

Познавательный журнал для хороших людей

НАУКА

из первых рук

www.scfh.ru

2 Специальный выпуск 2 • 2018

НАУКА ИЗ ПЕРВЫХ РУК

№ 2 Специальный выпуск

НА БЫСТРЫХ
ЭЛЕКТРОНАХ

ИСТОРИЯ
СОЗДАНИЯ
ЭЛЕКТРОННОГО
ОХЛАЖДЕНИЯ

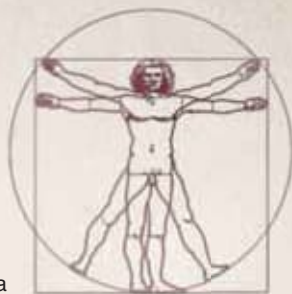
КАЖДЫЙ
«ВЫСТРЕЛ» -
20 МЛРД
ПОЗИТРОНОВ

О НАСТОЯЩЕМ
И БУДУЩЕМ
ТЕРМОЯДЕРНОЙ
ЭНЕРГЕТИКИ

*К 100-летию
академика Г. И. Будкера*

Вселенная Будкера

Познавательный журнал
для хороших людей



Редакционная коллегия

главный редактор
акад. *Н.Л. Добрецов*
заместитель главного редактора
акад. *В.И. Бухтияров*
заместитель главного редактора
акад. *В.В. Власов*
заместитель главного редактора
чл.-корр. *Н.В. Полосьмак*
заместитель главного редактора
акад. *В.Ф. Шабанов*
ответственный секретарь
Л.М. Панфилова
акад. *И.В. Бычков*
акад. *М.А. Грачев*
акад. *А.П. Деревянко*
акад. *А.В. Латышев*
к. ф.-м. н. *Н.Г. Никулин*
акад. *В.Н. Пармон*
акад. *Н.П. Похиленко*
чл.-корр. *М.П. Федорук*
акад. *М.И. Эпов*

Редакционный совет

акад. *Л.И. Афтанас*
акад. *Б.В. Базаров*
чл.-корр. *Е.Г. Бережко*
акад. *В.В. Болдырев*
акад. *А.Г. Дегерменджи*
проф. *Э. Краузе (Германия)*
акад. *Н.А. Колчанов*
акад. *А.Э. Конторович*
акад. *М.И. Кузьмин*
акад. *Г.Н. Кулипанов*
д. ф.-м. н. *С.С. Кутателадзе*
проф. *Я. Липковски (Польша)*
акад. *Н.З. Ляхов*
акад. *В.И. Молодин*
д. б. н. *М.П. Мошкин*
чл.-корр. *С.В. Нетесов*
д. х. н. *А.К. Петров*
проф. *В. Сойфер (США)*
чл.-корр. *А.М. Федотов*
д. ф.-м. н. *М.В. Фокин*
д. т. н. *А.М. Харитонов*
акад. *А.М. Шалагин*
акад. *В.К. Шумный*
д. и. н. *А.Х. Элерт*

Над номером работали

к. б. н. *Л. Овчинникова*
Л. Панфилова
Т. Морозова
к. б. н. *М. Перелечева*
А. Харкевич
к. ф. н. *Е. Игнатова*
А. Мистрюков

«Естественное желание хороших
людей – добывать знание»

Леонардо да Винчи

Периодический научно-популярный журнал

Издается с января 2004 года

Периодичность: 6 номеров в год

Учредители:

Сибирское отделение Российской
академии наук (СО РАН)

Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН

Институт археологии и этнографии
СО РАН

Лимнологический институт СО РАН

Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН

Институт химической биологии
и фундаментальной медицины СО РАН

Институт нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН

ООО «ИНФОЛИО»

Издатель: ООО «ИНФОЛИО»

Адрес редакции и издателя:
630090, Новосибирск,
ул. Золотодолинская, 11
Тел.: +7 (383) 330-27-22, 330-21-77
Факс: +7 (383) 330-26-67
e-mail: lidia@info-press.ru
e-mail: zakaz@info-press.ru

www.scfh.ru

Журнал зарегистрирован
в Федеральной службе по надзору
в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор)

Свидетельство ПИ № ФС77-37577
от 25 сентября 2009 г.

ISSN 1810-3960

Тираж 1 000 экз.

Отпечатано в типографии
ООО «ИД „Вояж“» (Новосибирск)

Дата выхода в свет 03.05.2018

Цена договорная

Перепечатка материалов только
с письменного разрешения редакции

© Сибирское отделение РАН, 2018

© ООО «ИНФОЛИО», 2018

© Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН, 2018

© Институт археологии и этнографии
СО РАН, 2018

© Лимнологический институт СО РАН,
2018

© Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН, 2018

© Институт химической биологии
и фундаментальной медицины
СО РАН, 2018

© Институт нефтегазовой геологии
и геофизики им. А. А. Трофимука
СО РАН, 2018

2. 2018
научно-популярный журнал

*Специальный
выпуск*



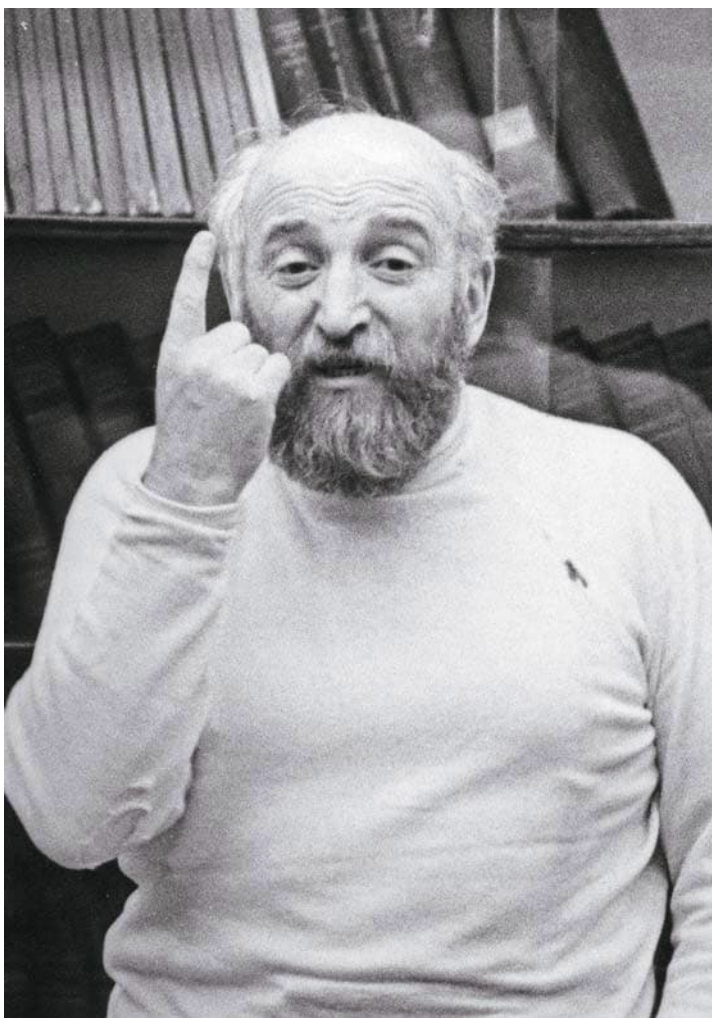
НАУКА

из первых рук



К 100-летию академика Г. И. Будкера

ВСЕЛЕННАЯ БУДКЕРА



ВСЕЛЕННАЯ БУДКЕРА

В 2018 г. новосибирский Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН отмечает двойной юбилей: свое шестидесятилетие и столетие со дня рождения основателя института, академика Будкера. Судьба отпустила ему в науке немногим более тридцати лет, но, по словам его ученика, чл.-корр. И. Б. Хрипловича, «благодаря увлеченности Будкер в свои неполные шестьдесят лет прожил фактически несколько жизней. Тонкий физик, “фонтанирующий” изобретатель, создатель и руководитель крупного института – того, что достиг он в каждом из этих занятий, с лихвой хватило бы на яркую, большую человеческую жизнь».

В последние годы жизни, по воспоминаниям академика С. Т. Беляева, «у него стало проявляться мудрое прозрение старца, спокойно сознающего ограниченность своего срока». И единственное, что его заботило, о чем он мог думать в оставшиеся ему часы, – это будущее созданного им института. Своим преемником он видел Александра Скринского, в то время молодого, сорокалетнего доктора наук. В последнем разговоре с С. Т. Беляевым он просил поддержать его кандидатуру, мотивируя это тем, что иначе «...это будет другой институт. Может быть, очень хороший, но другой».

Теперь мы можем сказать, что желание Будкера осуществилось в полной мере: институт сегодня не просто носит имя его основателя, это действительно «Вселенная Будкера», воплотившая его творческие замыслы в физике, технике и организации науки, которая продолжает развиваться и эволюционировать в направлении, заданном ее создателем.

В наши дни ИЯФ – это не только крупнейший академический институт страны, но и один из ведущих мировых центров в области физики элементарных частиц, ускорителей, синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах, а также физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза. И в каждой из этих научных областей есть позиции, по которым ИЯФ им. Г.И. Будкера удерживает лидерство.

Современные научные представления о мире во многом базируются на фундаментальных экспериментах в области физики высоких энергий. Появление в XX в. сначала квантовой механики, а затем физических теорий, объясняющих взаимодействие элементарных

частиц во всем доступном человеку диапазоне энергий, и теории возникновения и развития нашей Вселенной привело к созданию релятивистской квантовой теории (квантовой теории поля), положенной в основу Стандартной модели.

Можно смело утверждать, что основной массив экспериментальных данных, на базе которого создавалась физика элементарных частиц и сама Стандартная модель, был получен при помощи метода встречных пучков. Это была идея Будкера, и в этом научном направлении новосибирские физики были абсолютно первыми, здесь переоценить вклад ИЯФ невозможно. Как это было, можно понять по воспоминаниям академика А. Н. Скринского: «...Многие начинавшие вместе с нами отчаялись и ушли, тем более что работа была связана с переездом из Москвы, из прославленного Института атомной энергии в Новосибирск, в несуществующий, совершенно “негарантированный” институт, к тому же при вопиющем противоречии намерений и решений с реальными результатами. Путь к успеху занял долгих 6 лет, однако именно наш институт стал единственным, где с 1968 г. постоянно работал хотя бы один коллайдер. Сегодня же у нас работают две ускорительные установки из шести, действующих в мире, включая БАК».

ИЯФ – автор многих красивых и уникальных находок в физике ускорителей. Например, это метод электронного охлаждения, предложенный Будкером еще в 1966 г., который сегодня широко применяется во всем мире для фокусировки ионных пучков в ускорителях элементарных частиц, в том числе на Большом адронном коллайдере.

Именно благодаря коллайдерам появились новые научные и прикладные направления с использованием синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах, ускорительная масс-спектрометрия, ядерная медицина, не говоря уже о промышленных и технологических ускорителях. Все это, и в первую очередь уникальное экспериментальное производство оригинальной физической идеи в готовый работающий прибор, в последние несколько десятилетий является неотъемлемой частью деятельности ИЯФ. И создание



такой производственной базы, которой не может похвастаться ни один академический институт, – также заслуга академика Будкера.

Физика пучков заряженных частиц развивалась в ИЯФ СО РАН рука об руку с физикой плазмы и управляемым термоядерным синтезом – еще одним направлением исследований, заложенным в институте его создателем. Неожиданная идея Будкера, что плазму можно удерживать не только в замкнутых системах, но и в открытых, оказалась очень плодотворной. В последнее десятилетие в разработке открытых магнитных ловушек для плазмы в ИЯФ был достигнут настоящий прорыв благодаря развитию технологий создания мощных ионных пучков для нагрева плазмы и высокопроизводительных систем вакуумной откачки. Дальнейший прогресс в этом направлении поможет значительно ближе подойти к созданию термоядерного реактора на малонейтронном топливе. А уже достигнутые успехи в термоядерных технологиях позволили институту создать свой прототип компактного ускорительного источника нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии рака.

Главное кредо ИЯФ, которого он придерживался с момента своего создания, – это участие в важнейших фундаментальных научных экспериментах с упором на собственные оригинальные физические идеи и новые высокие исследовательские технологии, а также использование уникального мощного научно-производственного комплекса. Наверное, в мире трудно найти другую научную организацию с такой концентрацией интеллектуального, профессионального и технологического потенциала, как в ИЯФ.

И все же главное отличие ИЯФ от других научных центров, придающее ему небывалую силу и устойчивость, заключается в уникальной атмосфере, которая всегда царил в его научном коллективе. Здесь всегда ценился профессионализм и было уважение к творческому труду. Управление в ИЯФ – это, прежде всего, работа в команде. Главная задача руководителя – увлечь людей, поставить перед ними интересную проблему, постараться найти красивое решение в сложной ситуации. Если же у них не получается, то очень аккуратно, незаметно помочь им найти это решение. Просто управленец не может работать в научном коллективе, руководителем должен быть настоящий профессионал-ученый.

Даже в советское время решение в ИЯФ принимал не тот, у кого была выше должность, а тот, кто лучше всего разбирался в проблеме. Когда в институт приезжали эмиссары из других организаций, они первым делом стремились решить все вопросы с директором,

но им тут же объясняли, что обсуждать дела нужно с ответственным научным сотрудником, что, как он скажет, так и поступит директор института. Для многих такой управленческий подход был настоящим шоком. Мы и сегодня исходим из положения, что руководитель, во-первых, не должен мешать работать своим подчиненным-профессионалам; во-вторых, он должен правильно определять стратегические цели развития и стараться, чтобы они были достигнуты вовремя; в-третьих, проводить правильную кадровую политику и готовить себе смену.

Важным звеном управления Будкер сделал ученый совет института – так называемый «круглый стол». По воспоминаниям академика С. Т. Беляева, «с привычным понятием ученого совета он имел мало общего. Первоначальная идея была такой: собираться ежедневно в 12 часов дня на полчаса для обсуждения за чашкой кофе любых вопросов, как правило, заранее не планируемых: серьезные научные проблемы, организационные, кадровые, жилищные, новый фильм или местные новости. Иногда обсуждение сильно затягивалось, но незаинтересованные могли свободно уходить. Со стороны это все можно было воспринять как нечто не очень серьезное. Но сейчас я уверен в глубокой продуманности замысла Будкера. Круглый стол был для него местом и способом обучения и воспитания своих единомышленников. Принять решение было делом вторичным. Главное – создавать общие научные, нравственные, этические позиции, учить взаимопониманию, конструктивному преодолению противоречий, уважению чужого мнения».

Академик А. Н. Скринский, сменивший своего учителя Г. И. Будкера на посту директора ИЯФ, в полной мере сумел сохранить заложенные им главные принципы работы института, его дух и атмосферу, умение создавать новое высокотехнологичное оборудование и стремление двигать науку вперед – всю «Вселенную Будкера». По технической оснащенности ИЯФ сегодня находится в лучшей форме за всю свою историю. При этом все мы – члены одного коллектива, так что иногда даже трудно определить, чей вклад в научную разработку больше: научных сотрудников или талантливых высококвалифицированных рабочих. Создание и поддержание такой атмосферы – одно из главных преимуществ ИЯФ, обеспечивающих его высокую конкурентоспособность. Второй огромный плюс – это мощные научные школы, вырастившие целый ряд талантливых физиков, многие из которых развезались по всему миру, но которые по-прежнему тесно связаны между собой.

*Академик П. В. Логачев,
директор Института ядерной физики
имени Г. И. Будкера СО РАН*



Будкер придумал стабилизированный релятивистский электронный пучок – ярко светящееся кольцо тоньше человеческого волоса, повисшее в пространстве, «магнитную бутылку» для удержания плазмы; сказал, как получать первые на Земле атомы «антивещества» (его нет на нашей планете). Но, наверное, самое важное его изобретение – Круглый стол – инструмент, с помощью которого удалось из самых обыкновенных людей сделать один из самых необыкновенных творческих коллективов

А. Мелик-Пашиева, 2008

2006

«НАУКА из первых рук», № 2(8)



ЭКСКУРСИЯ ПО ГОСУДАРСТВУ

S ПРОДОЛЖЕНИЕ

ИЯФ: там, где рождаются частицы

Вопрос о пределах делимости материи восходит ещё к V в. до н.э. В древности наряду с дискретной картиной мира, известной как *атомизм*, распространена была и вера в бесконечную делимость материи. Даже сам основоположник атомизма Демокрит полагал, что *атомы* — неделимые, вечные и неизменные частицы — состоят из еще более мелких, практически не имеющих размеров частей. Впрочем, полемика об этих тёмных предметах носила в античное время исключительно умозрительный характер.

Результатом экспериментального изучения строения вещества в конце XIX в. стало открытие атомного ядра и элементарных частиц. Начало новому взгляду на частицы положил Поль Дирак, разработавший в конце 1920-х гг. теорию для описания движения электрона. Она обнаружила фундаментальную симметричность материи и антиматерии, предсказав существование «антиэлектрона», обладающего массой электрона, но

противоположным зарядом. И такая частица — *позитрон* — действительно была открыта через два года.

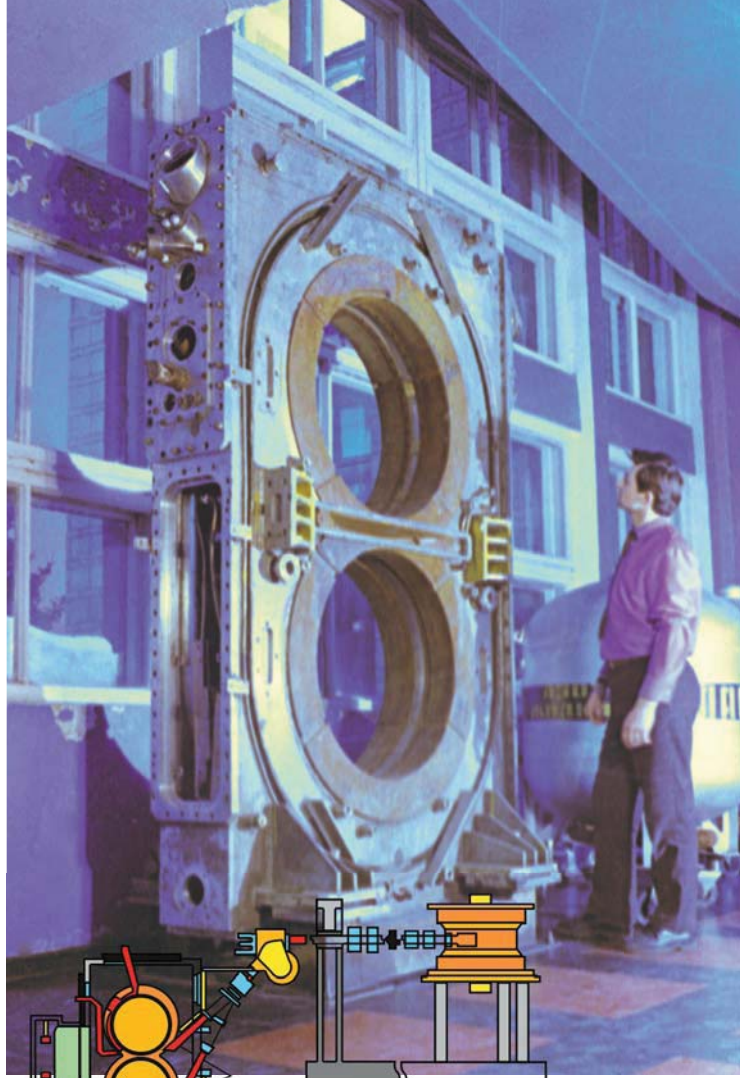
Когда стало ясно, что вся наблюдаемая материя состоит из атомов, а последние, в свою очередь — из нейтронов, протонов и электронов, физики были готовы поверить, что им наконец-то удалось отыскать последние «строительные кирпичики» мироздания, предельно малые, неделимые единицы материи.

Однако в начале тридцатых годов XX в. наступил принципиально новый этап в изучении субатомных явлений. Усовершенствование техники проведения эксперимента и разработка новых приборов детекции элементарных частиц помогли открыть новые их разновидности. Так, к 1935 г. было известно уже шесть элементарных частиц, к 1955 — восемнадцать, а к настоящему времени их известно уже более сотни. В такой ситуации применение к частицам эпитета «элементарный» является просто данью традиции.

В результате проблема делимости материи решается сегодня совершенно непредвиденным образом. Оказалось, что две частицы с высокой энергией при столкновении разбиваются на части, размеры которых, однако, оказываются не меньше размеров исходных частиц. Новые частицы возникают из кинетической энергии, задействованной в процессе столкновения. И единственный способ дальнейшего деления частиц заключается в их столкновении с использованием высокой энергии. Таким образом, мы можем снова и снова делить материю, но при этом не получать более мелких частей — новые частицы просто возникают из используемой нами энергии.

Итак, элементарные частицы одновременно делимы и неделимы. Это положение дел кажется парадоксальным до тех пор, пока мы придерживаемся идеи «строительных кирпичиков». Однако все встает на свои места, если начать воспринимать частицы как некие динамические «сущности» или, скорее, как процессы, задействующие некоторое количество энергии, заключенное в их массе. В процессе столкновения двух частиц их энергия перераспределяется и образует новый набор «сущностей». И, если кинетическая энергия столкновения была достаточно велика, новый набор может включать дополнительные частицы, которых не было в исходном.

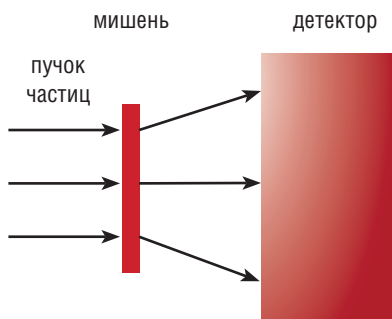
Высокоэнергетические столкновения элементарных частиц — основной метод, используемый в наше время для изучения их свойств, почему этот раздел физики носит также название *физики высоких энергий*. Высокий уровень кинетической энергии частиц достигается в огромных, окружённых в несколько миль, установках — *ускорителях* частиц, в которых они разгоняются до скорости, близкой к скорости света.



ВЭП-1 — первая экспериментальная установка ИЯФ СО РАН со встречными электронными пучками с энергией 2×160 МэВ

Что делает ребёнок, если хочет узнать, из чего состоит игрушка? Сначала он пытается разобрать её руками. Если это не удаётся, в ход идут почти научные методы: объект исследования разгоняется посредством руки и бросается в стену. Результатом могут быть осколки, которые и исследуются с помощью глаз, рук и языка. Если осколков не образуется, то эксперимент повторяется с большей энергией разгона — и так до победного конца. Аналогично работают ускорители на выведенных пучках

Схема эксперимента в физике элементарных частиц



Следующим шагом научной мысли по пути получения «осколков» элементарных частиц стали **ускорители на встречных пучках**. Представьте себе уже двух детей с одинаковыми игрушками, которые кидают их навстречу друг другу. Осколков в случае удаи будет явно больше, но точность при проведении опыта требуется не в пример выше. Один из первых подобных ускорителей был создан в 1964 г. под руководством Г. И. Будкера — первого директора института ядерной физики СО РАН

Если частицы считаются элементарными — как получаются при их столкновении какие-то осколки? В случае электрон-позитронных ускорителей сталкиваются не просто одинаковые частицы, но частица (электрон) и её античастица (позитрон). В результате аннигиляции могут родиться новые структуры, а вот они уже и дают осколки, которые можно изучить. Чем больше энергия сталкивающихся частиц, тем более тяжелые частицы могут родиться в эксперименте

Юрий Анатольевич РОГОВСКИЙ,
аспирант, старший лаборант:

Релятивистская машина

Установки со встречными пучками являются сегодня одним из основных источников информации в физике элементарных частиц и высоких энергий. При этом энергия частиц, взаимодействующих в таких ускорителях, непрерывно повышается: от 250 МэВ на первом электронном накопителе ВЭП-1 (ИЯФ СО РАН) до 2×7 ТэВ на протон-протонном ускорителе LHC, строящемся сейчас в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН).

ИЯФ обладает богатым опытом по созданию электрон-позитронных накопителей с высокой светимостью. В 1972–2000 гг. здесь успешно эксплуатировался ускоритель ВЭПП-2М с возможной энергией рождения частиц от 0,36 до 1,4 ГэВ. На ВЭПП-2М впервые в мире наблюдался процесс радиационной самополяризации пучков и внедрен в практику метод прецизионного измерения энергии

КОЛЛАЙДЕР — от collide (столкновение), ускорители заряженных частиц на встречных пучках

ВЭПП — встречные электрон-позитронные пучки

ЭЛЕКТРОН-ВОЛЬТ (эВ) — единица измерения энергии, популярная в физике высоких энергий.

1 эВ — энергия, которую приобретает электрон, пройдя потенциал в 1 В; соответствует примерно 10000 °С;

МэВ (мега-электрон-вольт) — миллион эВ; **ГэВ** (гига-электрон-вольт) — миллиард эВ;

ТэВ (тера-электрон-вольт) — миллион миллионов эВ

СВИТИМОСТЬ — важный параметр ускорителя, характеризующий число столкновений частиц в месте столкновения пучков в поперечном сечении в единицу времени. Чем больше число столкновений, тем больше шансов, что в результате «родится» что-то интересное

ОХЛАЖДЕНИЕ пучка — уменьшение скоростей элементарных частиц в системе отсчета пучка. Иными словами — мало разогнать частицы, нужно, чтобы они летели плотной группкой и не разлетались



электронов, с успехом использующийся в мире для измерения масс элементарных частиц. За эти годы комплекс претерпел несколько последовательных модернизаций, сменилось и несколько поколений детекторов элементарных частиц.

В 1999 г. в ИЯФе было принято решение о значительной модернизации комплекса ВЭПП-2М для повышения светимости и увеличения максимальной достижимой энергии до 2 ГэВ. Новый проект получил название ВЭПП-2000, где цифра 2000 означает не миллион, как думают многие, но как раз число «будущих» МэВ. Возникает резонный вопрос: зачем нужен ускоритель с такой относительно маленькой энергией, в то время как уже существуют почти в тысячу раз более мощные машины? Однако, когда нужно забить гвоздь, вы не берете для этого кувалду — гораздо удобнее воспользоваться небольшим молотком.

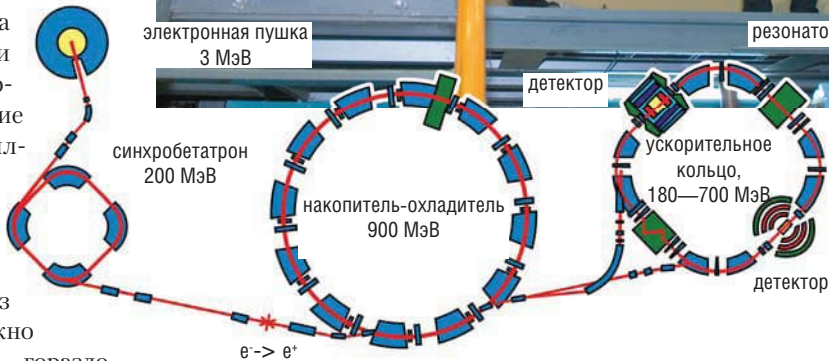
Любой современный ускоритель представляет собой сложную многокомпонентную систему, которую можно рассмотреть на примере состава комплекса ВЭПП-2000.

Во-первых, это *электронная пушка*, служащая источником электронов. Затем — *синхротетатрон*, в котором энергия электронов увеличивается от 30 до 250 МэВ. В *накопителе-охладителе БЭП* происходит накопление полученных ранее частиц с дальнейшим увеличением их энергии вплоть до 900 МэВ. И, наконец, основное ускорительное кольцо ВЭПП-2000 с периметром 24 м, где, как и во всех циклических ускорителях, движение заряженных частиц происходит по замкнутым круговым траекториям.

Как известно, заряженная частица, находящаяся в магнитном поле, движется по круговой траектории, поэтому для создания основной замкнутой орбиты в ускорителе используются *дипольные магниты* с вертикальным магнитным полем. Размеры ускорителя обычно ограничены доступным пространством, почему приходится использовать достаточно сильные магниты. Так, для достижения проектной энергии пучка в 1 ГэВ величина магнитного поля должна составлять 24 кГс, что превосходит магнитное поле Земли более чем в тридцать тысяч раз!

Для управления пучком в прямолинейных промежутках используются магниты со специальной конфигурацией магнитного поля — так называемые *квадрупольные линзы*. Такое название эти магниты заслужили из-за своего воздействия на пучок. Как обыкновенная

БЭП — накопитель электронов/позитронов на энергию до 900 МэВ



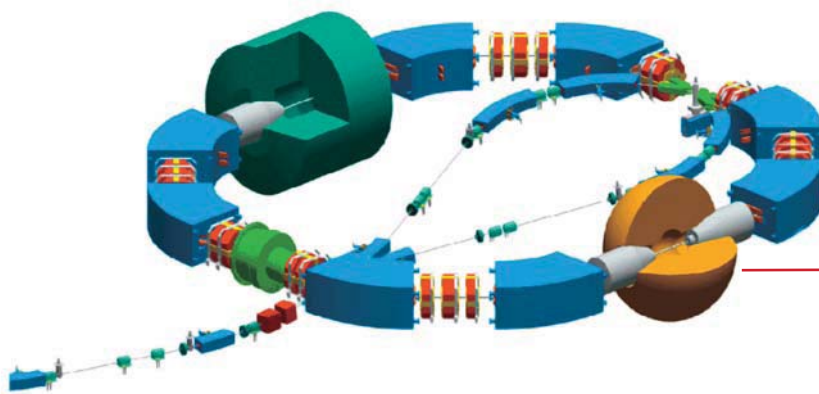
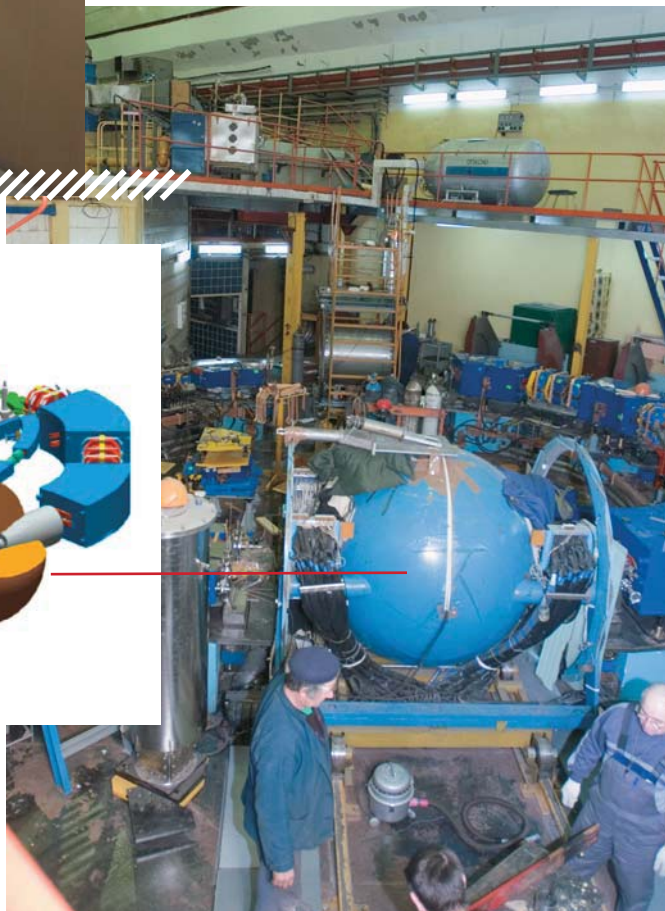
Комплекс ВЭПП-2М.
Работал в диапазоне энергий 0,4 — 1,4 ГэВ.
Максимальная достигнутая светимость — $5 \times 10^{30} \text{ см}^{-2} \times \text{сек}^{-1}$ на энергии 510 МэВ





Музейный экспонат ИЯФ — поворотный магнит ускорителя ВЭПП-2М

Детектор элементарных частиц СНД в экспериментальной промежулке вновь создаваемого ускорительного кольца ВЭПП-2000



оптическая линза преломляет световой поток, так и эти магниты способны фокусировать или дефокусировать пролетающий сквозь них пучок частиц.

Неотъемлемой частью ускорителя является *резонатор*. Это устройство, в котором происходит ускорение пучка электрическим полем, поскольку известно, что заряженная частица движется с ускорением в продольном электрическом поле. Резонатор по своему виду напоминает замкнутый цилиндр, в котором формируется электрическое поле, имеющее максимальное значение во время и в месте пролета пучка. При прохождении резонатора на каждом обороте пучок ускоряется, получая энергию маленькими порциями, и за большое количество оборотов ускоряется до скорости, мало отличающейся от скорости света.

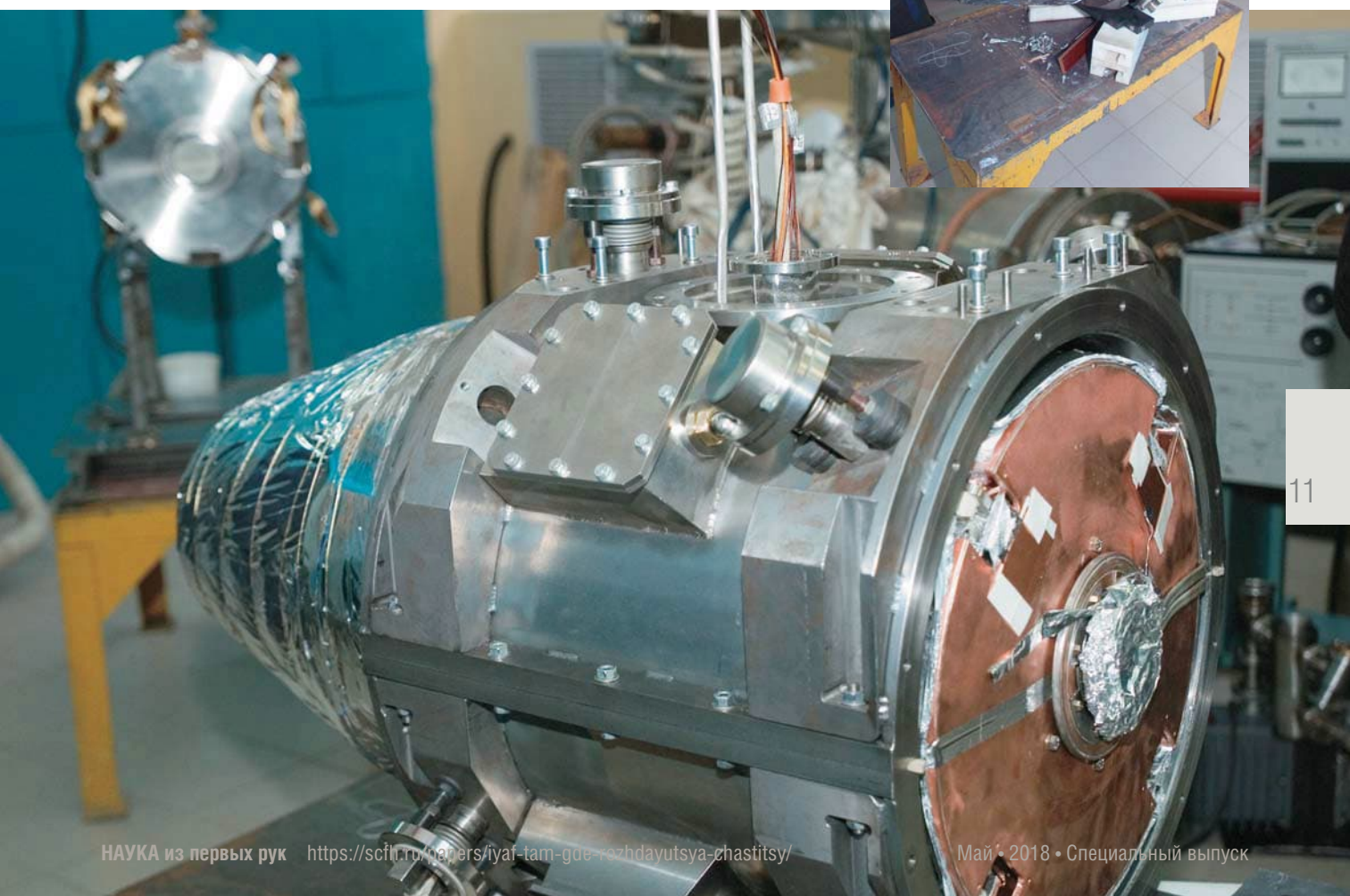
Столкновения электронного и позитронного пучков, в результате которых может родиться новая частица, происходят в двух диаметрально противоположных местах, окруженных современными *детекторами элементарных частиц*.

Особенностью ВЭПП-2000 является применение нетрадиционной оптики для достижения высокой проектной светимости $10^{32} \text{ см}^{-2} \times \text{сек}^{-1}$.

В оптической схеме ускорителя реализована концепция круглых пучков, предложенная в ИЯФ в 1989 г. Метод основан на устранении бетатронных резонансов связи поперечного движения, влияющих на динамику циркулирующих пучков, благодаря созданию дополнительного интеграла движения — продольной компоненты момента импульса. Практическая реализация этой схемы будет достигнута применением сверхпроводящих соленоидов для фокусировки пучков в месте встречи. ВЭПП-2000 будет первой в мире установкой с таким типом оптики



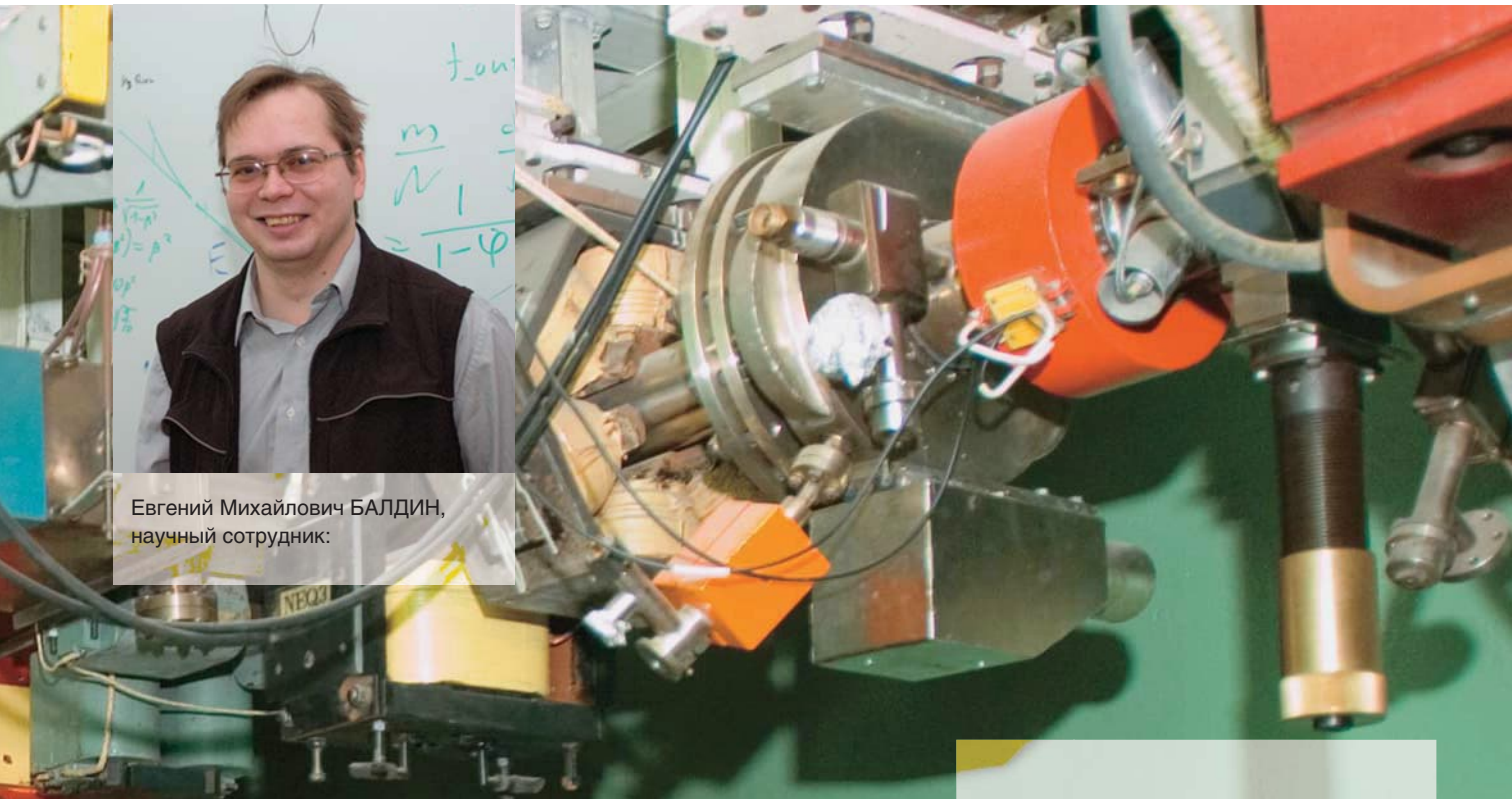
Сверхпроводящие соленоиды работают при очень низкой температуре, поэтому у каждого их блока есть буферный объем емкостью 200 л для хранения жидкого гелия (его температура — 4 °K или — 269 °C)





В так называемом ускорительном туннеле. Видны фокусирующие (красные) и дефокусирующие (синие) магниты вокруг вакуумной камеры, в которой движутся пучки элементарных частиц

Один из многочисленных геознаков — геодезических постов, необходимых для выравнивания элементов ускорителя с точностью до 100 мк



Евгений Михайлович БАЛДИН,
научный сотрудник:

Основной инструмент

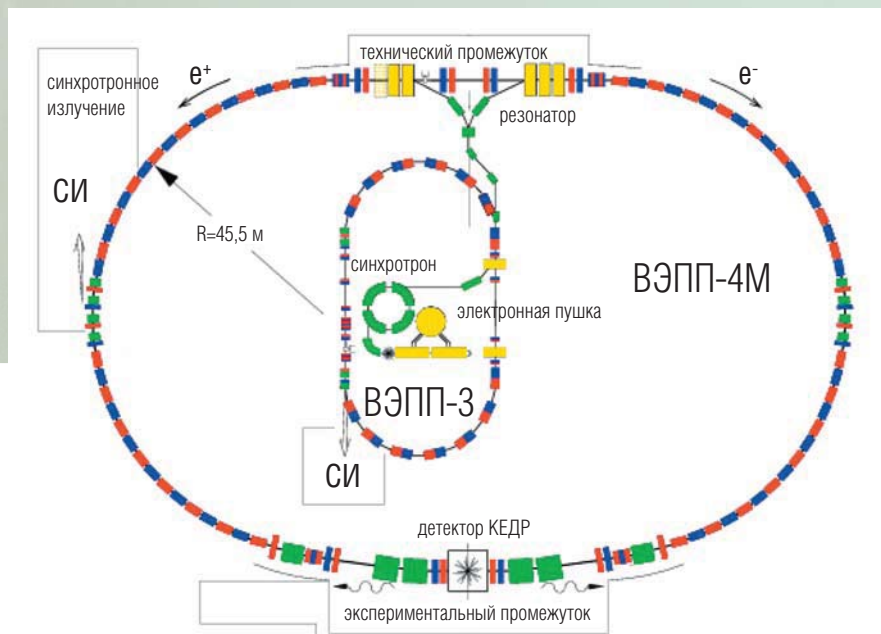
ВЭПП-4М — ускоритель на встречных электрон-позитронных пучках — представляет собой модернизированную установку, на которой ещё в 1980–1985 гг. в ИЯФе проводились исследования по физике высоких энергий. Сейчас это основной коллайдер института, на котором проводятся как эксперименты по физике высоких энергий и фотоядерные исследования, так и эксперименты с синхротронным излучением.

