

ЭНЕРГИЯ



Государственный
научный центр
Институт ядерной физики
им. Г.И.Будкера
N5-6, апрель, 1996г.

ШИМУЛЬС

— Алексей Павлович, расскажите, пожалуйста, об истории этих конференций.

— Первая конференция состоялась в нашем институте в сентябре 1977 года, инициатором ее были Будкер и директор SLAC Пановский. ИЯФ и SLAC поддерживали теплые дружеские отношения с начала 60-х годов, со времени пионерских работ сначала по встречным электронным пучкам, а затем по встречным позитрон-электронным.

Ко времени организации конференции ИЯФ провел серию экспериментов на установке ВЭПП-2, полным ходом шли эксперименты на установке ВЭПП-2М, соорудился коллайдер ВЭПП-4 и детектор к нему МД-1. В SLAC шли эксперименты на SPEAR и разрабатывался новый детектор MARK2. Метод встречных пучков получил всеобщее признание. Проблемы коллайдеров обсуждались на международных ускорительных конференциях. А по проблемам детекторов и их взаимодействия с коллайдерами не было соответствующих форумов. Этой теме и была посвящена наша первая конференция.

Интересно вспомнить эпизод, связанный с изданием трудов этой конференции. В то время в ИЯФ еще не было ксерокса. Мы попросили наших американских коллег привезти копии их докладов в количестве сорока экземпляров, сделали препринты своих докладов и разложили их в папки. Когда гости привезли копии своих докладов, мы их вложили в эти папки и вручили участникам при регистрации. Это был, пожалуй, единственный случай, когда труды конференции вышли еще до ее начала.

Первая конференция прошла удачно.

В конце февраля-начале марта в нашем институте проходила VI Международная конференция по методике экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках

Наш корреспондент взял интервью у заместителя председателя оргкомитета конференции Алексея Павловича Онучина.

Отзывы участников конференции читайте на стр. 4-5.

Фоторепортаж В. Петрова.

Гости остались весьма довольны. Мы тоже. Затем такие конференции проводились поочередно в Сан-Франциско и Новосибирске, сейчас они пользуются большой популярностью. Если на первую конференцию гости приехали к нам только из Америки, то в работе следующих конференций принимали участие физики из многих стран.

— Представители каких физических центров участвовали в этой конференции

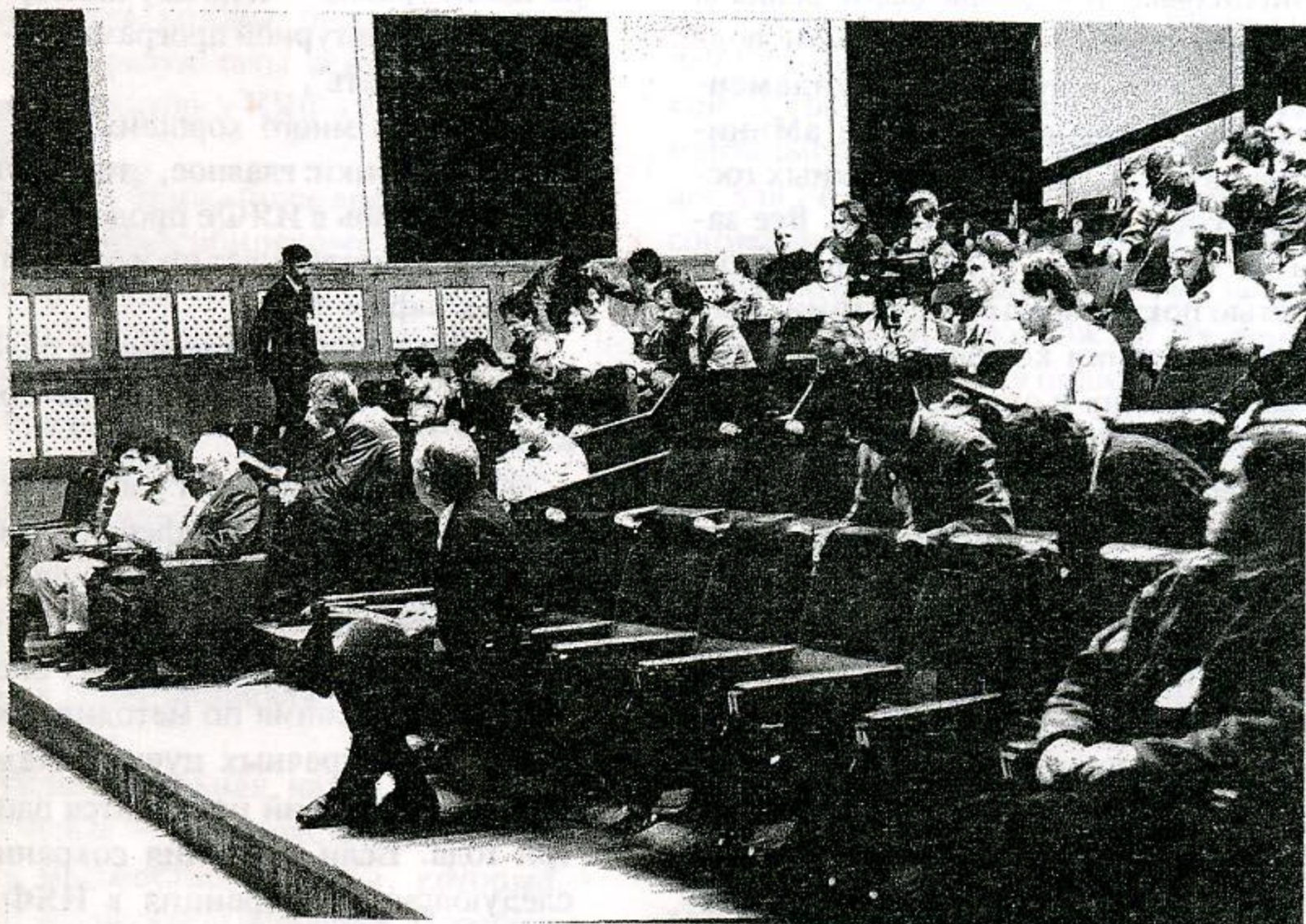
и сколько всего было гостей?

— Всего к нам приехало 45 человек из зарубежных центров — из Америки, Японии, Германии, Франции, Италии, Австрии, ЦЕРНа. Из российских центров были представлены ИТЭФ, Протвино, Томск, ОИЯИ — всего тринадцать человек.

— Какие цели преследовала нынешняя конференция?

— Проведение экспериментов на коллайдерах предполагает две важные составные части — это сам коллайдер, который должен давать высокую светимость и низкие фоновые условия, и уникальная аппаратура для регистрации частиц, — то, что мы называем детекторами. При этом возникают сложные проблемы взаимодействия ускорителя и детектора. В последние годы и ускорители, и детекторы становятся все более сложными, дорогими сооружениями — к.п.д. использования этих средств должен становиться выше и выше. При подготовке к этой конференции произошло несколько событий в мире. В частности, в 1993-1994 годах были приняты решения о строительстве В-фабрик в SLAC (США) и в лаборатории КЕК (Япония) и о строительстве фи-фабрики во Фраскати (Италия).

Кроме названных лабораторий ведутся эксперименты в Китае и в Корнеле (США), а также на самом большом элект-



Окончание. Начало на стр. 1

рон-позитронном коллайдере в ЦЕРНе.

Первый день нашей конференции был посвящен обзорным докладам по статусу работ в этих шести научных центрах. От нашего института доклад делал А.Н.Скринский.

— Как выглядит ИЯФ в ведущихся экспериментах, и прежде всего с точки зрения перспективы?

— Можно выделить несколько областей энергий, в которых идут эксперименты на электрон-позитронных пучках. Самая низкая энергия — это область фи-мезона, энергия в пучке 0,5 ГэВ. С 1974 года ИЯФ является единственным местом в мире, где ведутся эксперименты в этой области, есть много интересных результатов. В этой области в следующем году вступит в строй фи-фабрика в Италии. У нас идет подготовка к модернизации ВЭПП-2М и ведется строительство фи-фабрики. К сожалению, темпы работ сдерживаются недостаточным финансированием.

Следующая область — пси-мезоны, энергия 1,5 ГэВ в пучке. Эксперименты ведутся в Китае, в нашем институте разрабатывается проект с-тау-фабрики на эту область энергии.

Еще одна область — область ипсилон-мезонов, энергия 5 ГэВ. Как я уже сказал, недавно были приняты два проекта строительства В-фабрик в Америке и в Японии. Эти установки должны вступить в строй в 1998-99 годах. Работает установка в Корнелле. Идет модернизация нашего коллайдера ВЭПП-4М. Богатая частицами и мало исследованная область ипсилон-мезонов, а также наличие особой системы для исследования двухфотонных процессов позволяют ИЯФ надеяться на получение важных результатов.

В области Z-бозона — энергия порядка 50 ГэВ — работают ЦЕРН и SLAC. Существенно большие энергии — это проекты встречных линейных пучков. Подобный проект был разработан у нас еще до перестройки, но по финансовым причинам его закрыли. Ияфовские физики сейчас активно участвуют в разработке международных проектов.

— Что представляла собой научная программа конференции?

— Она была довольно насыщенная. У нас работали такие секции: взаимодействие коллайдеров и детекторов, координатные детекторы, системы идентификации, калориметры, электроника. Всего было около шестидесяти докладов и пятнадцать докладов на постерной секции.

Было довольно много интересных сообщений, хотя сейчас на конференциях не бывает чего-то сенсационного, т.к. сегодняшние средства коммуникации позволяют оперативно обмениваться информацией. Сегодня основная роль конференций — научная экспертиза результатов работ и проектов; обсуждение важных деталей работ, которые обычно отсутствуют в статьях; установление между специалистами личных контактов, которые очень помогают в дальнейшей работе. Важными

VI Международная конференция по методике экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках

также являются дискуссии о перспективах работ и новых идеях. На нашей конференции было три таких дискуссии — по координатным детекторам, системам идентификации и калориметрам.

— Такие конференции — большая нагрузка на институт. С какими проблемами столкнулся оргкомитет?

— В оргкомитет входили заведующие лабораториями и старшие научные сотрудники, которые в текущей деятельности привлекали молодых физиков. Председатель — В.А.Сидоров. Комитет состоял из семнадцати человек, между ними и были поделены все научные, финансовые, организационные задачи. С сентября про-

ность им от имени оргкомитета. ИЯФ продемонстрировал высокий уровень во всех вопросах, связанных с организацией конференции.

— Каково мнение участников конференции об уровне ее организации?

— Многие наши гости отмечали четкую организацию конференции и ее дружескую атмосферу. Профессор Хильке, председатель комитета по экспериментам в ЦЕРНе, сказал: "Я понимаю, если вы так спокойны сейчас, это значит вы очень много работали и много предусмотрели перед конференцией". Можно привести еще один отзыв, это наш коллега из Франции Пьер Бессон: "Мне предстоит организовать



шлого года оргкомитет собирался раз в две недели.

