аламосе параллельно. В сентябре 1947 года Э.Теллер выпустил отчет, в котором предложил использовать в



*Станислав Улам (около 1951 года). В это время предложил двухступенчатую термоядерную бомбу, используя нейтроны для имплозии вторичного термоядерного узла. Теллер модифицировал идею Улама, заменив нейтронную имплозию радиационной.*

“будильнике” новое термоядерное горючее — дейтерид лития-6. Включение в состав термоядерного горючего лития-6 должно было приводить к сильному увеличению наработки трития в процессе взрыва и, тем самым, заметно увеличивать эффективность термоядерного горения. Однако проект “будильника” в это время уже не казался многообещающим и перспективным. Интенсивность дальнейших работ по “будильнику” уменьшилась из-за почти непреодолимых проблем инициирования. Тем не менее теоретические работы по “будильнику” продолжались в Лос-Аламосе наряду с работами по “классическому суперу” и в последующие годы.

*Продолжение — в следующем номере нашей газеты.*