После 1985 г. в экспериментальном промежутке ускорителя был установлен новый детектор элементарных частиц КЕДР. Первоначально ускоритель предназначался для исследования физики Υ -мезонов (ψ -мезоны) — сложных си-

стем, составленных из тяжёлого b -кварка и его антикварка, а также и двухфотонных процессов, где вместо электронов в ускорителе сталкиваются фотоны.

Однако в последние годы было решено сконцентрировать усилия

в области энергий 3,0–3,6 ТэВ. Во-первых, в связи с возросшим интересом научного сообщества к исследованиям физики ψ -мезонов (ψ -мезонов) и τ -лептона, а во-вторых, что немаловажно, — жесткой конкуренции в области более высоких энергий. Одной





На экране монитора — фотонный «след» движущегося в ускорителе пучка частиц

Частица	$\Delta m/m$
нейтрон	4×10^{-8}
протон	4×10^{-8}
электрон	4×10^{-8}
μ	9×10^{-8}
$\pi^{+/-}$	$2,5 \times 10^{-6}$
J/ψ	4×10^{-6}
π^0	$4,5 \times 10^{-6}$
ψ'	5×10^{-6}

из отличительных особенностей ускорительного комплекса является *прецизионное измерение энергии* с помощью метода *резонансной деполяризации*, о котором будет рассказано ниже. Только благодаря этому способу удастся точно измерять массы и параметры *резонансов* — нестабильных частиц с массой, превышающей массу протона, которые рождаются только в экспериментах при наших энергиях.

$\Delta m/m$ — отношение точности измерения массы к массе, т. е. относительная точность. В экспериментальной физике ответом является не число, а число плюс/минус — «ошибка» измерения. В большинстве случаев трудозатраты по оценке точности измеряемой величины многократно превышают сложность получения самого числа. Это как в спорте, только там идет гонка за увеличением скорости/дальности, а здесь гонка за увеличением точности. Нейтрон, протон и электрон — это то, из чего состоит всё вещество на Земле. Мюоны (μ) и пионы (π) можно без особых проблем обнаружить в космических

лучах. А вот мезоны J/ψ и ψ' в достаточных для изучения количествах рождаются только на эксперименте. Наиболее точные измерения масс J/ψ - и ψ' - мезонов были проведены в новосибирском Институте ядерной физики СО РАН. Точные измерения масс этих частиц позволяют создать надежную энергетическую шкалу в этой области энергий, что способствует дальнейшему увеличению точности измерения параметров элементарных частиц. Теория в этой части физики пока далека от завершения. Элементарные частицы являются самыми простыми объектами, изучаемыми физикой, но до сих пор многие вещи предсказать не получается; например, до сих пор непонятно, почему массы частиц именно такие. А правильность той или иной теории можно проверить только экспериментом



Иван Борисович НИКОЛАЕВ,
младший научный сотрудник:

Запредельная точность

Эксперименты по сверхточному определению масс элементарных частиц требуют и суперточной системы измерения энергии пучков электронов и позитронов, сталкивающихся в коллайдере. Один из таких методов — *метод резонансной деполяризации* — был предложен в нашем институте ещё в 1975 г. С его помощью были измерены массы элементарных частиц из класса мезонов, сейчас же идет работа над измерением массы τ -лептона.

Суть метода резонансной деполяризации заключается в следующем. Заряженные частицы (в нашем случае — электроны) в ускорителе движутся по круговой орбите со скоростью всего лишь на сорок миллиардных меньше скорости света, составляющей, как известно, около 300 000 км/час. При таком движении они излучают *фотоны* — кванты света. Это излучение называется *синхротронным*. Кроме того, в ускорителе электроны образуют своеобразные сгустки, в каждом из которых содержится примерно десять миллиардов частиц.

Каждый электрон представляет собой маленький вращающийся

волчок. Это вращение невозможно ни ускорить, ни замедлить, поэтому у него есть даже специальное название — *спин*. В ускорителе само направление вращения *прецессирует* (вращается) вокруг направления магнитного поля ускорителя, причем скорость этого вращения зависит от энергии электрона. Поэтому, измеряя скорость прецессии спина, можно измерить энергию самих элементарных частиц.

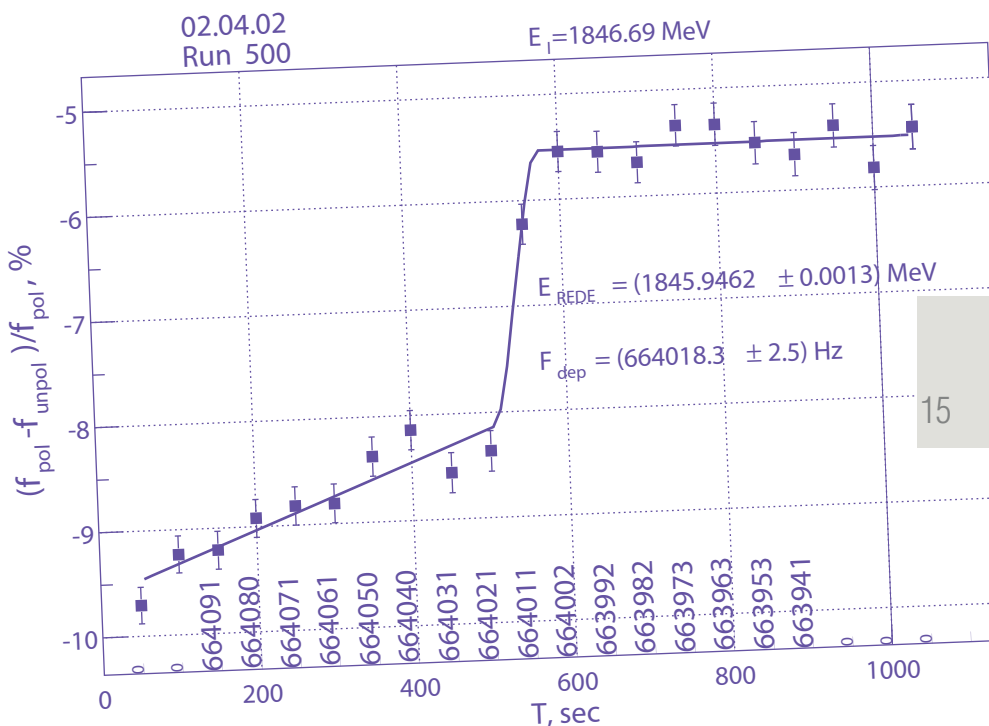
Спины всех электронов в пучке «смотрят» в разные стороны, и «увидеть» вращение отдельного электрона невозможно. И вот здесь на помощь приходит синхротронное излучение. Благодаря его действию спины электронов постепенно

выстраиваются примерно в одном направлении — против направления магнитного поля: происходит, как говорят, поляризация сгустка. В ИЯФе электроны сначала поляризуются примерно в течение часа на ускорителе ВЭПП-3, а затем уже поляризованными перепускаются в ВЭПП-4М.

Когда спины всех десяти миллиардов электронов начинают смотреть в одну сторону, поляризацию и скорость прецессии спина можно уже измерять. На сгусток воздействуют переменным электрическим или магнитным полем, создаваемым специальным устройством — *деполяризатором*. Когда частота этого поля достигает определенного

В наших измерениях мы используем два сгустка электронов, один из которых поляризован, и сравниваем интенсивности рассеяния электронов внутри сгустков. Резкий скачок относительной разности количества рассеявшихся электронов в поляризованном сгустке по сравнению с неполяризованным соответствует моменту деполяризации сгустка. Подписи под точками показывают энергию электронов в пучке, соответствующую данной частоте деполяризатора.

Точность измерения энергии составляет 1—2 кэВ — всего одну миллионную от энергии самого пучка



значения, происходит деполяризация сгустка — спины всех электронов снова направлены в разные стороны.

Поляризацию электронов можно отследить по процессу рассеяния электронов друг на друге внутри сгустка, поскольку часть электронов выбивается из него и, сделав один-два оборота по кольцу ускорителя,

«падает» на стенки. Регистрируя с помощью счетчиков такие электроны, можно по незначительному (всего 1–2 %) изменению их количества определить момент разрушения поляризации, а значит, и частоту прецессии спина. А посчитать после этого энергию самих элементарных частиц в пучках — уже дело техники.

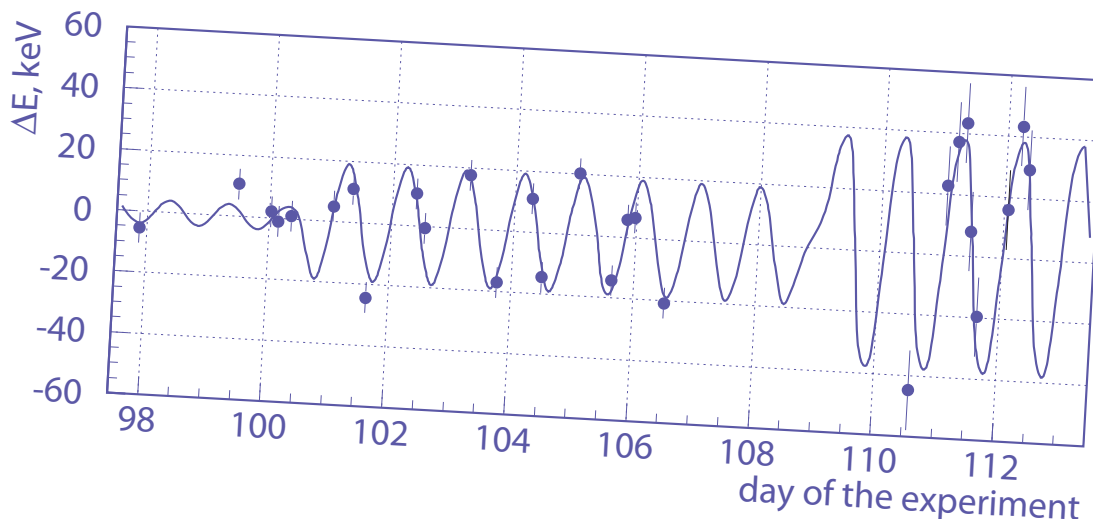


График колебаний энергии, достигнутой в ускорителе. По оси ординат указано расхождение между энергией измеренной и предсказанной, по оси абсцисс — время в сутках. Хорошо видна выраженная суточная динамика. Заметный рост амплитуды колебаний связан с весенним сезоном: сначала оттаяла одна половина ускорителя, затем — другая. Сибирь — не Швейцария!

Е. М. Балдин:

Просто — КЕДР



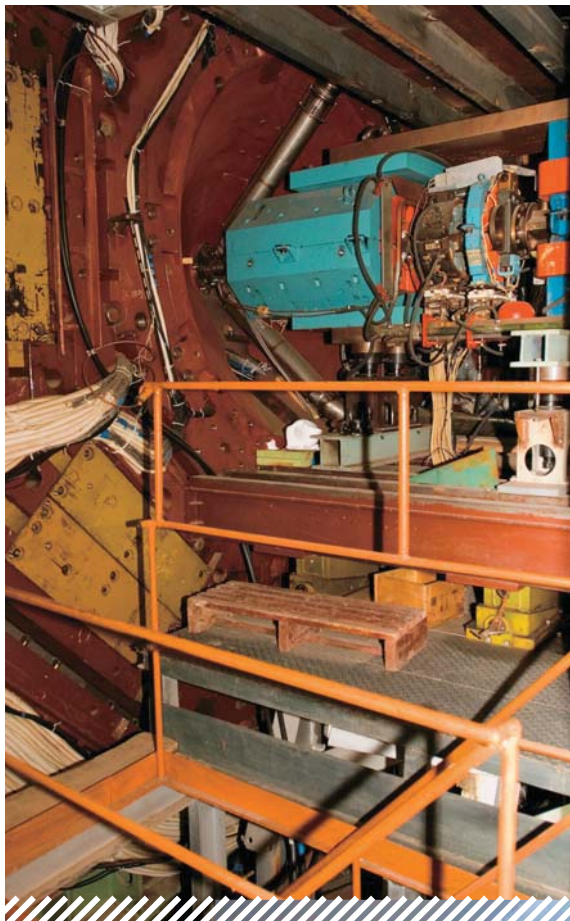
КЕДР

Почему детектор называется именно так, история ИЯФа умалчивает. «КЕДР» — просто имя, как у человека.

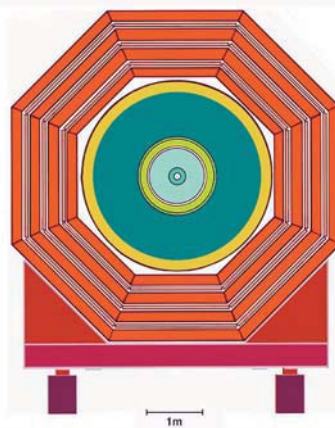
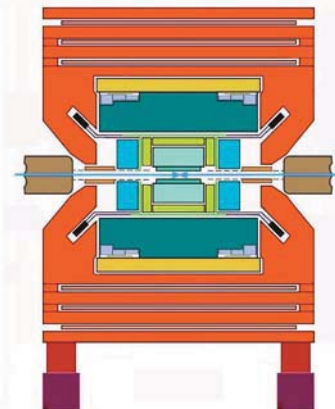
КЕДР — классический детектор элементарных частиц. Хотя в учебник включай: в той или иной степени в нем присутствуют все части или системы, из которых и состоят современные детекторы.

Детектор подобен матрешке: каждая из систем включает внутри себя предыдущую. В самом центре находится «место встречи»: место, где сталкиваются электронный и позитронный пучки, где может родиться новая частица. Родившись, она через некоторое время распадается. Судить о том, что произошло, мы можем только по относительно стабильным осколкам, которые долетают до систем детектора. Поэтому, чтобы сложить эту своеобразную «мозаику», все осколки надо зарегистрировать, измерить их параметры и идентифицировать.

Чтобы узнать об «осколке» все, достаточно измерить его импульс и энергию, но сделать это нужно с высокой точностью. Так как точность измерения всегда имеет свои пределы, то, чтобы облегчить жизнь при



- Вершинный детектор
- Дрейфовая камера
- Аэрогелевые счетчики
- Сцинтилляционные счетчики
- LKг калориметр
- CsI калориметр
- Мюонная система
- Сверхпроводящая катушка
- Ярмо магнита

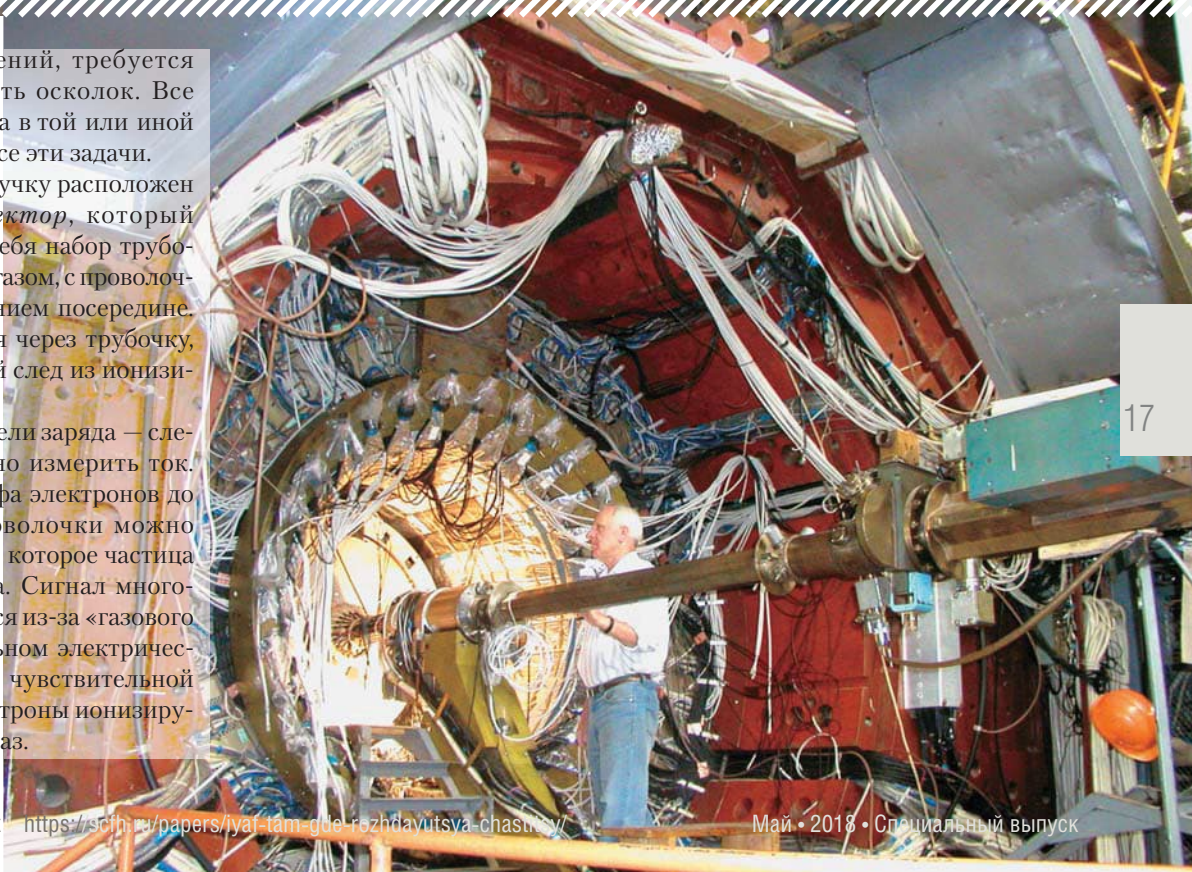


Детектор в рабочем (закрытом) состоянии во время сборки/разборки

анализе наблюдений, требуется идентифицировать осколок. Все системы детектора в той или иной степени решают все эти задачи.

Ближе всего к пучку расположен *вершинный детектор*, который представляет из себя набор трубочек, заполненных газом, с проволочкой под напряжением посередине. Частица, пролетая через трубочку, оставляет за собой след из ионизированного газа.

Если есть носители заряда — следовательно, можно измерить ток. По времени дрейфа электронов до центральной проволоочки можно найти расстояние, которое частица прошла от центра. Сигнал многократно усиливается из-за «газового усиления»: в сильном электрическом поле рядом с чувствительной проволочкой электроны ионизируют окружающий газ.



Виктор Сергеевич БОБРОВНИКОВ, младший научный сотрудник:

Легкий, как перышко

АЭРОГЕЛЬ — песок, правда, весьма необычный. Своим внутренним строением он напоминает обычную губку и является довольно хрупким материалом. Шарики кварца нанометровой величины, из которых состоит песок, в аэрогеле соединяются в цепочки. Они в свою очередь образуют сложные трехмерные конструкции, пространство между которыми заполнено воздухом.

Из-за своей пористой структуры аэрогель хрупок, зато обладает отличными теплоизоляционными свойствами. Даже если вы будете нагревать одну сторону блока аэрогеля газовой горелкой, а рукой прикоснетесь к противоположной стороне — вы ничего не почувствуете. Однако использовать его в быту нерационально из-за высокой стоимости. В коробках из под обуви можно найти лишь «младшего брата» аэрогеля — *силикогель*, вещество со сравнимой пористой структурой, которое способно активно поглощать влагу и применяется там, где нужно «высушить» воздух.

Поскольку цепочки кварца в аэрогеле можно располагать различным способом, плотность его может меняться в широких пределах. Показатель преломления аэрогеля, напрямую зависящий от его плотности, для производимого в Новосибирске вещества варьирует в пределах от 1,01 до 1,13. Поэтому в обычных условиях аэрогель занимает место между газами и твердыми телами, являясь в своем роде уникальным материалом.

Зачем нужен аэрогель в Институте ядерной физики? В детекторе КЕДР в так называемых *черенковских счетчиках* для идентификации частиц в нужном диапазоне импульсов требуется материал с показателем преломления 1,05. И использовать для этих целей аэрогель, по сути, — единственно возможное решение. В результате выполнения проекта по созданию аэрогелевых черенковских счетчиков Институтом катализа им. Г. К. Борескова совместно с ИЯФом был создан аэрогель с высокой оптической прозрачностью, не уступающий зарубежным аналогам, а зачастую и превосходящий их.

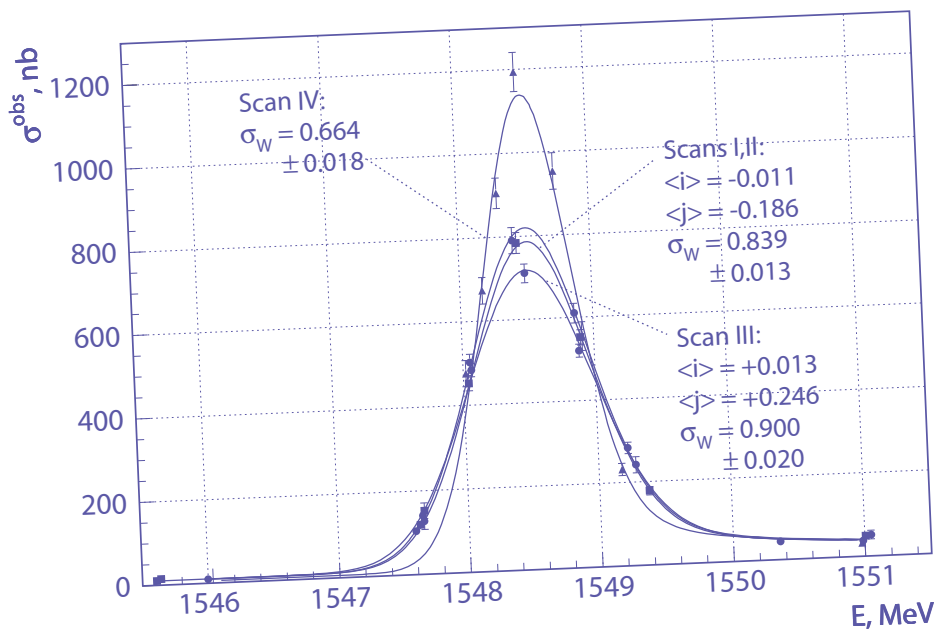
Дрейфовая камера работает примерно на том же принципе, что и вершинный детектор, только все проволочки-электроды расположены в одном большом объеме. Часть проволочек создают поле, в котором «дрейфуют» электронные «следы» от пролетевших частиц, а часть проволочек используется для измерения токового сигнала. (Оцените общее число проволочек из следующего факта: чтобы избежать провисания, их натягивали каждую с силой около 100 г, а в результате общее давление на торцы оказалось равным 2,5 т!) Так как дрейфовая камера находится в сильном магнитном поле, то по радиусу кривизны траектории частицы можно определить импульс.

Общеизвестно, что быстрее света ничто перемещаться не может. Есть только одно *но*: скорость света в веществе меньше скорости света в вакууме. Поэтому высокоэнергетичная элементарная частица, пролетая через объем, заполненный веществом, может превысить скорость света. В этом случае возникают своеобразные «ударные световые волны», которые можно зарегистрировать с помощью аэрогелевых *черенковских счетчиков*. Эта система позволяет отделить тяжелые частицы, скорость которых не превышает скорость света в веществе счетчика аэрогеле, от легких, имеющих при том же импульсе большую скорость.

Время-пролетная система представляет собой пластины из прозрачной сцинтиллирующей пластмассы, которые просматриваются с помощью фотоумножителей. Пролетая, частица оставляет часть своей энергии в пластмассе. Часть потерянной энергии в сцинтилляторе преобразуется в видимый свет, который можно зарегистрировать.

Старший научный сотрудник к. ф.-м. н. Е. А. Кравченко тщательно очищает поверхность блока аэрогеля перед оптическими измерениями





Прецизионное измерение массы J/ψ -мезона.
Показаны четыре сканирования в области энергии J/ψ мезона с разными параметрами пучка

Сигнал мало получить — его надо оцифровать!
Здесь, в машзале детектора, аналоговый сигнал превращается в «цифру»



Кроме определения времени пролета частиц от места встречи до счетчика, эта система используется также для запуска процесса «считывания» состояния детектора, так как она из всех самая быстрая.

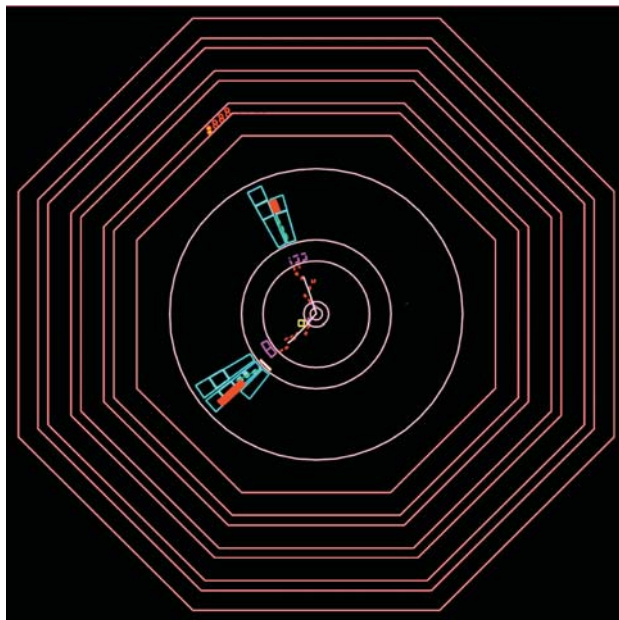
Для измерения энергии частиц служат *калориметры*. Кроме измерения энергии эти системы используются и для выяснения координат фотонов, не оставляющих «следов» в вершинном детекторе и дрейфовой камере. В детекторе КЕДР используются два типа калориметров: *торцевой калориметр* на основе неорганических кристаллов CsI и *баррельный калориметр* на жидком криптоне (LKг-калориметр).

Попадая в вещество, частица может терять энергию. Часть потерянной энергии в торцевом калориметре преобразуется в видимый свет, собираемый с помощью фотоумножителей. В LKг-калориметре потерянная энергия частично идет на ионизацию атомов криптона. Получившиеся в результате электроны и ионы можно собрать простым способом — подав потенциал на электроды. Полученный в результате электронный сигнал дает хорошую оценку для энергии.

LKг- калориметр находится внутри *сверхпроводящего соленоида* — большой катушки (диаметр три с половиной метра, длина четыре метра), создающей магнитное поле в детекторе. Для того, чтобы магнитное поле не выходило за пределы детектора, сверху все «одевается» в железное ярмо магнита.

А в самом железе скрывается еще одна система детектора — *мюонная*. Некоторые короткоживущие частицы разваливаются, не долетев до детекторного объема, часть их полностью теряет свою энергию в калориметрах (электроны и фотоны заведомо), часть вообще не детектируется (нейтрино). А вот мюоны хотя и оставляют «след» в детекторе, но норовят улететь за его пределы и унести часть энергии с собой. Поэтому если мюонная система что-то зарегистрировала, то это скорее всего был мюон или космическая (т. е. прилетевшая извне) частица.

Кстати сказать, фон от космических частиц — проблема при проведении эксперимента, так как он может имитировать «полезный» сигнал. Но в то же время космические частицы позволяют проверить работоспособность всех систем детектора, не включая ускоритель. Даже в «помехе» можно найти что-то полезное.



Реальное экспериментальное событие, «пойманное» детектором. Результат столкновения двух пучков электронов: $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$. Далее один τ -лептон распадается на электрон и два нейтрино, а второй — на мюон и два нейтрино

Внутренние внешние хранилища LKr-калориметра: в экспериментах на КЕДРе используется огромное количество жидкого криптона — 27 тонн!

Хотя детектор КЕДР был создан довольно давно, он до сих пор является вполне современной установкой, так как при создании в него были заложены самые передовые на то время идеи и технологии. Можно сказать, что детектор был по-настоящему экспериментальным: на нем обкатывались технологии, которые теперь используются во многих современных детекторах. Например, опыт, полученный при создании LKr калориметра, очень помог при создании калориметра на жидком аргоне для крупнейшего детектора ATLAS (ЦЕРН); отработано уникальное производство аэрогеля для черенковских счетчиков; наработки в электронике привели к созданию малодозной рентгеновской установки.

Ближих по параметрам к КЕДРу аналогов в России нет и в обозримом будущем не предвидится. Даже в смысле отработанных методик и проверенных идей КЕДР уже внес лепту в мировую физику, но этого для нас мало — надо ориентироваться на физику в целом. *Эксперимент должен продолжаться...*



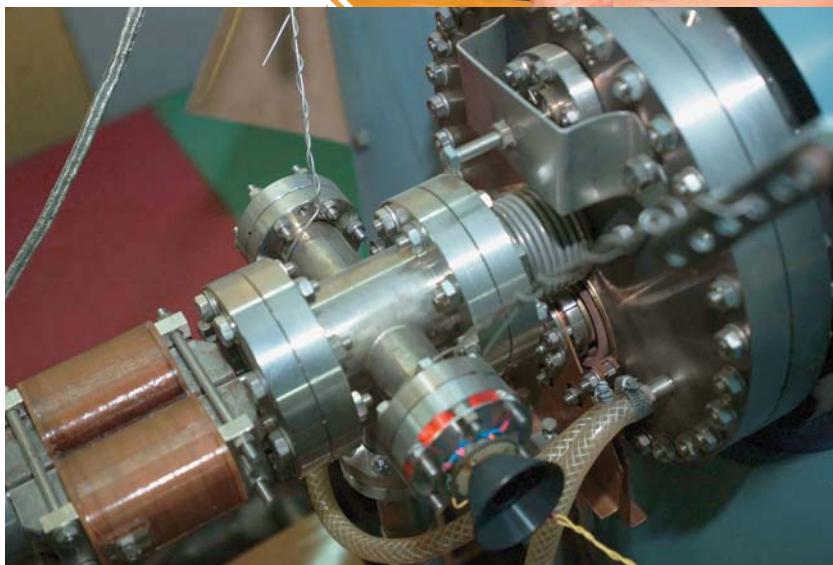
Будущее строится сегодня

Основная задача строящегося в ИЯФе инжекционного комплекса ВЭПП-5 — производство интенсивных позитронных и электронных сгустков для обеспечения эффективной работы установок на встречных электрон-позитронных пучках (ВЭПП-4М и ВЭПП-2000).

Современные источники позитронов, используемые в ускорительной технике, работают по принципу, впервые реализованному в 50-х гг. прошлого века в Стэнфорде. Интенсивный электронный пучок линейного ускорителя, сфокусированный на мишени из материала с высоким атомным номером, генерирует электромагнитный ливень. Рожденные в ливне позитроны выходят из мишени с большим угловым и энергетическим разбросом, поэтому лишь небольшая их часть с помощью импульсного магнита согласующего устройства попадает во второй линейный ускоритель. Начало этого ускорителя помещено в сильное магнитное поле, благодаря которому позитроны удерживаются на оси ускоряющей ВЧ-структуры до тех пор, пока они не приобретут достаточно большой продольный импульс и, следовательно, малый разброс по углам и энергиям. В остальной части ускорителя используется сильная фокусировка квадрупольными линзами, надетыми на ускоряющие структуры.

На каждые 30 электронов, падающих в конверсионную мишень, удастся получить в среднем лишь один ускоренный до нужной энергии позитрон. В экспериментах на встречных пучках в коллайдерах необходимо иметь как можно большее количество частиц в каждом из сталкивающихся сгустков, поэтому инжекционный комплекс разработан для производства электронов и позитронов в накопительном режиме.

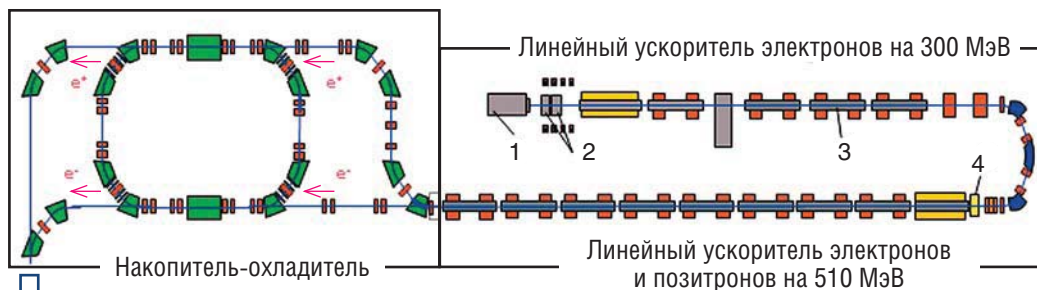
Татьяна Викторовна РЫБИЦКАЯ, аспирант, старший лаборант



Узел конверсионной системы — источника позитронов

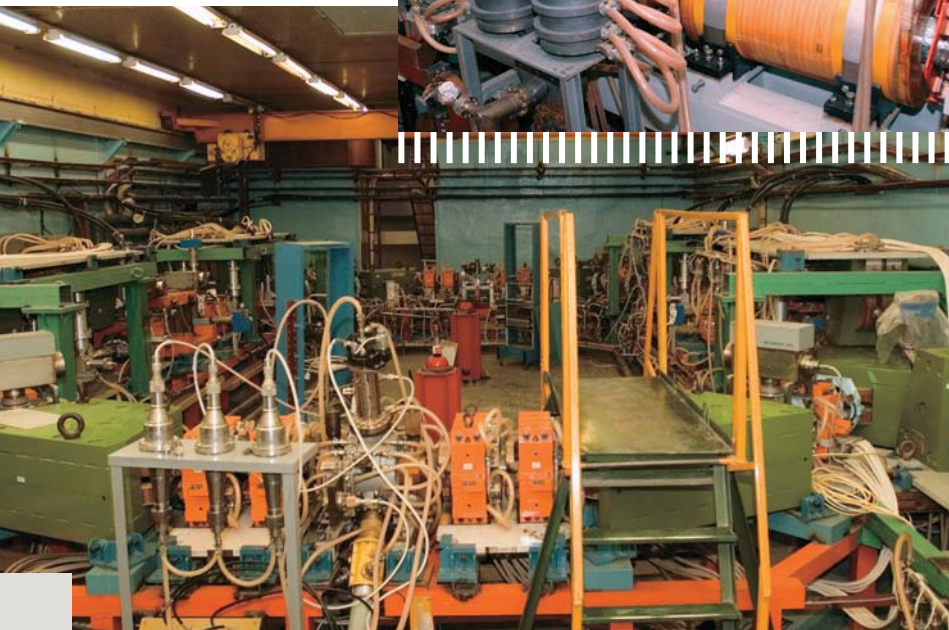
На сегодня комплекс ВЭПП-5 состоит из двух *линейных ускорителей* и *накопителя-охладителя*.

Электроны из первого ускорителя после поворота в магнитном поле на 180° попадают на *конверсионную мишень* и производят позитроны, часть из которых затем ускоряется до 510 МэВ во втором ускорителе. Перед позитронной мишенью установлены два импульсных магнита, отклоняющие электроны в противоположных направлениях на небольшой угол. Это позволяет осуществить параллельный перенос электронного пучка и направлять отдельные электронные сгустки мимо мишени во второй ускоритель, настроенный в этом случае для ускорения электронного сгустка с 300 МэВ до 510 МэВ. Затем каждый из ускоренных электронных или позитронных сгустков запускается в циклический накопитель-охладитель



ВЭПП-4М
ВЭПП-2000

- 1 — электронная пушка
- 2 — система группировки пучка
- 3 — ускоряющая секция
- 4 — конверсионная мишень



Ю.А. Роговский:
В состав оборудования современных ускорителей входят системы наблюдения и измерения параметров пучка, т.к. их электронная оптика нуждается в постоянной точной настройке. Подобное оборудование используется уже на этапе отладки накопителя для изучения характеристик магнитной системы. Затем его используют для изучения размеров сгустка, причин потери накопленных электронов и т.п. Наконец, уже в двухпучковом режиме исследуется влияние эффектов электромагнитного взаимодействия пучков (эффекты встречи) на их оптические функции и поперечный размер.

Для измерения параметров пучка используются методы, не приводящие к возмущению, и, тем более, к потере частиц в пучке, поскольку большое время жизни (в течение десятков или тысяч оборотов сгустка частиц на орбите) является одним из главных условий проведения экспериментов со встречными пучками.

Для измерения параметров пучка используются методы, не приводящие к возмущению, и, тем более, к потере частиц в пучке, поскольку большое время жизни (в течение десятков или тысяч оборотов сгустка частиц на орбите) является одним из главных условий проведения экспериментов со встречными пучками.