Финансовые проблемы были решены следующим образом: мы получили поддержку Российского фонда фундаментальных исследований, а также Министерства науки. С наших зарубежных гостей взнос составлял 250 долларов. Все затраты на проведение конференции были полностью покрыты этими деньгами. Российские участники конференции не платили за гостиницу и оргвзнос — это оплатил оргкомитет. Расходы зарубежных гостей, кроме проживания в гостинице, были тоже оплачены за счет оргкомитета. Сюда же входила культурная программа, которая включала в себя довольно много мероприятий — посещение музеев, картинной галереи, концерта русских народных инструментов и камерного хора, лыжную прогулку.

Перед конференцией отремонтировали здания первого корпуса, хорошо был организован транспорт. Все ияфовские службы сработали хорошо, и я выражаю благодар-

Международную конференцию по фотонным детекторам в июле, но я понимаю, что на таком уровне — и по научной организации, и по культурной программе — нам не удастся сделать".

Говорили много хороших слов и российские физики: главное, что они увидели здесь — жизнь в ИЯФе продолжается.

— Где и когда будет проводиться следующая конференция?

— Очередная конференция будет проходить в 1999 году в Японии в лаборатории КЕК.

Уже несколько лет существует соглашение между тремя конференциями: конференция в Вене по проволочным камерам, конференция в Пизе по методике экспериментов в физике высоких энергий и наша конференция по методике экспериментов на встречных пучках. Каждая из этих конференций проводится один раз в три года. Если традиция сохранится, то следующая конференция в ИЯФе будет проходить в будущем тысячелетии — в 2002 году.

— Геннадий Викторович, несколько слов о цели вашего визита в Новосибирский научный центр.

— Цель проста и естественна: познакомиться с ситуацией, в которой сейчас находятся научные учреждения, изучить опыт их работы в нынешних условиях. Тем более, что я и раньше знал, что здесь, в Новосибирске, есть что посмотреть и что перенять.

— Какие впечатления у вас об ИЯФе?

— Опыт посещения многих институтов показал, что ИЯФ — самый живой. Здесь куда ни пойдешь, люди думают не только о сегодняшнем дне, но и о завтрашнем, и о перспективе на десять лет вперед. Вот это и есть самое сильное впечатление — вера в будущее не абстрактная, а основанная на реалиях сегодняшнего дня.

— Вы побывали в цехах нашего экспериментального производства. Как вы оцениваете его?

— Производство отвечает всем требованиям, которые ему предъявляют, но самое главное — оно рационально загружено заказами. Есть экспрессные заказы, которые выполняются на коммерческой основе, и есть свой большой пакет заказов, которые в любой момент могут быть пущены в дело. Это, безусловно, стабилизирующий фактор. Крайне низкая текучесть кадров, необычная для нынешней обстановки. Поражает то, что у вас могут все сделать сами. Уровень специалистов очень высокий. Люди заинтересованы в своем деле и уверены в том, что все им по плечу — нет такого заказа, который бы они не сделали. И это близко к правде.

— В других центрах жизнь сложнее протекает?

— К сожалению, да. Ваш институт един, активно живут все подразделения. В других институтах иначе: приходишь в одну лабораторию — работают активней, чем даже раньше, в других лабораториях никого не найдешь — всюду пыль. У вас же традиции, основы которых были заложены раньше, дают результаты сейчас. И еще один важный фактор: у ИЯФа хорошее руководство.

— Будут ли в ближайшее время возвращены долги Новосибирскому научному центру, в частности, ИЯФу?

— Такие решения были приняты, но нет уверенности в том, что они будут выполнены. Я в этом вопросе не оптимист.

— Возможны ли другие формы поддержки фундаментальных наук?

— Фундаментальная наука без бюджетного финансирования существовать не может. Хотя в вашем институте часть зарабатываемых денег направляется на исследования.

Но фундаментальная наука не имеет границ. Ученые — энтузиасты, они могут поставить множество проблем, которые потребуют все ресурсы общества. Поэтому общество должно разумно подойти к этому вопросу и просчитать, сколько средств оно



“Труд ученого должен быть эффективным и престижным”

Недавно в нашем институте побывали: Геннадий Викторович Козлов — заместитель министра науки и технической политики РФ, интервью которого редакция предлагает вниманию читателей “Энергии-Импульс”, и Анна Михайловна Белова — куратор ИЯФ в Министерстве науки.

может потратить на фундаментальную науку. Ученые — это сливки общества, и здесь напрашивается такое сравнение: если молоко жирное, то и сметана густая, если тощее — и сметана жидкая. Это довольно точно характеризует взаимоотношение общества с фундаментальной наукой. Стратегически поддержать фундаментальную науку крайне важно, тем более для России, где потенциал огромный и социальные проблемы гигантские. Но покрыть все поле фундаментальных исследований в России невозможно. Их приоритетность определяется прежде всего квалификацией кадров. Если в прикладных работах она определяется социальным заказом (мы должны поддерживать те работы, которые дают товар, пользующийся спросом), то в области фундаментальных наук мы опираемся на школы, где люди прекрасно понимают сами, чем им заниматься. А объем этих исследований — всегда компромисс, и ни в одном кабинете невозможно решить эту проблему.

— Как относится Миннауки к строительству крупных установок, таких, например, как у нас ВЭПП-5, (с-гау-фабрика)?

— Если сейчас не строить такие установки, то буквально через несколько лет российская наука сдастся. С другой стороны, нужно иметь баланс как внутренних интересов, так и международных коопераций, особенно в физике высоких энергий. Если мы все деньги бросим на международное сотрудничество, а это дорогое удовольствие, то утратим свою базу и не на чем будет учить людей. Но не участвовать в международном сотрудничестве нельзя, хотя это дорого стоит. Поэтому я надеюсь, что Россия будет выделять по шесть миллионов долларов в год на строительство ускорителя и детекторов в ЦЕРНе и будет полноправным участником проекта ЛНС. Такие гигантские проекты, как ЛНС, самой России сегодня не по карману.

Кроме того, для того, чтобы вести такие стройки, нужно иметь серьезную аргумен-

тацию. И прежде всего, она должна включать физическую программу — часто это очень слабое место. В былые годы в России строилось большое количество огромных установок, которые потом оказывались не всегда нужными. Принцип — построим, а задачи найдутся — сейчас недопустим. Мы дол-

жны ориентироваться на конкретную проблематику, на программу исследований. А она предполагает наличие научных коллективов определенной квалификации. Если эти два условия есть, то тогда можно серьезно рассматривать строительство и финансирование. Делаться это должно гласно, открыто обсуждаться на государственном уровне. Но если уж такое решение принято, то нельзя допускать, чтобы прекращалось финансирование, а строительство замораживалось — это трагедия для целого поколения ученых.

— Есть ли у Министерства науки программа, предотвращающая “утечку мозгов” из России?

— Программы есть, и мы пытаемся проводить их в жизнь. В частности, сейчас обсуждается программа по поддержке новых научных школ, тем самым мы хотим поддержать молодежь.

Утечка утечке рознь. Если ученый на несколько лет едет работать за рубеж, и если корни у него здесь, то он обязательно вернется, но более квалифицированным, подготовленным. Консервировать науку нельзя. Разумное соотношение в плане работы за границей возможно. Во многих случаях те люди, которые поехали работать за рубеж, там являются представителями своего института. Они обеспечивают научные контакты, появляются совместные контракты, разработки. Политика в этом вопросе должна быть разумной.

Чтобы предотвратить “утечку мозгов”, надо решить две проблемы: сделать труд ученого эффективным и престижным (не может быть труд престижным, если человек не может содержать семью на результаты своего труда) и нужно обеспечить возможность заниматься наукой на мировом уровне.

Джон Джарос — профессор, СЛАК,

член Международного комитета советников

конференции

Письмо В.А. Сидорову

Уважаемый профессор Сидоров,

Спасибо за сохранение традиции проведения конференции. Том Маттисон сообщил мне, что это была очень успешная конференция и что российское гостеприимство именно такое, каким он представлял его после моего рассказа. Его пребывание в вашем институте было плодотворным и очень приятным.

Я рад тому, что у конференции есть надежное будущее. Думаю, что идея включения всех e+e- лабораторий, как места проведения конференции, является перспективной.

Я надеюсь, что конференция пройдет в СЛАКе до того, как мы все уйдем в отставку. Поздравляю вас и всех ваших сотрудников с организацией первоклассного дела.

Лино Мапелли, ЦЕРН

Конференция была организована очень умело, она прошла в очень доброжелательной обстановке.

ИЯФ произвел на меня очень сильное впечатление: здесь прекрасная рабочая обстановка.

Я увидел большие изменения в социальной обстановке по сравнению с периодом перестройки. Хотя цены очень высокие по отношению к зарплатам, но впечатление такое, что сейчас ситуация намного лучше, чем несколько лет назад. Я верю, что происходят положительные изменения. Люди же, особенно в небольших центрах, прекрасные и добрые.

В. Корбел, ДЭЗИ,
Гамбург

Мы занимаемся физикой высоких энергий в электрон-позитронных столкновениях и у нас много коллег среди российских физиков, которые работают с нами.

ИЯФ вносит важный вклад в e+e-физику в течение многих лет.

Конференция в ИЯФе была хорошо организована, ее отличала дружественная теплая атмосфера, способствующая появлению новых контактов.

Хочу высказать такое пожелание: было бы удобнее, если более общие доклады будут отделены от специальных (т.е. в утренние и дневные заседания).

В России я в первый раз. Русские дружелюбны, открыты для человеческих контактов, но им необходимо лучше знать иностранные языки.

Ф. Босси, Фраскати,
Италия

Конференция прошла очень хорошо: эффективно работали секретари и было много приятных событий. Представленные доклады отличал высокий уровень.

ИЯФ очень жизнеспособный институт, несмотря на все экономические проблемы. Мне особенно понравилось посещение ВЭПП-2 и детекторов.

В России я второй раз. Первый мой визит в вашу страну был четыре года назад, в Дубну. Мне кажется, что улучшение происходит, и вероятно, в следующие несколько лет самые большие проблемы будут решены. Однако, я не знаю, являются ли эти отличия следствием "истории" или лишь результат различий между Дубной и Новосибирском.

Т. Кампореси, ЦЕРН

Уровень организации конференции чрезвычайно высокий. Я был на трех совещаниях и конференциях в России, эта — самая лучшая.

Ваш институт работает и проводит исследования — это не тривиальное утверждение для российской лаборатории в нынешних условиях.