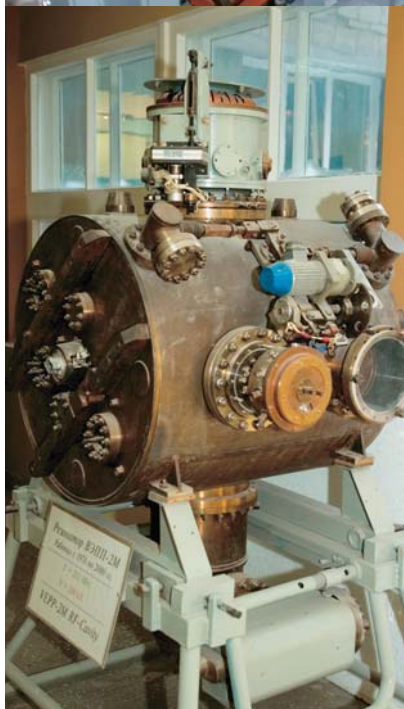
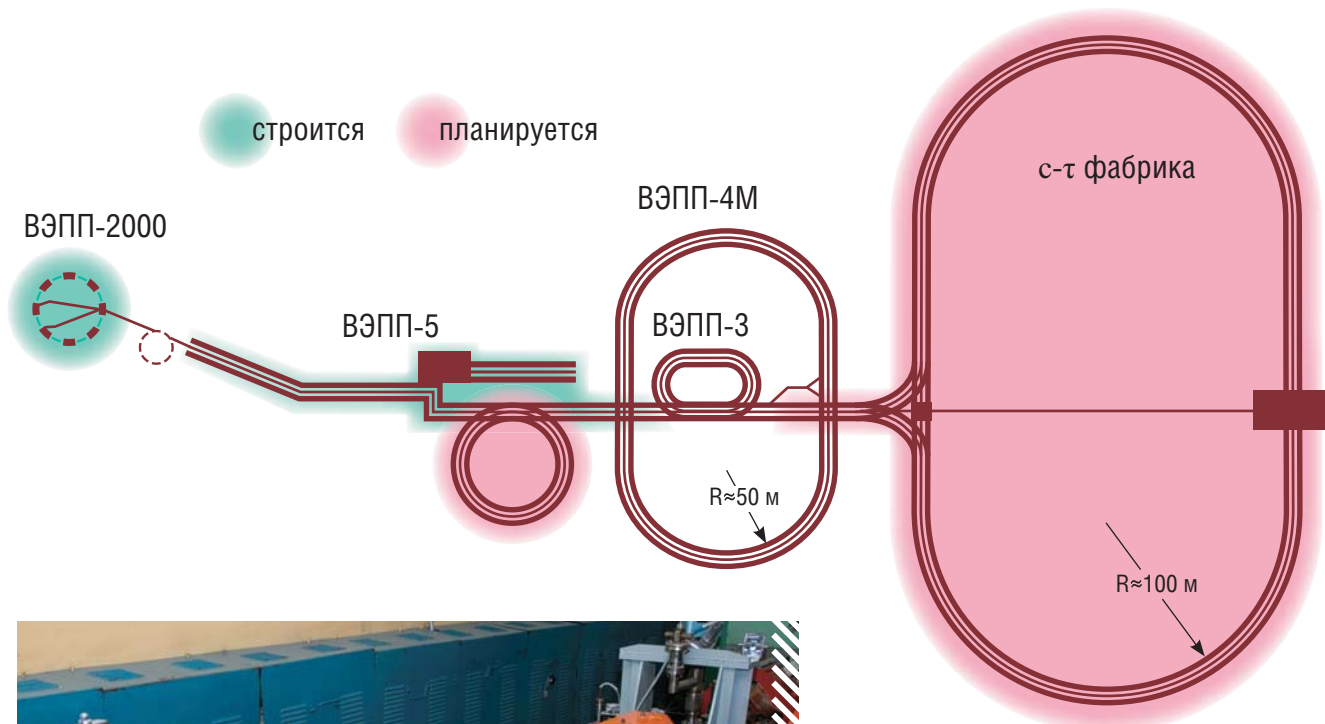
В этом смысле ценную информацию о пучке может дать так называемое синхротронное излучение (СИ), которое испускается заряженной частицей при движении по криволинейной траектории в вакуумной камере. Для СИ свойственна не только высокая интенсивность, но и монохроматичность и малая угловая расходимость, что позволяет широко использовать его для оптической диагностики. Но здесь мы вторгаемся уже в физику синхротронного излучения — другого научного направления и теме будущих публикаций

Циклический накопитель-охладитель — устройство, где сгусток циркулирует по замкнутой траектории и где через определенное количество оборотов к нему добавляется очередная порция электронов или позитронов из линейного ускорителя.

Кроме накопления частиц здесь осуществляется так называемое *охлаждение* пучка. При движении релятивистских заряженных частиц в магнитном поле по искривленным траекториям появляется синхротронное излучение и, соответственно, — сила, направленная против полной скорости частицы.

Средние потери продольного импульса частиц компенсируются в установке за счет ВЧ-резонатора, а радиационное трение приводит к постепенному затуханию поперечных компонент импульса.

Хаотическая скорость частиц уменьшается — пучок охлаждается



Большому кораблю — большое плаванье!

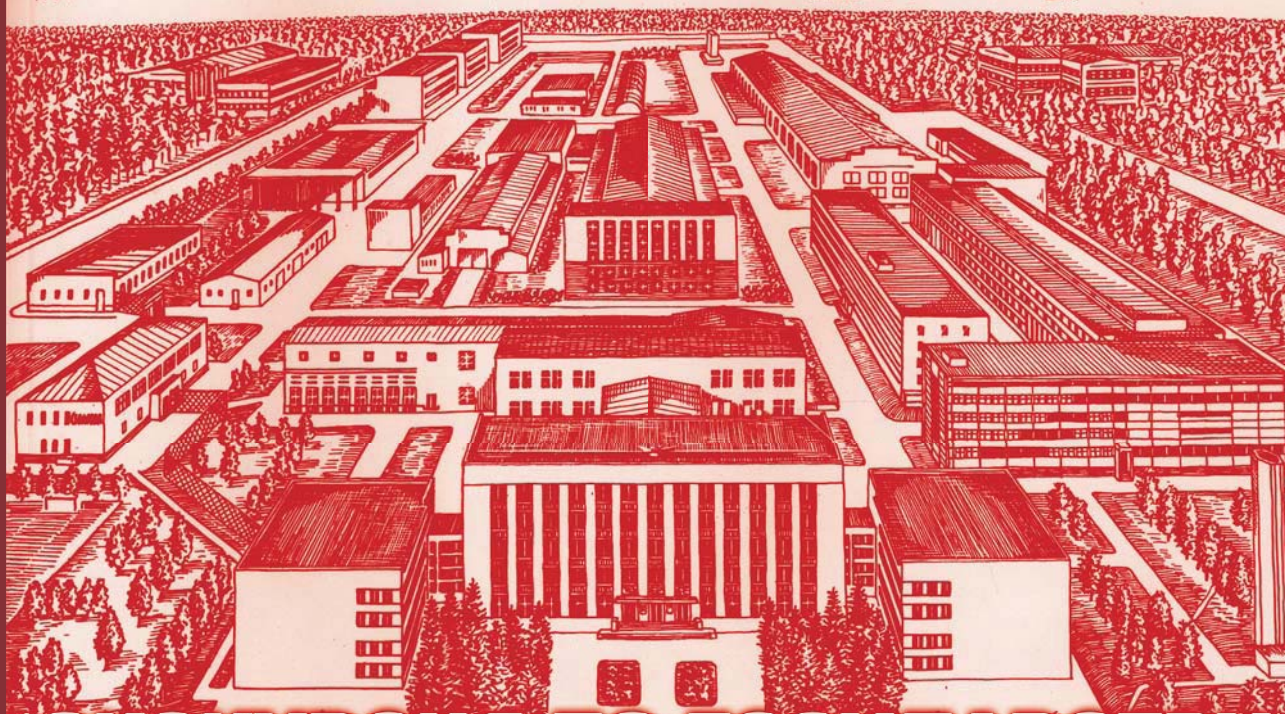
Вот и закончилась наша очередная экскурсия по новосибирскому Институту ядерной физики СО РАН — флагману в физике высоких энергий и ускорителях. Несмотря на не самые лучшие для науки времена, то, что есть — работает, что возможно — делается. И, конечно, есть то, о чем мечтается.

Ускорительщики ИЯФа могут сделать многое — об этом беспристрастно свидетельствуют эффективно работающие современные зарубежные установки, коллайдеры и детекторы, в которые вложено немало идей и труда *наших* ученых. Пусть пока у них маловато ресурсов для себя — мечтать это не мешает. На схеме настоящих и будущих ускорительных установок ИЯФа изображен прототип новой машины, делать пучки для которой должен строящийся сегодня ВЭПП-5. Хочется, чтобы эти планы стали реальностью в обозримом будущем. Все-таки наши люди неисправимые оптимисты — они верят, что мечты сбываются. И реалисты — потому что знают, что в их осуществление им придется вкладывать не только свои ум и силы, но и душу. К этому они готовы...



2017

«НАУКА из первых рук», № 2/3(74)

**ИЯФ**

ВЫРОС ИЗ ЛЕСА ВМЕСТО ГРИБОВ

В середине XX в. физики впервые заговорили об ускорителе на встречных пучках. Однако подавляющее большинство ученых всего мира, уверенные в фантастичности этой концепции, встретили ее скептически. Но Андрей Михайлович Будкер, в то время работавший в московском Институте атомной энергии АН СССР, вернулся с Международной конференции по физике высоких энергий, проходившей в Женеве в 1956 г., вдохновленный этой идеей. Была организована группа молодых ученых, которые занялись созданием электрон-электронного ускорителя-коллайдера ВЭП-1. Ускоритель начал строиться еще в Москве, но первые встречные электронные пучки были получены уже в Институте ядерной физики СО АН СССР в Новосибирске

Ключевые слова: Институт ядерной физики, Будкер, ускорители частиц, ВЭП-1, ВЭПП-2, Большой адронный коллайдер, ЦЕРН.

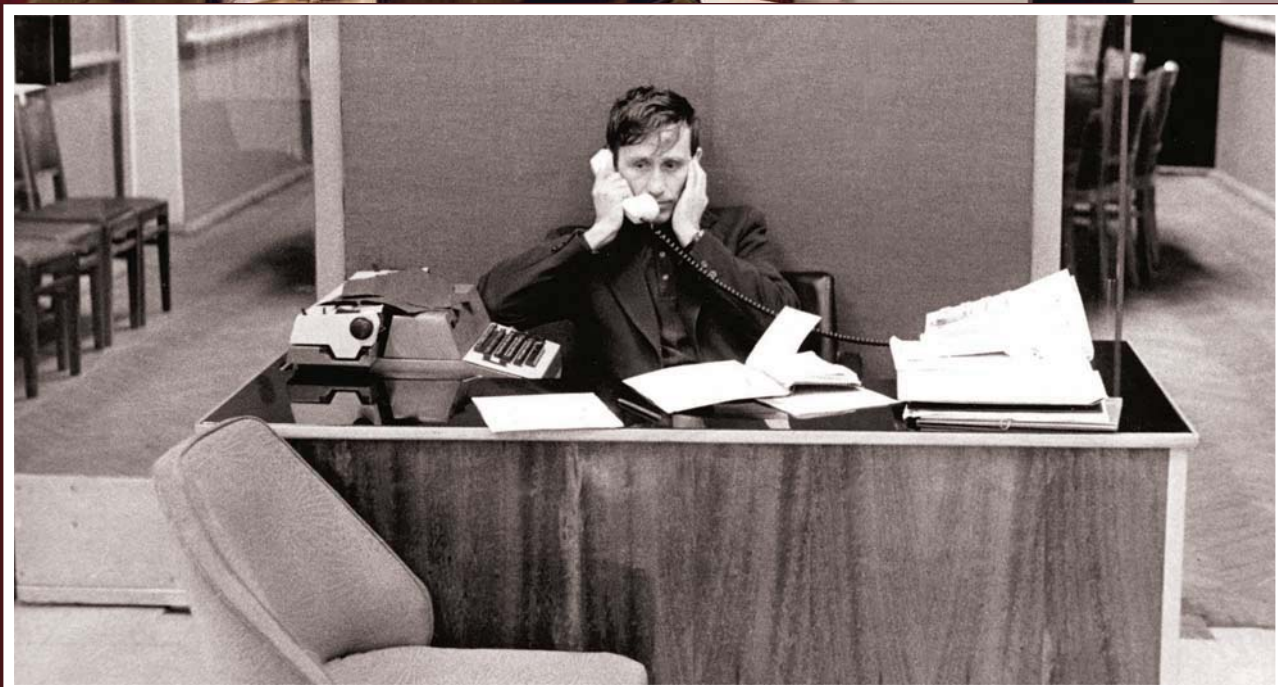
Key words: Institute of Nuclear Physics, Budker, particle accelerators, VEP-1, VEPP-2, Large Hadron Collider, CERN

© А. Н. Скринский, 2017

Я узнал об Андрее Михайловиче Будкере и его лаборатории новых методов ускорения в Институте атомной энергии, когда заканчивал 4-й курс физфака МГУ. Пора было решать, куда идти на преддипломную практику. Семья одной моей одногруппницы дружила с профессором И. И. Гуревичем, который и посоветовал мне защищать диплом у Андрея Михайловича.



Академик
А. Н. Скринский





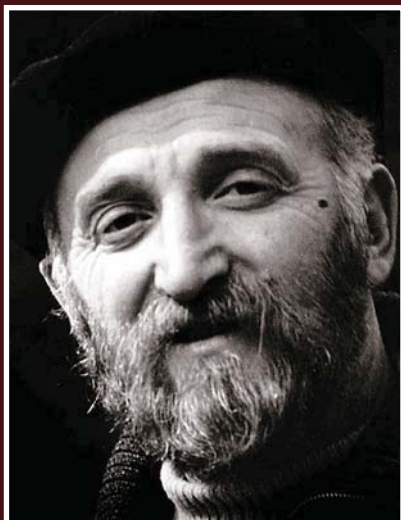
СКРИНСКИЙ Александр Николаевич – академик РАН, доктор физико-математических наук, научный руководитель Института ядерной физики СО РАН (г. Новосибирск). Действительный член Американского физического общества и иностранный член Королевской академии наук Швеции. Лауреат Ленинской премии (1967), Государственной премии СССР (1989), Государственной премии РФ (2001), Демидовской премии (1997), а также премий им. Р. Р. Вилсона Американского физического общества и им. А. П. Карпинского (Фонд Топфера, Германия). Награжден золотыми медалями РАН им. В. И. Векслера (1991) и им. П. Л. Капицы (2004), орденами Трудового Красного Знамени (1975), Октябрьской Революции (1982), «За заслуги перед Отечеством» IV степени (1996), «За заслуги перед Отечеством» III степени (2000), «За заслуги перед Отечеством» II степени (2007). Лауреат Государственной премии Российской Федерации (2006). Автор и соавтор более 300 публикаций по физике ускорителей и физике высоких энергий

«Из далекой холодной Сибири шлем самые теплые поздравления открывателю третьего поколения лептонов в связи с присуждением Нобелевской премии» – такое поздравление вместе с рисунком Ефима Бендера отправил ученый совет ИЯФ американскому физiku Мартину Перлу, открывшему ряд элементарных частиц, включая кварки

Я решил, что в конце лета пойду на собеседование к Будкеру в его лабораторию, а пока вместе с друзьями отправился в туристический поход на Северный Байкал. Поход был трудным и занял три недели, так что я еле успел на собеседование. Но в лабораторию практикантом меня взяли.

Три месяца я проработал с Борисом Валериановичем Чириковым, а потом Андрей Михайлович пригласил меня в микрогруппу заниматься встречными пучками. Как раз в то время Будкер подбирал молодежь для работы над созданием первого в мире ускорителя на встречных электронных пучках. Так я и еще несколько человек стали активно заниматься всеми задачами, которые пришлось решать при развитии направления встречных пучков.

Тогда за подобную работу – создание ускорителя на встречных пучках – взялся десяток лабораторий по всему миру, но к финишу пришли только мы и Стэнфордский университет.



ВЭП-1 – теперь историческая реликвия и музейный экспонат. Рядом – участники запуска первого ускорителя на встречных пучках (слева направо): Г. Н. Кулипанов, С. Г. Попов, А. Н. Скринский, Г. М. Тумайкин

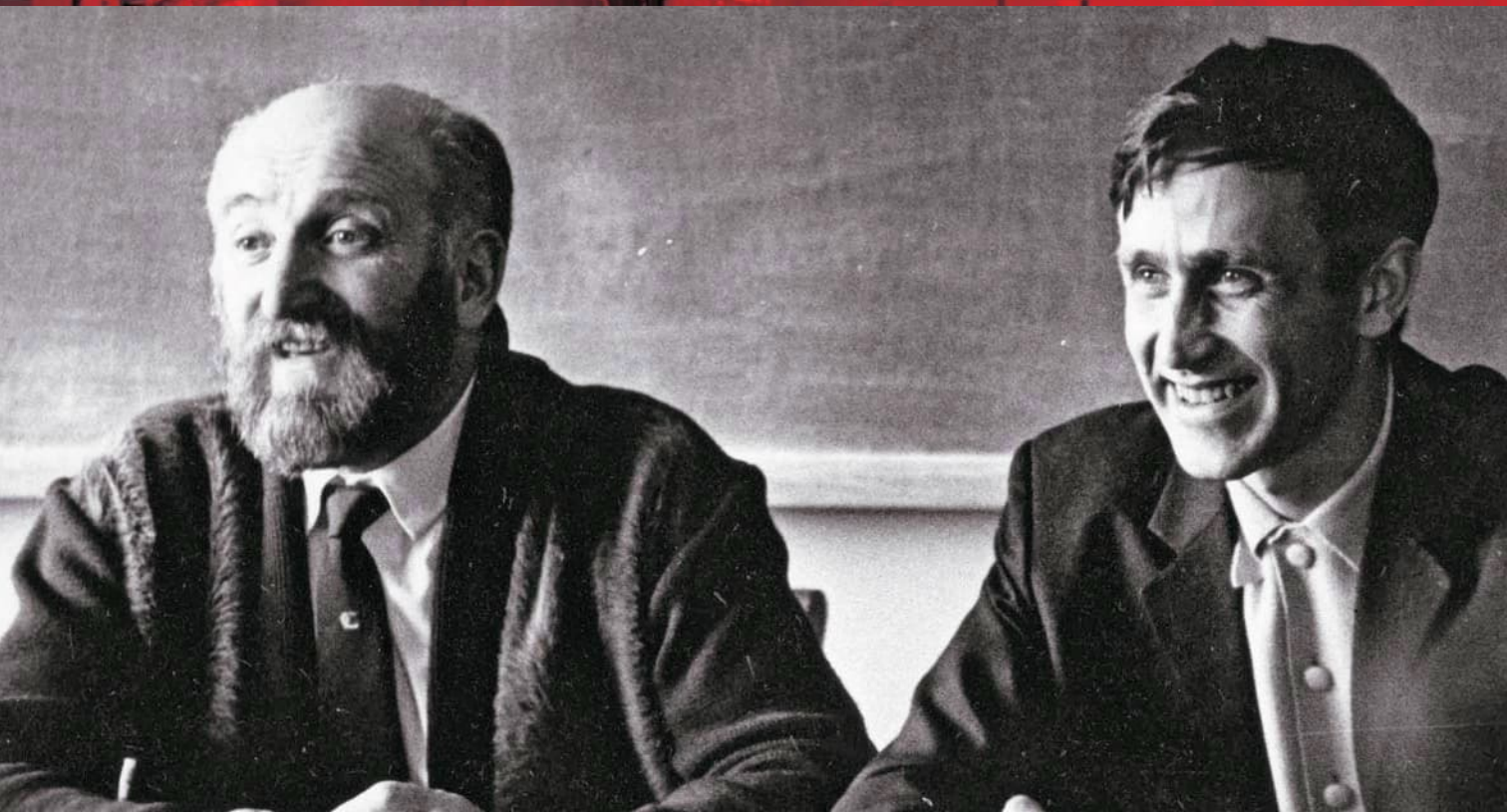
А. М. Будкер:

«Одна из основных тенденций в развитии современной физики – получение все более и более высоких энергий на ускорителях заряженных частиц, чтобы повысить энергию реакции взаимодействия частиц. Со времен Резерфорда схема таких экспериментов не менялась: пучок быстрых частиц бомбардировал неподвижную мишень. Но эта схема очень неэффективна при высоких энергиях, когда частицы разгоняются до околосветовых скоростей. Масса “частиц-снарядов” при такой скорости резко увеличивается и становится существенно больше массы частиц мишени. Когда тяжелый снаряд ударяет в легкую частицу мишени, то лишь незначительная часть его энергии, полученной такой дорогой ценой, идет на саму реакцию. “Львиная доля” расходуется просто на движение обеих частиц.

Мы решили идти по другому пути: сделать мишень подвижной и сталкивать два пучка частиц, разогнанных до одинаковой энергии. В этом случае массы “снаряда” и “мишени” остаются равными, и они могут всю свою энергию превратить в энергию взаимодействия.

Очень важно, что при скоростях частиц, близких к скорости света, эффект взаимодействия встречных частиц увеличивается не вчетверо, как следовало бы по механике Ньютона, а в значительно большее число раз. Например, при столкновении двух электронов, мчащихся навстречу друг другу с энергией в миллиард электронвольт, эффект взаимодействия оказывается таким же, как у обычного ускорителя на энергию в 4 000 миллиардов электронвольт. Сама по себе идея ускорителей на встречных пучках не нова, и в ней нет никаких научных откровений. Это простое следствие теории относительности Эйнштейна. Многие высказывали эту идею и до нас, но, как правило, пессимистически относились к возможности ее реализации. И это понятно. Ведь плотность “подвижной мишени” – пучка частиц в обычных ускорителях – в сотни миллионов миллиардов (единица с семнадцатью нулями) раз меньше плотности неподвижной мишени. Столкнуть две частицы – задача по сложности примерно такая же, как “устроить” встречу двух стрел, одну из которых выпустил бы Робин Гуд с Земли, а вторую – Вильгельм Телль с планеты, вращающейся вокруг Сириуса. Но выгоды встречных пучков по сравнению с обычными методами столь велики, что мы решили все-таки преодолеть трудности. Для этого потребовалось увеличить плотность пучков и заставить их много раз проходить друг через друга».

Газета «За науку в Сибири». 14 янв. 1970 г.



«Андрей Михайлович горит желанием немедленно приступить к осуществлению всех своих идей. Однако идеи слишком сложны, почти фантастичны, а сам он – всего лишь теоретик. И тогда он делает, вероятно, самый важный в своей жизни шаг, очень смелый и необычный, лучше сказать, не шаг, а “прыжок” в неизвестность – он решает возглавить группу энтузиастов, экспериментаторов и инженеров, которые готовы осуществлять его идеи. Андрей Михайлович сделал этот шаг не без внутренних колебаний и даже страха, и все-таки он решился, решил вопреки настойчивым советам и увещаниям многих близких друзей. Не имея никакого опыта в организации экспериментальных исследований, но и не скованный традициями, Андрей Михайлович выдвигает свои оригинальные идеи и в этой области: как должен жить и развиваться творческий научный коллектив. Так родилась школа Будкера. Вначале, в 1953 г., это была небольшая группа, всего из 8 человек. Но результаты не заставили себя ждать – уже через несколько лет был создан ускоритель бетатронного типа с током до 100 А, что на два порядка превышало токи лучших ускорителей того времени. Маленькая группа Андрея Михайловича разрастается в одну из самых больших лабораторий (лабораторию новых методов ускорения) Института атомной энергии, а в 1958 г. превращается

в самостоятельный Институт ядерной физики молодого Сибирского отделения Академии наук СССР.

И все же создать стабилизированный пучок не удалось – технические трудности оказались непреодолимыми; эта задача еще ждет своего решения в будущем. Андрей Михайлович понял это, вероятно, раньше всех. Что делать? Довольно большой уже коллектив напряженно работает с полной отдачей. Как быть? Куда направить этот поток творческой энергии? И он находит решение – встречные пучки!»

«Памяти академика Будкера», 1978

За горячей наукой – в холодную Сибирь

Совсем скоро Андрей Михайлович настоял на том, чтобы все мы перебрались в Новосибирск. В Москве «поводок» власти, который держал и науку, был коротким, а в Сибири нас ждала большая научная свобода и самостоятельность. И все-таки большая часть лаборатории осталась в Москве, не многие решились на переезд в Сибирь.

К этому времени вернулся в Москву молодой физик Вениамин Сидоров, проработав год в Институте Нильсона Бора. Андрей Михайлович предложил

Г. И. Будкер
и И. В. Курчатов
(стоят слева
направо)
подписывают
важные
документы
в Москве.
1957 г.
Фотоархив
СО РАН



ему возглавить московскую часть лаборатории, пока он с небольшой группой поедет в Новосибирск за еще не понятными перспективами. На что Сидоров ответил, что не собирается торчать в Москве и заниматься «старьем», когда группа Будкера будет делать передовую науку в Сибири. В конечном счете В. А. Сидоров стал заведующим лабораторией в будущем ИЯФе, а я его заместителем.

Однако далеко не все коллеги разделяли нашу позицию: большинство считали, что мы совершаем большую глупость, ведь в Москве огромные возможности, а мы уезжаем «в лес». Один очень хороший физик и ехидный человек сказал мне: «Собираешься в Новосибирск? С ума сошел. Ну, езжай, а через 2–3 года, когда у вас все загнетса, возвращайся, мы тебя обратно возьмем в институт». Через 3 года мы получили первые встречные пучки, а еще через 15 лет этот коллега приезжал к нам защищать докторскую. Я злорадствовать не стал.

ИЯФ очень быстро стал ведущим центром по физике элементарных частиц в СССР, можно сказать, мы из леса выросли вместо грибов.

Еще во время строительства ВЭП-1 у Будкера появилась идея создать установку с электрон-позитронными встречными пучками, гораздо более сложную и интересную. Будкер отправился к И. В. Курчатову и принес несколько листков «проекта», которые Игорь

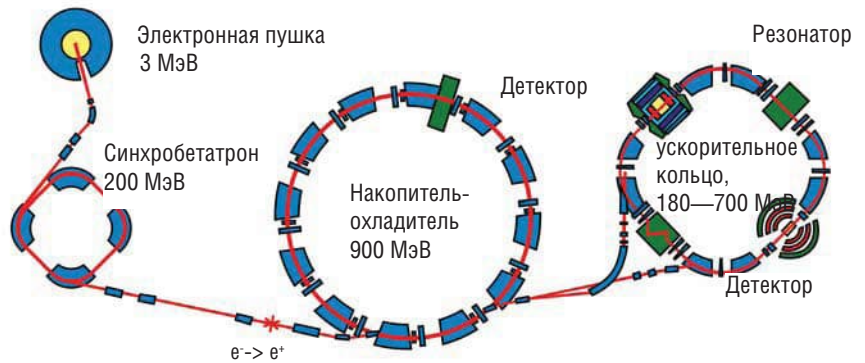
Васильевич отослал трем ведущим физикам СССР. Среди них был и академик АН СССР Владимир Иосифович Векслер. Все трое, прочитав эти несколько страниц, дали примерно одинаковые заключения: идея блестящая, но реализовать ее невозможно ни сейчас, ни в будущем. Андрей Михайлович повесил голову, а Курчатов, погладив свою знаменитую бороду, сказал: «Ну, теперь давай готовить постановление ЦК и Совету министров». Игорю Васильевичу было важно, что идею оценили как интересную, а вопрос реализации для него стоял на втором месте. Курчатов не побоялся сделать ставку не на высококлассных физиков, а на группу «зеленых» ученых-энтузиастов (старшие из нас лишь несколько лет как окончили университет, а самому Будкеру тогда было всего 37 лет).

Так лаборатория новых методов ускорения превратилась в Институт ядерной физики Сибирского отделения РАН. Кстати, в будущем только один из рецензентов признал свою неправоту. В. И. Векслер приехал в Новосибирск, когда на ВЭП-1 уже заработали первые пучки, а ВЭПП-2 находился в процессе создания. Он своими глазами увидел синхротронное излучение пучков, увидел, как они накапливаются, как



1965 Запущен электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2

1964 Создан первый ускоритель на встречных пучках ВЭП-1



Первый ускоритель ИЯФ на встречных пучках ВЭП-1

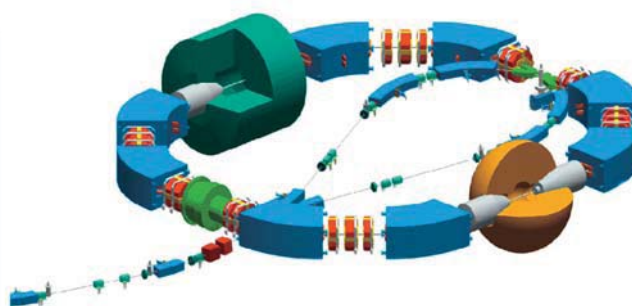
Комплекс ВЭПП-2М работал в диапазоне энергий 0,4 — 1,4 ГэВ. Максимальная достигнутая светимость — 5×10^{30} см⁻²×сек⁻¹ на энергии 510 МэВ. В 1972 г. заработал новый ускоритель ВЭПП-2М. Внизу – поворотный магнит ускорителя ВЭПП-2, ставший музейным экспонатом

1999 Модернизация
комплекса
ВЭПП-2М – комплекс
ВЭПП-2000

1971 Построен
электрон-позитронный
накопитель ВЭПП-3



Бустерный синхротрон Б-4, где происходит предварительное ускорение электронных (позитронных) пучков до энергии инжекции (360 МэВ) в накопитель ВЭПП-3



Детектор элементарных частиц СНД в экспериментальном промежутке ускорительного кольца ВЭПП-2000

1979 Введен
в эксплуатацию
электрон-позитронный
коллайдер ВЭПП-4



Празднование рождения ипсилон-мезонов
на ускорителе ВЭПП-4. 30 апреля 1982 г.

СИ В ИЯФ

Создание коллайдера-фабрики – это дело будущего, но уже сейчас ввод в эксплуатацию инжекционного комплекса ВЭПП-5 дает возможность повысить производительность работающих сегодня в институте ускорителей. И как следствие – повышение уровня и производительности исследований в очень актуальной области использования синхротронного излучения, которое можно назвать «микроскопом» современной науки. Такие работы в Новосибирском научном центре проводятся в рамках ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения», созданного при ИЯФ, где работают химики, геологи, физики и другие специалисты из различных российских городов. По словам старшего научного сотрудника лаборатории синхротронного излучения к. ф. – м. н. А. Д. Николенко, «наше синхротронное излучение – это мощный современный инструмент для исследований в области химии, биологии, археологии, медицины и других наук. Как это работает? К примеру, в нашем ускорителе на встречных пучках ВЭПП-4 вращается пучок электронов. Его скорость вращения немногим меньше скорости света. Двигаясь по криволинейной траектории в магнитном

сжимается их поперечный размер, как растет яркость свечения... С ростом энергии пучки из оранжевых становились голубоватыми, и они жили долго! Владимир Иосифович пришел на круглый стол в ИЯФ и сказал: «Я дал отрицательный отзыв на возможность осуществления ваших проектов, и я был не прав. Поздравляю вас с этим успехом!».

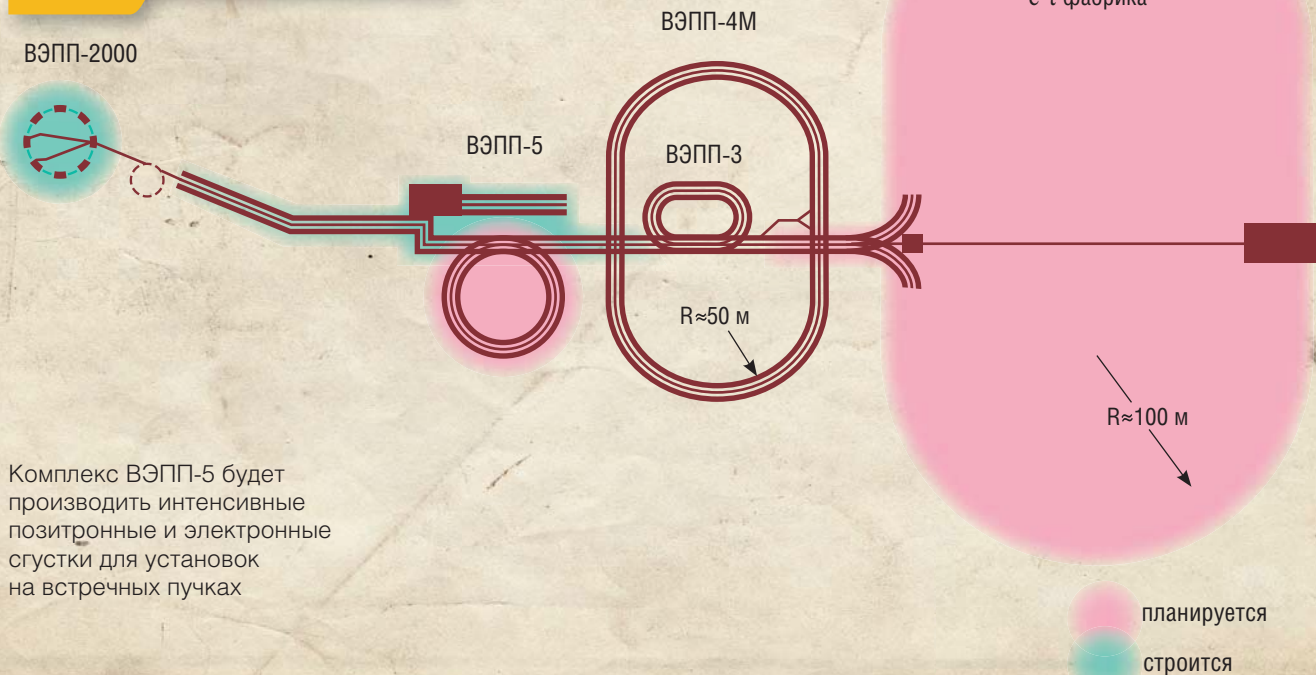
Когда мы получили первые электрон-позитронные пучки, это было что-то невероятное! Описать наши чувства невозможно. Сейчас кажется, что все случилось очень быстро, но тогда мы работали день и ночь, а ощущения, что есть хоть какое-то продвижение, не было. Что-то все время ломалось, приходилось переделывать еще и еще...

В 1967 г. мы получили Ленинскую премию за свои эксперименты со встречными пучками. А годом ранее, в 1966 г., мы с Андреем Михайловичем поехали в США, где посетили все институты и лаборатории, занимающиеся физикой элементарных частиц. Целый месяц мы ездили по стране и рассказывали о поведении пучков в условиях столкновения.

Началась совсем другая жизнь: ИЯФ стал мировым центром ядерной физики, а мы активно начали преподавать в ФМШ, НГУ и НЭТИ. С тех пор 90 % наших сотрудников – выпускники этих двух вузов.

на стр. 36

2015 Введена в эксплуатацию первая часть ускорительного комплекса ВЭПП-5



Комплекс ВЭПП-5 будет производить интенсивные позитронные и электронные сгустки для установок на встречных пучках

поле, пучок становится источником излучения, в котором присутствуют фотоны всевозможных энергий, от инфракрасного до спектрального диапазона. Мы вырезаем из спектра пучка “кусочек”, который требуется в конкретном эксперименте, и используем его для исследования различных объектов.

В синхротронном излучении присутствует ультрамягкая рентгеновская компонента, которая не проходит сквозь атмосферу. Поэтому на одной из наших станций – уникальной в стране – мы можем тестировать и калибровать детекторы и оптику спутников, так что наши клиенты иногда называют результаты калибровок “билетом на спутник”. Среди направлений работы нашего центра – калибровка аппаратуры для наблюдения за термоядерной плазмой, что очень актуально для создания термоядерной энергетики, и диагностика оборудования для ЭУФ-нанолитографии – способа массового изготовления интегральных схем со сверхмалыми электронными компонентами, где используется экстремальный ультрафиолет».

Источниками синхротронного излучения в институте сейчас служат ускорители ВЭПП-3 (созданный в 1972 г.) и ВЭПП-4М (запущенный в работу в начале 1980-х гг.

и впоследствии модернизированный), на которых также проводятся исследования по физике элементарных частиц. В результате на долю экспериментов с синхротронным излучением приходится лишь около 15% общего времени работы ускорителей. Таким образом, хотя эксперименты с использованием пучков синхротронного излучения ведутся в ИЯФе еще с 1973 г., для этих целей до сих пор (спустя более 40 лет!) используются не слишком яркие источники СИ 1-го поколения, работающие в рентгеновском диапазоне (длина волны от 0,01 до 1 нм) и с энергией пучка 2 или 4 ГэВ.

С запуском в 2003 г. 1-й очереди лазера на свободных электронах, источника мощных пучков терагерцового излучения, исследовательский арсенал института принципиально расширился, однако это не сняло проблемы создания более мощного источника СИ нового поколения, позволяющего проводить работы в рентгеновском диапазоне. Ввод в работу нового инжекционного комплекса ВЭПП-5 означает, что пучки электронов станут интенсивнее, а значит, будет мощнее и излучение, используемое на станциях центра, и ученые смогут улавливать более тонкие эффекты.

По: (Золотарев, Пиминов, 2015)



Большой адронный коллайдер, построенный в ЦЕРНе, имеет длину окружности главного тоннеля 27 км. В одной связке с ним работает целое семейство ускорителей, где частицы последовательно разгоняются до скоростей, предельно близких к скорости света

СХЕМА СКРИНСКОГО

«В начале 1990-х мне, как и всем остальным коллегам по физике высоких энергий, было ясно, что единственный шанс для России остаться на передних рубежах этой науки – равноправное участие в проекте LHC. Конечно, наше государство не могло тогда просто вложить более 100 миллионов долларов из своего бюджета в бюджет ЦЕРНа, как это делали остальные страны. Тогда у меня и родилась нестандартная схема участия России, которая должна была удовлетворить все заинтересованные стороны.

Суть схемы такова: Россия поставляет высокотехнологичное научное оборудование на сумму 150 миллионов долларов по мировым ценам. Российские институты-исполнители соглашаются сделать его за 100 миллионов, которые они получают в равных долях из бюджета ЦЕРНа и бюджета России. В этой схеме всем хорошо: ЦЕРН получает оборудования на “чистых” 100 миллионов как вклад России в проект, Россия за 50 миллионов обеспечивает для своей науки участие в самом амбициозном на сегодня проекте и одновременно поддерживает этими же деньгами свои научные институты, а последние получают хороший заработок и гарантированное участие в будущих экспериментах на комплексе LHC. Несмотря на очевидные плюсы этой

схемы, в то время практически никто не верил, что из этого что-нибудь получится. Представляете, в 1994-м договариваться о том, что мы будем делать в России в следующие 10 лет, в начале 2000-х, да еще с таким изощренным механизмом финансирования!

Потребовалось два года для того, чтобы объяснить выгоды для них, выгоды для нас, выгоды для всего научного сообщества. И Министерство науки нас поддержало. Мы организовали комитет “Россия – ЦЕРН”, в который входили 5 человек от руководства ЦЕРНа и 5 от России: один из руководителей Министерства атомной энергии и трое из научного сообщества под председательством министра науки. Мы добились специального решения от Совета ЦЕРНа, чтобы он финансировал наши работы. (Европейские коллеги резонно задавали вопросы: почему эти работы должны вести не их центры, не их институты и промышленность?)

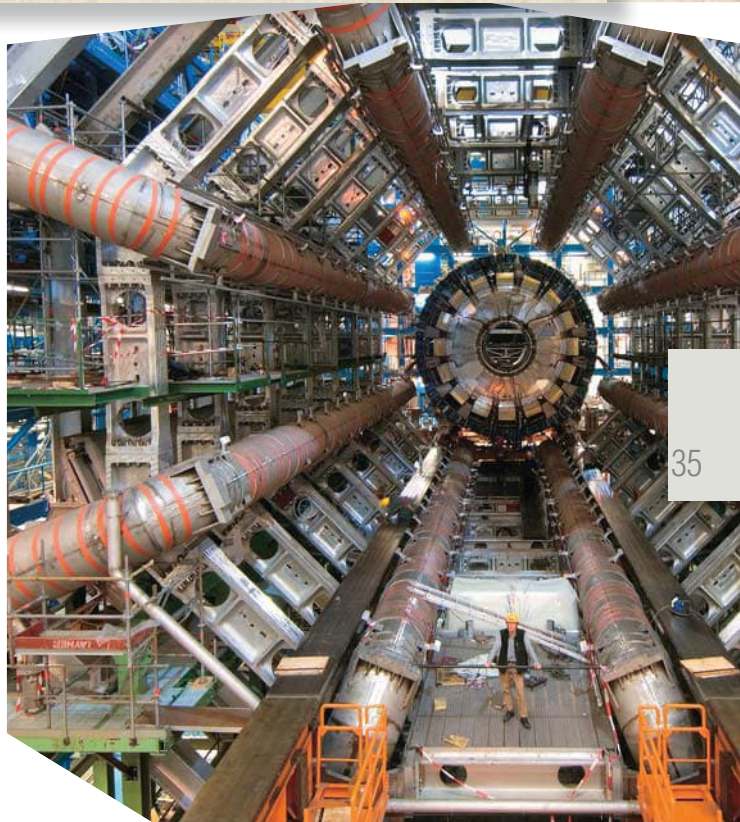
Схема (ее так и называют – “схема Скринского”) оказалась действенной. Кстати, за все эти годы ни одного схожего предложения от представителей других наук в наше министерство так и не поступило».

Скринский, 2006

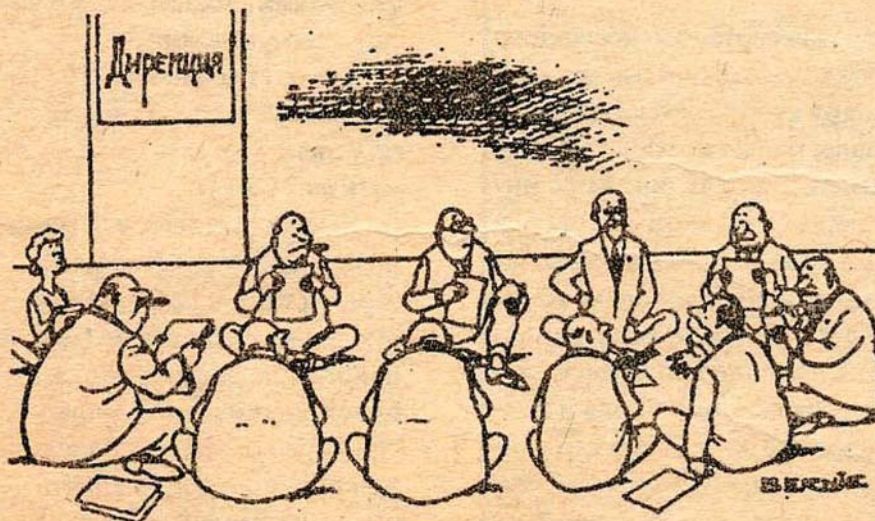


Сотрудники ИЯФ СО РАН разработали, изготовили, установили и наладили 360 дипольных и 180 квадрупольных магнитов для инжекционных каналов коллайдера, сверхвысоковакуумное оборудование, электронный охладитель тяжелых ионов и множество другой высокотехнологичной аппаратуры суммарным весом около 5000 т! На всех уровнях руководящих органов Европейского центра ядерных исследований неоднократно подчеркивалось, что вклад ученых, специалистов, институтов и предприятий России в проработку и реализацию проекта Большого адронного коллайдера исключительно велик. Это касается не только материально-технического обеспечения ряда ключевых позиций, но также использования передовых идей и достижений в физике частиц и технике ускорителей, ранее выдвинутых и развитых нашими учеными. Не случайно две улицы в ЦЕРНе носят имена российских физиков, внесших основополагающий вклад в мировую ускорительную науку, – академиков В. И. Векслера и Г. И. Будкера.

Бондарь, 2009



Политические события, происходящие в России, действительно, наводят на грустные размышления. Но 1 апреля, к счастью, еще по-прежнему остается Днем смеха. И несмотря на то, что всем нам сейчас не до веселья, давайте хотя бы улыбнемся — оптимистам во все времена живется легче.



*— Я думаю, вряд ли нам следует продолжать режим экономии...
«Пари-матч», Франция.*

Сделано в ИЯФ

Андрей Михайлович Будкер создавал институт, отличный от других. У нас все было иначе: от иерархической системы до финансирования. Только представьте: я стал заведующим лабораторией через три года после окончания университета! А в 1966 г. Будкер пошел к А. Н. Косыгину и договорился с ним лично, чтобы правительство издало постановление в качестве исключения разрешить Институту ядерной физики СО АН СССР заключать договоры не по смете. Это вызвало сначала бурные насмешки: «Ишь, чего захотели – зарабатывать в России!», а потом негодование: «Им можно, а нам нельзя?».

Но мало иметь юридическую возможность зарабатывать, нужно еще уметь делать то, чего не умеет никто другой. Мы работали и жили в Новосибирске, а строили ЦЕРН в Швейцарии, Брукхейвен в США, делали установки для Японии и Китая. Если расставить на карте мира флажки, где работали и работают наши физики или установки, сделанные в ИЯФе, то они покроют все города и страны, от Австралии до Канады.

И мы продолжаем так жить: принимать участие в самых разнообразных международных проектах. Так, зна-

чительная часть «железа» в проектах того же ЦЕРНа сделана в ИЯФе.

Андрей Михайлович, который очень любил спорт и в молодости занимался боксом и волейболом, всегда нам говорил, что мы не лаборатория, а команда, у которой должен быть хороший капитан. И весь институт действительно был одной командой и оставался ею в любые, даже самые сложные времена: и когда не стало Андрея Михайловича, и когда не стало самого СССР. Нам удалось сохранить науку и себя в ней.





В пультовой ВЭПП-2
слева направо:
В. Сидоров,
И. Протопопов,
С. Попов,
А. М. Будкер,
А. Скринский,
В. Петров

Литература

Скринский А. Н. Рыцари круглого стола // НАУКА из первых рук. 2006. № 1(7). С. 26–37.

Бондарь А. Е. Перед стартом в микрокосм. Коллайдер готовится к запуску // НАУКА из первых рук. 2009. № 4(28). С. 148–159.

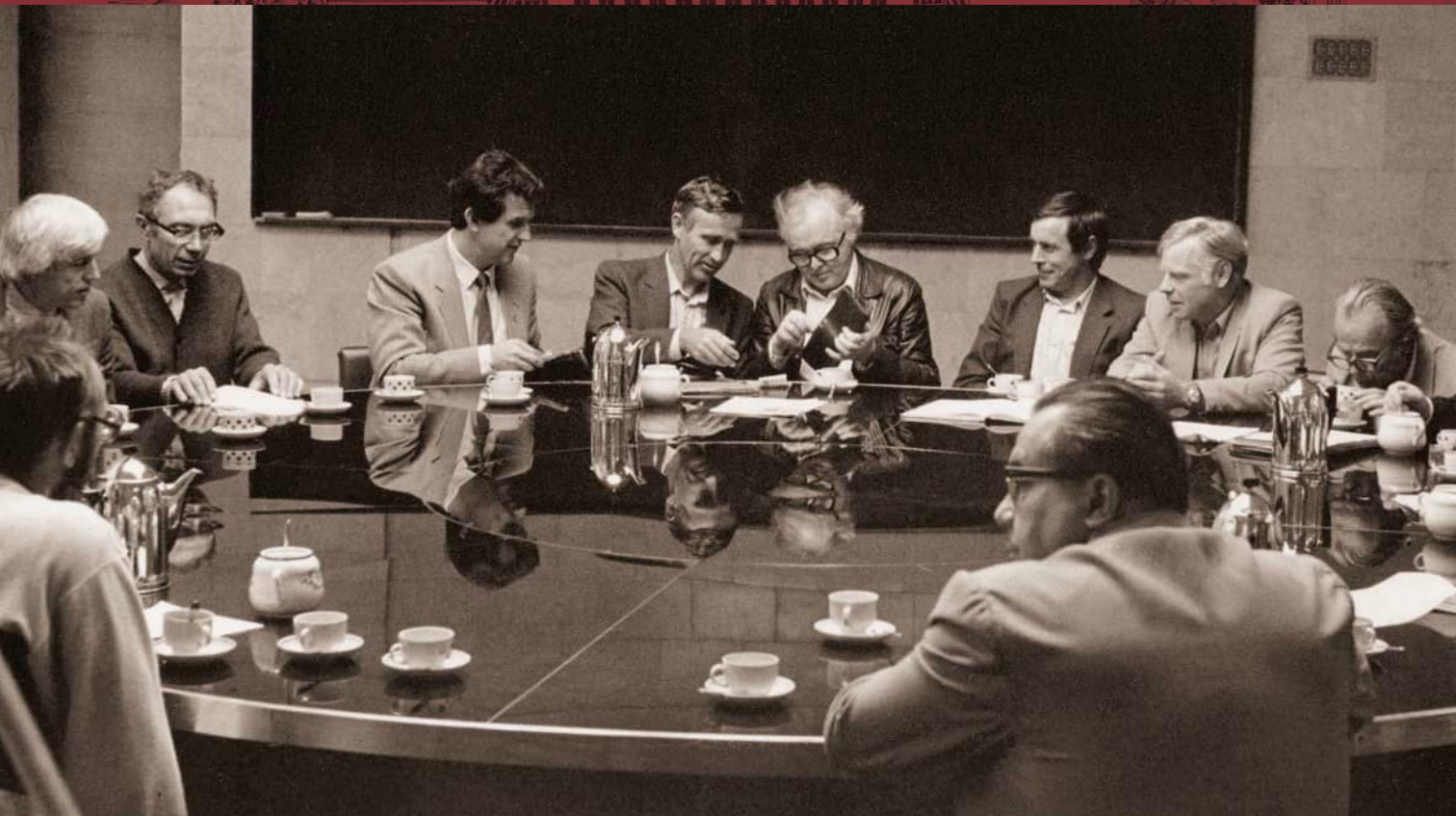
Золотарев К. В., Пиминов П. А. СИ в ИЯФ. Формула успеха // НАУКА из первых рук. 2015. № 2(62). С. 10–18.

В публикации использованы рисунки Е. Бендера





Академгородок — МЕСТО ВСТРЕЧ



Ключевые слова: Институт ядерной физики, Будкер, ускорители частиц, ВЭП-1, ВЭПП-2, круглый стол, синхротронное излучение.

Key words: Institute of Nuclear Physics, Budker, particle accelerators, the Round Table, synchrotron radiation

2017

«НАУКА из первых рук», № 2/3(74)

Благодаря тому, что когда-то в Академгородке собрались одни из самых выдающихся ученых, которые образовали свои научные школы, вырастили «детей» и «внуков», концентрация возможностей для встреч с уникальными личностями, фигурами мирового масштаба, здесь зашкаливала.

В то время все хотели побывать в Академгородке. Многие встречи проходили в Институте ядерной физики. Традиционные круглые столы в ИЯФ собирали не только ученых, но и писателей, артистов, режиссеров, поэтов. Круглый стол ИЯФ был символом демократии, независимых суждений за чашечкой кофе. Александр Исаевич Солженицын, Евгений Александрович Евтушенко, Булат Шалвович Окуджава – все они сидели за нашим круглым столом...

© Г. Н. Кулипанов, 2017



В жизни человеку важно попасть в нужное место в нужное время. Мне повезло: я оказался в нужном месте – в Академгородке, в ИЯФе, в нужное время, когда в институте только начались работы по запуску одного из первых ускорителей на встречных пучках ВЭП-1, с нужными людьми – в лаборатории А. Н. Скринского. Время, место и люди – все совпало.

Я окончил НЭТИ в 1963 г. Про Институт ядерной физики СО АН СССР мы знали так же мало, как и про сам Академгородок. Тем не менее после четвертого курса, летом 1962 г., я и еще четверо моих сокурсников отправились на собеседование в ИЯФ. К нам вышли три человека: А. Н. Скринский, В. А. Сидоров и Олег Нежевенко, выпускник НЭТИ 1961 г., который и рассказал нам об институте и предложил приехать. Мы разговаривали в одной



Академики
Г. Н. Кулипанов
и А. Н. Скринский

Кулипанов Геннадий Николаевич — академик РАН, советник РАН, доктор физико-математических наук, директор Сибирского центра синхротронного излучения (Новосибирск)



из комнат, начали с технических вопросов, а потом кто-то спросил меня, почему я, человек со специальностью «электронные приборы», хочу работать в ИЯФе. Набравшись храбрости, я ответил: «Послушайте, ядерная физика вообще невозможна без достижений электронной техники».

Всех пятерых взяли. Я попал на практику в лабораторию А. Н. Скринского, написал диплом, а после защиты с сентября 1963 г. начал работать в институте.

Основной «элемент» – Будкер

ИЯФ всегда был независимой демократической площадкой, но не в политическом плане. Когда ученый начинает заниматься политикой, ни к чему хорошему это не приводит, а уж коллективу института это просто противопоказано – верная гибель всей организации. А вот свобода научного творчества, свобода обсуждения, свобода научных идей – это стиль ИЯФ, который поддерживается до сих пор. Андрей Михайлович Будкер завел прекрасную традицию: ученые советы института всегда проводились за круглым столом. Совет собирался без предварительно утвержденных программ. Сначала это были общие встречи для всех сотрудников института, где каждый мог принять участие в дискуссии, выступить с сообщением о своих исследованиях. С увеличением штата института появился Большой совет, где собирались заведующие лабораториями, руководители подразделений, администрация и секционные советы для молодых научных сотрудников. На них обсуждались, как правило, вопросы по тематическим направлениям: ускорительная физика, физика плазмы, элементарных частиц, синхротронное

В. И. Коган: «В кабинете А. Б. Мигдала был умывальник. Струя воды из крана заметно отклонялась при поднесении к ней наэлектризованной чем-либо расчески. Систему эту я назвал “рациометром” (“рацио” по латыни – разум). Будкер продемонстрировал, что вышеописанный эффект от его брюк (пониже спины) существенно сильнее, чем от моей шевелюры. Это недвусмысленно указывало на соотношение наших физических квалификаций. Что подделаешь...»

«Академик Г. И. Будкер. Очерки. Воспоминания», 1988

излучение. Будкер всегда говорил, что он должен видеть глаза молодых, должен понимать реакцию молодых научных сотрудников на его слова. На таких советах Андрей Михайлович часто читал «проповеди». Ходил вокруг стола и говорил, например, о взаимоотношениях «учитель-ученик» или о соотношении между фундаментальными и прикладными науками – тоже извечный вопрос, над которым он думал.

Эта традиция жива до сих пор. Конечно, сегодня ученый секретарь иногда делает рассылку о повестке заседания – бюрократические элементы укрепляются и в жизни ученых. Но круглые столы с их свободой общения, блестящие кофейники со свежесваренным кофе – все это осталось неизменным.

Хороший кофе всегда был необходимым элементом круглого стола ИЯФ, и мы относились к этому очень

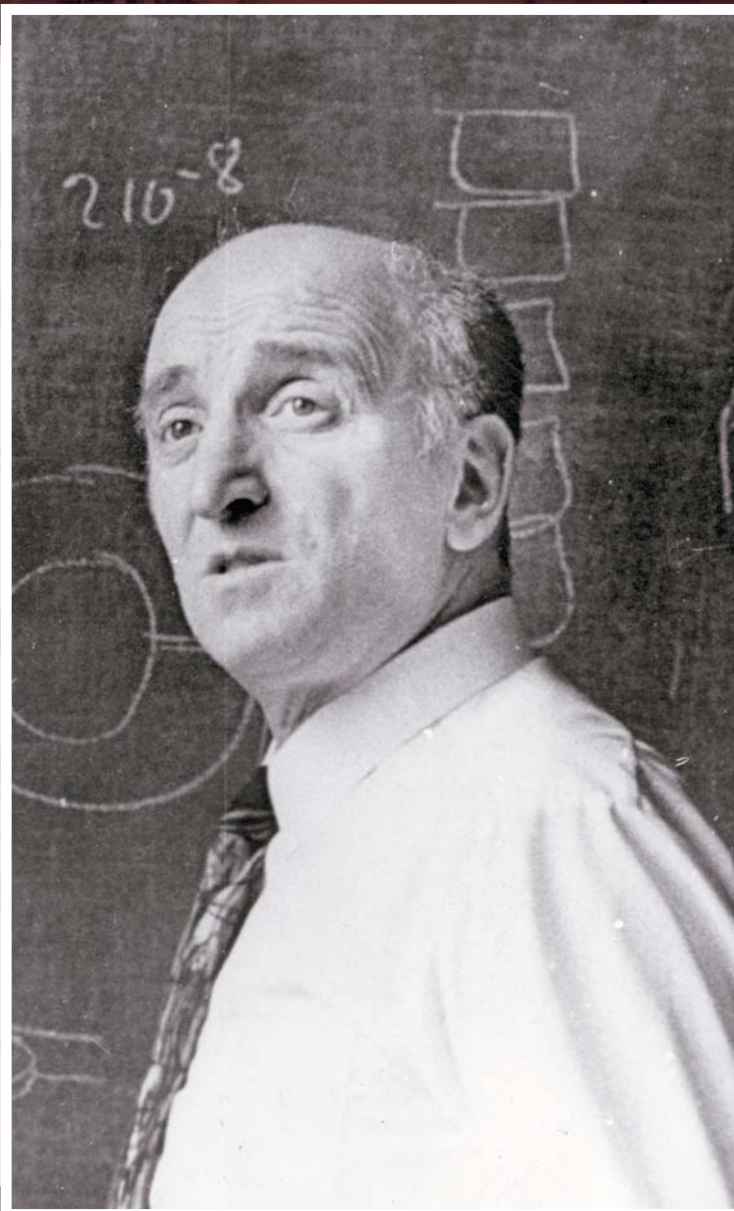
Круглый стол в ИЯФ СО РАН: обсуждение проекта лазера на свободных электронах для фотохимических исследований в 1989 г. (слева), обсуждение проекта нового яркого источника синхротронного излучения в 2015 г. (справа)



А. М. Будкер: «Необходимы ли ученому ученики? Вопрос в достаточной степени надуманный. Все равно, что спросить, нужны ли людям дети. Именно они продолжают начатые нами работы и доводят их до логического завершения. А что не успеют они, доделают ученики наших учеников. Так, собственно, наука и движется вперед. Учитель становится бессмертным в своих учениках, как каждый человек становится бессмертным в своих детях... Без помощников, а ученики – прежде всего помощники, в современной науке трудно что-либо сделать даже очень талантливому человеку. Но дело не только в этом. Растя детей, мы, как правило, не задумываемся ни о продолжении рода человеческого, ни о создании опоры в старости. Так и ученый, воспитывая ученика, действует, подчиняясь своему инстинкту, близкому инстинкту деторождения. Он испытывает естественную радость даже тогда, когда ученики уходят от него в самостоятельную научную жизнь. Лишь бы они оставались хорошими учеными... Вступающему в науку не нужно доказывать, как важно иметь доброго и умного наставника. Каждый ученый, если его спросить, всегда вспомнит, кому он обязан и первым, едва проснувшимся интересом к знаниям, и добрым советом при выборе первой научной работы, без которого нельзя научиться преодолевать препятствия, и многим-многим другим, без чего не вырастает ни один исследователь.

Учиться только по учебникам, монографиям и статьям – все равно, что пытаться овладеть тайнами мастерства пианиста по самоучителю. <...> Точно так же и в науке: без хорошей школы невозможно овладеть тайнами исследовательского мастерства. Не случайно хорошие физики рождаются там, где есть хорошая школа... ».

Р. К. Нотман «Преемственность», 2007



За знаменитым круглым столом Института ядерной физики СО РАН писатель и поэт Булат Окуджава. 6 сентября 1993 г. Фотоархив СО РАН

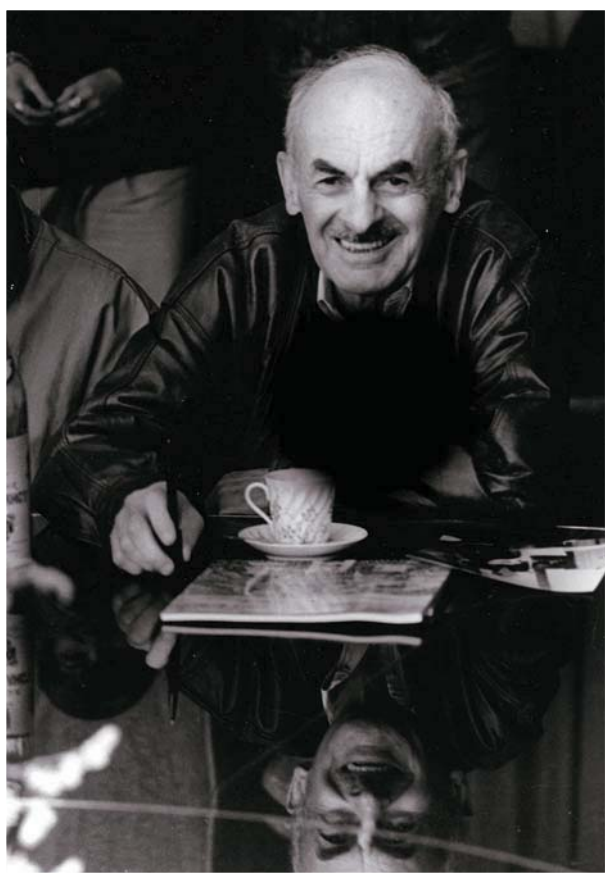
Г. Н. Кулипанов: «Считается, что учитель – это тот, кто старше тебя. Да, первыми людьми, которые привили мне любовь к знаниям, были школьные учителя: учитель математики М. И. Голов, учитель литературы М. Т. Мигасов. В ИЯФе – это Александр Николаевич Скринский, Борис Валерианович Чириков. Но зрелый возраст – это не обязательный признак для учителя. Когда я перешел работать на установку ВЭПП-3, там собралась отличная команда молодых ученых: Н. А. Винокуров, Е. А. Переведенцев, Н. А. Мезенцев. Мне снова повезло очутиться в нужное время в нужном месте, рядом с нужными людьми. Учиться у молодых, особенно если они талантливые, – это совсем другая учеба, но тоже учеба»

щепетильно. Даже когда в Новосибирске хороший кофе было не достать, каждый, кто отправлялся в командировку в Москву, заходил в магазин кофе на улице Кирова (сейчас ул. Мясницкая): какие там были запахи! Покупали кофе в зернах и привозили в Новосибирск, здесь мололи и варили. Но это все внешние атрибуты, основным «элементом» всегда был Андрей Михайлович Будкер, он задавал тон научных обсуждений, создавал атмосферу независимости и свободы.

Все, что делал Будкер, было наполнено его личной философией. Даже анекдоты, которые он любил рассказывать, были не просто смешными, а с философским подтекстом. Вообще Андрей Михайлович любил посмеяться и даже из неловких ситуаций выходил с улыбкой.

Гости ИЯФа

В 70-е гг. мы начали развивать новое направление исследований в Институте ядерной физики, связанное с разными вариантами генерации и использования синхротронного излучения. Одно из них – как при помощи синхротронного излучения получать очень интенсивные пучки мёссбауэровских квантов. Схему получения мы назвали «ядерно-брэгговская монохроматизация пучков», начали эксперименты. В связи с этим председатель комиссии по синхротронному излучению АН СССР и старый друг Рудольфа Мёссбауэра академик В. И. Гольданский позвонил мне и сказал: «Гена, тут Мёссбауэр приезжает (он тогда уже был Почетным академиком АН СССР) в Россию и хочет съездить в Новосибирск и посетить ИЯФ».



Б. Ш. Окуджава: «С одной стороны, я счастливый человек: мне пришлось увидеть, как все, что мешало нам жить, рушится. А с другой стороны, очень горько, потому что рушится с трагедиями, печалью. Это, по-видимому, одна из самых простых операций. Я только не знаю, рушим ли мы или оно рушится. Я думаю, что оно рушится в основном в плане времени. Вот мы говорим: “Горбачев разрушил Советский Союз”. А я себе представляю все это так: идет большой слон, его на поводку ведет человек. Все восторгаются и кричат: “Ой, какой у нас слон, какой гигантский – самый большой в мире!” А слон идет, тихонечко болеет, сгорает, гниет – и в один прекрасный день падает. Тогда все набрасываются на человека, который его вел, и говорят: “Ты погубил слона!”»

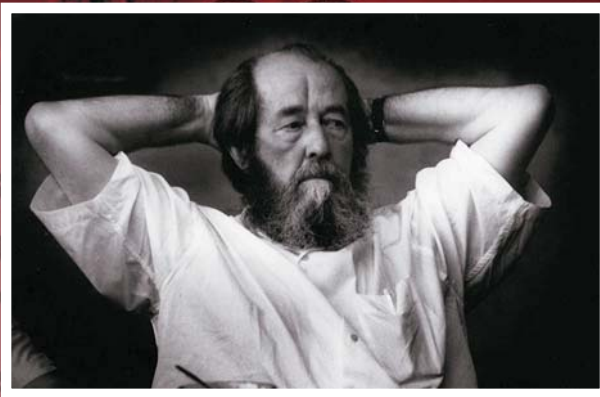
«Ияфовские встречи», 2015

Б. Ш. Окуджава: «Все-таки самостоятельно мыслящим исказили психологию в разной степени. Например, по телевизору майор говорит: “Я интеллигент, потому что я майор”. Это такой большевистский подход: раз в очках и в шляпе, да еще с дипломом – значит интеллигент. А я встречал интеллигентов среди рабочих и жлобов среди академиков.

Пока не научимся определять, что такое свобода, что такое интеллигент, какая разница между свободой и волей, что такое демократия, будем диким обществом»

«Ияфовские встречи», 2015

Писатель Александр Солженицын на встрече в Институте ядерной физики СО РАН. 28 июня 1994 г. Фотоархив СО РАН



А. И. Солженицын: «...Конечно, время нас не щадит, и больших сроков нам не отпущено. Можно только удивляться, что во многих местах, подобно вашему институту, еще продолжают держаться. А во что мы превратились в национальном смысле, потеряв двадцать пять миллионов человек и не заботясь об этих потерях? На многих встречах мне приходилось слышать: “Ах, зачем мы начинали эту перестройку, все было как-то налажено”. Но вот сейчас приходится как-то сразу расплачиваться за многое. Вот такой невероятный психологический удар полного разрушения представлений о том, как мы живем, как жить и что же делать, уже был в нашей стране в тридцатом-тридцать первом году. Это был удар, совершенно сокрушающий по народной психике, по психике интеллигенции. Невозможно было пройти эту отравленную зону, казалось, все кончено. Многие испытывают подобное сейчас, считая, что это уникальный случай. Нет, не уникальный. Вот так получается в жизни отдельных людей, и отдельных семей, и иногда – отдельных народов: создаются до такой степени

неудобные, неуютные – слова не найдешь – напряженные, невозможные условия, которые надо пройти, если мы еще живем. Надо найти в себе душевные силы, и хотя, может быть, наука очень страдает, но тут-то и душевные силы большие, а в других местах и душевных-то сил нет – испытания нечем выдерживать. Очень тяжелое состояние – что говорить!»

«Ияфовские встречи», 2015

Известный кинорежиссер Эльдар Рязанов в Институте ядерной физики СО РАН. 12 декабря 1994 г. Фотоархив СО РАН



«Человек искренний и непосредственный, Эльдар Рязанов с первых минут сумел расположить к себе всех, заявив, что чувствует себя в этой аудитории очень неловко, так как совсем не знает физику. Дело в том, что когда он учился в школе – а это были военные годы, – преподавателей физики просто не было: в аттестате у него в графе “физика” стоит прочерк. Это признание вызвало сочувственный отклик в сердцах наших физиков и сразу создало доброжелательную и непринужденную атмосферу. Традиционный рассказ заместителя директора института Вениамина Александровича Сидорова о том, что такое ИЯФ, по каким существует законам, как он борется за выживание, наш гость выслушал с искренним интересом, а его неожиданные вопросы вызывали неизменное оживление и одобрительный смех. Так, Эльдар Александрович поинтересовался, нельзя ли с помощью наших промышленных ускорителей, так же как вредных жуков, нейтрализовать вредных политиков. Ияфовские физики были вынуждены признаться, что над таким применением своей продукции пока еще не думали»

«Ияфовские встречи», 2015

Г.Н. Кулипанов: «Работаешь весь день на установке, вечером забираешь сына из детского сада, отводишь домой и обратно на работу. Приходишь, включаешь ВЭП-1 и сидишь до ночи. Сейчас кажется невероятным, что для работы ускорителя нужен был один человек: включаешь установку – и пучки сразу пошли. Теперь коллайдеры такие гигантские, что после включения еще 2—3 дня установка разгоняется. Я уж не говорю о том, что одному с ними уже не справиться»

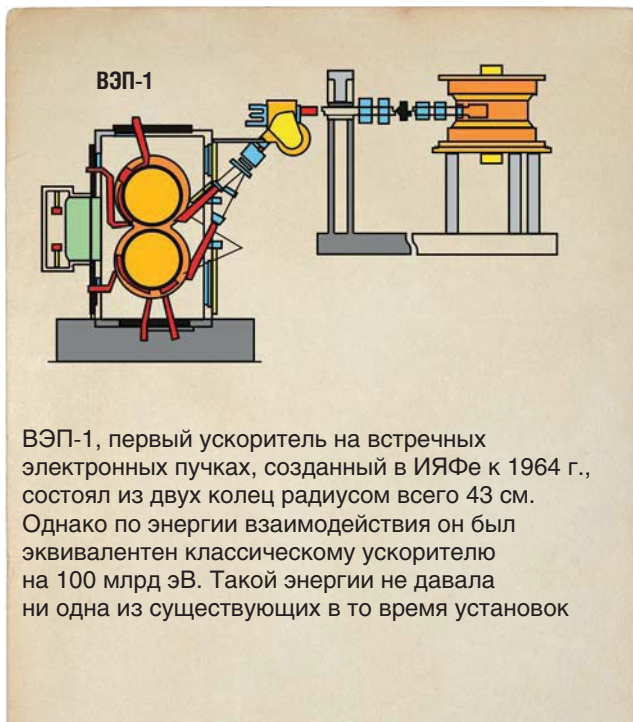
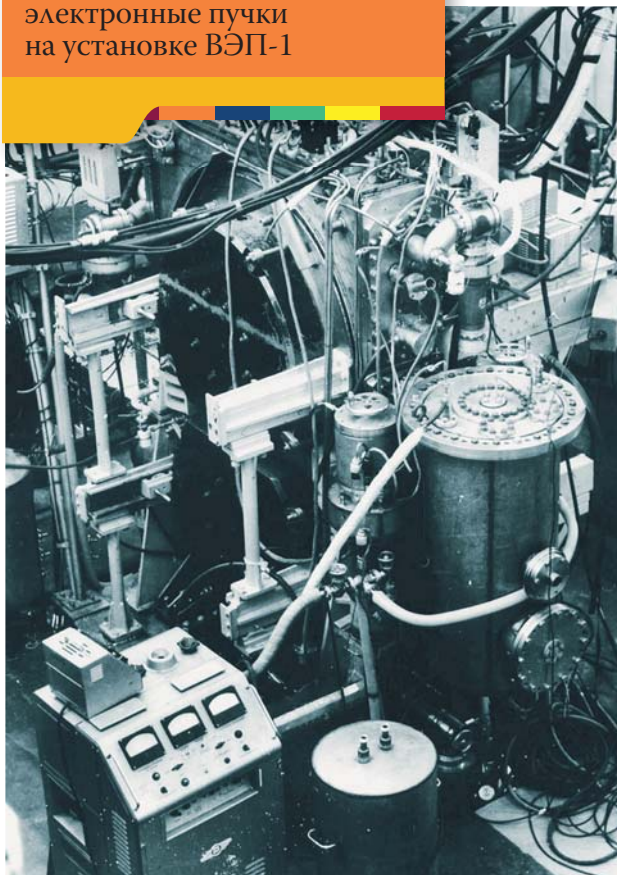
Гостя встретили, показали институт, а потом я повез его в Новосибирский театр оперы и балета. По дороге рассказывал, как строилась Транссибирская магистраль и как железная дорога изменила город, как повлияли на его развитие Первая мировая война, революция и Вторая мировая война. Здесь я добавил, что театр, в который мы едем, строился как раз в годы войны, а первая опера увидела свет 13 мая 1945 г. Тут Мёссбауэр округляет глаза и удивленно спрашивает: «Неужели вы (русские) были так уверены в победе, что строили театр вместо танков и самолетов?». Эта история со строительством театра так запала в душу ученому, что все время, пока он гостил у нас, постоянно рассказывал ее окружающим: когда читал лекцию в НГУ, когда произносил тост во время ужина.

История моего знакомства с нобелевским лауреатом и его знакомства с Новосибирским театром оперы и балеты имела продолжение. Но уже для самого театра.

В 2003 г. Новосибирск посетил Председатель правительства М. М. Касьянов. Губернатор В. А. Толоконский надеялся благодаря этому визиту получить дополнительные деньги на реставрацию Оперного. После посещения театра Толоконский привез Касьянова в Академгородок. По пути через лесок от Выставочного центра до Дома ученых я рассказал Касьянову историю про впечатление ученого-немца. И говорю: «Михаил Михайлович, неужели сейчас, когда ситуация в стране не такая катастрофичная, как в тяжелые годы войны, правительство не найдет денег на реставрацию нашего театра?». В Каминном зале Дома ученых я сидел рядом с министром культуры М. Е. Швыдким, он поблагодарил меня за вовремя рассказанную историю и сказал, что теперь уверен в получении финансирования. И деньги на реставрацию театра Новосибирск действительно получил.

28 июня 1994 г. в гостях у Института ядерной физики побывал нобелевский лауреат Александр Исаевич Солженицын. Писатель возвращался из США и проехал по Транссибирской магистрали с остановками в каждом крупном городе. Разговор за круглым столом в ИЯФе был долгим: говорили о науке, образовании, о России. Я задал Александру Исаевичу вопрос, с чем связано его

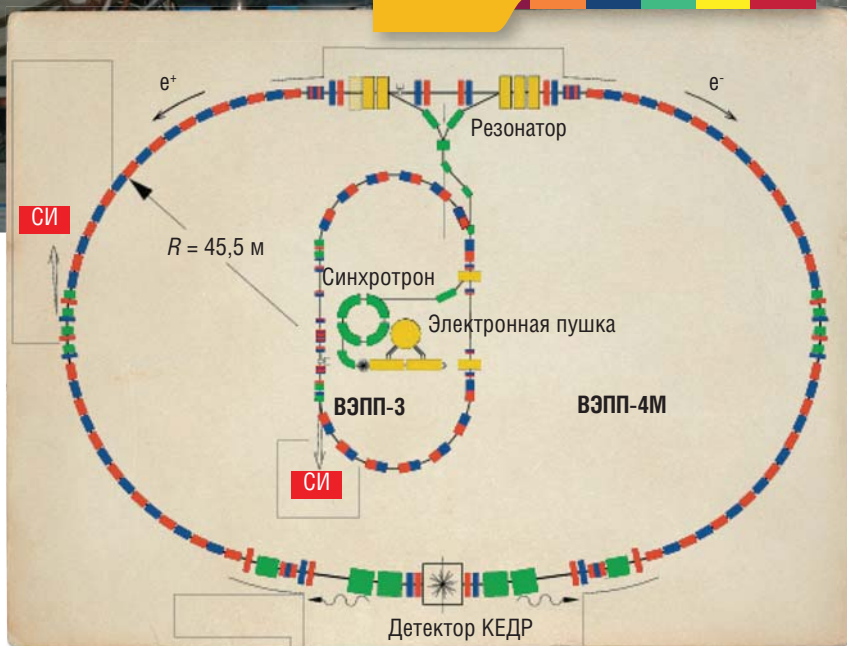
1964 Получены первые встречные электронные пучки на установке ВЭП-1





1981 Создан
Сибирский
центр синхротронного
излучения

1979 Введен
в эксплуатацию
электрон-позитронный
коллайдер ВЭПП-4



В ускорительно-накопительном комплексе для генерации синхротронного излучения в ИЯФ СО РАН используются ВЭПП-3/ВЭПП-4, причем ВЭПП-3 является бустерным (промежуточным) ускорителем для коллайдера ВЭПП-4 (схема справа). Ускорение происходит от энергии 360 МэВ до энергии 2 ГэВ. В режиме накопителя ускоритель может удерживать пучки с энергией 2 ГэВ и током около 100 мА в течение длительного времени (5—6 ч). Именно в этом режиме и ведутся работы с использованием синхротронного излучения.
Вверху – прямолинейный участок накопителя ВЭПП-3

Для координации усилий, направленных на развитие исследований с СИ, эффективное использование источников СИ и повышение качественного уровня исследований, 1 декабря 1981 г. на базе ускорительного оборудования и лабораторий ИЯФ СО АН СССР был создан Сибирский центр синхротронного излучения. В 1991 г. он преобразовался в Сибирский международный центр синхротронного излучения (СибМЦСИ) – открытую лабораторию института, в деятельности которой могли принимать участие российские и зарубежные организации и лица. В 2003 г. заработала 1-я очередь лазера на свободных электронах. В 2005 г. центр коллективного пользования был переименован в Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения (СЦСТИ)



СИ В ИЯФ. СЕГОДНЯ

Для нас очень важно то, что наши источники СИ расположены в таком необычном инфраструктурном объекте, как новосибирский Академгородок, т. е. в большом мультидисциплинарном окружении. И даже далекие от физики археологи, к примеру, могут практически «по-соседски» обратиться к нам и проанализировать артефакт, их интересующий. Ведь новые знания, как правило, появляются в результате комбинации уникальных пользовательских образцов и адекватных исследовательских инструментов, которые могут быть реализованы с использованием СИ.

Кроме того, у нас создаются и используются методики, которые в принципе затруднительно развивать в больших синхротронных центрах, в том числе из-за административно-организационных ограничений. Примером может служить изучение детонационных процессов с субмикросекундным временным разрешением в специальной взрывной камере, расположенной прямо на канале вывода синхротронного излучения. Так как синхротронное излучение выходит не сплошным потоком, а в виде коротких вспышек, повторяющих временную структуру коротких электронных сгустков (в нашем случае длительность таких вспышек составляет 1 нс, а период повторения – около 100 нс), то, изучая особенности взаимодействия такого излучения с веществом, можно определять текущее состояние вещества с соответствующим временным разрешением, т. е. за то мгновение, которое продолжается детонация, определить характер химических процессов, происходящих в зоне движения детонационного фронта, динамику роста детонационных нанодiamondов и другие интересные специалистам эффекты.

Среди последних наших разработок – «метрологическая» станция «КОСМОС», предназначенная для тестирования спутниковой аппаратуры, и станция «ПЛАМЯ», которая создается совместно с новосибирским Институтом химической кинетики и горения СО РАН и предназначена для проведения исследований таких быстрых химических реакций, как горение.

По: (Золотарев, Пиминов, 2015)

В бункере, где используется синхротронное излучение из накопителя ВЭПП-3, работа организована как в знаменитой сказке «Теремок»: в тесноте, да не в обиде.

В экспериментальном зале площадью всего лишь 90 м² расположено 10 пользовательских станций, поэтому плотность оборудования здесь просто зашкаливает.

Вверху справа – уникальная первая станция «Детонация», состоящая из взрывной камеры, в которой можно использовать заряды взрывчатых веществ весом до 50 г и блока детектирования

«Живая» история ускорительной физики – бустерный синхротрон Б-4, где идет предварительное ускорение электронных (позитронных) пучков до энергии инжекции (360 МэВ) в накопитель ВЭПП-3.

Вероятно, это один из немногих в мире работающих синхротрон, достигший «антикварного» возраста

2017 Работают
12 станций СИ
и 4 станции терагерцового
излучения



Рис. Е. Бендера

«Школа Будкера много бы потеряла без личного обаяния самого основателя. Симпатия к нему возникала мгновенно, с первой встречи. Он легко привлекал людей. Едва ли только эрудицией. Еще и неожиданностью суждений, прекрасной речью, мгновенной реакцией на мысль и на шутку. Гуманитария, на мой взгляд, в нем было ничуть не меньше, чем физика. Один экспромт я слышал от него на встрече с иностранными журналистами. Когда речь зашла о том, как живется в России... полукровкам. Вопрос был странный для того времени и с каким-то смутным намеком. Будкер ответил на него мгновенно: «Не каждый метис Матисс». Все хохотнули, и заданный вопрос «прошел стороной»».

Р. К. Нотман «Преемственность», 2007

посещение Китая, не вызвано ли оно желанием сравнить китайский вариант реформ с российским? И о том, что есть социальный закон, который гласит, что невозможно одновременно перестраивать политическую и экономическую структуры, так как, на мой взгляд, возникают обратные связи, разрушающие обе системы. На что Солженицын ответил: «Я хотел взглянуть собственными глазами на кусочек Китая, особенно в сравнении с Благовещенском. Видно, что город напротив Благовещенска быстро растет экономически. Что касается того социального закона, о котором Вы упомянули, то боюсь, что да. Как бы ни хотелось нам отделаться от прежней своей системы, вероятно, было бы разумнее начинать только с экономики. Этот вопрос обсуждался еще в 1946—1947 гг. во время тюремных дискуссий, на которых я присутствовал, будучи молодым офицером. Уже тогда нам всем было ясно, что коммунизм потерпит крах. И на этих дискуссиях обсуждался вопрос, как из него выходить. Разумные люди с жизненным опытом говорили следующее: «Нужно оживлять только экономическую сферу, не разваливая всей этой ужасной, нелепой, безрассудной системы. Нужно начинать с самых низов, через маленькие земельные участки, маленькие мастерские, маленькие магазины – так, чтобы люди наелись, оделись, поправились и постепенно оживляли систему снизу вверх». Этот совет нам некому было дать. Говорившие это давно уже в земле. Я этот совет запомнил и с тех пор убедился в его правильности».

В науке бывает по-разному...

Благодаря своей гениальной изобретательности Будкер мог придумать совершенно уникальные решения: например, открытые ловушки для термояда или стабилизированный пучок. Однако его безумные и грандиозные идеи, такие как линейный коллайдер,

давали результат далеко не сразу. Проекты тянулись по несколько лет. И Будкер это прекрасно понимал, он настаивал на том, что институт обязан заниматься прикладными вопросами, например строительством промышленных ускорителей. В такие проекты он вкладывался, заставлял каждую лабораторию думать о прикладных исследованиях, ведь без них нет института. Объем бюджетных денег – 20 % бюджета института, а остальное – контракты. При Будкере это были контракты по проектам для оборонной промышленности СССР, потом мы стали развивать направления для зарубежных стран (было время, когда зарубежные контракты стали основными и составляли 75 % бюджета). Сейчас ситуация такая: 25 % – зарубежные контракты, 75 % – российские заказы.

В конце восьмидесятых мы взялись за большой закрытый проект – создание лазера на свободных электронах (ЛСЭ). Проект делался по постановлению ЦК партии и правительства, к нему были подключены заводы. Но грянул 1991 г., за ним 1992, 1993 – и денег не стало. К этому времени заводы сделали какое-то количество «полуфабрикатов» для установки (около 30 %). Доводить проект до конца нам пришлось самостоятельно: силами института и за деньги, зарабатываемые по зарубежным контрактам. Первая генерация произошла спустя больше 10 лет, в 2003 г. Даже при наличии финансирования реализация современных физических проектов, требующих создания больших физических установок, 10 лет считается нормой (Большой адронный коллайдер строился больше 15 лет). А Мёссбауэр начал работать в 1956 г., в 1959 был открыт эффект, а в 1961 г. ученый получил Нобелевскую премию. В науке бывает по-разному.