Я был в России много раз, видно, что здесь много проблем. Впервые я побывал в вашей стране в 1991 году, затем, во время сотрудничества с Протвино, приезжал неоднократно. Я вижу два основных процесса, происходящих в России. С одной стороны, технологические новшества приближают ее к так называемым "западным стандартам" — это компьютеры, связь, телесвязь. С другой стороны, жизненные стандарты медленно снижаются, несмотря на большее по сравнению с прежними временами количество товаров. Однако русские люди всегда прекрасны. Я надеюсь, что переход к рыночной экономике не приведет к потере "русской" индивидуальности.

Дженс Броуз, Дрезден, Германия

Организация конференции превосходная, культурная программа была очень интересной. К сожалению, времени на посещение Новосибирской художественной галереи было очень мало.

Большинство докладов было на очень высоком уровне. Наиболее важными я считаю обзоры, рассказывающие о работе различных центров. Ваш институт проводит физическую программу высокого уровня в различных областях. Поздравляю вас с успехами!

Я был несколько раз в Советском Союзе в 80-е годы. После установления независимости республик это мой первый визит в Россию.



Накао, КЕК, Япония

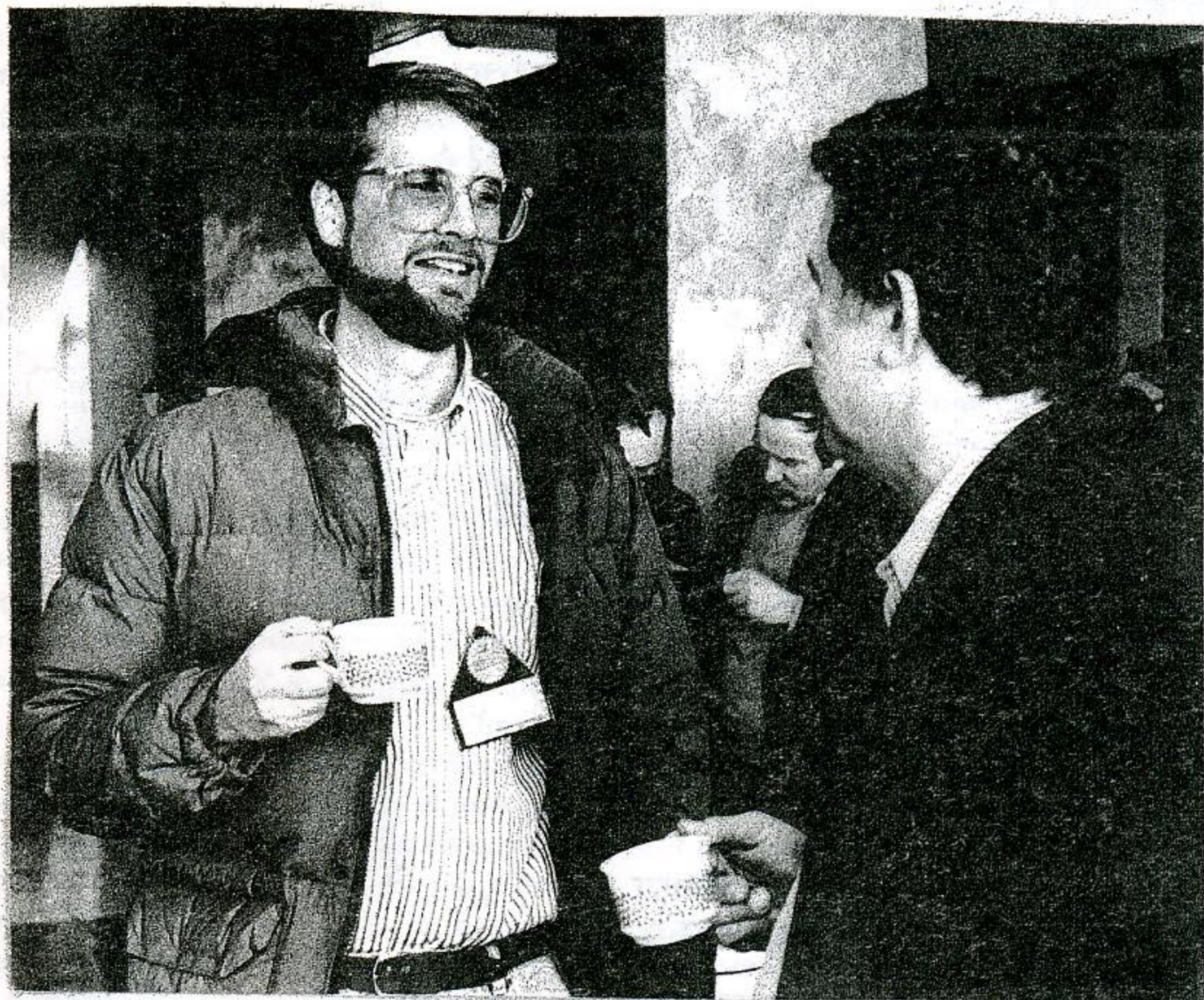
Я получил большое удовольствие и узнал много интересного на конференции.

Уровень докладов был очень высокий. Мне особенно понравились доклады Куденко (CsI для T-несохранения) и Вебера (H1).

Новосибирск произвел на меня очень хорошее впечатление, но в Москве было жутко: минус шестнадцать — это для меня "рекорд" низкой температуры. Правда, я обнаружил, что это не такое

суровое состояние, как я думал до этой поездки. Но все-таки было бы лучше, если бы конференция проходила в более теплое время.

ИЯФ — прекрасный институт. И если бы воздушное сообщение с Японией было бы более удобным, то визиты сюда могли бы быть более частыми.



Томас Маттисон, СЛАК, США.

СЛАК — это американская лаборатория, подобная ИЯФ. Мне очень приятно быть одним из представителей СЛАК на этой конференции.

Конференция по методике экспериментов была очень успешной — ее отличали высокий уровень научных докладов и четкая организация. Сообщения о достижениях во всех системах детекторов для e+e- физики (и других разделов физики частиц) сделали представители ведущих зарубежных и российских физических центров.

С большим интересом я прослушал доклад Скринского и более подробно узнал историю e+e- в ИЯФе. Доклад Дона Линкольна, представившего новый прибор — счетчик фотонов видимого света, также меня заинтересовал. Содержали много полезной информации доклады от конкурирующей с на-

шим детектором ВаВаг коллаборации BELLE.

Что касается моих впечатлений об ИЯФе, то я увидел здесь первоклассных ученых и инженеров, обращенных к быстро изменяющемуся миру. Поездка была очень удобно организована, сотрудники института встречали самолеты в Москве и Новосибирске. В свободное время наши коллеги часто гостеприимно приглашали нас домой на восхитительные вечера. Незабываемые воспоминания остались после лыжной прогулки.

Это была моя первая поездка в Россию и в Новосибирск, и я надеюсь, что не последняя.

На снимке Томас Маттисон — слева.

Дон Линкольн, Фермилаб, США

Конференция прошла организованно. Мне понравилось то, что отсутствовали параллельные секции. Были представлены хорошие доклады. Лучшими, на мой взгляд, были обзорные доклады.

ИЯФ произвел на меня очень глубокое впечатление: я не предполагал, что здесь такой высокий уровень.

Я впервые побывал в вашей стране и поражен различием в уровне благосостояния России и США. Уверен, что эта ситуация изменится. Русские, с которыми я здесь общался, были замечательными и отзывчивыми людьми.

Хочу высказать одно небольшое замечание. Очевидно, что русские не понимают достаточно хорошо западных людей. Все экскурсии были интересными, но слишком регламентированы. Было бы лучше, если бы люди имели немного свободного времени во время этих экскурсий, для того, чтобы посмотреть то, что им хочется. Например, добавить 1-2 часа для прогулки по Новосибирску.

Также в западной традиции привозить подарки из поездки. В следующий раз хорошо было бы получить возможность для покупки сувениров.

С. Мишнев Зарплата в ИЯФ и инфляция в 1995г.

Предыдущая статья на ту же тему была опубликована в газете "Энергия-Импульс" в декабре 1994г. Я не надеюсь, что все читали эту статью, а те кто читал, хорошо ее помнят, поэтому я повторю основные положения.

1) Используется понятие "продовольственная корзина", т.е. набор продуктов, по ассортименту и калорийности более или менее соответствующий тому, что нужно человеку на месяц (конкретно используется корзина из 21 наименования продуктов). Цена этой корзины может служить той линейкой, которой измеряется величина инфляции и уровень зарплаты. Сразу скажу, что в середине 80-х годов, когда цены были стабильны, а средняя зарплата в ИЯФ составляла около 250 руб в месяц, указанная корзина стоила 45 руб, а в декабре 1995 г., при зарплате 720 тыс. руб, та же корзина стоила около 300 тыс. руб. По данным Государственного комитета по статистике (Госкомстат) средняя зарплата по России в декабре 1995 г. была равна 710 тыс. руб.

Было бы правильнее считать цену не "продовольственной", а "потребительской" корзины, включая туда в нужном соотношении затраты на жилье, транспорт, одежду и т.д. Но дело в том, что автор статьи каждый месяц определяет цену продовольственной корзины самостоятельно, пройдя по ближайшим магазинам и записывая, конечно, на глазок, в зависимости от настроения, средние цены, не самые высокие и не самые низкие. Считать же потребительскую корзину ему совершенно не по силам, этим занимаются Госкомстат и экономические институты, которые иногда (нерегулярно) печатают в газетах цифры, средние по России.

2) Используется средняя по ИЯФ численная зарплата, как это записано в расчетной книжке, до вычитания налогов. Учитываются все выплаты в ИЯФ, включая аккордные, премиальные и т.д. Зарплату, поделенную на цену продовольственной корзины, я буду называть в дальнейшем "реальной зарплатой".

3) Курс доллара берется из газеты "Известия", которая публикует его в каждом номере.

Экономические итоги за 1995 г. и частично за предыдущие годы показаны в таблицах и на графиках.

На графике 1 показано, как росли в последнее время цены и зарплата; за точку отсчета были приняты данные октября

1994 г. Надо сказать, что именно в этом месяце отношение (зарплата/цена прод. корзины) было равно 3 - цифра максимальная за последние несколько лет. В следующие полгода цены быстро росли, и повышения зарплаты в феврале, июле и ноябре не смогли преодолеть отставания.

На графике 2, кроме ежемесячных дан-

(Окончание на стр 7)

ИАиЭ - ИЯФ:

новые дифракционные элементы, работающие в белом свете

Наша лаборатория (Лаборатория лазерных технологий) достаточно долго (но до последнего времени — неофициально) сотрудничает с ИЯФом. В уходящем году эти работы были впервые легализованы в рамках совместного гранта РФФИ. Было решено объединить идеи и разработки ИАиЭ в области дифракционной оптики и уникальную экспериментальную базу ИЯФ, созданную за долгие годы вокруг синхротрона.

Существующие голограммы — как синтезированные, так и обычные, работают по своей природе только с монохроматическим (лазерным) излучением. Цель совместного проекта — создание и изучение нового вида дифракционных элементов (или синтезированных голограмм), позволяющих фокусировать, отклонять и преобразовывать по заданному закону излучение с широким спектром, другими словами, “белый свет”. Кроме чисто физического интереса очевидны широчайшие практические приложения таких синтезированных голограмм.