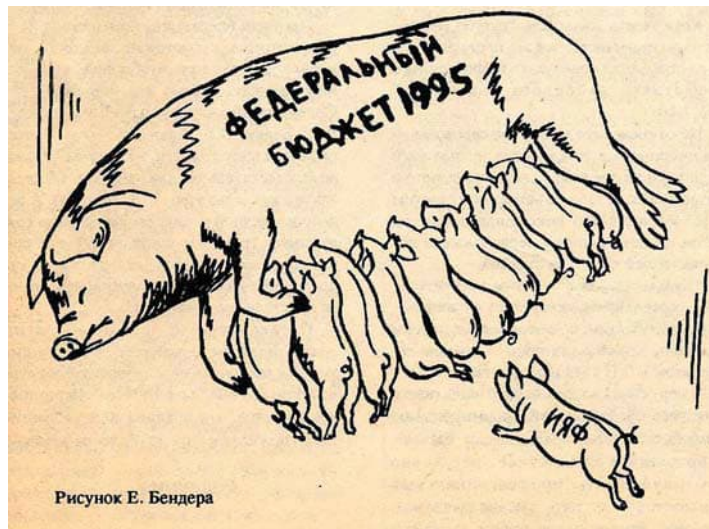


Рисунок Е. Бендера



А. М. Будкер: «Я уже как-то говорил, что всем, кто отправляется в дальний путь, обычно желают попутного ветра. Но если у судна крепкий руль и опытный рулевой, то оно может плыть, и не только по ветру, но и поперек ветра, и даже против ветра. Более того, если тебе ветер все время дует в спину, то остановись и подумай: туда ли ты плывешь, не плывешь ли ты по воле ветра? В науке очень опасно плыть по воле ветра: постоянно создается иллюзия, что ты движешься, а на самом деле тебя несет...

Наиболее опасен для судна штиль. В этом случае можно двигаться только на буксире. Поэтому бояться следует только штиля. А бояться бокового и встречного ветра не нужно: при них всегда можно двигаться вперед, к цели. Бойся штиля!».

«Возраст познания», 1974

Литература:

Скринский А. Н. Рыцари круглого стола // НАУКА из первых рук. 2006. № 1(7). С. 26–37.

Балдин Е. М. Экскурсия по государству ИЯФ // НАУКА из первых рук. 2006. № 1(7). С. 6–25.

Роговский Ю. А., Балдин Е. М., Николаев И. Б. и др. Экскурсия по государству ИЯФ: там, где рождаются частицы // НАУКА из первых рук. 2006. № 2(8). С. 34–51.

Золотарев К. В., Пиминов П. А. СИ в ИЯФ. Формула успеха // НАУКА из первых рук. 2015. № 2(62). С. 10–18.

В публикации использованы рисунки Е. Бендера



2015

<https://scfh.ru/news/kazhdyy-vystrel-20-mlrd-pozitronov/>

Куда ты лезешь, здесь идет эксперимент!

КАЖДЫЙ «ВЫСТРЕЛ» 20 млрд позитронов!

В Институте ядерной физики имени Г.И. Будкера (Новосибирск) в декабре 2015 г. введен в строй инжекционный комплекс (ИК) – первая часть ускорительного комплекса ВЭПП-5. Работа ИК увеличивает производительность уже существующих коллайдеров института, а также является важным шагом на пути к будущему коллайдеру – Супер чарм-тау фабрике, создание которого и станет завершающим этапом реализации этого крупного научного проекта.

О том, как изменилась работа коллайдеров ИЯФ после запуска инжекционного комплекса, поможет ли институту Федеральное агентство научных организаций создать новый коллайдер Супер чарм-тау фабрику и что еще можно будет узнать о Вселенной, используя новый мощный инструмент исследования, – в материале корреспондента журнала «НАУКА из первых рук»



Физика элементарных частиц, или физика высоких энергий, занимается самой сокровенной проблемой мироздания – устройством Вселенной, пытаясь найти ответы на фундаментальные вопросы о свойствах материи, пространства и времени.

Чтобы исследовать элементарные частицы на ядерном и субъядерном уровнях, физики сталкивают эти частицы, а затем наблюдают за событиями, которые происходят в результате их соударения: рождением новых частиц, их распадом и взаимными превращениями. Основным исследовательским инструментом современной физики высоких энергий служат ускорители частиц на встречных пучках – коллайдеры, в которых пучки элементарных частиц разгоняются до околосветовых скоростей и направляются навстречу друг другу. Первый такой ускоритель был создан в новосибирском Институте ядерной физики в 1964 г. под руководством его первого директора, выдающегося физика Г.И. Будкера.

Д. Е. Беркаев, к. ф. – м. н., руководитель инжекционного комплекса ВЭПП-5: «Многokrатно сталкивая электрон с позитроном, мы проверяем теорию строения и взаимодействия элементарных частиц – Стандартную модель. И если теория подтверждается, это служит еще одним свидетельством ее торжества. И все-таки физики всего мира мечтают получить хотя бы микроскопические отклонения от теории, что будет означать, что в чем-то эта теория не совершенна, а значит, есть что-то неизведанное, что нужно изучать дальше. Пока, правда, мы этого еще не дождались. Но работа продолжается, и новый ускорительный комплекс позволит Институту ядерной физики СО РАН сделать очередной шаг в исследованиях фундаментальных свойств материи, развитии широкого спектра прикладных исследований и обеспечить дальнейшее развитие научных школ и технологий».

Важнейшей характеристикой любого коллайдера является его светимость: чем чаще происходят столкновения частиц встречных пучков, тем она больше. Зависит она, во-первых, от точности фокусировки пучка, а во-вторых, от числа самих частиц. Именно проблему повышения светимости должен решить новый инжекционный комплекс ВЭПП-5, который служит

источником электронных и позитронных сгустков для всех установок на встречных электрон-позитронных пучках в ИЯФ СО РАН.

Ранее здесь удавалось получать 2 млрд позитронов за один «выстрел», сейчас же это число увеличилось в 10 раз. Соответственно, в 10 раз возрастет и светимость ВЭПП-2000 – одного из коллайдеров института, который заработал в режиме эксплуатации в 2009 г. Благодаря новому ИК ВЭПП-5 на коллайдере ВЭПП-2000 возможны эксперименты в диапазоне энергии от 1 до 2 ГэВ в системе центра масс с рекордной для этого диапазона энергии точностью.

Проектная светимость ускорителя ВЭПП-2000 – 10^{32} см⁻²с⁻¹ на энергии 1 ГэВ в пучке. Наиболее интересный процесс, наблюдаемый в этой области энергии, – рождение нуклон-антинуклонных пар. Ранее ученые ИЯФ СО РАН изучали эти процессы на В-фабриках в Америке и Японии. Теперь же, с вводом нового инжекционного комплекса ВЭПП-5, именно в Новосибирске самые лучшие условия для изучения этой физики.

Благодаря новому источнику частиц сможет выйти на проектную мощность 8 ГэВ и «ветеран» ИЯФ – коллайдер ВЭПП-4. Для этой установки пучки электронов и позитронов необходимо обновлять с определенной периодичностью, при этом скорость обновления зависит от производительности источника. Ранее этот процесс занимал не менее получаса, а с новым ИК ВЭПП-5 время обновления сократилось до 1 минуты.

Д. Никифоров, аспирант ИЯФ СО РАН: «После запуска нового инжекционного комплекса возможностей двух наших коллайдеров достаточно для удовлетворения всех наших текущих потребностей, но уже сейчас мы работаем над проектами по апгрейду этого комплекса, чтобы он не устарел и через десятки лет. ВЭПП-5 играет ключевую роль и в создании Супер чарм-тау фабрики – так называемого «мегасайенс»-проекта, который ИЯФ СО РАН реализует в сотрудничестве с международными научными организациями. Для этого ускорителя построена треть подземного тоннеля, частично подготовлена и инфраструктура».

Энергия пучка будущей фабрики-коллайдера – 2–5 ГэВ. Сейчас в мире нет установок, которые бы вели полномасштабные исследования в этой энергии. На Супер чарм-тау, или Супер-ст, получившей свое название от двух элементарных частиц (с-очарованный кварк и τ-лептон), будут изучать процессы рождения этих частиц, вести поиски четырех- и пятикварковых, гибридных и других экзотических состояний, а также исследовать их свойства. Предполагается, что объем полученных данных на новосибирской установке

Ключевые слова: ИЯФ, Большой адронный коллайдер, ЦЕРН, СО РАН, инжекционный комплекс, ВЭПП-5, пучок, синхротронное излучение.

Key words: Institute of Nuclear Physics, Large Hadron Collider, CERN, SB RAS, Preinjector Complex, VEPP-5, beam, synchrotron radiation

на три-четыре порядка превысит объем, доступный для анализа на сегодняшний день. Это позволит начать изучение таких новых явлений, как CP-нарушение в распадах D-мезонов и τ -лептона и нарушение закона сохранения лептонного числа в распадах τ -лептона.

В 1990-е гг. в мире обсуждалось несколько проектов ст-фабрик с энергией пучка 1–3 ГэВ и пиковой светимостью около $10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Однако единственным таким реализованным проектом на сегодняшний день является коллайдер BEPC II, запущенный в 2009 г. в лаборатории ИНЕР (Китай).

Создание сибирской Супер чарм-тау фабрики является главным, завершающим шагом строительства самого крупного в России ускорительного центра – Ускорительного комплекса встречных электрон-позитронных пучков (УК ВЭПП-5). Этот проект ИЯФ СО РАН базируется на новом, необычном методе встречи пучков *crab waist*, позволяющем увеличить производительность коллайдера в 100 раз. Этот же способ новосибирские физики предложили и для создания циклического коллайдера будущего (*Future Circular Collider, FCC*), который планируется построить на базе Европейского центра ядерных исследований на смену Большому адронному коллайдеру.

Присутствующий на запуске пучка руководитель ФАНО М. М. Котюков отметил, что на «мегасайенс»-проект Института ядерной физики требуется существенный бюджет, а возможные подходы в финансировании уже обсуждаются с директором ИЯФ СО РАН П. В. Логачевым: «Весь опыт работы института говорит о том, что ИЯФ – уникальная организация, которая сочетает в себе полный спектр научной деятельности, от идеи до воплощения. Я думаю, что, объединив усилия, мы сможем продвигаться в реализации проекта Супер чарм-тау фабрики».

Через несколько дней после пуска ИК на пресс-конференции по итогам работ в рамках гранта РНФ директор ИЯФ, чл. – корр. РАН П. В. Логачев пояснил, что «пока нет никаких конкретных договоренностей, кроме общего желания ФАНО помогать нам в этом направлении. Понятно, что руководитель федерального агентства отлично понимает, что это очень важный проект, который, кроме всего прочего, загрузит местную промышленность и другие высокотехнологичные производства России. Это то, что действительно нужно экономике нашей страны, но для реализации этого проекта институт должен иметь все необходимое. Масштаб проекта слишком значителен, поэтому здесь кроме технического понимания нужно еще политическое решение. И оно – в согласии и гармоничном сочетании

усилий всех профильных министерств правительства России: Минобрнауки, ФАНО, РАН. Мы же со своей стороны стараемся способствовать этому».

Сейчас речь идет не о деньгах: в ближайшие годы вряд ли появятся какие-то большие финансовые возможности. Но даже в этих условиях наш институт может сделать многое для продвижения этого большого проекта. Мы не будем ждать, пока нам дадут деньги, но будем пытаться применять новый метод встречных пучков, на котором основан проект Супер чарм-тау фабрики, на уже имеющихся ускорителях».

Создание коллайдера-фабрики – это дело будущего, но уже сейчас ввод в эксплуатацию инжекционного комплекса ВЭПП-5 дает возможность повысить производительность работающих сегодня в институте ускорителей. И как следствие – повысить уровень и производительность исследований в очень актуальной области – использовании синхротронного излучения, которое сегодня является «микроскопом» современной науки. Такие работы в Новосибирском научном центре проводятся в рамках ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения», созданного при ИЯФ СО РАН, где работают ученые-химики, геологи, физики и иные специалисты не только из сибирских, но и других российских городов.

А. Д. Николенко, к. ф. -м. н., старший научный сотрудник лаборатории синхротронного излучения ИЯФ СО РАН: «Наше синхротронное излучение – это мощный современный инструмент для исследований в области химии, биологии, археологии, медицины и других наук. Как это работает? К примеру, в нашем ускорителе на встречных пучках ВЭПП-4 вращается пучок электронов. Его скорость вращения немногим меньше скорости света. Двигаясь по криволинейной траектории в магнитном поле, пучок становится источником излучения, в котором присутствуют фотоны всевозможных энергий, от инфракрасного до спектрального диапазона. Мы вырезаем из спектра пучка “кусочек”, который требуется в конкретном эксперименте, и используем его для исследования различных объектов».

В синхротронном излучении присутствует ультрамягкая рентгеновская компонента, которая не проходит сквозь атмосферу. Поэтому на одной из наших станций – уникальной в стране – мы можем тестировать и калибровать детекторы и оптику спутников, так что наши клиенты иногда называют результаты этих калибровок “билетом на спутник”. Среди направленных работ нашего центра – калибровка аппаратуры для наблюдения за термоядерной плазмой, что очень актуально для создания термоядерной энергетики,



и диагностика оборудования для нанолитографии – способа массового изготовления интегральных схем со сверхмалыми электронными компонентами, где используется экстремальный ультрафиолет».

Ввод в работу нового инжекционного комплекса ВЭПП-5 означает, что пучки электронов станут интенсивнее, а значит, будет мощнее и излучение, используемое на станциях центра: теперь ученые смогут улавливать более тонкие эффекты.

По словам А. Д. Николенко, «коллективу ИЯФ удалось запустить инжекционный комплекс, но теперь предстоит работа по инъекции электронного пучка из этого комплекса в имеющиеся установки, в первую очередь в комплекс ВЭПП-2000. Потом нужно будет получить позитроны и провести их туда же, затем заставить весь этот комплекс работать в рутинном режиме. Только после этого имеющиеся установки начнут работать в новом, более интенсивном режиме, чем сейчас, а мы сможем начинать набирать статистику результатов столкновения. И только тогда можно получать новые научные данные».

Физика высоких энергий, несмотря на свою неоспоримую фундаментальность, не так уж далека от обычной жизни. Научно-технические решения, которые рождаются при разработке и создании этих установок,

Демонстрация установки ВЭПП-2000 участникам международной конференции

могут с успехом применяться в промышленности и медицине, служить человеку здесь и сейчас.

Л. В. Кардапольцев, к. ф. – м. н., научный сотрудник ИЯФ СО РАН: «Хочется, чтобы в массовом сознании укоренилась мысль, что научно-технический прогресс, инновации не появляются по щелчку, а фундаментальная наука не обладает и не должна обладать высоким прикладным потенциалом в каждый конкретный момент. Ведь когда начинались первые эксперименты с ускорителями, никто из ученых-первопроходцев не думал о том, что в будущем появится всемирная сеть Интернет, что с помощью пучка излучения можно будет удалять раковые опухоли. Им просто было интересно наблюдать и изучать, а все остальное появилось уже потом. И такой ход событий закономерен для развития фундаментальной и прикладной науки».



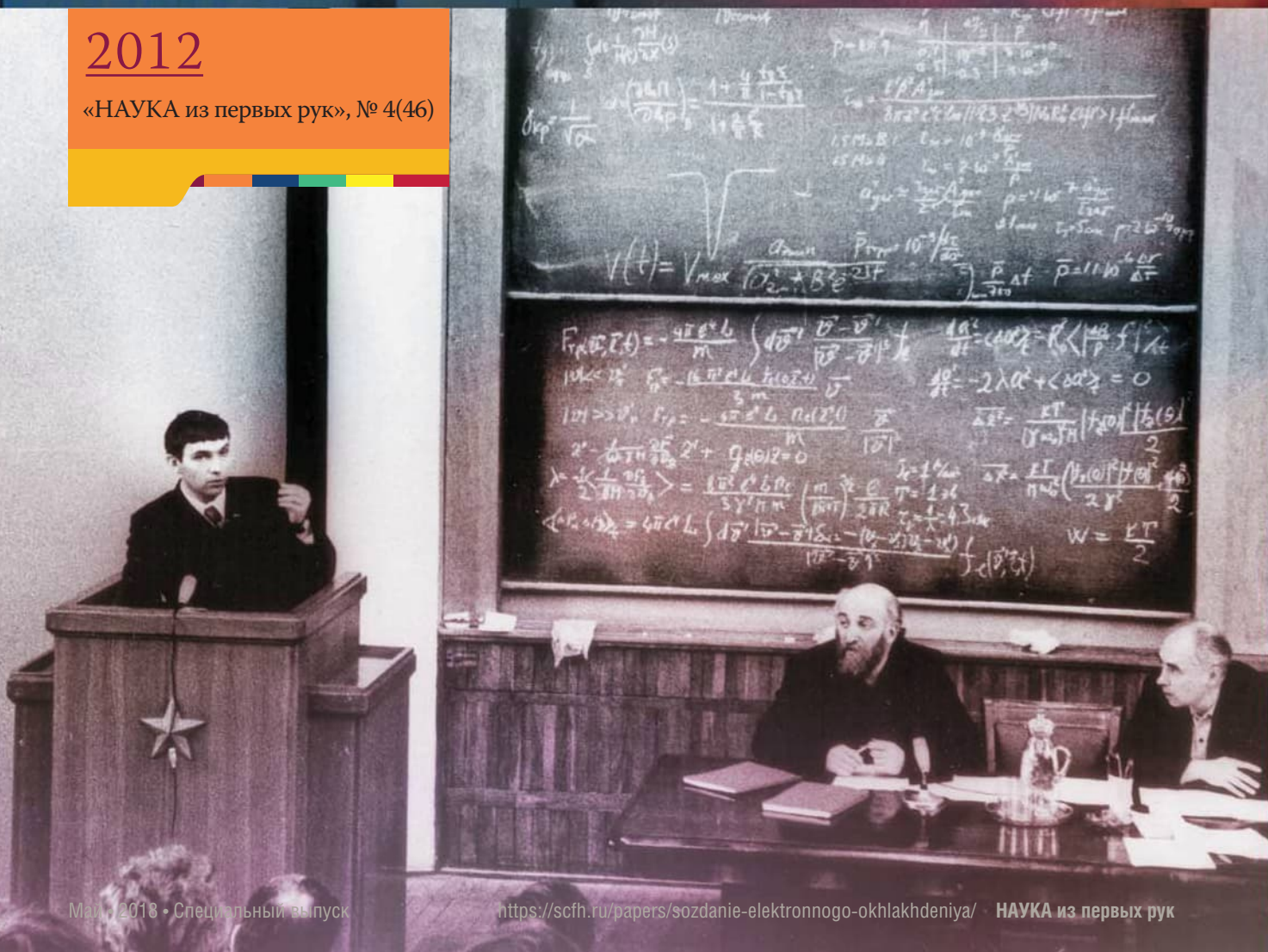
ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

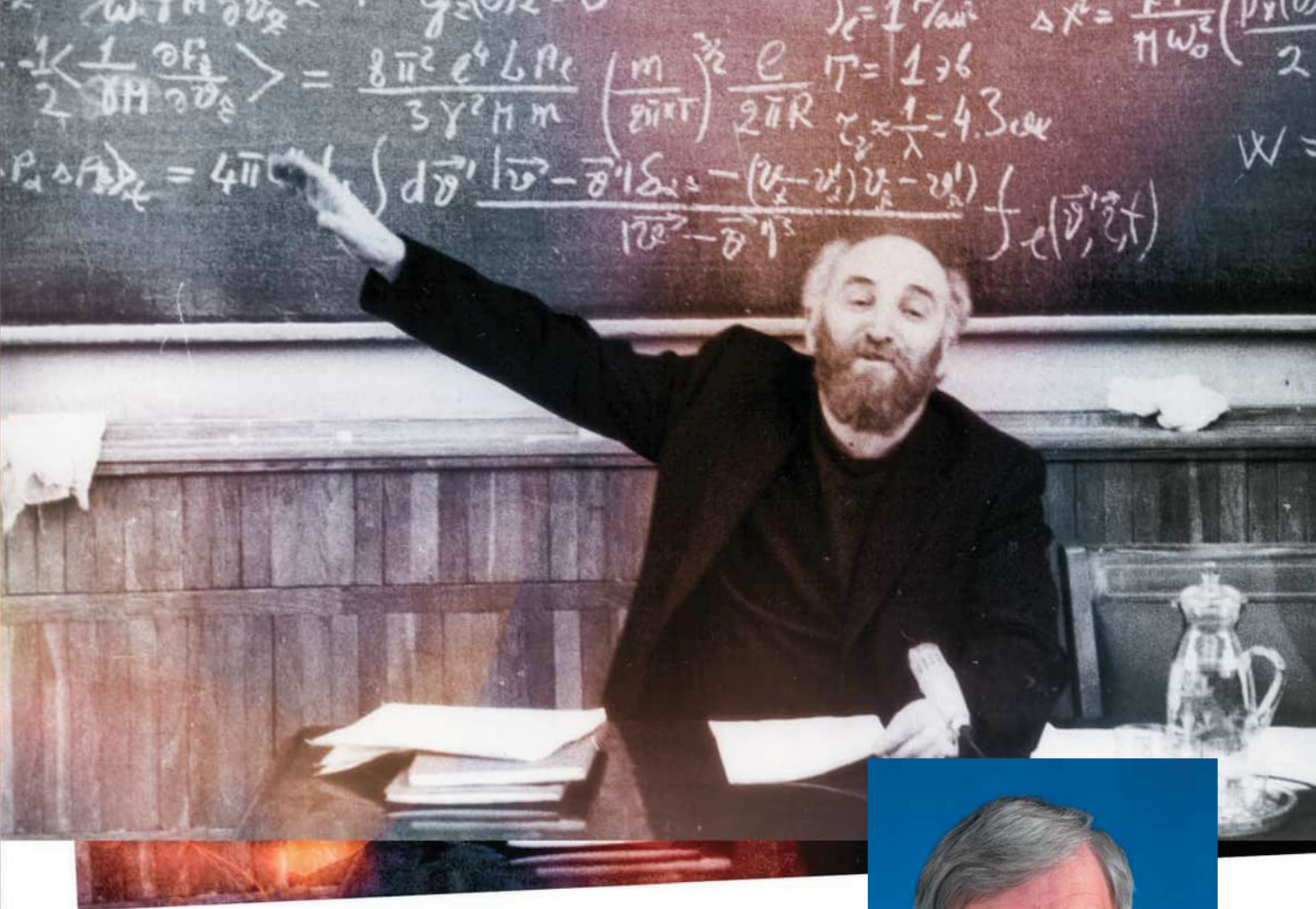
В. В. ПАРХОМЧУК

Метод электронного охлаждения, применяемый в ускорителях для фокусировки ионных пучков, был предложен Г. И. Будкером в 1966 г. Однако реализовать его на практике, создать действующую установку удалось не сразу. То, что на этом пути возможен успех, тогда было не так очевидно, как сейчас. Тем не менее благодаря энтузиазму и усилиям ученых в 1971 году в Институте ядерной физики СО РАН был запущен первый ускоритель, использующий этот метод. Мы публикуем воспоминания одного из создателей метода электронного охлаждения, чл.-корр. РАН Пархомчука В.В., об истории создания и развития этой уникальной разработки

2012

«НАУКА из первых рук», № 4(46)





ПАРХОМЧУК Василий Васильевич – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Лауреат Государственной премии РФ. Автор и соавтор более 160 научных работ

Ключевые слова: ускорители заряженных частиц, встречные пучки, электронное охлаждение.
Key words: charged particle accelerators, colliding beams, electron cooling

Прошло полвека с тех пор, как я впервые услышал о встречных пучках от Г.И. Будкера на его лекции у фонтана в первой летней школе для победителей олимпиад. Тогда, в 1962 г., Г.И. Будкер с вдохновением рассказывал о применении метода столкновения встречных пучков протонов или электронов для изучения их структуры. Для простоты понимания он сравнил частицы с паровозами, мчавшимися навстречу другу другу почти со скоростью света. После такого мощного столкновения все внутренние элементы частиц (паровозов) разлетятся во все стороны, и их можно будет разглядывать по отдельности.

Уже в то время возможности ускорителей элементарных частиц были таковы, что эффективная масса ускоренных электронов в соответствии с теорией относительности возрастала в тысячи раз, и было ясно, что столкновения быстро движущихся «тяжелых» электронов с «легкими» электронами неподвижной мишени будут гораздо менее эффективны, чем встречные столкновения высокоэнергичных «тяжелых» частиц.

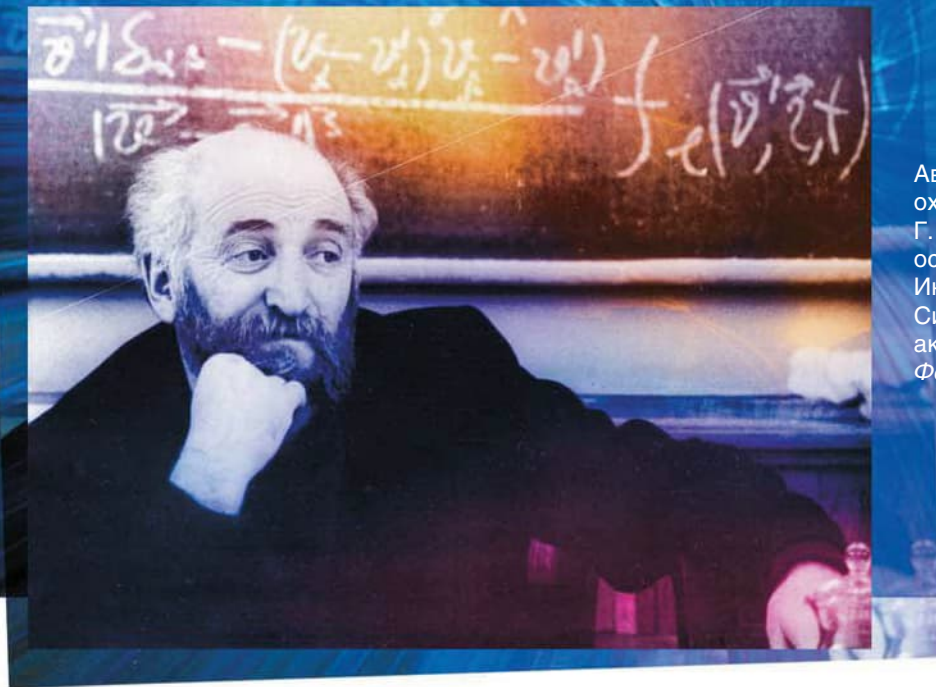
25 марта 1975 г. В.В. Пархомчук защищает кандидатскую диссертацию «Первые эксперименты по электронному охлаждению». За столом – члены диссертационного совета Г.И. Будкер и Л.М. Барков.

Из воспоминаний В.В. Пархомчука: «Г.И. Будкер был очень доволен практической реализацией своей идеи, он комментировал почти каждый тезис моего выступления. На доске написаны формулы для скорости охлаждения и приведен экспериментально полученный результат – время охлаждения протонного пучка в моих экспериментах составляло 1 сек». Фото В.В. Петрова (ИЯФ СО РАН)

© В.В. Пархомчук, 2012

НАУКА из первых рук <https://scfh.ru/papers/sozдание-elektronnogo-okhlakhdeniya/>

Май • 2018 • Специальный выпуск



Автор идеи электронного охлаждения – академик Г. И. Будкер (1918—1977), основатель и первый директор Института ядерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.
Фото В. В. Петрова (ИЯФ СО РАН)

Первая премия по физике, полученная за участие во Всесибирской физико-математической олимпиаде среди учащихся средних учебных заведений, и грамота, подписанная Г. И. Будкером и А. А. Ляпуновым, вдохновили меня на мысль сделать физику своей профессией. Мне, как и каждому мальчишке, такие эксперименты «с паровозами» показались забавными, и я связал всю свою последующую жизнь с наукой.

Физико-математическая школа, Новосибирский государственный университет, Институт ядерной физики привели в аспирантуру к Г. И. Будкеру. Там я и начал заниматься *электронным охлаждением* – экспериментально проверять новую идею фокусировки пучков тяжелых частиц, сформулированную Г. И. Будкером. В коллектив, занимавшийся разработкой этого метода, входили такие известные уже и в то время ученые, как сам академик Г. И. Будкер, академик А. Н. Скринский, с. н. с. Я. С. Дербенев, зав. лаб. Н. С. Диканский, с. н. с. И. Н. Мешков, н. с. Д. В. Пестриков, зав. лаб. Р. А. Салимов, н. с. Б. Н. Сухина.

Путь к созданию работоспособной установки был непростым, но нам удалось воплотить идею в жизнь.

Эта работа впоследствии получила высокую оценку: в 2002 г. ее результаты были отмечены Государственной премией Российской Федерации.

Как сфокусировать пучок ионов?

Для того чтобы при столкновении встречных пучков частиц наблюдать достаточное количество реакций, необходимо, чтобы пучки были плотными. Основным препятствием для фокусировки является поперечная скорость частиц пучка, возникающая как следствие их высокой начальной температуры и, соответственно, большой скорости теплового движения.

Известно, что движущиеся с ускорением (например, по круговой траектории, как это и происходит в кольцевых ускорителях) электроны и позитроны испускают электромагнитное излучение (так называемое *синхротронное излучение*), благодаря чему эффективно теряют энергию. Это приводит к быстрому естественному остыванию пучка электронов и, соответственно, к его сжатию. Для более тяжелых частиц, протонов и ионов



Быть всегда первым: за участие во Всесибирской физико-математической олимпиаде учащихся средних учебных заведений в 1962 г. Василий Пархомчук был награжден Первой премией по физике. Почти через сорок лет после этой победы – снова высшая оценка: вклад, который внесли в развитие науки авторы метода электронного охлаждения, был отмечен в 2001 г. Государственной премией РФ в области науки и техники

ВЫПИСКА ИЗ УКАЗА ПРЕЗИДЕНТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

от 5 августа 2002 года № 831

"О ПРИСУЖДЕНИИ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ПРЕМИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ 2001 ГОДА В ОБЛАСТИ НАУКИ И ТЕХНИКИ"

Рассмотрев предложения Комиссии при Президенте Российской Федерации по Государственным премиям Российской Федерации в области науки и техники, Президент Российской Федерации постановил:

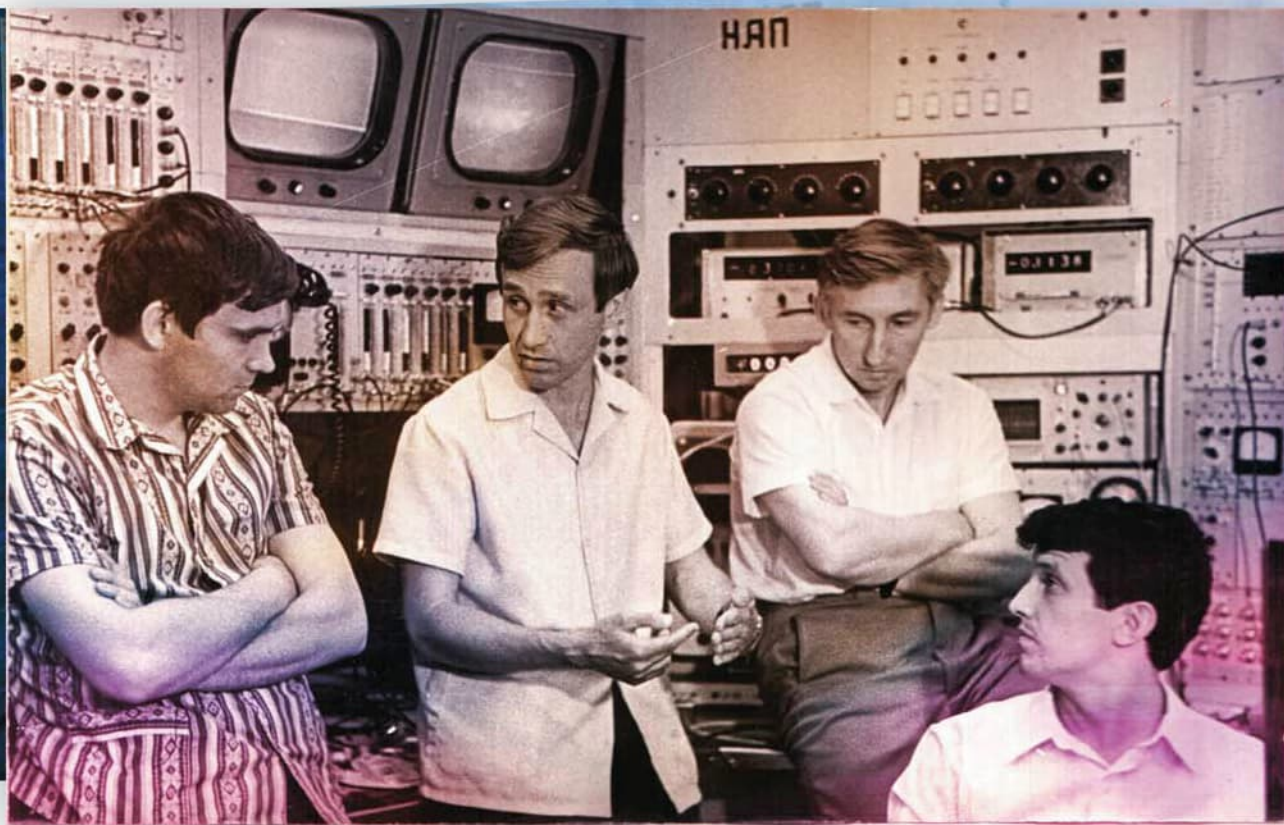
Присудить Государственную премию Российской Федерации в области науки и техники и присвоить звание лауреата Государственной премии Российской Федерации в области науки и техники:

п. 6. Пархомчуку В.В., члену-корреспонденту РАН, заведующему сектором Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, Пестрикову Д.В., д.ф.-м.н., ведущему научному сотруднику, Салимову Р.А., д.т.н., заведующему лабораторией, Скринскому А.Н., академику, директору, Сухине Б.Н., д.т.н., ведущему научному сотруднику, – работникам того же института; Диканскому Н.С., члену-корреспонденту РАН, ректору Новосибирского государственного университета; Мешкову И.Н., члену-корреспонденту РАН, главному инженеру Объединенного института ядерных исследований; Будкеру Г.И., академику (посмертно), – за цикл работ «Метод электронного охлаждения пучков тяжелых заряженных частиц».

этот способ охлаждения пучка не годился, поскольку синхротронное излучение становится достаточно интенсивным только при энергиях движения частиц, достигающих десятков тераэлектронвольт, что в 60-е гг. было недостижимым.

Суть предлагаемого Г.И. Будкером метода охлаждения заключалась в том, что пучок протонов и пучок электронов, двигаясь рядом с почти одинаковыми скоростями, начинают эффективно взаимодействовать посредством электромагнитных сил. Такое взаимодействие приводит к выравниванию их темпе-

ратур, т.е. перетеканию энергии теплового движения от протонного пучка к более холодному электронному. При этом, поскольку масса протона почти в две тысячи раз больше массы электрона, скорость его теплового движения и, соответственно, угловой разброс пучка в десятки раз меньше, чем у пучка электронов: $T=(m_e \cdot V_e^2)/2=(M_p \cdot V_p^2)/2$, скорость V_p частицы, имеющей в $M_p/m_e \approx 2000$ раз большую массу, должна быть в 40 раз меньше (в сопутствующей системе) в тот момент, когда в процессе охлаждения температура частиц станет равной температуре электронов.



Первый успех

Для проверки метода было решено построить полномасштабную модель накопителя антипротонов (с периметром кольца 47 метров) и на ней провести эксперименты по электронному охлаждению. В 1971 г. началась практическая реализация идеи.

Мы проектировали и создавали установку в институтских мастерских, проверяли в экспериментах элементы первого в мире ускорителя с электронным охлаждением. На специальном стенде был получен электронный пучок и исследовались его свойства: плотность, заряд пучка, температура – все, что могло влиять на процесс охлаждения.

Самый первый мой эксперимент заключался в измерении электростатического потенциала электронного пучка легким шариком, подвешенным на длинной нити. Этот почти школьный опыт (когда в электроскопе раздвигаются легкие полоски) при столкновении с реальностью практически провалился. Шарик хорошо отклонялся на столе, но как только мы поместили его в вакуум, трение о воздух, «успокаивающее» его движение, резко упало, и из-за вибраций установки он

стал так сильно колебаться, что нить было плохо видно. Пришлось придумывать специальные демпферы для успокоения нити.

После сборки всех элементов начались попытки добиться охлаждения, которые в течение нескольких месяцев не приносили результата. Происходило это по разным причинам – сначала из-за недостаточно хорошего вакуума, затем из-за проблем с пульсациями в наших электронных схемах. Только вера в идею и горячее желание «подковать блоху», то есть все-таки добиться охлаждения протонного пучка, помогли преодолеть возникавшие проблемы.

Однажды при достаточно случайном выключении внутреннего ионного насоса мы вдруг увидели, что время жизни пучка возросло, и я сразу вспомнил эксперименты с измерением поля электронного пучка шариком на нити. Оказалось, что горячие ионы из насоса сильно заряжали электронный пучок и высокое значение электрического поля «выбивало» протоны из ускорителя вместо охлаждения. Сразу же после этого мы модернизировали систему вакуумной откачки и,

1978 г. Первопроходцы неизведанного: академик А. Н. Скринский в пультовой НАП обсуждает с молодыми учеными В. В. Пархомчуком, И. Н. Мешковым, Н. С. Диканским только что обнаруженное явление сверхбыстрого электронного охлаждения

1998 г. Пионеры стали флагманами : члены РАН В. В. Пархомчук, А. Н. Скринский, И. Н. Мешков, Н. С. Диканский на конференции по электронному охлаждению в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна)



к всеобщей радости, увидели признаки того, что охлаждение происходит.

На достижение этого результата ушло несколько лет. За это время мы не опубликовали ни одной работы и в сегодняшних условиях грантовой системы нас бы разогнали. Но тогда, во время отчета аспирантов, ученый секретарь Института ядерной физики С. Попов меня успокаивал: «Ничего, вот получите охлаждение, тогда и будут публикации».

Это была технически и научно сложная задача. То, что ее можно решить, в то время не казалось таким очевидным, как сейчас, спустя десятилетия. Наверное, поэтому никто в мире не решался начать эти работы, и только в ИЯФ СО РАН благодаря интуиции старшего поколения и энтузиазму молодых ученых стало возможным преодолеть множество встававших на пути создания работоспособной установки проблем и в конце концов добиться успеха.

В итоге в 1974 г. накопитель НАП-М (Накопитель АнтиПротонов-Модель) действовал и был получен первый результат по электронному охлаждению.

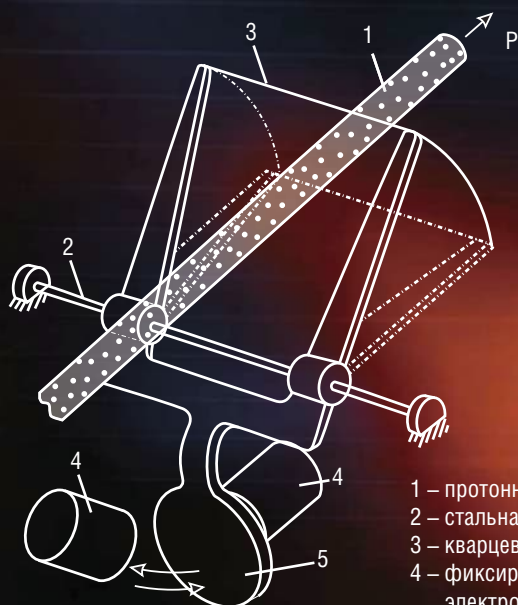
Это большое научное достижение заслужило признание как российских ученых, так и зарубежного научного сообщества.

Новые идеи

Спустя два года, в 1976 г., мы добились еще одного значительного прорыва – обнаружили так называемое *быстрое электронное охлаждение*.

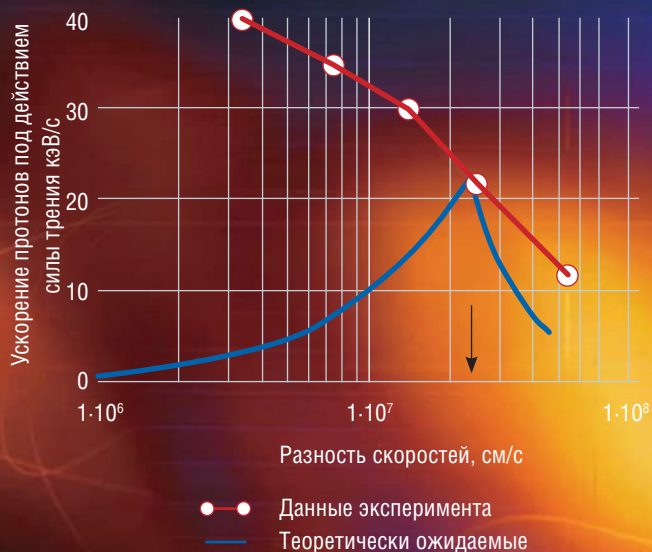
Оказалось, что физика процесса гораздо богаче, чем мы думали: электроны, ускоренные электростатически, имеют в продольном направлении гораздо меньший разброс по скоростям, чем в поперечном. Этот факт был обнаружен экспериментально при измерении зависимости силы трения (взаимодействия протонов и электронов, приводящего к потере энергии протонами) от разности скоростей электронного и протонного пучков.