В нашей лаборатории знали о таких элементах задолго до того, как о них нача-

ние поверхностного рельефа микросхем и элементов интегральной оптики с высотой рельефа в доли микрона.

В ИЯФе установили, что некоторые полимеры под действием жесткого рентгеновского излучения разрушаются, а их экспонированные области удаляются химическим травлением. Причем скорость травления зависит от дозы облучения от точки к точке, можно получить желаемый профиль в полимерной пленке или пластине.

Но тут встает

другая задача: как по заданному закону изменять дозу облучения вдоль подложки синтезируемого элемента? Обычный рентгеношаблон, который используется в ЛИГА-технологии, позволяет модулировать по пространству проходящее излучение только двоичным способом. Мы предложили закодировать требуемую величину дозы облучения с помощью широтно-импульсной модуляции пропускающих областей рентгеношаблона.

Пространство между рентгеношаблоном и пластиной сглаживает распределение излучения и в плоскости регистрирующей среды получается заданное плавное распределение дозы облучения (см.рис.2d). Уникальное свойство синхротронного излучения — его очень широкий спектр (от единиц до десятков Ангстрем) исключает паразитную интерференцию и обеспечивает высокое качество рельефа. Предложенная нами схема эксперимента и результаты численного моделирования показаны на рис.2.

Результаты.

Самые простые дифракционные элементы — это решетка и зонная пластинка. Результат их работы хорошо известен, и было решено начать с создания и изучения именно таких элементов, но с глубоким профилем. Мы промоделировали дифракцию широкополостного излучения на глубоких структурах, рассчитали и изготовили растринированные фотошаблоны на нашем лазерном фотопостроителе. Фотошаблоны передали в ИЯФ и через пару



Рис. 1

Такой рельеф надо было

получить. Впервые эту идею высказали у нас в конце 70-х годов. Однако изготовить такие элементы мы тогда не могли, и о них забыли. Но после того, как два года назад на Западе начался вал публикаций на эту тему, мы поняли, что дальше оставаться в стороне нельзя. К этому времени мы имели опыт сотрудничества с ИЯФом, знали о возможностях (и ограничениях) ЛИГА-технологии и хорошо представляли, что надо делать.

Классическая ЛИГА-технология позволяет формировать рельеф прямоугольной (бинарной) формы с глубиной до сотен микрон. Этот процесс хорошо изучен и получены прекрасные результаты. Но для получения новых элементов надо было научиться создавать рельеф с непрерывно изменяющейся высотой, как показано в примере на рис.1. Причем точность задания профиля должна быть очень высокой — доля длины волны света, т.е. порядка 0,1 - 0,2 мкм.

Как получить такой рельеф? Это задача оказалась новой для микротехнологии, областью приложения которой было созда-

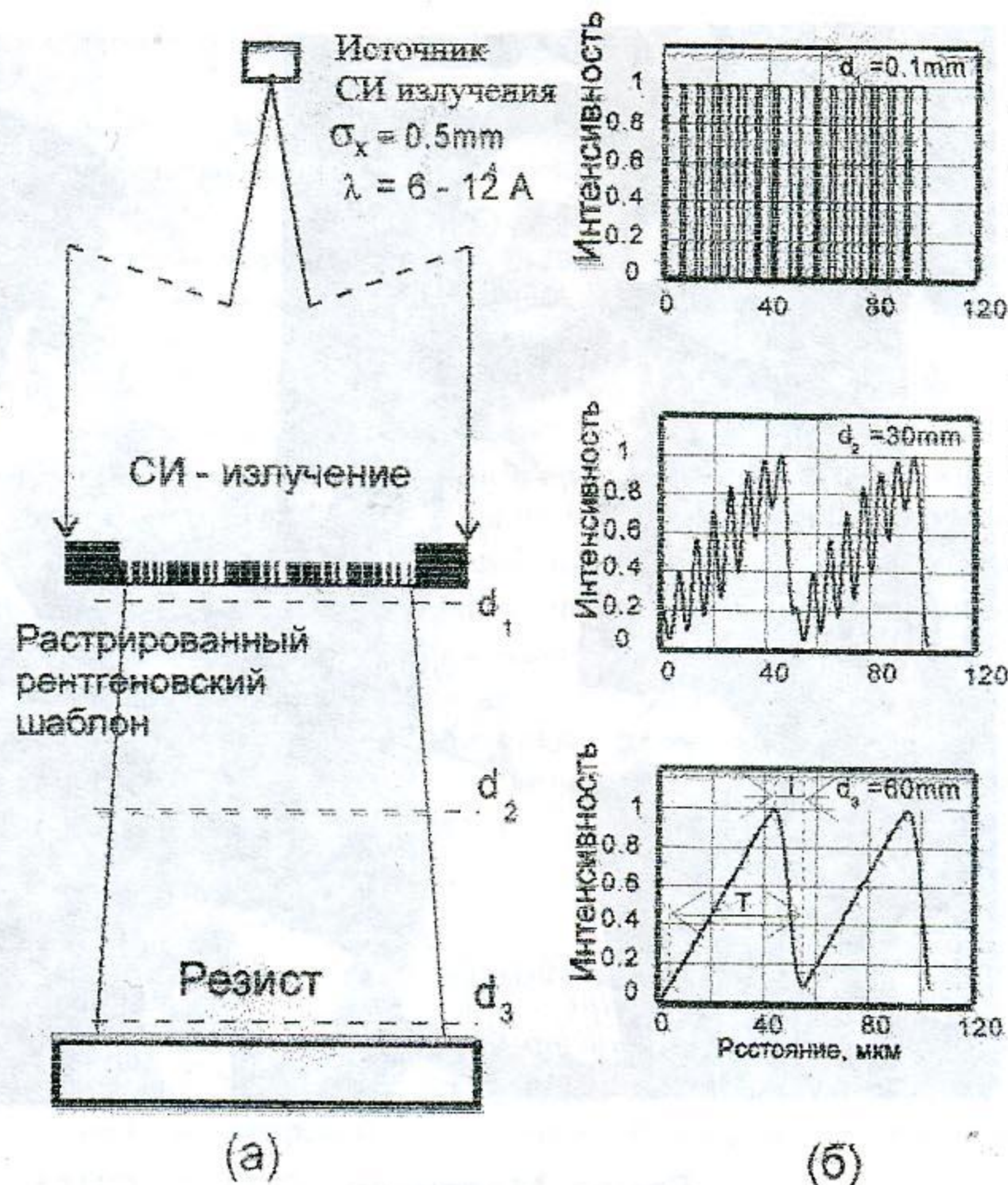


Рис. 2

месяцев получили первые образцы дифракционных элементов с глубоким профилем. Пластины ППМА были экспонированы и проявлены. Полученный профиль фрагмента линзы можно видеть на рис.3. Мы убедились, что она работает в соответствии с теорией — фокусирует белый свет в точку, почти как обычная “толстая” линза.

Мы проверили только первые эксперименты, предстоит улучшить качество рельефа (пока есть большое рассеяние света) и попытаться изготовить более светосильные элементы. А дальше главная цель нашего проекта — создание дифракционных элементов для фокусировки и преобразования широкополостного синхротронного излучения. Таких элементов пока еще никто не создавал.

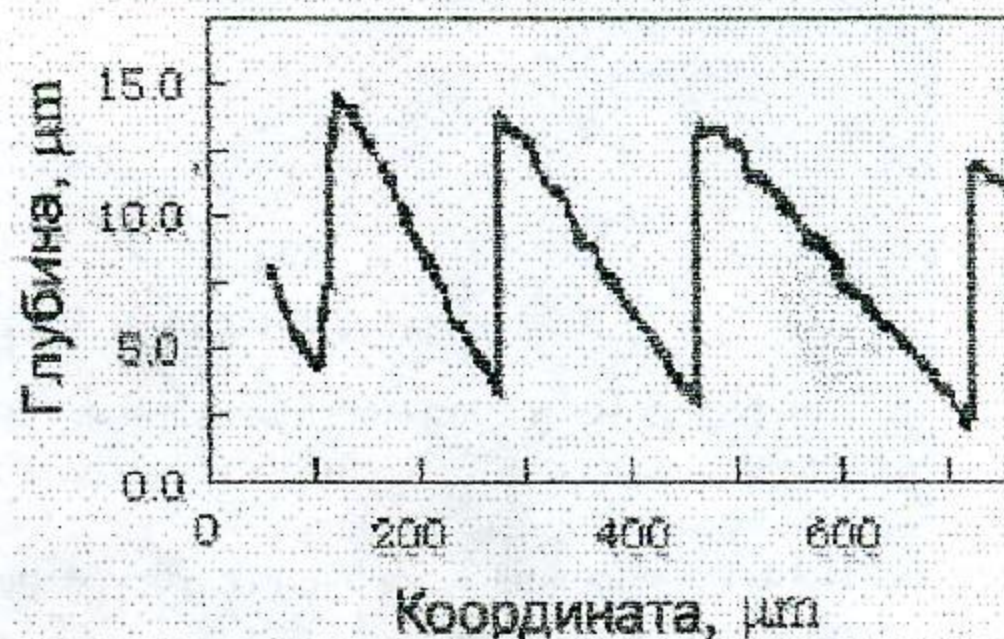


Рис. 3

Одно из перспективных и полезных применений новых дифракционных элементов — создание оптики сканирующего рентгеновского микроскопа для исследования 3-мерных микрообъектов.

Ст.н.с. лаб. 2-5 А.Г.Полещук, ИАиЭ

Окончание. Начало на стр. 5

ных о реальной зарплате, показаны еще и средние величины за 1994 г. и 1995 г. С сожалением можно видеть, что средняя за год реальная зарплата упала с 2.5 прод. корзин в 1994 г. до 1.84 в 1995 г., и только к концу года, после ноябрьского повышения зарплаты, стала приближаться, но еще не достигла среднего уровня 1994 г.

Ход инфляции за последние 5 лет показан на графике 3 и в таблице 2. Индексом инфляции в данном случае называется прирост цены прод. корзины в конце месяца по отношению к концу предыдущего месяца, выраженный в процентах. Результаты усреднены по кварталу, чтобы сгладить ошибки измерения. У автора нет подробных сведений за 1991-92 г.г., поэтому в этой части графика показана средняя инфляция за год. В январе и, по-видимому, в феврале рост цен примерно такой же, как в предыдущем квартале (около 5% в месяц), а дальше как получится. Это зависит от действий властей, предсказывать которые я не берусь.

С. Мишнев

Зарплата в ИЯФ и инфляция в 1995г.

Видно, что есть разница в подсчете роста цен по "продовольственной" и "потребительской" корзине. Разными авторами используются разные продовольственные корзины: из 17-ти, 19-ти и даже 44-х наименований товаров; цена их, конечно, тоже разная, но изменение во времени почти одинаково. Другое дело, когда расчет инфляции ведется по потребительской корзине. В этом случае все затраты обычно делятся на три части: на продовольствие, на промышленные товары и на услуги (последнее включает квартплату, транспорт и т.п.). Известно, что цены на промтовары выросли в среднем не больше, чем на продовольствие, а скорее даже меньше, в то время как цена услуг поднималась быстрее всего. Поэтому результат расчета будет

сильно зависеть от того, насколько разумно выбрано соотношение между разными видами затрат. Каким образом это делал Госкомстат, мне, к сожалению, неизвестно.

В таблице 2 показано изменение цен по отношению к середине 80-ых годов и по отношению к

критической точке - началу 1992 г., когда вместо СССР мы стали жить в России, и начались реформы, условно называемые "гайдаровскими". Выводы могут быть разными, сделать их я предоставляю читателям.

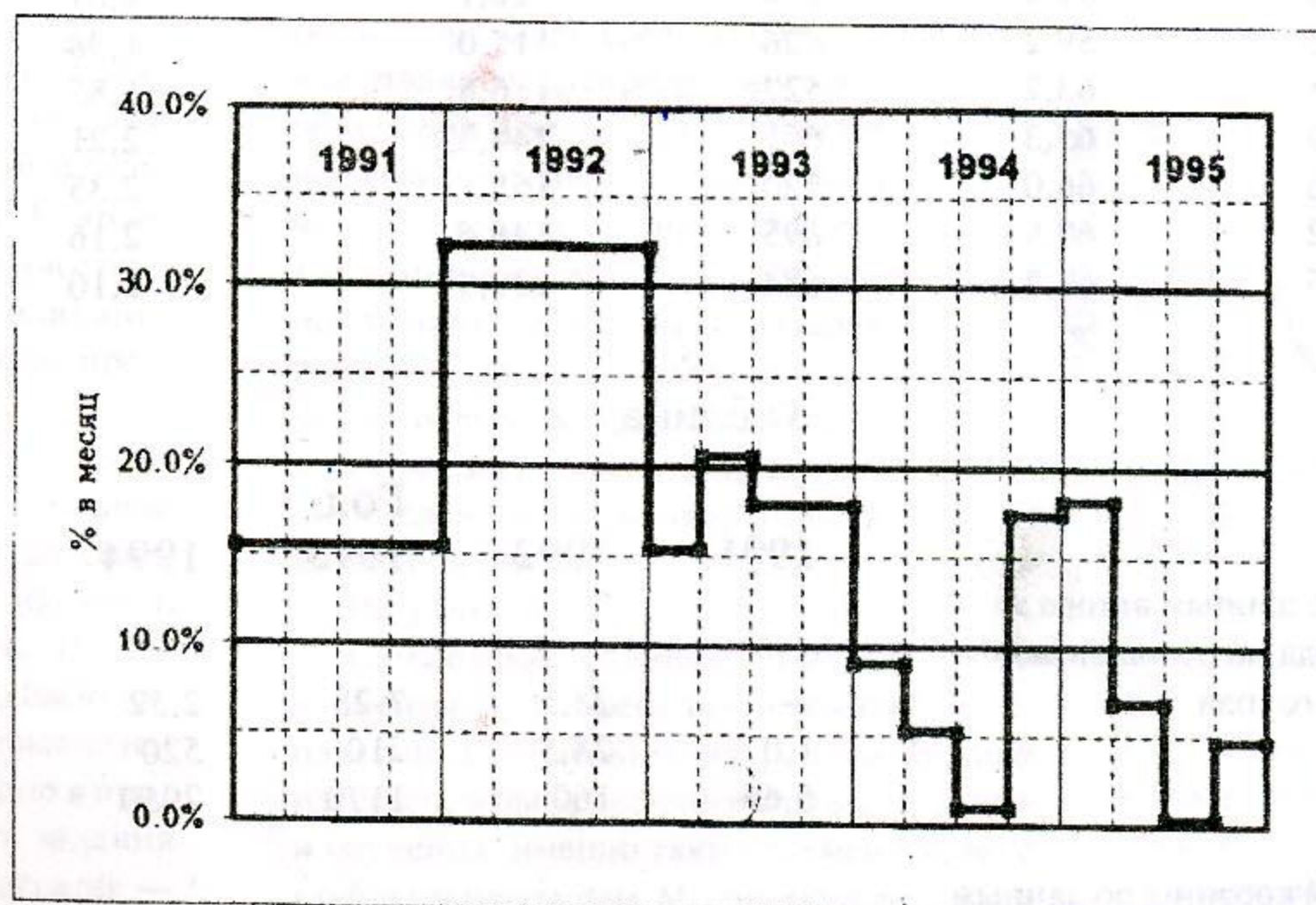
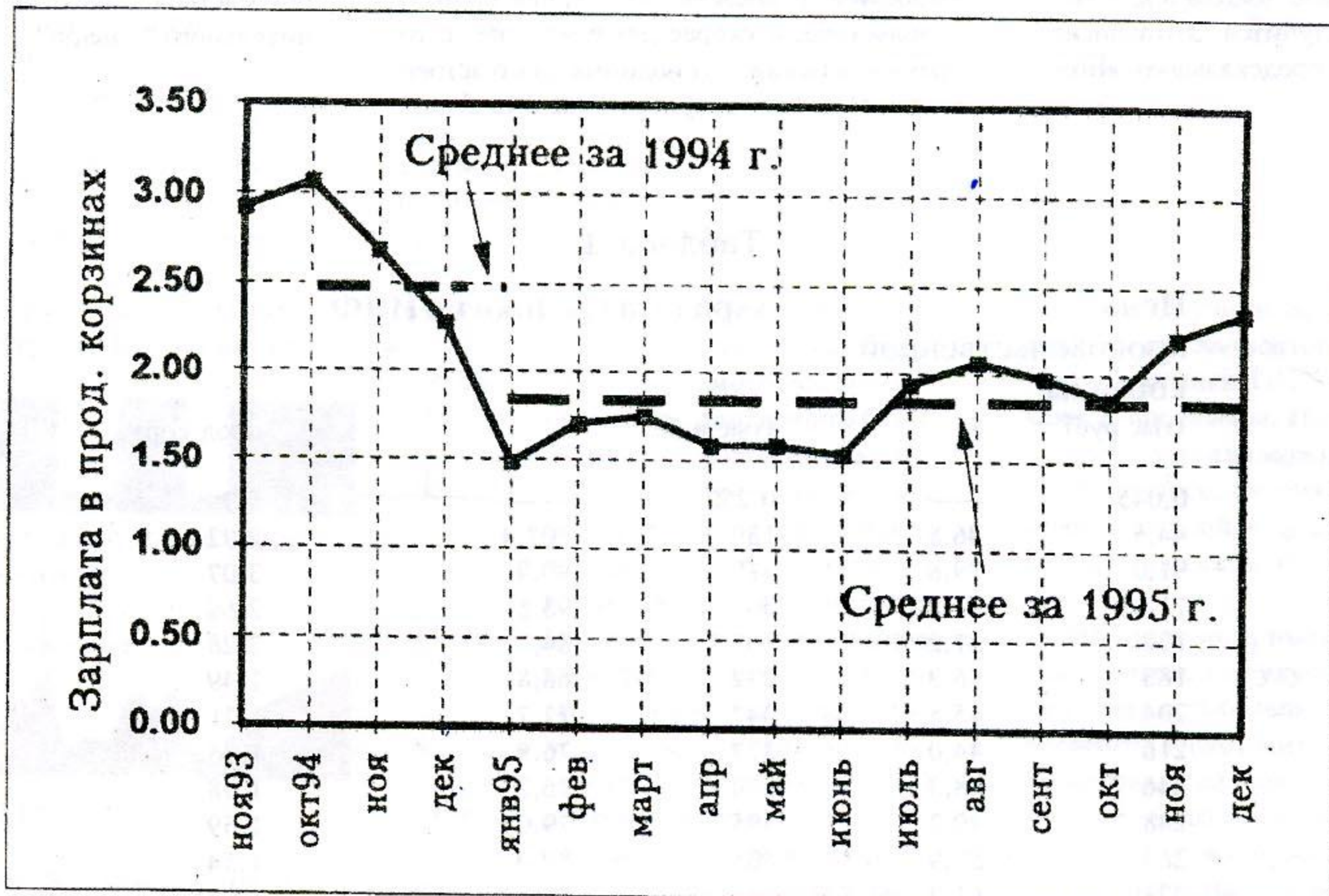
Стоит отметить еще, что, как видно из таблицы 1, за 1995 г. почти в два раза упала покупательная способность доллара (за 1994 г. она почти не изменилась), что означает дальнейшее уменьшение выгоды валютных заказов. Создается впечатление, что теперь, как правило, валютные заказы кормят только тех, кто на них непосредственно работает, и не дают дополнительного "наvara".

Таблица 1

Месяц год	Цена продовольственной корзины		Зарплата средняя по ИЯФ		
	(тыс.руб)	\$	(тыс.руб)	\$	прод.корз
1985	0,045	—	0,250	—	5,7
нояб93	44,5	36,8	130	107,4	2,92
окт94	91,0	29,6	279	90,9	3,07
нояб	112,5	34,8	302	93,5	2,69
дек	132	37,2	301	84,7	2,28
январь95	183	46,3	272	68,8	1,49
февр.	204	45,5	347	77,7	1,71
март	216	44,0	377	76,9	1,75
апр	246	48,3	390	76,5	1,58
май	248	49,7	395	79,0	1,59
июнь	263	57,9	405	89,0	1,54
июль	271	61,3	524	118,7	1,94
авг	263	59,4	544	122,7	2,07
сент	266	59,2	526	117,0	1,98
окт	285	63,2	527	116,8	1,85
нояб	299	65,3	661	144,3	2,21
дек	306	66,0	720	155,1	2,35
январь96	322	67,9	695	146,6	2,16
февр	325	67,7	684	139,9	2,10

Таблица 2

	1991	1992	Год 1993	1994	1995
Цена прод. корзины по данным автора в декабре указанного года по отношению:					
к декабрю предыдущего года	—	28,5	7,28	2,52	2,34
к декабрю 1991 года	1,0	28,5	210	520	1220
к середине 80-х годов	5,65	160	1170	2950	6920
Цена потребительской корзины по данным Госкомстата (Известия 23.01.96)					
к декабрю предыдущего года	2,6	26	9,4	3,24	2,31
к декабрю 1991 года	1,0	26	244	790	1830
к декабрю 1990 года	2,6	68	635	2060	4760