Сохранился график зависимости силы трения от разности скоростей, на котором я ставил измеренные точки, и они все сильнее и сильнее расходились



- 1 – протонный пучок;
- 2 – стальная струна;
- 3 – кварцевая нить;
- 4 – фиксирующие электромагниты;
- 5 – якорь

Простое, но эффективное устройство для измерения профиля пучка ускоренных протонов. Кварцевая нить сечением в несколько микрон пересекает пучок. Измеряя интенсивность рассеянных нитью частиц, можно прецизионно измерить распределение плотности протонов по сечению пучка



При исследовании взаимодействия пучков протонов и электронов выяснилось, что первоначальные теоретические предположения о силе, действующей на протоны, расходятся с результатами эксперимента. Сопоставление этих данных позволило обнаружить и объяснить явление сверхбыстрого электронного охлаждения

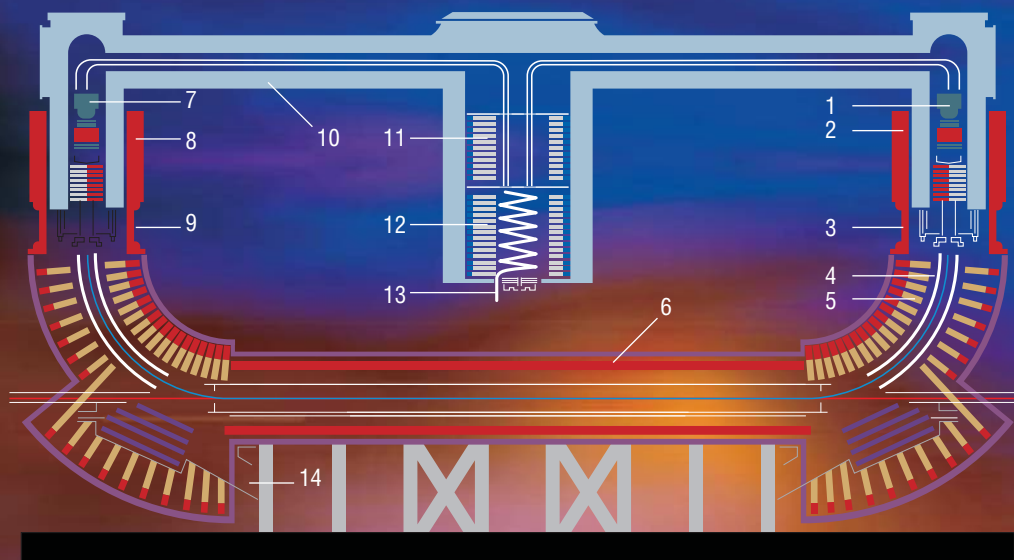
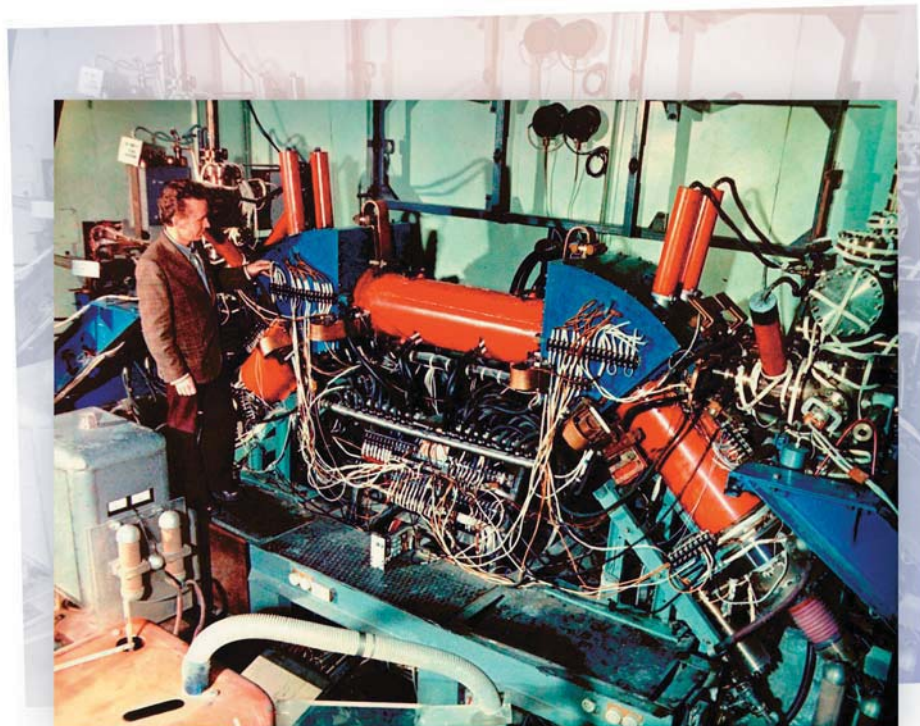


Схема охладителя с энергией 350 кэВ:

- 1 – электронная пушка;
- 2 – основной магнит пушки;
- 3 – дополнительный магнит пушки;
- 4 – электростатическая отклоняющая система;
- 5 – тороидальная магнитная отклоняющая система;
- 6 – основной магнит;
- 7 – коллектор;
- 8 – основной магнит коллектора;
- 9 – дополнительный магнит коллектора;
- 10 – элегазовый (SF₆) фидер;
- 11 – выпрямители;
- 13 – ввод питания;
- 14 – вакуумные насосы

Конструкция электронного охладителя выглядит достаточно просто. Электронный пучок создается электронной пушкой с катодом специальной формы. Затем пучок ускоряется и при помощи отклоняющих систем вводится в канал основного ускорителя. Затем электронный пучок опять же при помощи отклоняющих систем выводится наружу и электроны принимаются в коллектор



с расчетами наших руководителей. Пытаясь понять, как это может быть, мы и осознали причину «холодности» продольного движения.

Кроме того, оказалось, что если электроны «замагничены» – движутся свободно вдоль силовых линий магнитного поля, вращаясь вокруг них, то для протона они выглядят как частицы, не имеющие поперечной скорости (эффективная температура замагниченных электронов была близка к 1 К вместо 1000 К), и процесс охлаждения идет в сотни раз быстрее. Образно говоря, благодаря движению в магнитном поле электроны холоднее, чем они есть на самом деле. Расчеты кинетики охлаждения замагниченными электронами, проведенные Я. С. Дербеневым и А. Н. Скринским, позволили глубже понять причину быстрого охлаждения и целенаправленно модернизировать установку.

В результате удалось получить глубоко охлажденные протонные пучки с уникальными параметрами: угловая расходимость такая же, как у хорошего лазера, меньше доли миллирадиана, размеры охлажденного пучка при эффективной температуре поперечного движения протонов порядка 1 Кельвина – доли миллиметра.

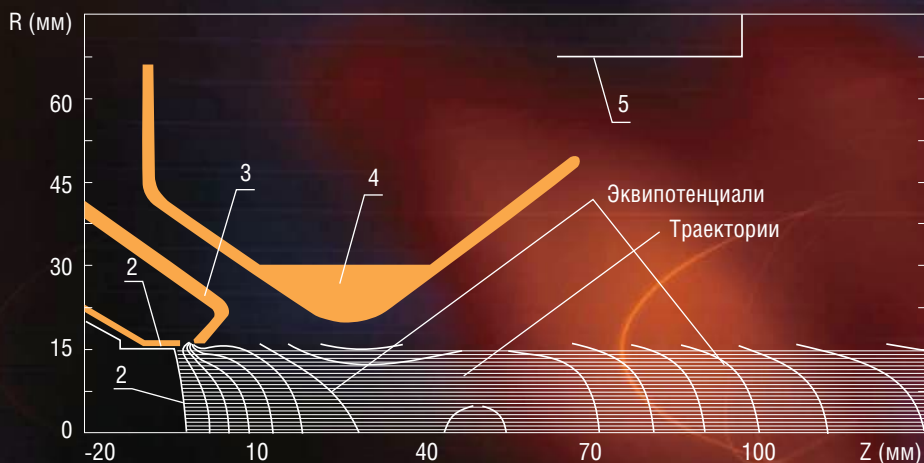
Поперечный размер пучка удобно было измерять тонкой кварцевой нитью с микронным диаметром. Для создания такой нити был изготовлен арбалет, из которого выстреливалась стрела с кварцевой палочкой на острие, расплавленной на конце. При выстреле вытягивалась сверхтонкая нить, найти которую можно было на абсолютно черной поверхности по блеску. Бархат с платья моей супруги оказался самой хорошей

1976 год. Сердце комплекса НАП-М – реализующая метод электронного охлаждения установка ЭПОХА (установка с Электронным Пучком для ОХлаждения Антипротонов). На снимке – один из ее создателей В. И. Куделайнен

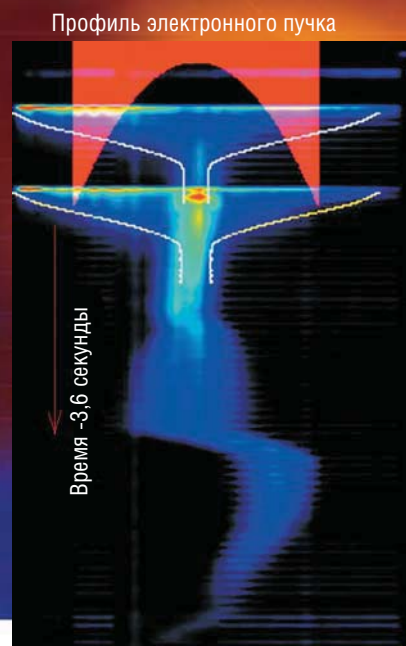
поверхностью для поиска нити. Через несколько месяцев супруга с возмущением обнаружила пропажу, но вскоре я был все же прощен ввиду научной важности полученных результатов.

В ионных пучках со столь малой температурой наблюдается явление, подобное кристаллизации жидкостей – возрастают корреляции между движением и относительным положением ионов. Еще в то время, когда я защищал докторскую диссертацию (1985 г.) и докладывал о возможности наблюдения «кристаллических» пучков, мой оппонент А. Н. Лебедев обратил внимание на то, что при переходе от одномерного кристалла к более реальному, трехмерному, будут возникать проблемы сохранения структуры такого пучка при движении в ускорителе.

Сейчас во многих зарубежных лабораториях ведутся исследования таких пучковых кристаллов, разрабатываются новые конфигурации магнитных систем для сохранения кристаллических свойств глубоко охлажденных пучков. А вот наше российское участие в этих работах, к большому сожалению, ограничивается лишь редкими поездками молодых ребят на эксперименты в центры, в которых установлены наши системы охлаждения.



Модифицированная электронная пушка способна создавать поперечный профиль пучка электронов. Электроны, испускаемые горячим катодом (1), ускоряются в электростатическом поле, создаваемом анодом (4). Экранирующий электрод (2) и управляющий электрод (3) при подаче на них напряжений определенной величины позволяют формировать пучки с различным профилем электронной плотности



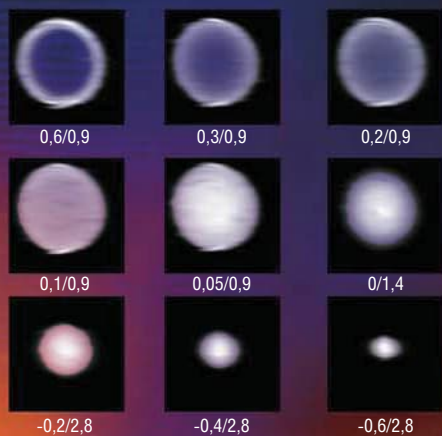
Изображение, полученное при помощи прибора для измерения профиля пучка частиц, иллюстрирует работу электронного охладителя, установленного на Большом адронном коллайдере. Масштаб по вертикали соответствует времени 3,6 секунды. Красным цветом показан профиль электронного пучка, плотность которого на краях гораздо больше, чем в центре. Синим цветом изображен пучок ионов свинца, которые при инъекции занимают все сечение камеры диаметром 50 мм. Электронный пучок охлаждает и быстро сжимает пучок ионов до диаметра 2 мм. Затем происходит новая инъекция, добавляющая ионы. Вновь расширившийся ионный пучок подвергается еще одному циклу охлаждения и сжимается до диаметра примерно 4 мм. После этого электронное охлаждение выключают и пучок немного расширяется

Метод электронного охлаждения позволяет фокусировать не только пучки протонов, он также применим и для случая пучков более тяжелых частиц – ионов. Для того, чтобы ионы не терялись за счет рекомбинации с электронами, возникла идея сформировать электронный пучок так, чтобы плотность электронов была максимальной на периферии пучка, а в середине, где электронов мало, накапливать плотный ионный пучок.

При реализации идеи полого пучка мы решили создать секционный катод, центр которого нагревается меньше и, соответственно, эмитирует меньше электронов. Но после расчетов и моделирования выяснилось, что такая электронная пушка очень плохо управляема и неудобна в эксплуатации.

Один из наших товарищей, А. Н. Шарапа (к сожалению, рано умерший), разрабатывал электронную пушку со специальным катодом в виде кольца. В бурных дискуссиях о том, как же упростить эту пушку, родилась идея: если «оторвать» прикатодный фокусирующий электрод (так называемый *пирсовский электрод*) от катода и подать на него вместо фокусирующего отрицательного потенциала дефокусирующий положительный потенциал, можно вместо узкого пучка получить кольцо.

Впоследствии именно этот ход и позволил получить пучки с неравномерным распределением электронов.



Профиль электронного пучка можно менять, варьируя напряжения на аноде и управляющем электроде. Если на управляющий электрод подать отрицательный потенциал, пучок будет фокусироваться, если положительный – расширяться, вплоть до образования полого, пустого в середине профиля

Еще одна идея, расширяющая возможности электронного охлаждения: разделить кольцо, управляющее профилем, на 4 сектора. Она реализована в новейшем охладителе для Германии

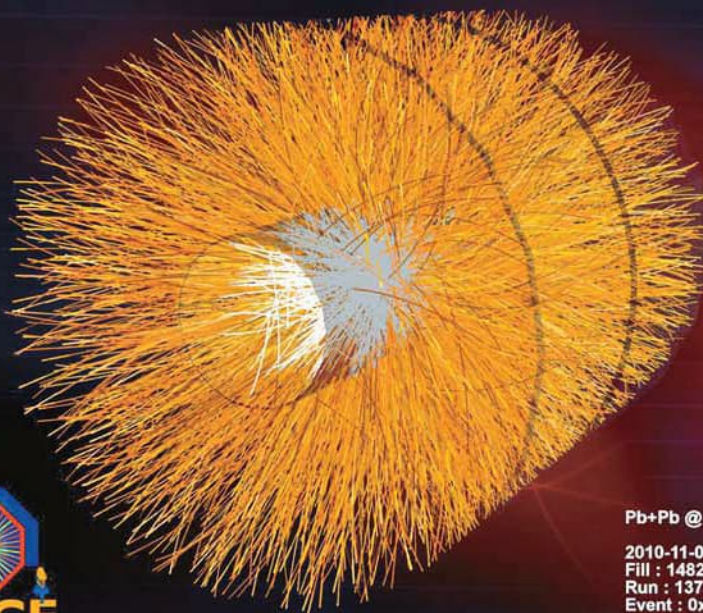
МИШЕНЬ – ОПУХОЛЬ

Применение метода электронного охлаждения приводило к значительному успеху не только в физике элементарных частиц. Очень интересные результаты получены с его помощью в медицине, а именно в онкологии. При обычной терапии рентгеновскими лучами максимум дозы облучения достигается на момент входа пучка излучения в тело пациента, однако по мере достижения опухоли она заметно снижается.

Для компенсации этого эффекта облучение производят с разных сторон, в результате чего опухоль получает максимальную дозу, а облучение здоровых тканей не достигает опасного предела, хотя и достаточно велико.

В случае использования высокоэнергичного пучка ионов ситуация складывается иным образом. По мере торможения пучка в теле пациента ионизация возрастает и максимальный разрушающий эффект наблюдается в зоне опухоли. Благодаря электронному охлаждению размер ионного пучка мал, что позволяет легко его фокусировать, направляя из различных положений на участок ракового поражения. Это дает возможность сконцентрировать большую плотность излучения только в новообразовании, при этом сводя ее к минимуму в здоровых тканях.

Опыты по лечению этим методом онкологических больных проводятся в китайском Институте современной физики (IMP, провинция Ланджоу) на большом экспериментальном ионном комплексе с двумя установками электронного охлаждения, сконструированными и построенными в ИЯФ СО РАН. За время работы этого комплекса сотни людей получили шанс продлить жизнь. Результаты лечения выглядят многообещающе, и в IMP создается проект специализированного центра для лечения больных по этой методике



Столкновение ионов свинца дает богатую научную информацию: на изображении, полученном на детекторе ALICE Большого адронного коллайдера (ЦЕРН), показано обилие треков продуктов столкновения двух ионов.

Для осуществления подобных экспериментов необходима максимально возможная фокусировка ионных пучков, а это невозможно без применения метода электронного охлаждения.

© 2010 CERN



Pb+Pb @ sqrt(s) = 2.76 ATeV

2010-11-08 11:30:46

Fill : 1482

Run : 137124

Event : 0x00000000D3BBE693



1996 г. Электронный охладитель на синхротроне с радиусом кольца 216 м SIS-18 в Институте тяжелых ионов (Германия). Этот ускоритель может разгонять ионы до скорости 90 % от скорости света.

На фото – коллектив российских и немецких физиков, участвовавших в разработке и изготовлении охладителя

Электронное охлаждение – это один из немногих примеров, когда российское изобретение было развито внутри страны до такого уровня, что эти работы остаются востребованными до сих пор. Здесь есть чем гордиться – за несколько десятилетий был пройден большой научный путь, решены сложнейшие технические задачи, и все это позволило существенно продвинуть состояние дел в физике элементарных частиц.

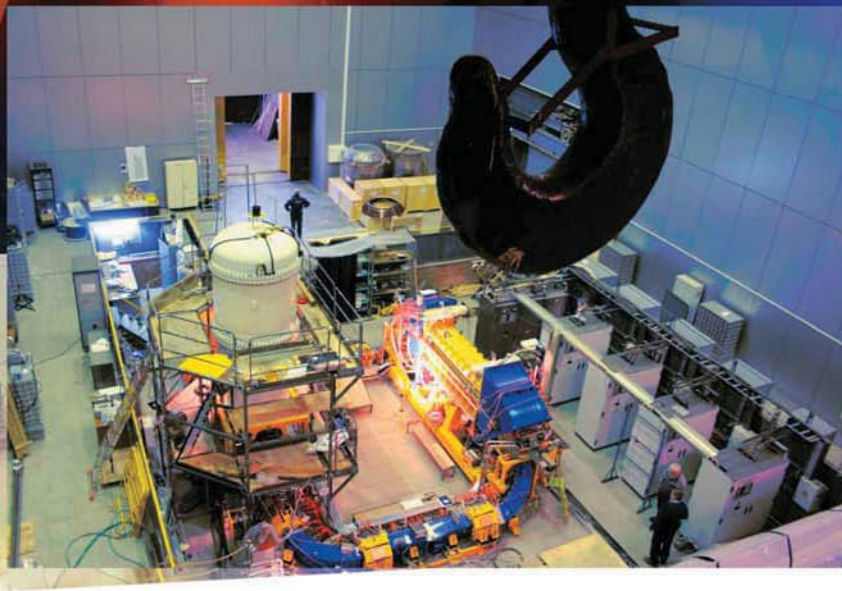
ИЯФ создал накопители ионов с применением идеи электронного охлаждения для Германии, Китая, Швейцарии. Институт активно участвовал в развитии этого метода в Японии, Швеции, США. Установка для накопления ионных пучков на Большом адронном коллайдере также разработана и изготовлена в ИЯФ СО РАН.

Важным шагом вперед стала только что созданная для ускорительно-накопительного центра в Германии установка электронного охлаждения на напряжение до 2 МВ. В следующем году ее предполагается установить на синхротрон COSY, что существенно расширит экспериментальные возможности этого ускорителя.

В этой установке для электронного охлаждения ионов свинца, созданной российскими учеными для Большого адронного коллайдера, реализовано множество научных идей и оригинальных технологических решений. Специалисты ЦЕРН высоко оценивают перспективы ее использования



Ускорительные центры во всем мире заинтересованы в российских технологиях. Последняя, наиболее современная установка электронного охлаждения разработана и изготовлена в Институте ядерной физики СО РАН для научно-исследовательского центра COSY (Юлих, Германия)



В России, в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна), создается тяжелоионный коллайдер NICA, в котором предполагается использовать системы охлаждения пучков ионов. В ИЯФ уже создан эскизный проект такого охладителя и планируется в ближайшем будущем начать его изготовление.

Наличие на настоящий момент в той же Германии четырех установок электронного охлаждения при полном отсутствии их в России является иллюстрацией вечной нашей проблемы: мы вновь выступаем в роли небезызвестного сапожника без сапог. И все же я надеюсь, что в недалеком будущем метод электронного охлаждения будет применяться и в нашей стране, как для научных, так и практических приложений.

Литература

Будкер Г.И. Эффективный метод для демпфирования колебаний частиц в протонных и антипротонных кольцах // *Атомная энергия*. 1967. Т. 22. С. 346–348.

Будкер Г.И., Скринский А.Н. Электронное охлаждение и новые возможности в физике элементарных частиц // *УФН*. 1978. № 124. С. 561–595.

Пархомчук В.В., Скринский А.Н. Электронное охлаждение – 35 лет развития // *УФН*. 2000. Т. 170. № 5. С. 473–493.

Parkhomchuk V. V., Skrinsky A. N. Electron cooling: physics and prospective applications // *Report on Progress in Physics*. July 1991. V. 54. № 7. P. 919–947.

Parkhomchuk V. V. and Skrinsky A. N. Cooling methods for charged particle beams // *Reviews of Accelerator Science and Technology*. 2008. V. 1. P. 1–21.

«Ионная» терапия рака

Установки электронного охлаждения ионных пучков, созданные в Институте ядерной физики СО РАН (Новосибирск), используются в комплексе для лечения онкозаболеваний высокоэнергичным пучком ионов углерода. Этот метод, гораздо более эффективный и безопасный по сравнению с обычной рентгенотерапией, в 2009 г. уже опробован в КНР, где показал хорошие результаты

Метод электронного охлаждения ионных пучков был предложен еще в 1966 г. академиком Г. И. Будкером. Эту идею, поначалу встреченную скептически, удалось осуществить десять лет спустя. В экспериментах, которые были проведены в ИЯФе, температуру протонного пучка удалось уменьшить с нескольких миллионов до нескольких десятков градусов по Кельвину, а его диаметр – с нескольких сантиметров до долей миллиметра. В дальнейшем этот метод стал широко применяться во многих мировых ускорительных центрах.

Ионные пучки такого качества нужны для решения как фундаментальных, так и прикладных задач. Сегодня в мире создано несколько десятков установок, основанных на этом методе и служащих для различных целей. Самая крупная из них охлаждает антипротонный пучок на протон-антипротонном комплексе ТЭВАТРОН в США (электронный охладитель для антипротонов создавался командой выходцев из ИЯФа).

В течение многих лет специалистами из Института ядерной физики продолжались работы по развитию метода электронного охлаждения. Но отсутствие спроса на высокотехнологическую продукцию внутри страны стало поводом для выхода на внешний рынок – производство установок по контрактам началось для Германии, Китая, Швейцарии. Первая из них была создана для немецкого синхротрона SIS-18 с целью повышения интенсивности редких ионов. Она работает до сих пор, и в 2009 г. использовалась в экспериментах по накоплению редких ионов рутения (кстати, открытого в 1844 г. и названного в честь Руси Карлом Клаусом, немцем, работавшем тогда в Казанском университете). В 2007 г. еще одна установка для охлаждения ионов свинца, созданная в ИЯФе, заработала в инжекционном комплексе самого большого коллайдера LHC, построенном в Женеве.

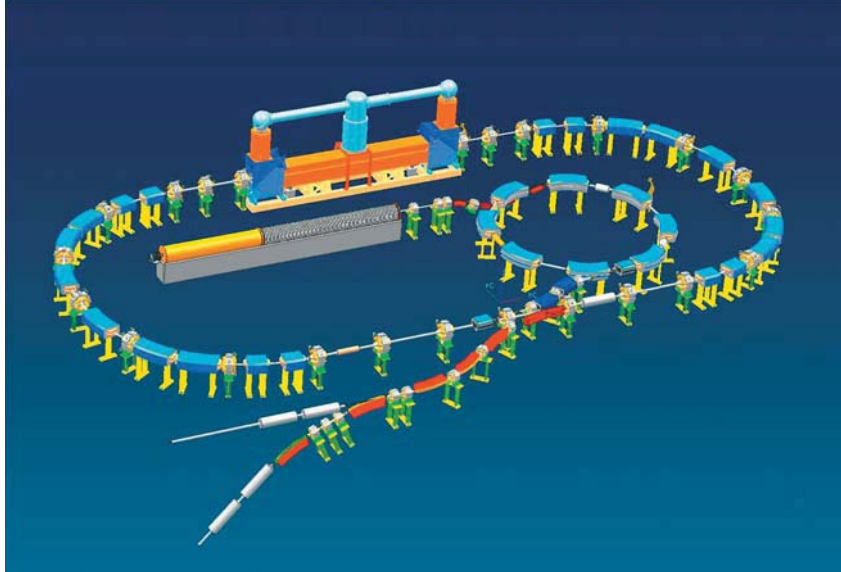
Но особо актуальна возможность применения метода электронного охлаждения в медицине, а именно



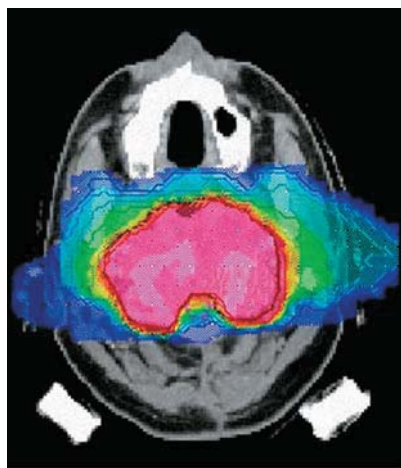
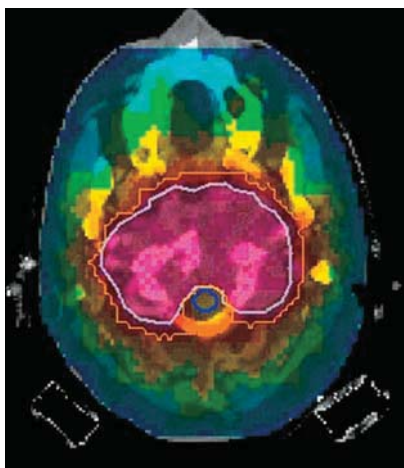
Первая в мире установка электронного охлаждения. Справа сверху показан атомарный пучок с диаметром менее 1 мм, возникающий в результате рекомбинации и прошедший расстояние 10 м до попадания на пленку. Угловой разброс пучка существенно меньше 10^{-5} , а температура в сопутствующей системе составляет порядка 10 К

2010

«НАУКА из первых рук», № 2(32)



Проект углеродного комплекса для лечения рака с использованием метода электронного охлаждения. Ионы углерода ускоряются в небольшом линейном ускорителе и инжектируются в кольцевой бустер. Оттуда они направляются в основное кольцо с электронным охлаждением, где и накапливаются, затем снова посредством охлаждения, направляются в каналы распределения



Компьютерный план распределения дозы, полученный при использовании рентгеновской терапии с девяти направлений (слева), и углеродной терапии с двух направлений (справа). Видно, что доза, полученная здоровыми тканями, при рентгеновской терапии значительно больше, чем при ионной. Более четкий контур высокой дозы при применении ионной терапии позволяет получать хороший терапевтический эффект за счет быстрого восстановления прилегающих к опухоли тканей

в онкологии. При обычной терапии рентгеновскими лучами максимум дозы облучения достигается на момент входа пучка излучения в тело пациента, однако по мере достижения опухоли она заметно снижается. Для компенсации этого эффекта облучение производят со многих направлений, в результате чего опухоль получает максимальную дозу, а облучение здоровых тканей не достигают опасного предела, хотя и достаточно велико.

В случае использования высокоэнергичного пучка ионов ситуация складывается иным образом. По мере торможения пучка в теле пациента ионизация возрастает, и максимальный разрушающий эффект наблюдается в зоне опухоли. Малый размер ионного пучка позволяет легко его фокусировать, направляя из различных положений на участок ракового поражения. Это дает возможность сконцентрировать большую плотность излучения только в новообразовании, при этом сводя ее к минимуму в здоровых тканях.

Ключевые слова: охлаждение пучков, ионная терапия, медицинские ускорители.

Key words: beam cooling, cooler, ion therapy, medical accelerators

В Китайском научном центре IMP (провинция Ланджоу) создан ионный комплекс с двумя установками электронного охлаждения, сконструированными и построенными в ИЯФ СО РАН. В 2009 г. на них было проведено лечение первых десятков больных, которое дало хорошие результаты. Правительство провинции выделило крупные средства на создание специализированного центра углеродной терапии. Подобных установок в России нет, и если в ближайшие годы аналогичное финансирование не будет выделено, наши соотечественники, нуждающиеся в антираковой терапии, будут вынуждены обращаться за ней за границу.

Литература

Будкер Г.И., Скринский А.Н. Электронное охлаждение и новые возможности в физике элементарных частиц // УФН. 1978. Т. 124. С. 561.

Parkhomchuk V. V., Skrinsky A. N. Cooling Methods for Charged Particle Beams // Reviews of Accelerator Science and Technology. 2008. V.1. P. 237–257.

Патент № 93026, «Ускорительный Комплекс для терапии рака протонными и ионными пучками» зарегистрирован 20 апреля 2010 г.

Чл.-корр. В.В. Пархомчук (Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск)



ЗЕРКАЛЬНАЯ

асимметрия в атомных явлениях

К 30-летию открытия новосибирских физиков





2009

«НАУКА из первых рук», № 1(25)

Тридцать лет назад в новосибирском Академгородке был проведен эксперимент, результаты которого если не потрясли, то сильно встряхнули научный мир. Выполнили его в Институте ядерной физики СО АН СССР Л. М. Барков и М. С. Золоторев, а «идеологом» был теоретик И. Б. Хриплович. Сибирские ученые открыли эффект несохранения четности в слабом взаимодействии электронов с атомным ядром. Эксперимент вошел в энциклопедии. Сегодня академик Барков (на фото — слева) и член-корреспондент Хриплович (справа), несмотря на солидный возраст, продолжают трудиться в стенах родного института, Золоторев с 1980-х гг. живет в США. Герои настоящей публикации достигли в жизни самых высоких — и заслуженных! — степеней общественного и научного признания: Лев Митрофанович Барков — лауреат Государственной премии (1989), награжден несколькими орденами; Иосиф Бенционович Хриплович удостоен таких престижных наград в области теоретической физики, как медаль Дирака (2004) и премия им. И. Я. Померанчука (2005).

Журнал «НАУКА из первых рук» решил познакомить читателей с историей (и предысторией) выдающегося эксперимента, чтобы вы из первых уст узнали те колоритные подробности, о которых обычно не пишут в монографиях и не докладывают на научных конференциях

Времена одиночек в физическом эксперименте давно прошли. Физики элементарных частиц это касается в наибольшей степени. Размеры и стоимость ускорителей и ядерных реакторов, с помощью которых получают основные экспериментальные результаты, постоянно растут, и этой тенденции уже много десятилетий.

Тем удивительней сделанный в 1978 г. в ИЯФе опыт Баркова и Золоторева, ключевую идею которого предложил Хриплович. Им удалось исследовать фундаментальные вопросы слабых взаимодействий методами оптической спектроскопии. Нарушение зеркальной симметрии, или, как говорят физики, пространственной четности, во взаимодействии электронов с нуклонами новосибирские ученые обнаружили, наблюдая вращение плоскости поляризации света в парах висмута. Можно сказать, малыми силами исследователи добыли большое знание.

Пространственная инверсия и четность

Для объяснения понятия четности следует углубиться еще на двадцать лет назад — в середину прошлого века. До 1950-х гг. казался незыблемым постулат, что природа обладает зеркальной симметрией. Что это означает?

Представим себе преобразование, при котором направления координатных осей изменяются на противоположные ($x \rightarrow -x$, $y \rightarrow -y$, $z \rightarrow -z$). Такое преобразование называется *пространственной инверсией*. Эту операцию удобно рассматривать как три последовательных отражения относительно трех взаимно перпендикулярных плоскостей («зеркал»). Часто при анализе вопроса, что происходит в той или иной физической

ситуации при пространственной инверсии, можно ограничиться одним зеркалом — только нужно его правильно выбрать.

Ученые считали, что законы физики устроены таким образом, что в зеркале они выглядят так же. То есть, имея описание какого-либо физического явления (зависимость от времени координат, скоростей, полей и т. д.), нельзя определить, наблюдается оно непосредственно или в зеркале. Утверждение, что процессы природы симметричны относительно отражения координат, в квантово-механической формулировке называют *законом сохранения пространственной четности* (или просто четности).

Подозрения, что иногда четность все-таки не сохраняется, возникли в связи с наблюдаемыми распадами K^+ -мезонов, обусловленными слабыми взаимодействиями. Разгорелась жаркая дискуссия. Гениальный Ландау публично заявлял: «Я повешусь, если четность не сохраняется!» Наконец, в 1957 г. в научном споре была поставлена точка: эксперименты нескольких исследовательских групп убедительно продемонстрировали несохранение четности в распадах ядер и элементарных частиц. Ландау своего обещания, конечно, не сдержал, но зеркальная симметрия мира рухнула.

Опыт Ву

Самым наглядным среди экспериментов 1957 г. был, пожалуй, опыт мадам Ву из Колумбийского университета. В чем заключалась его суть? Радиоактивный образец изотопа кобальта ^{60}Co помещался в магнитное поле кругового тока, под действием которого спины ядер выстраивались вдоль направления поля. У ядра кобальта-60 величина спина $J = 5$ и, соответственно, большой магнитный момент, что позволяло получить высокую сте-

пень поляризации ядер в магнитном поле. Чтобы тепловое движение не уничтожило поляризацию, образец охлаждался значительно ниже температуры жидкого гелия.

Как известно, в каждом акте β -распада испускается электрон (называемый β -частицей) и антинейтрино:



Частицы летят по всем направлениям, но в эксперименте измерялось только количество электронов, испущенных по направлению магнитного поля (спинов ядер) и в противоположном направлении.

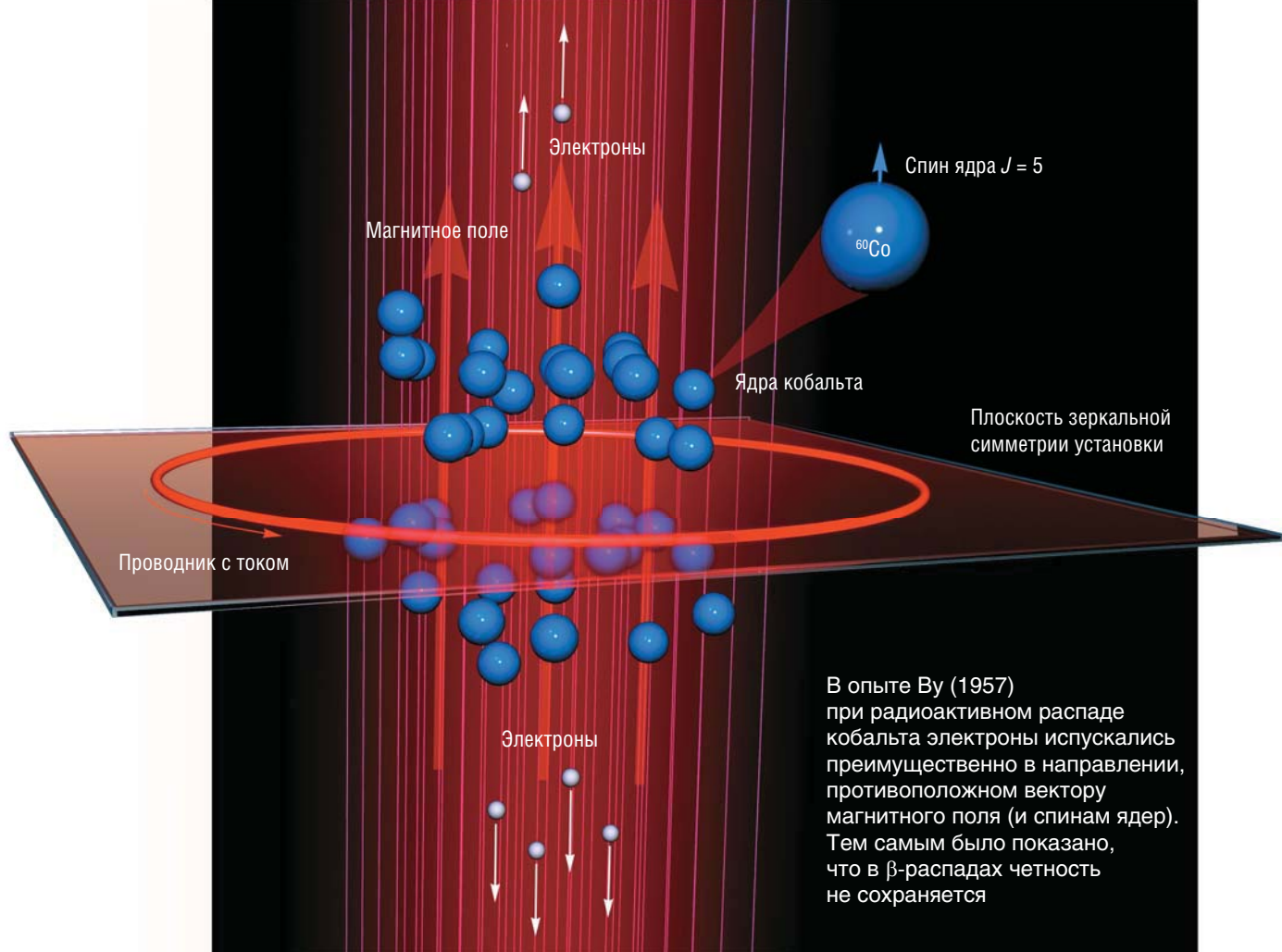
Теперь обратите внимание, что вся установка зеркально симметрична относительно плоскости, в которой расположен круговой ток. При зеркальном отражении импульс (полярный вектор) меняет знак, а напряженность магнитного

ПОЛЯРНЫЕ И АКСИАЛЬНЫЕ ВЕКТОРЫ

При отражении координатных осей (пространственной инверсии) различные физические векторные величины ведут себя по-разному. Одни из них меняют свой знак на противоположный (сохраняясь по модулю), другие — нет.

Если при пространственной инверсии вектор меняет знак, он называется полярным. Примеры: радиус-вектор, скорость, импульс.

Аксиальный вектор не меняет знака при отражении координатных осей. Примеры: векторное произведение обычных (полярных) векторов, например момент импульса $M = r \times p$ (r — радиус-вектор, p — импульс), или напряженность магнитного поля $H = \text{rot } A = \nabla \times A$ (A — векторный потенциал). Следует понимать, что направление аксиального вектора в известной степени условно, так как зависит от принятого при определении условия



В опыте Ву (1957) при радиоактивном распаде кобальта электроны выпускались преимущественно в направлении, противоположном вектору магнитного поля (и спином ядер). Тем самым было показано, что в β -распадах четность не сохраняется

поля, магнитный момент, спин (аксиальные векторы) знака не меняют. Если бы четность сохранялась, что эквивалентно неизменности физической картины при зеркальном отражении, то должно было бы регистрироваться одинаковое количество электронов как по направлению магнитного поля, так и в противоположном направлении. Однако оказалось, что электроны летят преимущественно против вектора магнитного поля. Так было впервые показано, что в слабых взаимодействиях не сохраняется пространственная четность.

Одновременно с этой классической работой были выполнены эксперименты, обнаружившие несохранение четности в распадах мюонов и пионов. А вот не в распадах, а в процессах с так называемыми нейтральными токами (о которых речь впереди) вопрос, сохраняется

ли четность, оставался открытым в течение двадцати лет, до эксперимента Баркова—Золоторева.

Нейтральные токи

К 1970-м годам нарушение зеркальной симметрии в известных процессах слабого взаимодействия элементарных частиц уже никем не оспаривалось. Чем же был обусловлен интерес исследователей, в том числе в новосибирском Академгородке, к поискам новых эффектов несохранения четности? Чтобы объяснить причину этого, нужно хотя бы вкратце коснуться понятий, используемых на рубеже 1960—1970-х гг. некоторыми теориями электрослабого объединения.