Э, р — SCIENCE

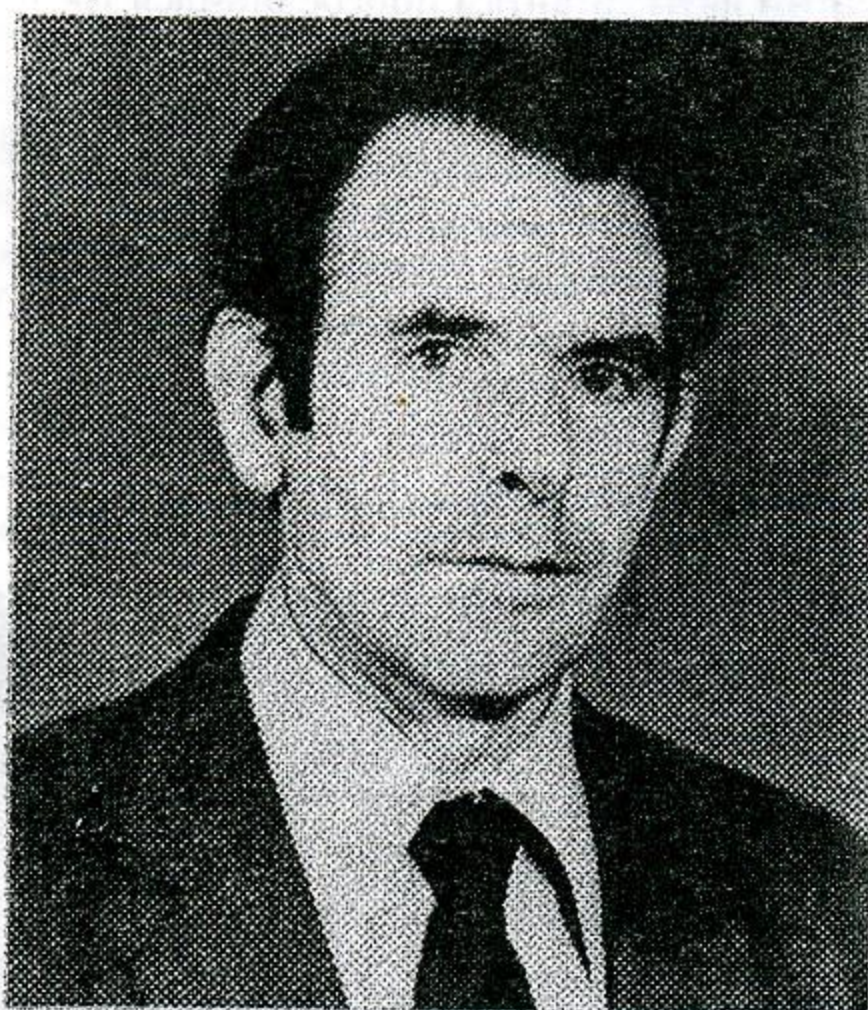
Э.Кругляков

Управляемый термоядерный синтез

История и перспективы

В данной статье изложена история термоядерных исследований, описано современное состояние исследований, показана роль Института ядерной физики и его сотрудников в прогрессе данного направления науки. Автор отчетливо понимает, что нарисованная им картина может оказаться в чем-то субъективной, хотя он и пытался быть предельно объективным. Насколько это удалось, — судить читателям.

Исследования по мирному использованию энергии управляемого термоядерного синтеза начались в обстановке глубочайшей секретности в 1951 году. Для извлечения энергии синтеза легких ядер требовалось создать на Земле субстанцию, существующую на Солнце и звездах, — высокотемпературную плазму. Поскольку речь шла о сотнях миллионов градусов, было естественно использовать магнитное поле для термоизоляции от материальных стенок. А чтобы не было проблем с теплопроводностью на торцы, система должна быть замкнутой. Первая такая система была предложена в 1951 году академиками Д.А.Сахаровым и И.Е.Таммом. Это была тороидальная камера с магнитным полем, напоминающая бублик больших размеров. В направлении малого радиуса плазменный шнур быстро обжимался. При этом должен был осуществляться мощный нагрев плазмы. Несколько позднее нечто подобное предложили английские ученые. Однако в СССР через пару лет исходная идея модифицировалась. По плазменному шнуру был пропущен тороидальный ток. При этом тороидальное магнитное поле превратилось в винтовое, что позволило решить проблему дрейфа на стенки заряженных частиц в тороидальном магнитном поле. На этой основе уже в 1955 году в Институте атомной энергии возникло знаменитое в последствии детище Советской науки — первый токамак. В эти же годы в США Л.Спитцером была предложена также замкнутая магнитная система, но без



тока в плазме. Для компенсации дрейфов заряженных частиц Л.Спитцер предложил создать в замкнутой системе винтовые обмотки. Система получила название стелларатор. Геометрия стелларатора была намного сложнее геометрии токамака.

В 1956 году после поездки И.В.Курчатова вместе с Н.С.Хрущевым в Англию завеса секретности с термоядерных исследований была снята. Оказалось, что к этому времени было предложено (в основном, советскими и американскими физиками) свыше десяти схем удержания плазмы. Как показали дальнейшие события, основными оказались три: токамак, стелларатор, открытая ловушка.

В 1951 году при обосновании первого термоядерного реактора А.Д.Сахаров исходил из возможности использования D-D реакции. Дейтерий содержится в обычной воде в количестве 160 г на тонну. Если извлечь дейтерий, содержащийся в одном литре воды, ионизировать его и нагреть до температур, при которых можно преодолеть кулоновское расталкивание, то при слиянии ядер дейтерия выделится столько

энергии, сколько ее содержится в 300 литрах бензина. Человечество получает практически неисчерпаемый источник энергии. Вскоре, однако, стало понятно, что по крайней мере первые термоядерные реакторы должны создаваться на основе синтеза ядер тяжелого (D) и сверхтяжелого (T) изотопов водорода. D-D реакция возможна лишь при температурах свыше миллиарда градусов, D-T реакция происходит в существенно более “холодной” плазме, при температурах 100-200 миллионов градусов. Изотоп тритий практически в природе не встречается. Однако, термоядерный реактор на основе D-T реакций способен нарабатывать тритий. Анализируя реакции синтеза, А.Д.Сахаров указал основные каналы реакции и без комментариев привел вторичные реакции. Не исключено, однако, что реакция

${}^3\text{He} + \text{D} = {}^4\text{He} + \text{p} + 3,7\text{МэВ} + 14,5\text{МэВ}$ может в будущем стать основной в связи с проблемами экологии.

Как развивались замкнутые системы? Первый токамак заработал в СССР в 1955 году. Параметры плазмы в нем были более чем скромные: температура плазмы 150 тысяч градусов, время удержания — 0,0001 с. К 1968 году на токамаках был достигнут значительный прогресс. Параметры плазмы на стеллараторах уступали параметрам плазмы токамаков. К конференции МАГАТЭ (Международное Агентство по атомной энергии) 1968 года, которая проводилась в Новосибирске, на токамаках были получены весьма впечатляющие результаты: температура плазмы достигла десяти миллионов градусов! Однако токамаки были только в СССР, и мировое плазменное сообщество относилось к данному результату с некоторым недоверием. Руководитель термоядерных исследований в Институте атомной энергии академик Л.А.Арцимович предложил английским физикам провести совместный эксперимент. Англичане приехали со своей

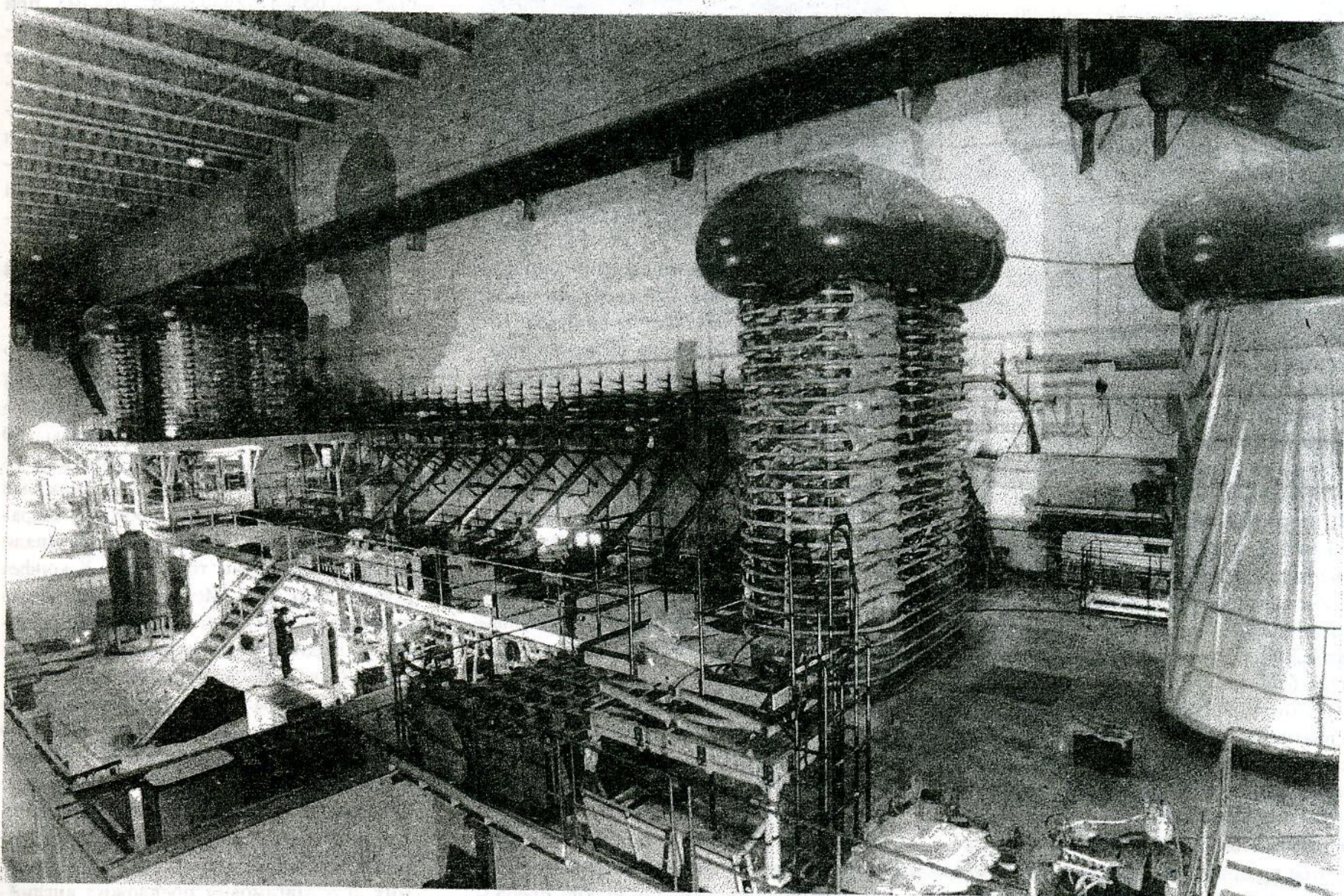
аппаратурой и провели измерение температуры плазмы методом, который не вызывал никаких сомнений (метод томсоновского рассеяния). Английская аппаратура подтвердила: десять миллионов градусов достигнуто! Совместный советско-английский доклад явился событием номер один Новосибирской конференции. Вторым важным событием конференции было выступление А.М.Будкера. Он напомнил собравшимся, что главной задачей является не изучение физики плазмы вообще, а исследование физики плазмы термоядерного реактора. "Мне кажется, что успехи, достигнутые за прошедший период физиками, заставляют нас вернуться к идее создания термоядерного реактора. Физику не обязательно начинать дело только тогда, когда он будет знать все. Чтобы вступить в бой, ему не обязательно ждать, когда будет пришта последняя пуговица к шинели последнего солдата".

Эти два события имели серьезные следствия. Во-первых, в мире начался невиданный бум токамаков. К сожалению, поддавшись моде, многие лаборатории свернули исследования по другим системам удержания плазмы. Во-вторых, возник новый раздел термоядерных исследований, - так называемый системный анализ, позволивший оценить перспективы различных подходов к решению термоядерной проблемы. Подключение множества зарубежных лабораторий к созданию систем типа токамак привело к бурному росту параметров плазмы в токамаках. В 1977 году в Принстоне (США) на токамаке PLT достигнута тем-

пература в 40 млн градусов. Несколько лет спустя на этом небольшом токамаке получена температура ионов в 100 млн градусов. На многих установках мира при достаточно высокой ионной температуре электронная температура оставалась довольно низкой. В 1987 году на советском токамаке Т-10 впервые достигнута температура в 100 млн градусов. Сама по себе она не определяет скорость термоядерных реакций, однако при низкой электронной температуре ионы не могут долго оставаться горячими. Или, как говорят физики, энергетическое время жизни высокотемпературной плазмы будет низким.

Начало новой эры в токамаках приходится на 1982-83 годы, когда почти одновременно были построены крупнейшие современные токамаки: TFTR (США) и объединенный европейский токамак JET (Англия). Вскоре после запуска этих машин при одном только омическом нагреве тороидальным током на них была получена температура 30 млн градусов в огромных объемах плазмы. Самый же впечатляющий результат состоял в том, что время жизни плазмы достигло 1 секунды. Вскоре к этим двум гигантам присоединился третий — японский токамак JT-60. На этих-то трех машинах и началась методическая осада первой вершины термояда — осуществление так называемой физической демонстрации достижимости управляемого термоядерного синтеза. У физиков это звучит коротко: получение $Q=1$. Это соответствует условию: энергия, вложенная в плазму, и энергия, выделенная из плазмы,

равны. Можно считать, что физическая демонстрация состоялась. На всех трех крупнейших токамаках достигнута величина Q равная 0,8-0,9. В конце 1993 года на европейском токамаке JET осуществлено несколько рабочих импульсов с применением дейтерия и трития. Измерения показали, что в термоядерных нейтронах впервые была выделена мощность 2 Мегаватта. Полтора года спустя на американской установке TFTR выделено уже 10 Мегаватт. Сомнений в осуществимости управляемой термоядерной реакции остается все меньше. Что нужно для осуществления самоподдерживающейся реакции? Сегодня можно с большой степенью надежности сформулировать совокупность параметров, при которой будет идти самоподдерживающаяся реакция. Вот эти параметры: ионная температура — 200 млн градусов, плотность плазмы $1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, энергетическое время жизни — полторы секунды, коэффициент усиления $Q=5$. Что мы имеем сегодня? Ионная температура, достигнутая в крупнейших токамаках, даже выше требуемой (400 млн градусов). Максимальная плотность плазмы в токамаках также выше требуемой (до $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$). Энергетическое время жизни плазмы 1,2 секунды, правда эта величина получена при более низких плотностях плазмы. Наконец, как уже упоминалось, максимальный коэффициент усиления на токамаках сегодня равен $Q=0,9$. Богатейший экспериментальный материал, накопленный за прошедшие годы, позволяет перейти к заключительному шагу термоядерной про-



граммы токамаков — сооружению установки, на которой будет достигнута самоподдерживающаяся термоядерная реакция. Европейский Союз, США, Япония и Россия работают над проектом международного токамака-реактора (ИТЭР). Проектные работы будут закончены в 1998 году. Но уже сегодня можно себе представить масштабы этого сооружения: большой радиус тороида 6 метров, вертикальный размер плазменного шнура 8 метров, напряженность магнитного поля, создаваемого в этом гигантском объеме с помощью сверхпроводящих обмоток 5 Тесла.

А теперь мы перейдем к другой версии термоядерного реактора, к версии, связанной с открытыми системами. Как выяснилось впоследствии идея открытой магнитной ловушки была высказана независимо А.М.Будкером в СССР и Р.Постом в США в 1954 году. Идея была чрезвычайно простой: если в однородном соленоиде усилить магнитное поле на концах, т.е. поджать у торцов соленоида магнитные силовые линии к оси системы, то большая часть заряженных частиц в образовавшейся ловушке будет удерживаться. Сотрудник нашего института С.Н.Родионов в модельных экспериментах, вошедших в учебники, показал, что позитроны, на которых ставились опыты, действительно удерживались в ловушке, совершая в ней до десяти миллионов отражений от концевых пробок, — сгущений магнитного поля. Далее позитроны терялись в ловушке из-за рассеяния на частицах остаточного газа. Вскоре оказалось, однако, что идея содержит коварные подводные камни. В частности, Б.В.Чириковым было предсказано, что если частота вращения частиц в магнитном поле окажется кратной частоте отражений от пробок, то могут возникать неустойчивости, приводящие к потерям частиц из ловушки. На еще одну неприятность указал А.А.Галеев, нынешний академик, директор Института космических исследований, а в то время сотрудник ИЯФ. Он показал, что открытым ловушкам присуща так называемая конусная неустойчивость, приводящая к быстрой гибели плазмы. И все же открытые системы обладали столь важными достоинствами, что даже после удара, нанесенного А.А.Галеевым, физики продолжали работать с открытыми ловушками. Что же это за достоинства? Прежде всего, по своим физическим принципам это стационарная система. Во-вторых, существует чрезвычайно важный параметр, характеризующий качество системы удержания плазмы. Это величина бэта, — отношение давления плазмы к давлению магнитного поля. Так вот, в случае токамака величина бэта менее 0,1, а в открытых ловушках бэта может быть равна единице (и это экспериментально доказано американскими физиками). Наконец, если говорить об осесимметричных магнитных системах, то они намного проще замкнутых систем типа токамаков и стеллараторов.

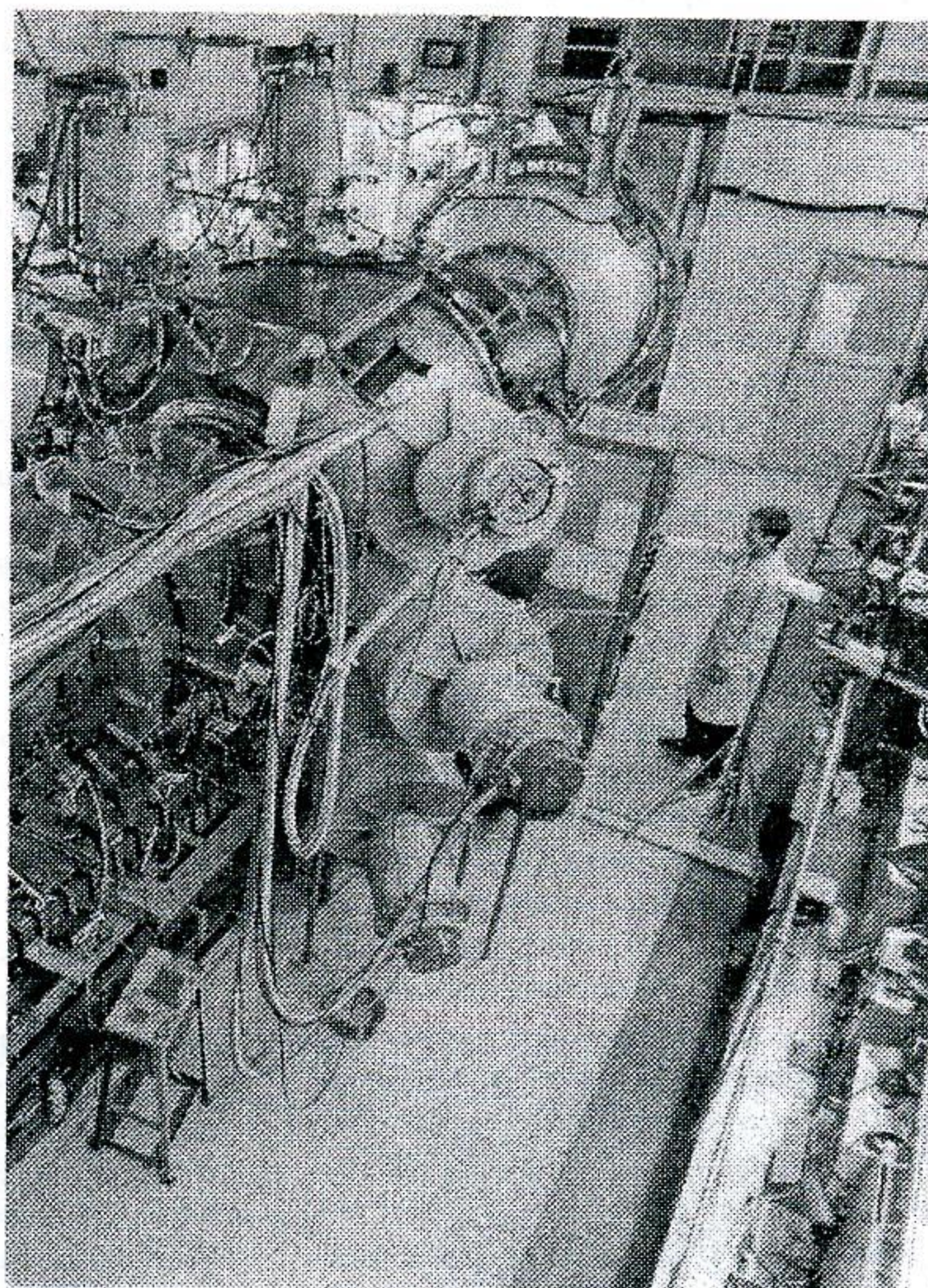
Как же развивались открытые системы? Если не считать классических опытов Родионова, история открытых систем на-

чинается с создания в 1957 году в СССР крупной магнитной ловушки под названием Огра. Это была первая крупная неудача плазмистов. Плазма в установке не хотела держаться. По мере развития теории в 60-х годах стали осознавать, что в осесимметричной ловушке существует крупномасштабные неустойчивости, из-за которых плазма выбрасывается на стенки. Вскоре советский физик М.С.Иоффе предложил рецепт для подавления этих неустойчивостей, и на многих магнитных ловушках мира появились “палки Иоффе”. Последние дали плазме макроскопическую устойчивость, но ловушки стали сложнее. А ведь требовалось еще подавить конусную неустойчивость Галеева. Так или иначе, но в 1973 году в Ливерморе на открытой ловушке 2X11В даже раньше, чем на токамаках, была достигнута ионная температура плазмы в 150 млн градусов!