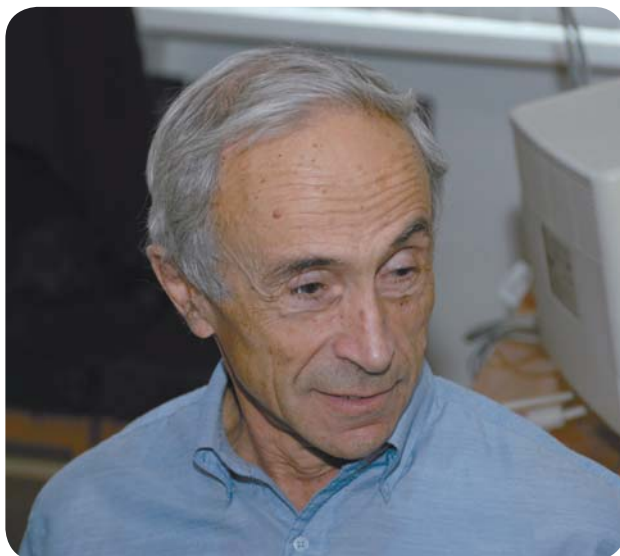
В то время в физике элементарных частиц одним из центральных оказался вопрос о существовании и

ЧТО ТАКОЕ СПИН?

Спин (от англ. *spin* — вращаться) — собственный момент импульса элементарных частиц, имеющий квантовую природу и не связанный с перемещением частицы. Частица может находиться в $2J + 1$ спиновых состояниях (где спиновое число J — целое или полуцелое), что эквивалентно дополнительной степени свободы. Наличие у электрона спина, равного $1/2$, объяснило тонкую структуру атомных спектров, особенности расщепления спектральных линий в магнитном поле (эффект Зеемана), закономерности периодической системы элементов. Как разновидность момента импульса, спин является аксиальным вектором

ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА

Дух высоких энергий	72
Лазер, фотодиоды и военпред	75



ДУХ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

И.Б. Хриплович: И Лев Митрофанович Барков, и я — мы оба родом из физики высоких энергий. Лев Митрофанович к тому же экспериментатор, поэтому привык к большим установкам. В 1960-х — начале 1970-х основным рабочим инструментом были ускорители, а это, как вы понимаете, сооружения размером в десятки-сотни метров и коллективы из сотен людей. И вот году в 1974-м у меня возникла мысль, что можно получить важный результат в физике элементарных частиц с помощью фактически комнатной установки. Речь идет о поиске несохранения четности в атомных переходах посредством наблюдения вращения плоскости поляризации света в парах тяжелых металлов. Идея многим показалась фантастической, но Барков и Макс Золоторев стали ее энтузиастами. Надо сказать, что одновременно подобную идею выдвинули еще две исследовательские группы — в Оксфордском университете и в Университете штата Вашингтон в Сиэтле. Не знаю, была ли согласованность действий у англичан с американцами, но у нас с ними никакой корреляции не было. И что интересно: мы ведь не были специалистами в атомной физике, грубо говоря, мы были дилетантами, но как раз из-за отсутствия опыта действовали во всей этой эпопее решительно, быстро и часто правильно. Мы подошли к нашей научной задаче не как спектроскописты... Я бы сказал так: дух физики высоких энергий был привнесен в это дело.

структуре нейтральных слабых токов. Что это такое? Рассмотрим, например, обычный β -распад нейтрона

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

или распад мюона

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Как нетрудно видеть, эти слабые процессы сопровождаются изменением электрического заряда *адронов* (нейтрона, протона) и *лептонов* (электрона, мюона, электронного и мюонного нейтрино и антинейтрино). Обо всех подобных процессах говорят, что они обусловлены слабым взаимодействием *заряженных токов*.

Между тем законами сохранения не запрещены и процессы, не сопровождающиеся передачей заряда, например упругое рассеяние нейтрино на протоне

$$\nu_e + p \rightarrow \nu_e + p.$$

Нейтрино, рассеиваясь на протоне за счет слабого взаимодействия, просто передает ему энергию и импульс. О процессах такого рода, в которых не изменяется заряд лептонов и составляющих адроны *кварков*, принято говорить, что они обусловлены *нейтральными слабыми токами*.

После того как было выдвинуто предположение о существовании нейтральных токов, на протяжении многих лет физика не ощущала особой необходимости в этой гипотезе. Ситуация изменилась после появления теоретических моделей, единым образом описывающих слабые, электромагнитные и сильные взаимодействия элементарных частиц. Ясно, что подобная теория, подтвержденная к тому же экспериментально, оказалась бы достижением того же класса, что и создание Максвеллом единой теории электромагнитного поля вместо разрозненного описания электростатических и магнитных явлений, существовавшего до него. Так вот, большинство упомянутых моделей естественным образом содержит нейтральные токи.

ОБЩЕПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

p — протон,
 n — нейтрон,
 e^- — электрон,
 ν_e — электронное нейтрино,
 μ^- — мюон,
 ν_μ — мюонное нейтрино.

Примечание: античастица помечается чертой над буквенным обозначением соответствующей частицы

Когда в 1973 г. нейтральные токи были экспериментально обнаружены, целый класс единых моделей оказался закрытым. В экспериментах наблюдались реакции, в которых мюонное нейтрино, рассеиваясь на протоне или нейтроне, рождает адроны с суммарным зарядом, равным заряду начального адрона:

$$\nu_{\mu} + p(n) \rightarrow \nu_{\mu} + \text{адроны.}$$

То, что нейтральные токи впервые были открыты в реакциях с участием нейтрино, не случайно. Поскольку эта частица не обладает ни сильным, ни электромагнитным взаимодействием, нейтринные нейтральные токи легче обнаружить: они ничем не маскируются. Для заряженных частиц слабое взаимодействие маскируется на много порядков более сильным электромагнитным.

Как же выделить вклад слабого взаимодействия электрона с атомным ядром, обусловленного нейтральными токами, в реакции

$$e^{-} + p(n) \rightarrow e^{-} + p(n)?$$

На помощь физике элементарных частиц пришла оптика с ее прецизионной точностью измерений.

«Слабая» оптика

Популярные в то время теории электрослабого объединения, в том числе модель Вайнберга и Салама (1968), предсказывали существование слабого взаимодействия между электроном и ядром, не сохраняющего четность. Следует отметить, что впервые принципиальная возможность поиска нейтральных токов по эффектам несохранения четности в атомных оптических переходах обсуждалась еще в 1959 г. советским физиком Я. Б. Зельдовичем.

Вспомни из школьного курса физики, как излучает атом. Со-

КВАРКИ, ЛЕПТОНЫ И ТРИ ТИПА ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Все вещество состоит из 12 фундаментальных частиц, являющихся истинно элементарными, т. е. не имеющих внутренней структуры: 6 кварков (u, d, s, c, b, t) и 6 лептонов (электрон, мюон, τ -лептон и соответственно 3 сорта нейтрино). Кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях; заряженные лептоны (электрон, мюон, τ -лептон) — в слабых и электромагнитных; нейтрино — только в слабых взаимодействиях. Гравитационное взаимодействие в физике элементарных частиц пренебрежимо мало.

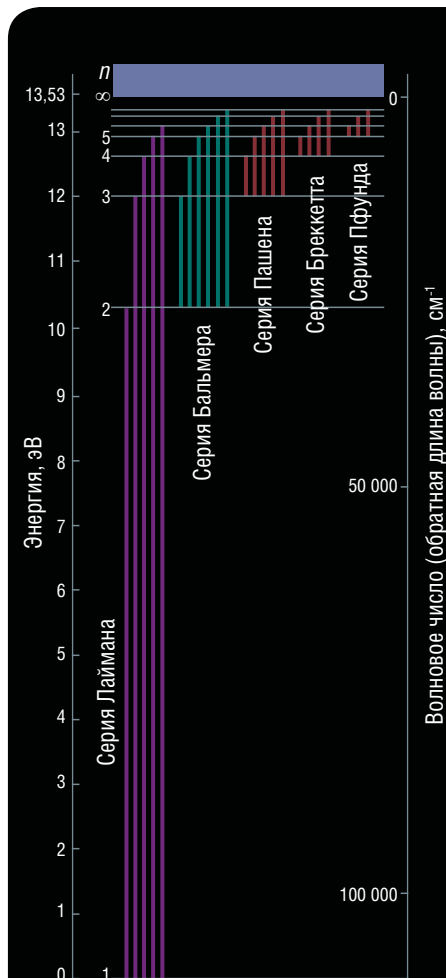
Из кварков состоят адроны, в частности, протоны и нейтроны (из трех кварков), а также мезоны (из одного кварка и одного антикварка). По современным представлениям, кварки не могут существовать в свободном виде

гласно постулатам Бора электрон в атоме может находиться в некоторых стационарных состояниях (на орбиталях), в которых он не излучает. Каждой орбитали соответствует свой уровень энергии. Значения возможных энергий квантованы (дискретны). Когда электрон переходит с одной орбитали на другую, излучается (или поглощается) квант. Энергия кванта E_{mn} равна разности энергий электрона до и после перехода:

$$E_{mn} = h \nu_{mn} = E_m - E_n,$$

где h — постоянная Планка, ν_{mn} — частота кванта, m и n — номера энергетических уровней.

Как может сказаться существование нейтральных токов на атомных явлениях? Прежде всего, слабое взаимодействие приведет к смещению уровней, а значит, повлияет на частоты переходов. Частоты



Это спектр простейшего атома — водорода. Макроскопическая структура спектральных линий определяется разницей в энергетических уровнях атомных орбиталей. Однако при более детальном исследовании каждая линия проявляет свою тонкую структуру, обусловленную малыми возмущениями, которые немного сдвигают и расщепляют энергетические уровни. Поправки могут возникать из-за релятивистских эффектов, связи спин-орбита, влияния внешнего магнитного поля (эффект Зеемана) и т. д.

Литература

- [1] L.O'Raifeartaigh. Phys. Rev. Lett., 14, 575, 1965.
- [2] Ю.А.Гольфанд, Е.П.Лихтман. Письма в ЖЭТФ, 13, 452, 1971.
- [3] J.Wess, B.Zumino. Nucl. Phys., B70, 39, 1974.
- [4] J.Wess, B.Zumino. Phys. Lett., B49, 52, 1974.
- [5] A.Salam, J.Straathdee. Nucl. Phys., B76, 477, 1974.
- [6] B.Zumino. CERN preprint TH-1901, 1974.

Письма в ЖЭТФ, том 20, вып. 10, стр. 686 – 689

20 ноября 1974 г.

ВОЗМОЖНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЯ НЕСОХРАНЕНИЯ ЧЕТНОСТИ
В АТОМНЫХ ПЕРЕХОДАХ

И.Б.Хриплович

Обсуждается возможность обнаружить несохранение четности в оптических переходах по вращению плоскости поляризации света в парах тяжелых металлов. Угол поворота может достигать 10^{-5} рад/м при давлении 100 м.м.

Принципиальная возможность обнаружить слабое взаимодействие электрона с протоном и нейтроном путем наблюдения несохранения четности в атомных переходах была указана много лет назад Зельдовичем [1] и с тех пор неоднократно обсуждалась теоретиками [2 – 5] (см. также [6 – 9]). Среди этих статей следует особо отметить работу Бушиа [3], в которой было показано, что эффекты несохранения четности в тяжелых атомах усилены настолько, что их экспериментальное обнаружение оказывается на грани возможного. ~~Однако конкретная оценка степени циркулярной поляризации фотонов в $\beta_{1/2} - \gamma_{1/2}$ переходе в цезии, данная в работе [2], по-видимому, является завышенной (см. [5]), так что соответствующий эксперимент представляется более трудным, чем это следовало бы из оценок Бушиа.~~

В настоящей статье я хотел бы обратить внимание на достаточно реальную возможность обнаружить несохранение четности в атомных переходах по вращению плоскости поляризации света в парах тяжелых металлов. То, что несохранение четности приводит к появлению оптической активности, было впервые отмечено в статье [1]. Коэффициенты преломления для право- и левополяризованных фотонов с частотой ω , близкой к резонансной ω_0 , запишем в виде

$$n_{\pm} - 1 = \frac{N |V_{\pm}|^2}{\pi^2 \omega} \left\langle \frac{1}{\omega - \omega_0 - (v/c)\omega_0 + i\Gamma/2} \right\rangle. \quad (1)$$

686

ние эффектов, которые сами по себе могут вызываться только слабыми взаимодействиями.

В 1974 г. французские физики супруги Бушиа заметили, что эффекты несохранения четности, обусловленные нейтральными токами, усилены в тяжелых атомах настолько, что их обнаружение оказывается на грани экспериментальных возможностей. Они предложили искать эти эффекты в очень маловероятном переходе в цезии. Ожидалось, что вероятности поглощения атомом право- и левополяризованных фотонов (т.е. фотонов, у которых направленные вращения вектора поляризации образует с направлением скорости, соответственно, правый и левый винт) будут отличаться.

В том же году сотрудник новосибирского Института ядерной физики И. Б. Хриплович предложил другой эксперимент, а именно наблюдение вращения плоскости поляризации света в парах тяжелых металлов, в частности таллия, свинца и висмута. Мы знаем, что величина коэффициента преломления определяется взаимодействием света с атомами (молекулами) среды. Если вероятности поглощения и испускания для право- и левополяризованных фотонов отличаются, разными окажутся и коэффициенты преломления. А поскольку линейно поляризованную волну всегда можно представить как наложение двух циркулярно поляризованных волн с противоположным направлением вращения (правым и левым), то при прохождении через среду эти составляющие будут распространяться с разными скоростями, приобретая разность хода, линейно зависящую от длины пути. В результате плоскость поляризации должна поворачиваться.

Свойство среды вызывать вращение плоскости поляризации света имеет специальное название — оптическая активность. Вообще, это явление давно известное. Оптически

Оттиск теоретической статьи И. Б. Хрипловича 1974 г. в журнале «Письма в ЖЭТФ» (с авторской правкой), давшей стартовый импульс эксперименту Баркова—Золоторева

в спектроскопии измеряются с огромной точностью. Но в данном случае абсолютные измерения частот сразу не внушали оптимизма из-за того, что величина смещения очень мала по сравнению с точностью нашего знания мировых констант (через которые выражаются частоты переходов без учета слабых взаимодействий). Поэтому единственной реальной надеждой было наблюдение



◀ ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА

активным веществом является, например, обычный раствор сахара. Причина здесь в том, что молекула сахара обладает винтовой структурой. Оптическая же активность газа из неполяризованных атомов в отсутствие внешних полей — эффект, до того времени никогда не наблюдавшийся. Пожалуй, трудно представить себе более наглядное проявление несохранения четности, неравноправия левого и правого в физике.

Эксперимент — дело тонкое

Летом 1974 г. в Институте ядерной физики СО АН Барков и Золоторев при теоретической поддержке Хриповича приступили к подготовке эксперимента по поиску оптической активности паров тяжелых металлов. В качестве рабочего вещества в конце концов был выбран висмут: выбор определялся и ожидаемой величиной эффекта, и наличием мощного лазера с подходящей длиной волны. Исследования велись напряженно, в обстановке острой конкуренции: одновременно аналогичные опыты с висмутом начались в Англии и США.

ЛАЗЕР, ФОТОДИОДЫ И ВОЕНПРЕД

И.Б. Хрипович: Нам был нужен перестраиваемый лазер. Мы знали, что в стране существуют полупроводниковые лазеры с необходимыми параметрами: судя по сообщениям прессы, такие приборы делал Алферов в Ленинграде. Но на определенном этапе переговоров один из его сотрудников заявил Золотореву буквально следующее: «Ты что, дурак? Откуда вы это взяли — из газет? Неужели до сих пор верите газетам? Если хотите хороший лазер, покупайте на Западе».

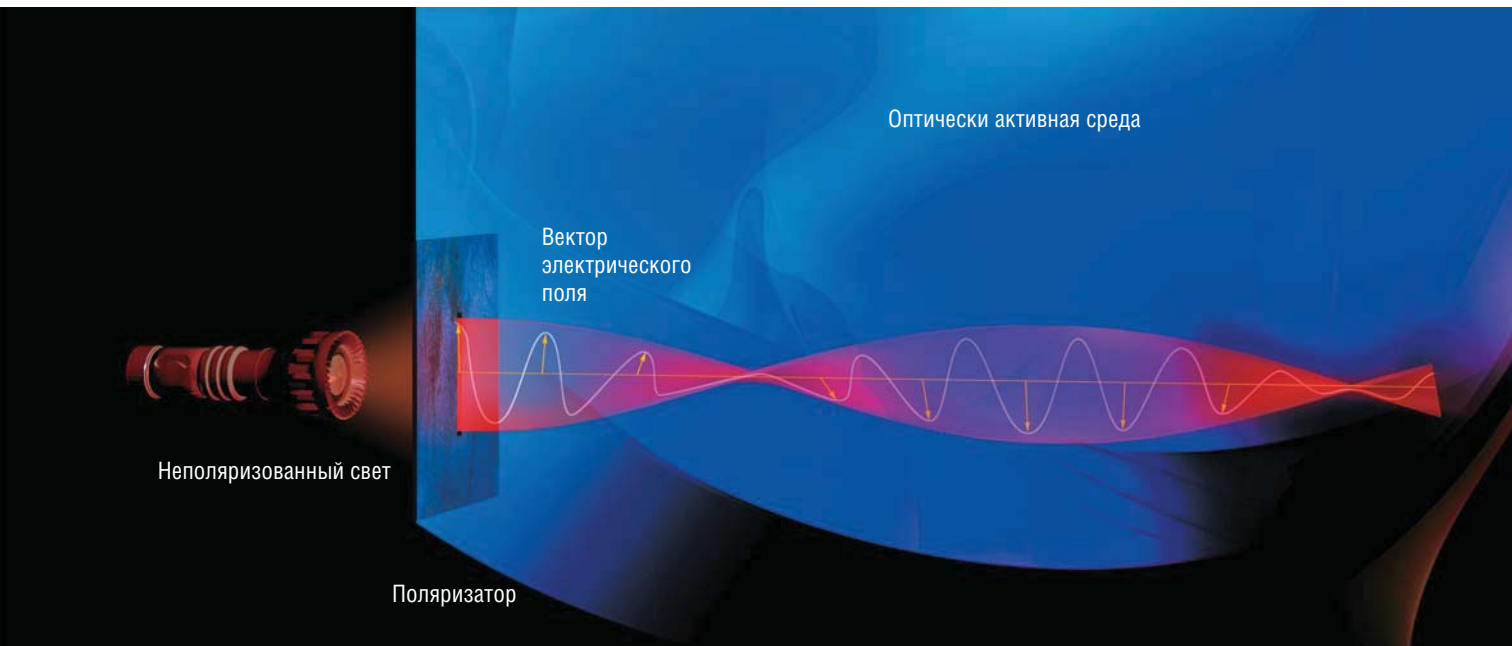
В результате мы заказали лазер на красителе фирмы Spectra Physics, как сейчас помню, за 17 тысяч инвалютных рублей, или 21 тысячу долларов. По имеющейся у меня информации, это был почти весь валютный запас института. Будкер в нас поверил. Будкер умел принимать решения. И дело завертелось. Впрочем, и до получения лазера подготовка эксперимента шла полным ходом. Лазерная часть установки должна была состоять из двух блоков. Лазер накачки приобрели без особых приключений. А вот с лазером на красителе и дефицитными фотодиодами произошла история, которую стоит рассказать. Золоторев и я прилетели на семинар в Москву. Мы знали, что лазер уже

отгружен, знали все входящие и исходящие номера. Самолет почему-то посадили в Шереметьево вместо Внукова. Склад находился неподалеку, мы узрели в этом перст судьбы, разыскали склад, выяснили, что экспедитор Министерства внешней торговли за два дня до того получил этот лазер.

Макс мне говорит: «Ты займись лазером, а я — фотодиодами, на них документов нет, ты не сумеешь». Отправился я в Минвнешторг. На проходной — куча народу, некоторые мыкаются здесь уже по две недели. А у меня на завтра билет на самолет. В общем, с большим трудом пробился на прием. Мне заявляют: «Это еще не пришло». — «Как не пришло, когда ваш экспедитор три дня назад получил?!» Конечно, я проявил редкостную наивность. Если бы поставил бутылку коньяка, а лучше две, думаю, проблема разрешилась бы сразу. Но я взял их измором, и на второй день мне выдали вожденный ящик.

У Золоторева было колоритней. Макс явился на завод, который выпускал фотодиоды, и узнал, что всю продукцию забирает Министерство обороны. Он потребовал военпреда. Состоялся мужской разговор, офицер попросил Золоторева предъявить паспорт, после чего отлучился на полчаса. Когда вернулся, они зашли куда-то за угол, и этот офицер насыпал Макс фотодиоды пригоршней — без счета, бесплатно.

...Был ночной рейс. Утром прилетели в Новосибирск с лазером. А к вечеру он уже работал! Кстати сказать, конкурирующая организация в Советском Союзе — ФИАН (оптическое подразделение) — тоже покупала импортный лазер, только другой марки — Coherent Radiation. Профессиональные оптики, они несколько недель ждали представителя фирмы, чтобы запустить его. Сами не решились.



Оптическая активность — свойство среды вызывать вращение плоскости поляризации проходящего через нее линейно поляризованного света (на рисунке показана фигура, описываемая вектором электрического поля световой волны). К примеру, оптическая активность сахарного раствора обусловлена несимметричным строением молекул сахара. В магнитном поле возникает искусственная (наведенная) оптическая активность — это продольный магнитооптический эффект Фарадея (следствие эффекта Зеемана)

Эксперимент этот оказался чрезвычайно трудным и занял годы. Начнем с того, что углы поворота, которые необходимо было измерять, не превышали 10^{-7} радиан*. Для иллюстрации того, насколько мала эта величина, заметим, что при повороте километрового стержня на такой угол вокруг оси, проходящей через один из его концов, другой конец сместится всего на 0,1 миллиметра! Была разработана оригинальная методика для измерения столь малых углов (причем с помощью призм, неидеальность которых много больше измеряемых углов). Особые меры принимались для подавления паразитного магнитного поля, которое также приводит к вращению плоскости поляризации света (*эффект Фарадея*). Даже поле, составляющее 10^{-3} от магнитного поля Земли, достаточно для имитации искомого эффекта и представляет серьезную помеху.

Оптические измерения проводились на компонентах сверхтонкой структуры красной линии 6477 \AA , соответствующей определенному переходу в атомарном висмуте. Источником света служил лазер, в который был введен элемент, позволяющий сканировать длину волны излучения на частоте 1 кГц. Поляризатор и

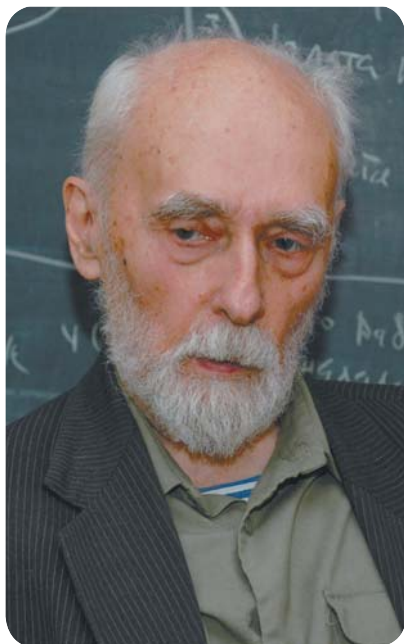
анализатор представляли собой одинаковые призмы из исландского шпата, развернутые на 90° . Лазерный луч проходил через поляризатор, кювету с парами висмута, анализатор и попадал на фотоприемное устройство, сигнал с которого обрабатывала сложная радиоэлектронная схема с использованием синхронных детекторов, обратной связи и схемы вычитания. В итоге искомым эффектом измерялся посредством детектирования полезного сигнала по первой гармонике частоты сканирования (1 кГц).

Есть эффект!

Международная эпопея по поиску эффектов несохранения четности в атомах развивалась довольно драматично. Первыми (в 1976 г.) были опубликованы экспериментальные результаты американцев и англичан. Группа Сандарса из Оксфордского университета работала на той же красной линии, что и Барков с Золоторевым; Фортсон из Университета штата Вашингтон — на инфракрасном переходе. Знак эффекта в этих группах получился разный. Надо сказать, что физики Оксфорда, Сиэтла и Новосибирска при расчетах использовали одну и ту же модель электромагнитных и слабых взаи-

* 1 рад $\approx 57^\circ$

Отступить некуда!	77
А все-таки она возвращается!	80
Премия, которой не было	81



ОТСТУПАТЬ НЕКУДА!

Л. М. Барков: Драматизм положения заключался в том, что когда мы стали реально измерять, оказалось, что для работы со сверхтонкой структурой атомных уровней этот дорожный лазер Spectra Physics не годится совсем. Он имел большую ширину линии. Его параметры мы, естественно, знали заранее, но думали, что поставим интерферометр Фабри—Перо и выделим из широкого спектра ту линию, которая нам нужна. Когда это сделали, то поняли, что в интерферометре возникает стоячая волна и свет отражается назад, внутрь лазера. Наши иллюзии разбились в прах.

Но возможности отступить не было, денег на еще более дорогой прибор никто бы уже не дал. Поэтому мы были вынуждены изобрести некое устройство (и даже получили свидетельство об изобретении!), которое вставили в лазер, и оно позволило работать в режиме одночастотной генерации и менять очень маленькими шажками длину волны излучения.

Когда технические проблемы были преодолены и экспериментальная аппаратура заработала в комплексе, выяснилось, что научная часть задачи по сложности ни в какое сравнение не идет с тем, что мы ожидали. Благодаря продуманной методике легко было даже померить эти малые углы. Но в парах висмута жизнь оказалась совершенно не похожа на ту, когда вы берете какой-нибудь неподвижный предмет типа кристалла. Там флуктуации плотности — как в воздухе. При высоких температурах парциальные давления паров атомарного и молекулярного висмута соизмеримы, и колебательно-вращательный спектр молекул накладывался на сверхтонкую

атомную структуру. Поскольку мы были не профессионалы в спектроскопии, то слабо представляли, что должны увидеть. А увидели полный хаос, частотол, дремучий лес в огромном диапазоне — сотни, может быть, тысячи спектральных линий! И какие из них наши, абсолютно непонятно.

Методом, как говорится, экспериментального тыка мы намеренно подали в систему магнитное поле — то самое, от которого до сей поры так тщательно избавлялись. И обнаружили, что вызываемое магнитным полем фарадеевское вращение плоскости поляризации (Хриплович хорошо умел его рассчитывать) позволяет однозначно идентифицировать все атомарные линии. Впоследствии, при измерениях углов, мы и нормировались по эффекту Фарадея.

Дальше все просто: год непрерывной работы. Крупная организационная ошибка, что мы работали на установке вдвоем с Золоторевым. Другие исследовательские группы имели по 5—6 человек, и это правильно. Лазер должен выдавать стабильную генерацию, печка с висмутом, магнитные поля тоже очень капризная вещь. А нас было только двое. Это минимум даже по правилам техники безопасности, ведь там и высокое напряжение, и лазерное излучение. Мы с Мариком (Макс Золоторев. — *Прим. ред.*) фактически не вылезали из лаборатории. Даже спали в этой комнате. Иногда я падал на диван и говорил Марик: «Не могу больше, у меня сейчас развалится голова». Как мы выдержали эти жуткие перегрузки, не понимаю. Служба была. Надо!

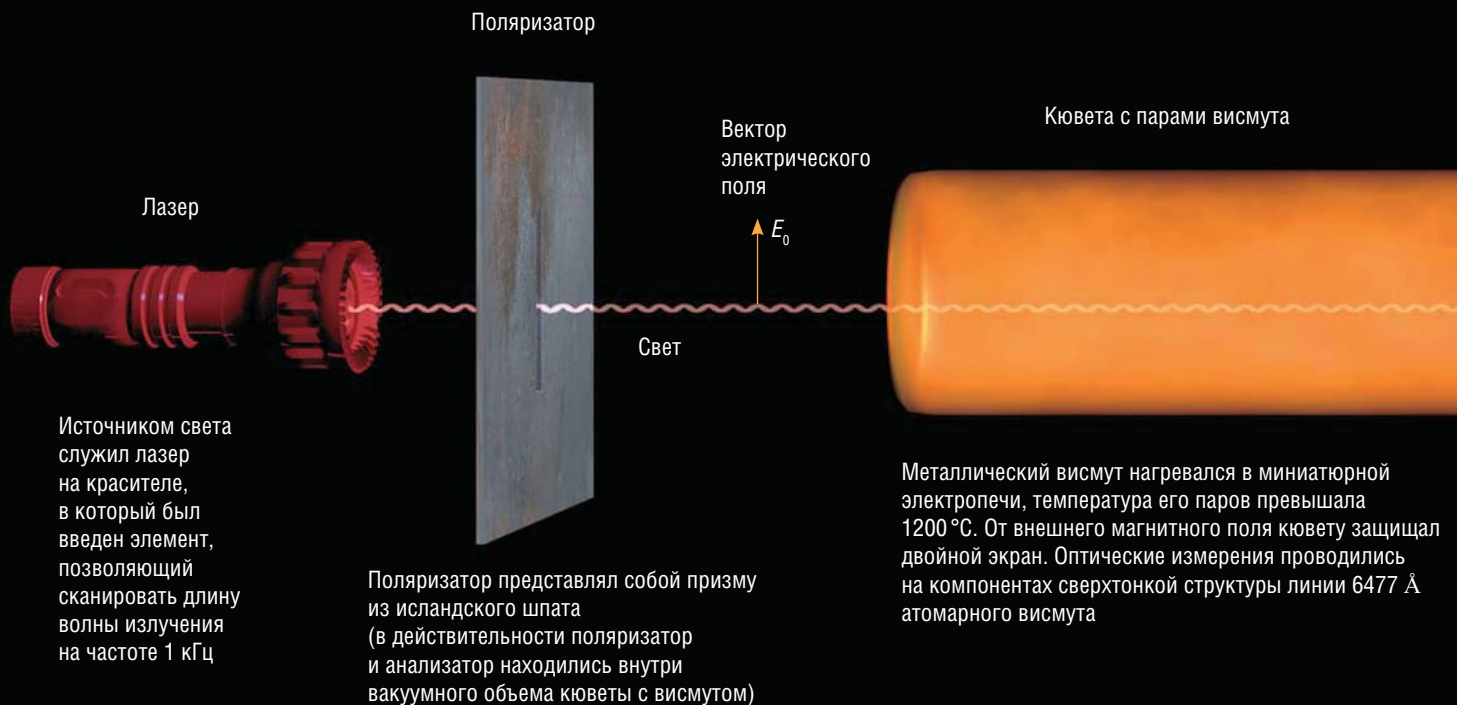
модействий — Вайнберга и Салама. Теория определенно предсказывала, что знак должен быть одинаковым в обоих переходах. Осознавая противоречивость полученных данных, авторы совместной англо-американской публикации склонились к мнению, что эффект близок к нулю или во всяком случае много меньше предсказываемого моделью.

В 1977 г. новые публикации Фортсона и Сандарса опять засвидетельствовали отсутствие ожидаемого эффекта. Наконец, в январе 1978 г. первые результаты появились у Баркова и Золоторева. В февралемарте они были подтверждены в новых сериях измерений. На всех рабочих частотах в парах висмута наблюдался поворот плоскости поляризации света, причем численные значения углов поворота демонстрировали хорошее согласие с теорией!

Результатов оптического эксперимента в ИЯФе с нетерпением ждали многие физики, занимающиеся элементарными частицами. Ход опытов с висмутом интересовал и самих авторов популярной теории — будущих нобелевских лауреатов Вайнберга, Салама и Глэшоу.

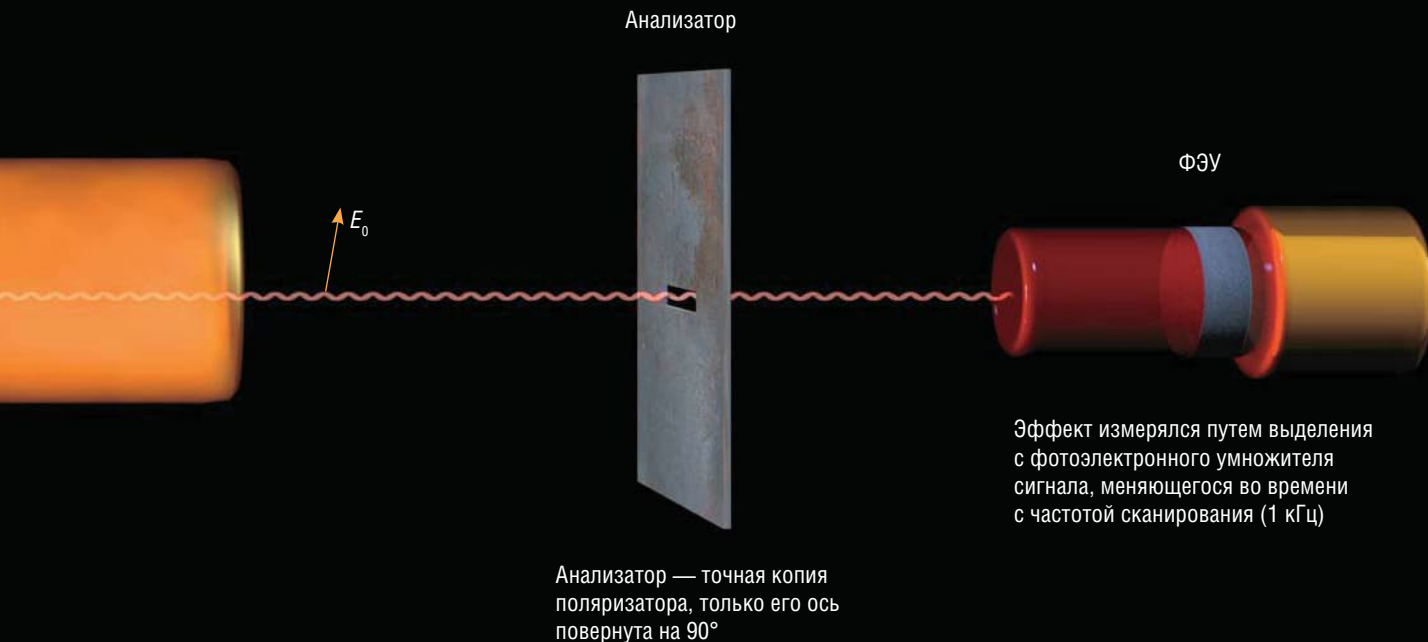
на стр. 80 ▶

ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА ▶ 80



- ▼ Основная тяжесть этого относительно малобюджетного, но чрезвычайно трудоемкого эксперимента легла на плечи двоих — Л. М. Баркова (справа) и М. С. Золоторева (слева). И. Б. Хриплович (в центре) отвечал за теорию и численные расчеты. 1970-е гг.





Эффект измерялся путем выделения с фотоэлектронного умножителя сигнала, меняющегося во времени с частотой сканирования (1 кГц)

Принципиальная схема эксперимента Баркова—Золоторева (1978). Несохранение четности в слабых процессах с нейтральными токами было открыто посредством наблюдения вращения плоскости поляризации света в парах висмута

КАК ИЗМЕРЯЛИСЬ СВЕРХМАЛЫЕ УГЛЫ

Пусть свет, прошедший через поляризатор, поляризован вдоль вертикальной оси. Тогда, если анализатор ориентирован так, что пропускает лишь свет, поляризованный вдоль горизонтальной оси, то в отсутствие оптически активного вещества на фотоприемник сигнал не поступает. Предположим теперь, что после внесения кюветы с веществом плоскость поляризации света поворачивается на угол φ . Тогда, если амплитуда электрического поля волны после поляризатора равна E_0 , то амплитуда волны, прошедшей через анализатор, при малых φ составляет $E_0 \varphi$. Интенсивность же света на приемнике (в оптическом диапазоне непосредственно измеряется не амплитуда волны E , а именно ее интенсивность I , которая пропорциональна E^2) будет равна $I = I_0 \varphi^2$. Таким образом, для нахождения угла поворота достаточно, на первый взгляд, измерить интенсивность света, прошедшего через анализатор.

Однако для измерения углов порядка 10^{-7} радиан этот метод непригоден. Дело в том, что призмы, используемые в качестве поляризаторов и анализаторов, отнюдь не идеальны. В 1970-е гг. даже для лучших образцов максимальное ослабление интенсивности света при скрещенных призмах составляло 10^{-6} — 10^{-7} . Отсюда ясно, что рассчитывать на измерение таким способом

углов, меньших 10^{-3} — 10^{-4} радиан, не приходится. Поэтому поступают несколько иначе: одну из призм дополнительно поворачивают на малый угол φ_0 , который выбирается так, чтобы $\varphi \ll \varphi_0 \ll 1$. В этом случае интенсивность света на приемнике, очевидно, равна $I = I_0 (\varphi_0 + \varphi)^2 \approx I_0 (\varphi_0^2 + 2\varphi_0 \varphi)$.

Из этой формулы сразу видно первое преимущество: непосредственно измеряемая величина, интенсивность I , зависит от φ линейно, а не квадратично. Кроме того, здесь возможна модуляция сигнала, а переменный сигнал с известной зависимостью от времени измерить гораздо легче, чем постоянный.

В эксперименте Баркова—Золоторева свет был частотно-модулированным, т. е. частота лазерного излучения ω имела вид:

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t.$$

Здесь ω_0 — резонансная частота (центр линии поглощения), $\Delta\omega$ — амплитуда сканирования, Ω — частота сканирования. Из теории известно, что φ есть линейная функция расстройки $\omega - \omega_0$, тогда в случае частотной модуляции полезный эффект может быть измерен путем выделения сигнала, меняющегося во времени с частотой сканирования.

Когда наши ученые объявили, что четность в атомных переходах не сохраняется, это была маленькая сенсация. А в апреле сиэтлская группа сделала очередное сообщение, в котором настаивала на обратном.

Это было трудное время для сибирских физиков, получивших результат, диаметрально противоположный выводам других авторитетных ученых. Подтверждение правильности эксперимента Баркова—Золоторева пришло с неожиданной стороны. Летом 1978 г. коллектив исследователей, работающих на линейном ускорителе в Стэнфорде (США), обнаружил несохранение четности при рассеянии электронов большой энергии на дейтерии — тяжелом водороде. Измерялась фактически та же физическая константа, что и в оптических исследованиях в новосибирском Академгородке. Таким образом, было окончательно установлено существование слабого взаимодействия между электронами и нуклонами ядра. Эти экспериментальные достижения в конечном счете способствовали научному признанию теории Вайнберга—Салама—Глэшоу. Что касается групп из Оксфорда и Сиэтла, то они впоследствии отказались от своих «нулевых» результатов.

Тонкий опыт, блестяще проведенный Барковым и Золоторевым, который некоторые считали «несерьезным», эксперимент «непрофессионалов» принес самую актуальную информацию о фундаментальных свойствах материи. Теперь неэквивалентность правого и левого в процессах с нейтральными токами — общее место, модель же Вайнберга—Салама стала фундаментом современной физики микромира.

...Незабываемый для участников событий 1978-й уходит в даль времен. Почти не сохранилось фотографий тех лет, давно разобрана установка, составившая славу ее создателей. Физиков сегодняшнего дня занимают новые проблемы, новые задачи. Но эксперимент Баркова—Золоторева, вне всякого сомнения, останется в истории науки.

Литература

- Вайнберг С. // УФН. — 1976. — Т. 118. — С. 505.
 Зельдович Я. Б. // ЖЭТФ. — 1959. — Т. 36. — С. 964.
 Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика. — М.: Наука, 1974.
 Хриплович И. Б. Несохранение четности в атомных явлениях. — М.: Наука, 1988.
 Barkov L. M., Zolotarev M. S. // Phys. Lett. — 1979. — V. 85B. — P. 308.
 Bouchiat M., Bouchiat C. // Phys. Lett. — 1974. — V. 48B. — P. 111.

ОТ ПЕРВОГО ЛИЦА

А ВСЕ-ТАКИ ОНА ВРАЩАЕТСЯ!

Л. М. Барков: Мы опаздывали. Когда новосибирский эксперимент был в разгаре и ияфовская группа преодолевала бесчисленные подводные камни, Сандарс и Фортсон из Оксфорда и Сиэтла сделали на международной конференции доклад, где объявили, что эффект в висувете отсутствует, т. е. четность в атомных переходах сохраняется.