А теперь вернемся в ИЯФ начала 60-х годов. Институт только-только начал работать. Естественно, что с самого начала невозможно было строить крупные установки, мы только-только начинали “накачивать мускулы”. Тем не менее уже в начале 60-х годов в институте функционировала установка со щелочной плазмой, на которой под руководством Н.С.Бучельниковой было получено немало фундаментальных результатов, в частности, по поперечному переносу плазмы в магнитном поле. Оказалось, что поперечный перенос плазмы отнюдь не соответствует классическим механизмам. Было продемонстрировано, что коэффициенты переноса плазмы могут быть в тысячи раз больше классических. В этих экспериментах принимали участие теперешние “мэтры”: А.М.Кудрявцев, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман.

В эти же годы в лаборатории Ю.Е.Нестерихина закладывалась принципиально новая база будущих экспериментов: были разработаны и созданы малоиндуктивные конденсаторные линии на основе масляной изоляции. Несколько позднее в качестве высоковольтной изоляции впервые в мировой практике стала использоваться вода. К середине 70-х годов нам удалось приблизиться к пределу электрической прочности воды: она держала до 1,2 мегавольта на см.

Среди работ, которые велись в институте в 60-е годы, следует отметить развитие различных методов ускорения плазмы



(Л.В.Дубовой, В.К.Малиновский, В.М.Федоров). В этих работах удалось получить потоки плазмы со скоростями, соответствующими эффективной температуре в 100–200 миллионов градусов. Под руководством С.Г.Алиханова развивались работы, связанные с созданием сверхплотной плазмы: А.М.Будкер, по инициативе которого начались эти работы, искал решение термоядерной проблемы нестандартными методами.

Огромный вклад в развитие термоядерных исследований внесли наши теоретики, работавшие в те годы под руководством молодого академика Р.З.Сагдеева. В частности, Р.З.Сагдеев совместно с С.С.Моисеевым объяснили, почему может наблюдаться усиленный поперечный перенос плазмы. Они дали физическое обоснование так называемой диффузии Бома, — той самой, которая приводила к переносу в тысячу раз больше классического. Вклад наших теоретиков в физику токамаков оказался не из приятных. Ранее существовал критерий Крускала-Шафранова, определявший максимальное значение тороидального тока в плазме токамака при фиксированном значении тороидального магнитного поля. Оказалось, что из-за микронеустойчивостей этот предельный ток не может быть достигнут. Еще более неприятный сюрприз преподнес токамакам А.А.Галеев: он показал, что существует некий эффект, из-за которого примеси со стенок собираются на оси плазменного шнура. Сейчас с этим эффектом справились, а в то время он вызвал большой переполох: примеси очень быстро охлаждаются

горячую плазму. Но самым эффективным достижением теории явилась работа Р.З.Сагдеева о бесстолкновительном нагреве плазмы. Им было показано, что благодаря коллективным процессам, даже в отсутствие кулоновских столкновений в плазме могут генерироваться ударные волны, способные греть плазму. В опытах группы Р.Х.Куртмуллаева эта теория нашла экспериментальное подтверждение. Одновременно с физическими экспериментами осуществлялась и разработка новых методов исследования плазмы. Следует особо отметить разработку метода оптической интерферометрии (Э.П.Кругляков, Ю.Е.Нестерихин), позволившего измерять плотность плазмы за счет совершенно ничтожного, но обнаруживаемого изменения ее показателя преломления. Надо отметить, что культура оптических методов диагностики плазмы пошла в плазменные лаборатории СССР из ИЯФ. Именно ИЯФ снабдил крупнейшие установки Советского Союза лазерами для метода томсоновского рассеяния, с помощью которого измеряется температура плазмы. А расширению возможностей института в немалой степени способствовало создание в 1964 году оптического участка. Среди других разработок отмечу фотоэлектронный прибор для исследования профилей спектральных линий (Э.П.Кругляков, Ю.Е.Нестерихин, 1965 год). Интересно, что прибор до сих пор выпускается промышленностью и известен как диссектор или ЛИ-602. Сегодня этот прибор используется и в физике высоких энергий. Наконец, нельзя не упомянуть еще одну разработку института, основанную на идее А.М.Будкера и Г.И.Димова (1968г). Речь идет о диагностическом источнике нейтральных атомов (Г.И.Димов, Г.В.Росляков, В.Я.Савкин, 1977 год). Этот источник применяется сегодня во многих лабораториях мира, позволяя определять несколько важных параметров плазмы.

Современная история термоядерных исследований началась в институте в 70-х годах. В 1971 году А.М.Будкером, В.В.Мирновым и Д.Д.Рютовым была предложена принципиально новая схема так называемого многопробочного удержания плазмы в открытой довушке. Идея нового метода чрезвычайно проста и изящна. Представим себе очень плотную (длина свободного пробега частиц плазмы должна быть значительно меньше продольного размера системы) плазму в длинной трубе с однородным магнитным полем. Если плазму быстро нагреть, она начнет разлетаться, причем, характерное время разлета (время жизни плазмы) оценивается как L/v_{Ti} - (здесь L - продольный размер плазмы, v_{Ti} - ее тепловая скорость). На этой основе можно построить, пожалуй, самый простой термоядерный реактор. Но он получается слишком большим. Нельзя ли его уменьшить? Оказывается, можно. Для этого предыдущую систему следует гофрировать, т.е. создать совокупность пробочков, когда-то предложенных А.М.Будкером. Нужно только сделать так, чтобы длина свободного пробега частиц плазмы

была больше размера одного пробочков. А теперь посмотрим за поведением отдельной частицы, летящей вдоль оси системы, скажем, слева направо. Частица пролетает несколько пробочков, сталкивается с другой частицей и захватывается в тот пробочков, где произошло столкновение. Когда частица столкнется в следующий раз, она развернется на большой угол и может вылететь из пробочков. Но куда она двинется? Налево или направо? Она уже "забыла", куда двигалась раньше. Т.е. она может двинуться как влево, так и вправо. Но такое поведение частиц описывается диффузионным законом. Значит, время жизни частиц может быть записано как

$$\tau \simeq L^2/\lambda v_{Ti}.$$

Более точные расчеты показывают, что время жизни растет еще сильнее:

$$\tau = K^2/(L^2/\lambda v_{Ti}).$$

(здесь K — пробочное отношение или отношение максимальной величины поля в пробочков к минимальной. Теперь термоядерный реактор с многопробочным удержанием плазмы стал существенно (в десятки раз) короче. Для проверки теории в кратчайшие сроки была создана установка со щелочной плазмой. Под руководством автора этих строк в течение 1972-73 годов были выполнены основные эксперименты, которые подтвердили справедливость теории продольного удержания плазмы в многопробочных конфигурациях. К сожалению, расчеты показали: чтобы осуществить одновременное удержание как в продольном, так и в поперечном направлениях, потребуется магнитное поле с напряженностью 3 Мегагаусса. Для термоядерного реактора такое поле находится за границами технических возможностей. Но выход был найден усилиями Д.Д.Рютова с сотрудниками. Было предложено использовать так называемое "стеночное" удержание. Если плазму поместить в цилиндрическую камеру с магнитным полем относительно небольшой (масштаба 100 кГс) напряженности (при этом стенки камеры должны быть хорошо проводящими), то как показывают вычисления, после быстрого нагрева плазмы в ней происходит перераспределение плотности и магнитного поля по радиусу. Изменения плотности и поля на оси камеры невелики, однако у самой поверхности напряженность магнитного поля достигает нескольких мегагаусс! Из вычислений следовало, что время поперечного остывания плазмы оказывается достаточно большим, т.е. данная концепция термоядерного реактора имеет право на жизнь. Однако, концепция стеночного удержания требовала тщательной экспериментальной проверки. Для этого требовалась мощная энергетика, а ее в те годы у нас не было.

Учитывая специфику института, было естественно использовать для нагрева плазмы релятивистские электронные пучки. В 1971 году в институте появилась небольшая установка ИНАР, на которой под руководством В.С.Койдана начались систематические исследования по взаимодей-

ствию релятивистских электронных пучков (РЭП) с плазмой. На этой установке были получены первые принципиальные результаты. Эксперименты показали, что хотя длина свободного пробега релятивистского электрона много больше размера системы и, грубо говоря, соответствует расстоянию от Земли до Луны, пучок все же оставляет в плазме до 30 процентов своей энергии. Это происходит из-за коллективных процессов, возникающих в плазме. В первых экспериментах на ИНАРе использовался пучок электронов с энергией всего 100 Дж. Несколько лет спустя появилась установка ГОЛ-1 (группа Э.П.Круглякова) с ускорителем "Водяной", где впервые для генерации пучка электронов была использована водяная изоляция. Энергия пучка поднялась до 3 КДж. Вскоре был создан еще более мощный ускоритель с водяной изоляцией "Акваген" (В.М.Лагунов), на котором был получен пучок с энергосодержанием 20 КДж. В 1980 году в лаборатории В.С.Койдана был создан новый тип генератора (У-1) с энергозапасом в пучке в 100 КДж. С 1985 года на первой очереди установки ГОЛ-3 начались эксперименты. До недавнего времени установка функционировала с подобным пучком, но вот 29 декабря 1995 года удалось запустить вторую очередь. При этом магнитная система установки была удлинена с семи метров до двенадцати и к ней был пристыкован еще более мощный генератор РЭП с ленточным пучком (У-2), созданный несколько лет тому назад (группа А.В.Аржанникова). Отныне пучок, вводимый в плазму, имеет энергосодержание в 300 КДж! Теперь можно говорить о проверке концепции стеночного удержания.

Высокие параметры плазмы после ее нагрева с помощью РЭП да и параметры самого РЭП представляют интерес для различных приложений. В частности на генераторе РЭП с ленточным пучком была продемонстрирована возможность создания мощного лазера на свободных электронах в миллиметровой области спектра. Сама же плазма после нагрева является мощным источником ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения. Наконец, разлет горячей плазмы через торцы установки позволил обнаружить эффект, который раньше не наблюдался. Начиная с плотностей потока энергии плазмы в 1 МДж/м² происходит сильное разрушение поверхности мишени, на которую падает поток. Уже при 3 МДж/м² мишень разрушается до глубины 0,5 мм. Наблюдаемый эффект имеет прямое отношение к моделированию процесса "большого срыва" в ИТЭРе. Такой эффект самопроизвольного сброса плазмы на стенку, в принципе, может наблюдаться в ИТЭРе при предельно высоких параметрах плазмы.