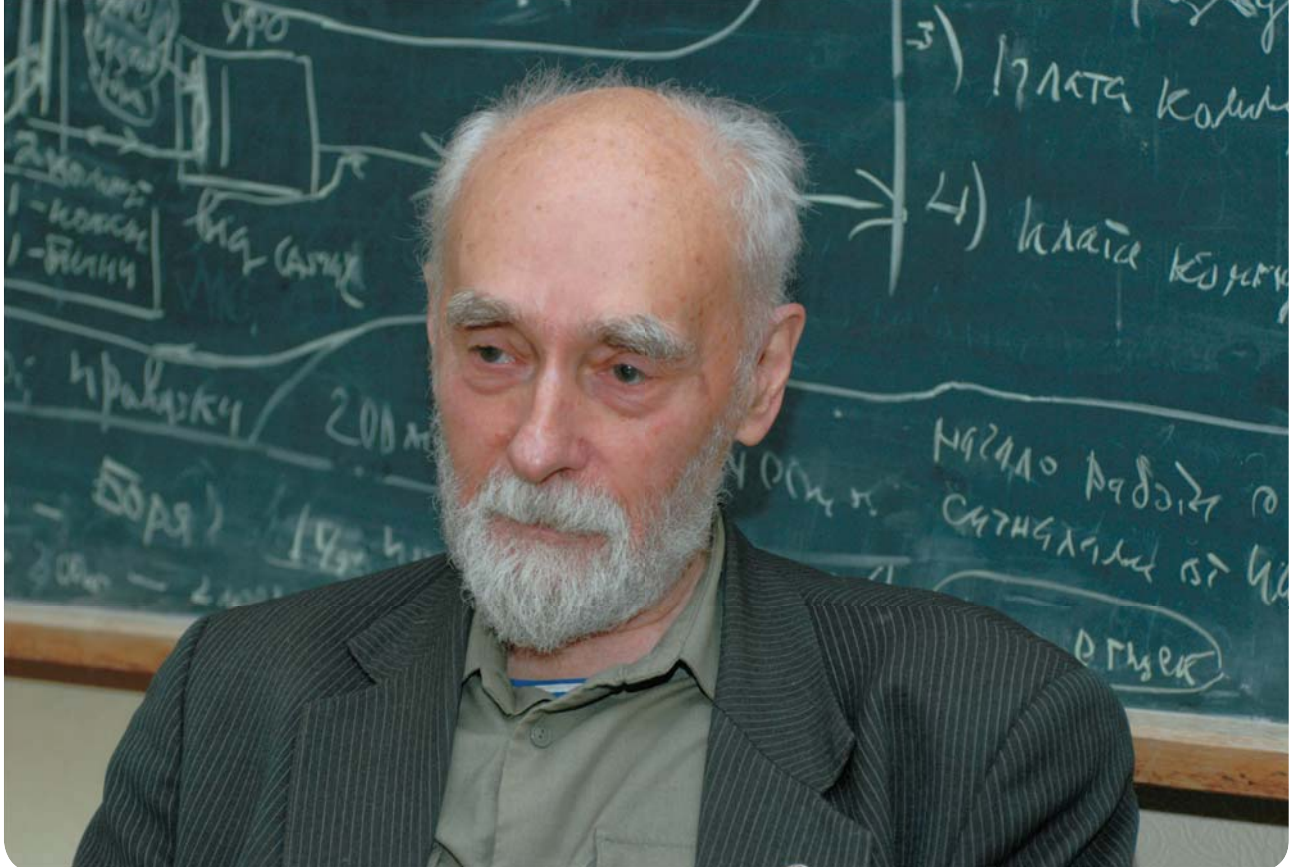
Многим тогда казалось, что наше дело проиграно, деньги пропали, годы работы пропали. Однако я видел, что у конкурентов грубый, в сущности, результат. Их ответы не сходились по знаку между собой. Тогда они усреднили их, получив ноль. Я понял, что американцы и англичане испытывают те же трудности, что и мы, но, желая оказаться впереди, объединились в совместную публикацию.

Теперь, когда конкуренты уже имели на руках конкретные цифры, у нас немного изменились цели. Мы должны были довести эксперимент до конца именно с нашей оригинальной методикой и получить абсолютно независимый ответ.

К началу 1978 г. мы уверенно наблюдали и измеряли вращение плоскости поляризации. Причем, чтобы не было соблазна подгонять под цифру, близкую к предсказаниям модели Вайнберга—Салама, до последнего момента держали все с точностью до неизвестного коэффициента. Хриплович как раз уехал в командировку. В его отсутствие Золоторев и я сделали наконец последнюю математическую операцию и впервые получили число. Но оказалось, что знак эффекта обратный! Несколько дней ползали вокруг установки, проверяли, в ту ли сторону происходит вращение. Десятки проверок — тот же результат!

Этот неожиданный вывод я и доложил в МИФИ на сессии отделения ядерной физики: дескать, четность в атомах не сохраняется, но численные результаты эксперимента противоречат модели Вайнберга—Салама. Сообщение вызвало резонанс и в Союзе, и в мире. Появилась информация, что теория одного индийского товарища предсказывает именно обратный знак эффекта, по сравнению с моделью Вайнберга—Салама.

Разъяснилось все после приезда Хрипловича. За несколько месяцев до описываемых событий экспериментаторы попросили теоретиков изобразить, как будет выглядеть некий график. Сушков и Фламбаум, молодые ребята, которые вместе с Хрипловичем выполняли все расчеты, нарисовали требуемую зависимость. Специальной договоренности, что откладывать по оси X — частоту или длину волны, не было. А от этого как раз зависит знак эффекта (у производных будет разный знак). Нарисовали они зависимость от частоты, а воспринято было как длина волны. Вот так и случилось: за численное значение мы ручались головой, а со знаком вышло полное недоразумение.



Накладка эта в какой-то степени сыграла в нашу пользу. Нам ведь как непрофессионалам никто не верил, но коли мы не побоялись публично дать противоположный ответ, то тем самым сняли с себя возможные обвинения, что подстраиваемся под Вайнберга—Салама. Коллеги потом допытывались: «Ну сознайтесь, нарочно устроили этот цирк?»

А вообще, три группы настаивали, что эффект отсутствует: к англичанам и американцам позже присоединились фиановцы (группа Собельмана) и нагнали большую точность, в несколько раз якобы выше, чем в наших измерениях. Мы стояли одни. Честно говоря, страшно было. И когда на Стэнфордском ускорителе было обнаружено несохранение четности при рассеянии электронов на дейтерии, что тоже подтверждало модель Вайнберга—Салама, с души свалился камень.

ПРЕМИЯ, КОТОРОЙ НЕ БЫЛО

Л. М. Барков: Итак, мы первыми в мире наблюдали несохранение четности в слабых процессах с нейтральными токами. Вполне серьезное открытие, но

никаких, по выражению Хрипловича, «коврижек» за него не получили. Вы спросите — почему?

Не ради славы — ради объективности. Руководство ИЯФа выдвигало работу на Ленинскую премию. Были статьи в газетах. Но мы ничего не получили, потому что наши влиятельные коллеги намеряли в это время ноль. На одном заседании Президиума Академии наук, когда фиановцы докладывали свой «ноль» и уже всем, кроме них самих, было ясно, что модель электрослабого объединения правильная и что эффект несохранения четности есть, я сидел рядом с Гинзбургом. Говорю ему: «Видите здание? Вероятность того, что оно сейчас упадет, такая же, как правильность их ответа». Он на меня вздыбился.

Считалось, что мы нарушили правила приличий. Один институт, три человека, никакой коллаборации. Нам говорили: «Так не делается. Работали же солидные люди и в другом институте, надо было объединяться с ними».

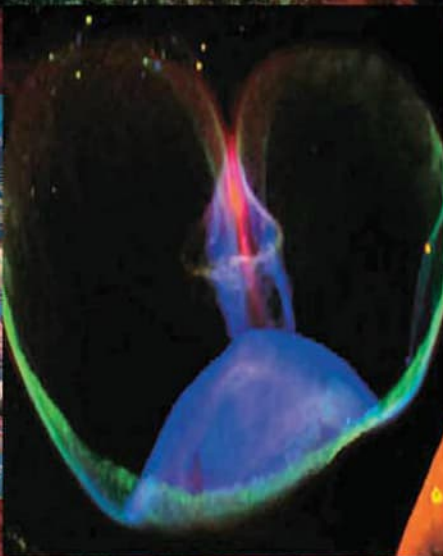
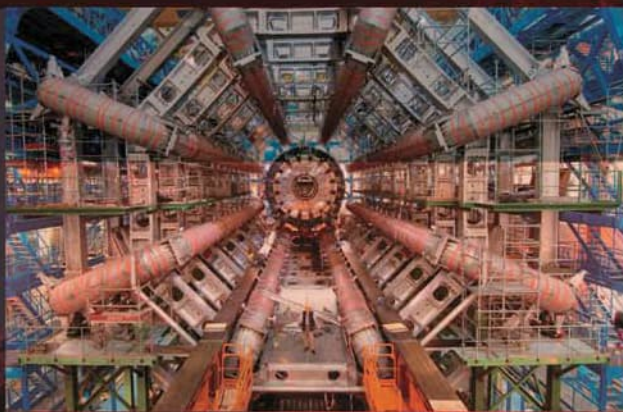
...Что касается не политических, а научных последствий нашего эксперимента, то он открыл дорогу модели Вайнберга—Салама. Рассказывали, как Сандарс

всем показывал фотографию своей установки, имевшей вид компактного ящика: «Вы думаете, что это такое? Это гроб модели Вайнберга—Салама». Но с таким выводом он поспешил. Впоследствии модель завоевала позицию основной теории физики элементарных частиц. В 1979 г. Вайнберг, Салам и Глэшоу за объединенную теорию слабых и электромагнитных взаимодействий получили Нобелевскую премию. Теперь она является составной частью так называемой Стандартной модели, которая включает в себя еще и сильные взаимодействия, подтверждена в сотнях экспериментов. Другое дело, что любая физическая теория имеет ограниченную область применимости. Поиск отклонений от Стандартной модели — одно из активных направлений исследований в последние годы. Вот сейчас большие надежды связывают с адронным коллайдером, который построен в ЦЕРНе. Ожидается, что эксперименты на нем могут зарегистрировать отступления от Стандартной модели. Если это произойдет, значит, будет сделан новый шаг вперед. Это естественно, ведь процесс познания бесконечен.



2015

«НАУКА из первых рук», № 2(62)



Эпоха Ускорения

Почти столетие назад выдающийся российский физик Г.И. Будкер – основатель новосибирского Института ядерной физики, выдвинувший и реализовавший идею об увеличении энергии взаимодействия частиц методом встречных пучков, – назвал ускорители заряженных частиц микроскопами современной физики, поскольку они позволяют судить о структуре наблюдаемого объекта по картине рассеяния на нем потока частиц, только уже не световых квантов, как в микроскопе, а частиц высокой энергии. С ростом предельных энергий ускорителей началась настоящая революция в теории элементарных частиц и внутриядерных взаимодействий, продолжающаяся и поныне, значение которой для науки и практики трудно переоценить.

Зато магнитотормозное излучение, которое испускали заряженные частицы, движущиеся с релятивистскими скоростями в магнитном поле ускорителей, поначалу казалось досадным побочным продуктом ускорительного процесса, поскольку означало большие энергетические потери, которые требовалось компенсировать. Так как подобное излучение впервые наблюдалось в синхротроне – циклическом резонансном ускорителе, оно

стало называться синхротронным, хотя его источником в принципе может служить любое устройство, отклоняющее заряженные частицы.

Но синхротронное излучение (СИ) удивительно быстро прошло путь «от Золушки до принцессы», и это превращение было обусловлено такими чертами его «характера», как большая ширина спектра излучения – от инфракрасного до жесткого рентгеновского, высокая степень направленности и поляризации, периодичность в наносекундном масштабе и, наконец, большая мощность (хотя последние качества – это уже заслуга специализированных устройств, его генерирующих). Идею возможности использования излучения релятивистских частиц высказал еще в 1947 г. российский физик-теоретик и будущий Нобелевский лауреат В.Л. Гинзбург, и за последующие полвека синхротронное излучение превратилось в универсальный и очень эффективный инструмент познания окружающего мира.

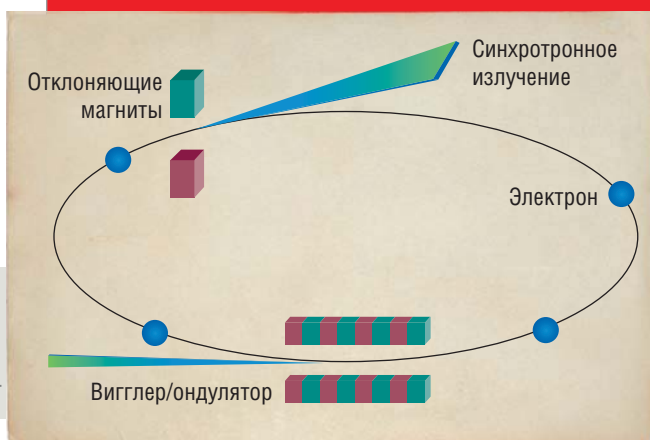
Существуют три поколения источников синхротронного излучения. К первому относятся синхротроны и накопительные кольца, созданные для физики высоких энергий; ко второму – накопительные кольца, разработанные специально как источники СИ. Излучение в этих источниках обычно генерируется отклоняющими





Участники круглого стола «Новые горизонты ускорительной техники: настоящее и будущее ярких источников синхротронного излучения»: профессор А. Серый (Институт им. Джона Адамса), профессора Э. Харрисон и Р. Уолкер (*Diamond Light Source*), академик Г. Н. Кулипанов (ИЯФ СО РАН), генеральный консул Великобритании Д. Шарп.
 Фото Отдела науки и инноваций при Посольстве Великобритании в России

Судя по древним хроникам, с синхротронным излучением человечество впервые столкнулось еще в 1054 г., когда на небе среди бела дня засветилась яркая «звезда-гостья» – Крабовидная туманность, образовавшаяся в результате взрыва сверхновой. «Изобретателем» СИ считается французский физик А. Лиенар, в конце XIX в. впервые показавший, что движущийся по круговой траектории электрон интенсивно излучает электромагнитные волны. Первое «рукотворное» синхротронное излучение удалось получить в 1947 г. на американском синхротроне компании «Дженерал Электрик», а несколькими годами позже – на советских синхротронах в ФИАН СССР



Крабовидная туманность.
 Image Credit: NASA, ESA, J. Hester, A. Loll (ASU)

РОССИЯ И ВЕЛИКОБРИТАНИЯ ЗА «КРУГЛЫМ СТОЛОМ»

Отдел науки и инноваций при Посольстве Великобритании в России является частью Научно-инновационной сети Великобритании, поддерживаемой британским правительством. Представленная в 29 странах мира, эта сеть способствует развитию научно-исследовательской деятельности и международному обмену знаниями, создает возможности для сотрудничества между ведущими учеными и научно-образовательными учреждениями мирового уровня и открывает доступ к крупномасштабной международной научной инфраструктуре.

Одна из целей Отдела науки в России – ближе познакомить Россию с существующими в Великобритании возможностями проведения научных исследований мирового уровня в области космических наук, ускорителей, новых материалов, медико-биологических и полярных исследований. Мы также способствуем привлечению большего количества российских научных публикаций в международные рецензируемые журналы.

Отдел занимается организацией и проведением российско-британских круглых столов, научных кафе и лекций

ведущих британских ученых в крупнейших городах России, участвует в научных фестивалях и семинарах. В 2014 г. благодаря содействию отдела в Москве впервые прошла Российско-британская неделя химии Королевского химического общества Великобритании, в центре которой были вопросы публикации статей в ведущих научных журналах и открытого доступа к научным публикациям. В 2014—2015 гг. было проведено два российско-британских научных круглых стола: «Антарктика и Арктика в фокусе научных исследований» совместно с Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом (Санкт-Петербург) и «Новые горизонты ускорительной техники».

В 2015 г. мы надеемся организовать мероприятия, посвященные проблеме антимикробной резистентности, одному из приоритетных вопросов для Правительства Великобритании.

*Отдел науки и инноваций
при Посольстве Великобритании в России*

магнитами, и поскольку оно направлено по касательной к траектории частицы, подобно свету автомобильных фар на повороте, то его пучок имеет веерообразную форму с большим углом рассеяния.

К третьему поколению относятся накопительные кольца с длинными прямолинейными промежутками и встроенными магнитными структурами чередующейся полярности, генерирующими синхротронное излучение, которое обладает меньшими размерами пучка, более высокой интенсивностью и намного более высокой спектральной яркостью. Последний

показатель является наиболее важным параметром, так как определяет величину полезного потока фотонов. Благодаря целенаправленной работе физиков-ускорительщиков яркость источников рентгеновского СИ увеличивалась на три порядка за каждые десять лет! Тем не менее даже в самых современных источниках СИ величина «полезных» фотонов составляет лишь тысячные доли от полного светового потока, поэтому в последние десятилетия мировое физическое сообщество активно работает над проектами источников СИ нового, четвертого, поколения.



Участники круглого стола Э. Харрисон, Р. Уолкер (*Diamond Light Source*) и Т. Яковлева (Посольство Великобритании в России) на встрече с редакторами журнала «НАУКА из первых рук». Новосибирск, 2015



Экскурсия по государству ИЯФ:



2015

«НАУКА из первых рук», № 2(62)

© К. В. Золотарев, П. А. Пиминов,
А. Д. Николенко, 2015

ДЕВЯТЬ ЛЕТ СПУСТЯ

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера – крупнейшее отечественное академическое учреждение и всемирно признанный научный центр – сотрудникам «НАУКИ из первых рук» впервые удалось посетить более девяти лет назад. «Свежеиспеченных» редакторов недавно созданного журнала, далеких от мира «высокой физики», в ИЯФе потрясло многое. И казавшиеся бесконечными лабиринты «ускорительных» подземелий, и поражающая воображение путаница проводов и конструкций непонятого назначения, и исторические «круглые столы», заведенные еще первым директором института Гершем Ицкевичем Будкером...

А чего стоила удивительная доступность даже самых высоких институтских «чинов» и научных советов, которые, все по той же традиции, мог посетить любой желающий! И конечно, не могло не запомниться поразительно большое число откровенно умных, интересных и запоминающихся мужских лиц (да простят нас за шовинизм): теперь, поднаторов в физических терминах, можно сказать, что здесь, на относительно малом пространстве, удалось добиться удивительно высокой фокусировки интеллектуальных частиц высокой энергии! Все эти впечатления вылились в серию статей-экскурсий «по государству ИЯФ», где нашими экскурсоводами стали молодые физики, аспиранты и сотрудники института.

... Почти десятилетие спустя нас встретили все те же начищенные раритетные кофейники на тех же круглых столах, все то же гостеприимство и немало знакомых лиц разного возраста, но практически не постаревших, – похоже, занятия «высокой» физикой благотворно сказываются не только на интеллектуальном долголетии...

Только в уже знакомых подземельях прибавилось путаницы проводов, а до отказа набитый оборудованием экспериментальный бункер для синхротронных исследований на «патриархе» ВЭПП-3 стал навевать устойчивые ассоциации с подземным миром морлоков Герберта Уэллса... Постоянство радует, когда речь идет о традициях, о преемственности, о научном творчестве, но мы надеемся на очередной «экскурсии» по отечественному флагману физики высоких энергий увидеть осуществление давно лелеемых здесь планов о радикальной перестройке ускорительного комплекса



ПИМИНОВ Павел Алексеевич – кандидат физико-математических наук, начальник ускорительного комплекса ВЭПП-3/ВЭПП-4 Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 103 научных работ

ЗОЛОТАРЕВ Константин Владимирович – кандидат физико-математических наук, заведующий сектором Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск). Доцент кафедры ускорительной физики Новосибирского государственного университета. Автор и соавтор 93 научных работ



СИ в ИЯФ: формула успеха

Как известно, синхротронное излучение (СИ), которое для своих многочисленных пользователей служит хлебом насущным, для физиков-ускорительщиков является паразитным: ведь с ним уносится немалая часть энергии, которую они с такими усилиями закачивают в пучок заряженных частиц, разогнанных почти до световой скорости. К тому же, если этот хлеб в ИЯФе и не горек, то и не всегда обилен. Дело в том, что источниками синхротронного излучения в институте сейчас служат ускорители ВЭПП-3 (созданный в 1972 г.) и ВЭПП-4М (начавший работу в начале 1980-х гг. и впоследствии модернизированный), на которых также проводятся исследования по физике элементарных частиц. В результате на долю экспериментов с синхротронным излучением приходится лишь около 15% общего времени работы ускорителей.

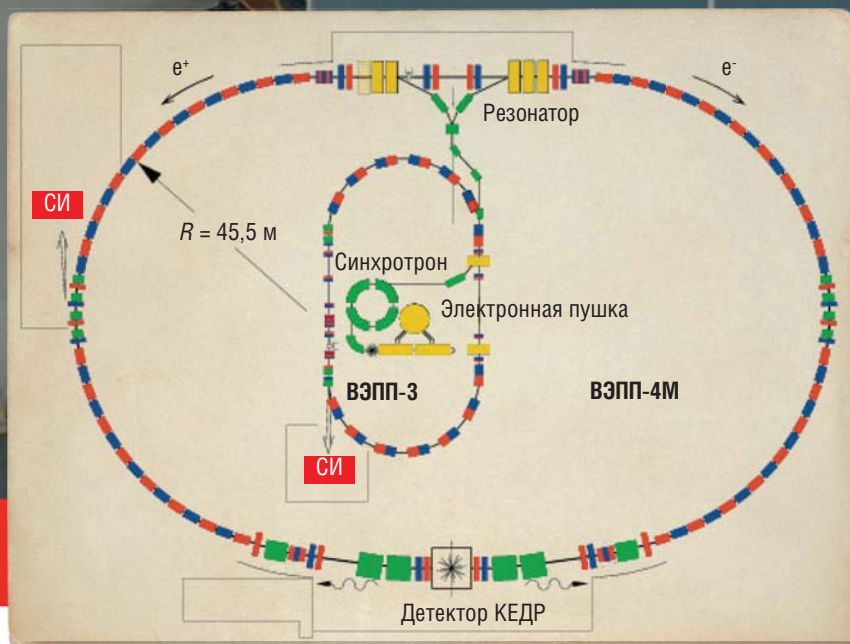
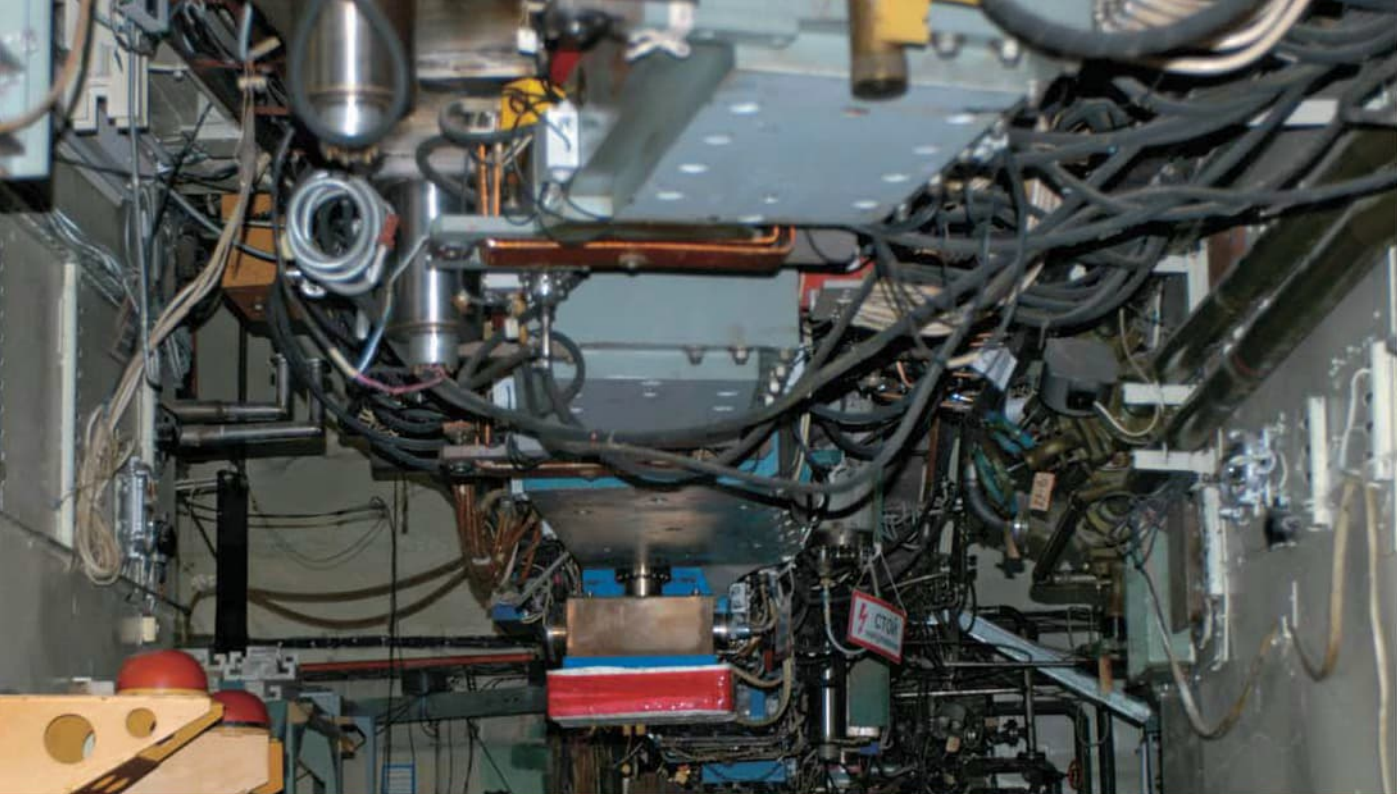
Таким образом, хотя эксперименты с использованием пучков синхротронного излучения ведутся в ИЯФе еще с 1973 г., для этих целей до сих пор – спустя более сорока лет! – используются ВЭПП-3/ВЭПП-4, т. е. не слишком яркие источники СИ 1-го поколения, работающие в рентгеновском диапазоне (длина волны от 0,01 до 1 нм) и энергией пучка 2 или 4 ГэВ.

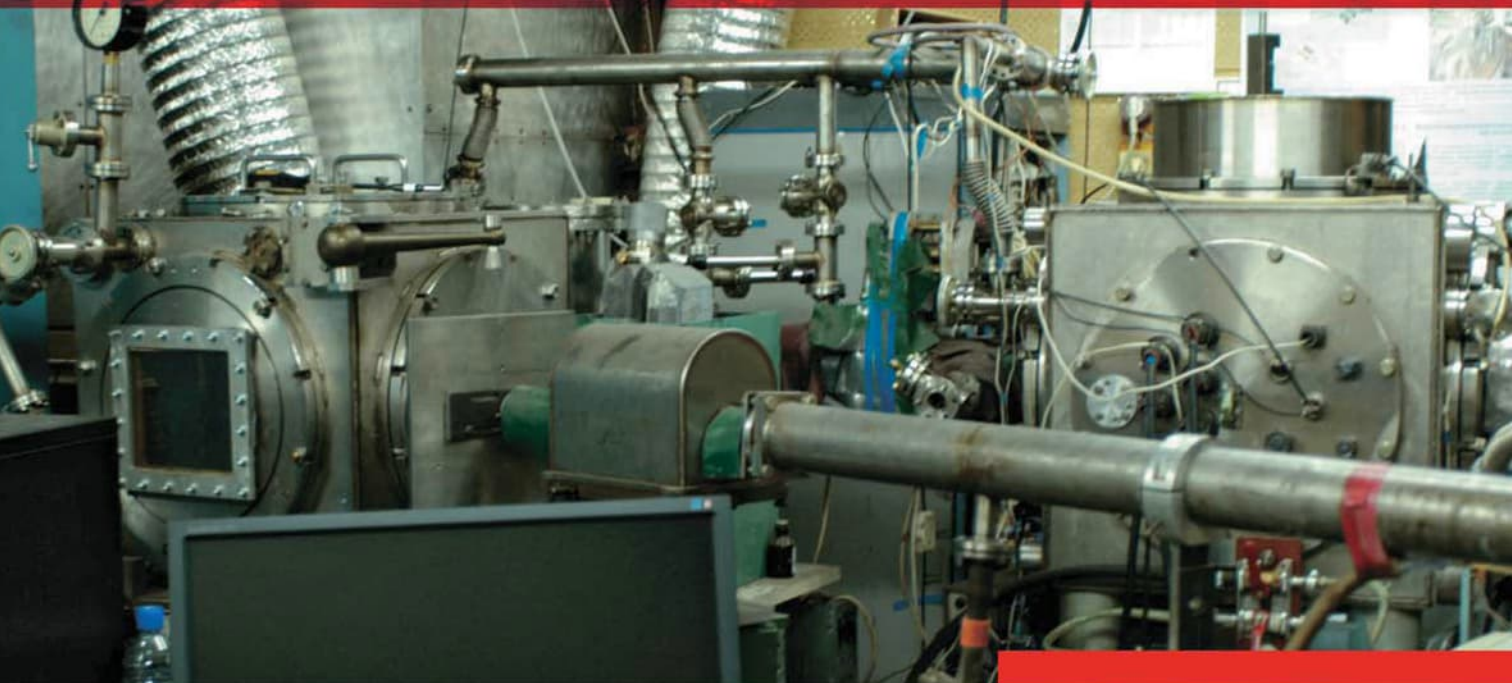
Нужно отметить, что с запуском в 2003 г. 1-й очереди лазера на свободных электронах, источника мощных пучков терагерцового излучения, исследовательский арсенал института принципиально расширился, однако это не сняло проблемы создания более мощного источника СИ нового поколения, позволяющего проводить работы в рентгеновском диапазоне.

Для координации усилий, направленных на развитие исследований с СИ, эффективное использование источников СИ и повышение качественного уровня исследований 1 декабря 1981 г. на базе ускорительного оборудования и лабораторий ИЯФ СО АН СССР был создан Сибирский центр синхротронного излучения, в 1991 г. преобразованный в Сибирский международный центр синхротронного излучения (СибМЦСИ) – открытую лабораторию института, в деятельности которой могут принимать участие российские и зарубежные организации и лица. В 2003 г. заработала 1-я очередь лазера на свободных электронах, и в 2005 г. центр коллективного пользования был переименован в Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения (СЦСТИ)

В ускорительно-накопительном комплексе для генерации синхротронного излучения в ИЯФ СО РАН используются ВЭПП-3/ВЭПП-4, причем ВЭПП-3 является бустерным (промежуточным) ускорителем для коллайдера ВЭПП-4 (схема справа).

Ускорение происходит от энергии 360 МэВ до энергии 2 ГэВ; в режиме накопителя ускоритель может удерживать пучки с энергией 2 ГэВ и током около 100 мА в течение длительного времени (5–6 ч). Именно в этом режиме и ведутся работы с использованием синхротронного излучения. *Справа вверху* – прямолинейный участок накопителя ВЭПП-3; *внизу* – вид экспериментального зала СИ на накопителе ВЭПП-4





Сегодня в мире работает несколько десятков крупных научно-исследовательских центров с источниками синхротронного излучения 3-го поколения, таких как британский *Diamond Light Source*, швейцарский *Swiss Light Source*, французский *Soleil* и другие, а два более «ярких» источника – американский *NLSL-2* и шведский *MAX-IV* – в настоящее время находятся в состоянии запуска. Все эти центры востребованы и работают с максимальной загрузкой; в них организованы экспертные системы выделения «пучкового времени»: на конкурсной основе – для исследователей, и платной – для остальных пользователей. Типичными платными потребителями являются крупные фармацевтические компании, создающие и тестирующие новые лекарственные препараты – это огромная, постоянная и дорогостоящая работа.

ИЯФ не может конкурировать с крупными центрами на «столбовых дорогах» – у нас не те характеристики пучка, которые были бы конкурентоспособны на «большом рынке». И если у кого-то из отечественных ученых или технологов есть конкретная, серьезная задача – например, протестировать новое лекарство, то им проще съездить в ту же Англию или во Францию, в Европейский центр синхротронного излучения (ESRF), участником которого является и наша страна.

Тем не менее и для наших далеко не «юных» источников хватает работы, как исследовательской, так и рутинной технологической. К примеру, сотрудники из Института катализа СО РАН постоянно анализируют здесь образцы новых катализаторов, которые планируется запускать в промышленное производство. Но главное наше достоинство, пожалуй, в том, что в ИЯФ синхротронное излучение в большей степени сохранило свой изначально нерегламентированный статус поискового инструмента, которым практически любой заинтересованный ученый может проверить свою, пусть даже слегка «безумную» идею.

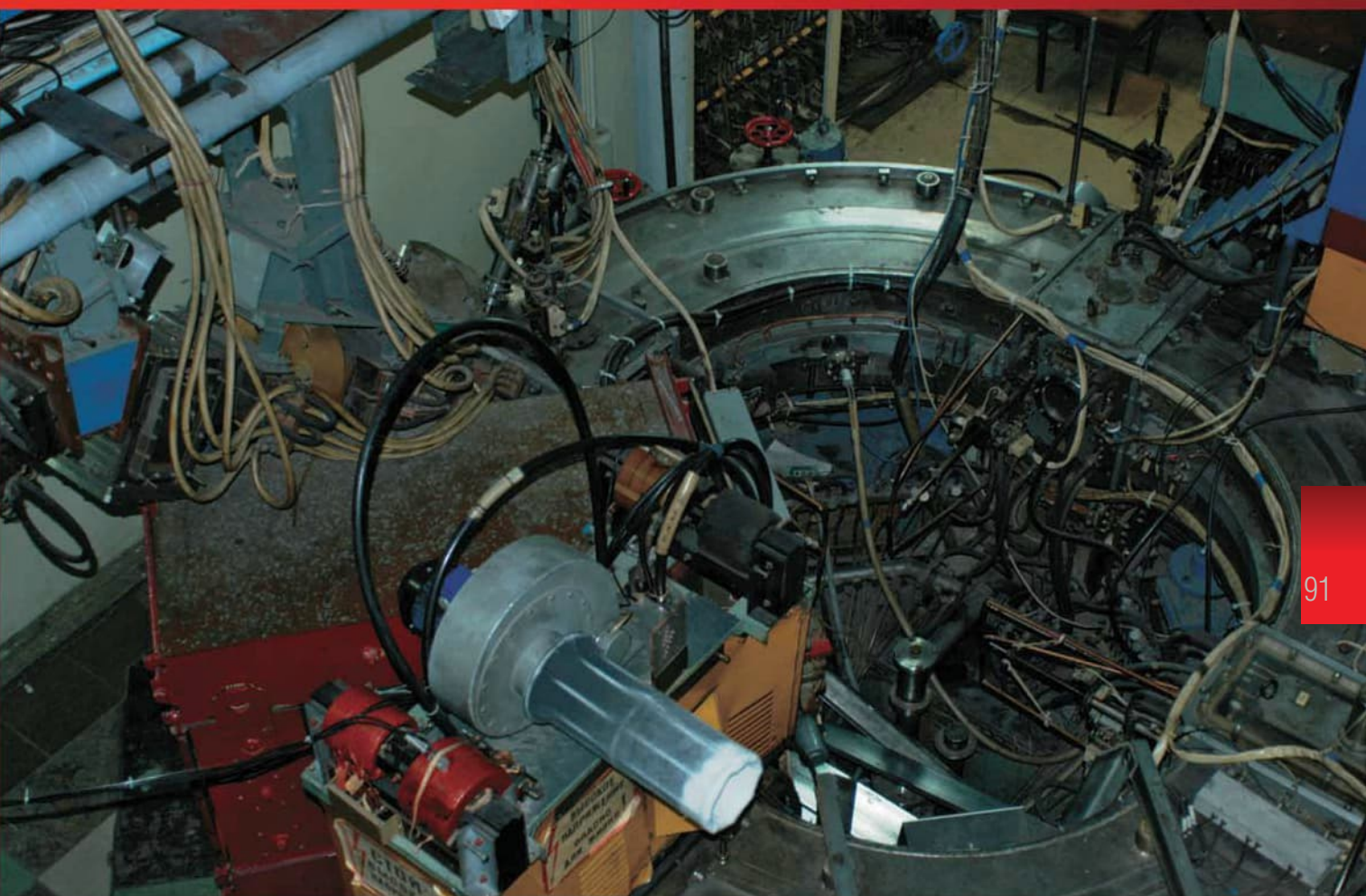
В этом смысле очень важно то, что наши источники СИ расположены в таком необычном инфраструктурном объекте, как новосибирский Академгородок, т. е. в большом мультидисциплинарном окружении. И те же

В бункере, где используется синхротронное излучение из накопителя ВЭПП-3, работа организована как в знаменитой сказке «Теремок»:

в тесноте, да не в обиде. В экспериментальном зале площадью всего лишь 90 м² расположено 10 пользовательских станций, поэтому плотность оборудования здесь просто зашкаливает.

Вверху справа – уникальная первая станция «Детонация», состоящая из взрывной камеры и блока детектирования, в которой можно использовать заряды взрывчатых веществ весом до 50 г

А это уже «живая» история ускорительной физики – бустерный синхротрон Б-4, где идет предварительное ускорение электронных (позитронных) пучков до энергии инжекции (360 МэВ) в накопитель ВЭПП-3. Вероятно, это единственный в мире работающий синхротрон, достигший «антикварного» возраста



Сегодня в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения работает 12 станций синхротронного излучения и 4 станции терагерцового излучения. Основными целями и задачами центра является проведение фундаментальных и прикладных исследований в физике, химии (в том числе катализе), биологии, медицине, экологии, геологии, материаловедении, а также разработка новых методов и технологий и создание специализированных источников излучения и новых экспериментальных станций

далекие от физики археологи, к примеру, могут практически «по-соседски» обратиться к нам и проанализировать любой артефакт, который их заинтересует. Ведь новые знания, как правило, появляются в результате комбинации уникальных пользовательских образцов и адекватных исследовательских инструментов, которые могут быть реализованы с использованием СИ.

Кроме того, у нас создаются и используются методики, которые в принципе затруднительно развивать в больших синхротронных центрах, в том числе из-за административно-организационных ограничений. Примером может служить изучение детонационных процессов с субмиллисекундным временным разрешением в специальной взрывной камере, расположенной прямо на канале вывода синхротронного излучения. Так как синхротронное излучение выходит не сплошным потоком, а в виде коротких вспышек, повторяющих временную структуру коротких электронных сгустков (в нашем случае длительность таких вспышек составляет 1 нс, а период повторения – около 100 нс), то, изучая особенности взаимодействия такого излучения с веществом, можно определять текущее состояние вещества с соответствующим временным разрешением. То есть за то мгновение, которое продолжается детонация, изучить характер химических процессов, происходящих в зоне движения детонационного фронта, динамику роста детонационных нанодIAMЗОВ и другие интересные специалистам эффекты.

Первая экспериментальная станция «Детонация» была установлена на накопителе ВЭПП-3, а позже заработала и вторая станция на накопителе ВЭПП-4: в новой камере стало возможным изучать детонацию зарядов с массой до 200 г. Сейчас эта станция модернизируется: на ней планируется изучать влияние мощных лазерных плазменных импульсов на конструкционные материалы. Знания об этих процессах будут востребованы при проектировании будущих термоядерных реакторов.


Постоянно модернизируются и другие пользовательские станции. Так, благодаря установке новых фокусирующих линз удалось улучшить пространственное

разрешение рентгенофлуоресцентного элементного анализа, с помощью которого можно определить не только химический состав образца, но и пространственное распределение отдельных элементов. И хотя в этом направлении мы не можем конкурировать с другими синхротронными центрами, тем не менее и у нас удалось получить ряд интересных результатов. Например, сотрудники из иркутского Лимнологического института СО РАН обнаружили «отклик» элементного состава донных осадков на изменения климата, такие как циклы Миланковича, что позволяет использовать СИ для изучения палеоклимата. Подобные работы сейчас проводятся и на донных осадках алтайских озер, в частности, оз. Телецкое.

Еще один способ изучения состояния вещества в экстремальных условиях (при сверхвысоких давлениях в несколько гигапаскалей и температурах до тысячи градусов) – метод алмазных наковален, при котором образец зажимают между двумя алмазными остриями. Таким способом можно в маленьком объеме добиться сверхвысоких давлений, тем самым моделируя поведение вещества на больших глубинах, в мантии или даже в центре Земли. «Хозяином» этой станции является новосибирский Институт химии твердого тела СО РАН.


Среди последних наших разработок – «метрологическая» станция «КОСМОС», предназначенная для тестирования спутниковой аппаратуры, и «ПЛАМЯ», которая создается совместно с новосибирским Институтом химической кинетики и горения СО РАН и предназначена для проведения исследований таких быстрых химических реакций, как горение.

Однако место ИЯФ в «мире синхротронного излучения» не ограничивается ролью простого участника – в определенной степени он является и его активным строителем. ИЯФ практически стал мировым монополистом по созданию сверхпроводящих вигглеров – многополюсных магнитов, создающих знакопеременное периодическое магнитное поле, которые устанавливаются в прямолинейные промежутки накопителей электронов для повышения интенсивности излучения. При этом новосибирские физики и инженеры обеспечивают весь цикл производства этого очень сложного устройства, от разработки и производства до тестирования и сборки на месте. Сегодня по всему миру, от Австралии и Бразилии до Америки, работает свыше 20 новосибирских вигглеров. Институт разработал, изготовил и поставил сверхпроводящие устройства практически для всех мировых центров синхротронного излучения, включая японский Spring-8, итальянский ELETTRA, канадский CLS, бразильский и австралийский синхротроны и единственный в России специализированный источник синхротронного излучения – Курчатковский синхротрон в Москве.



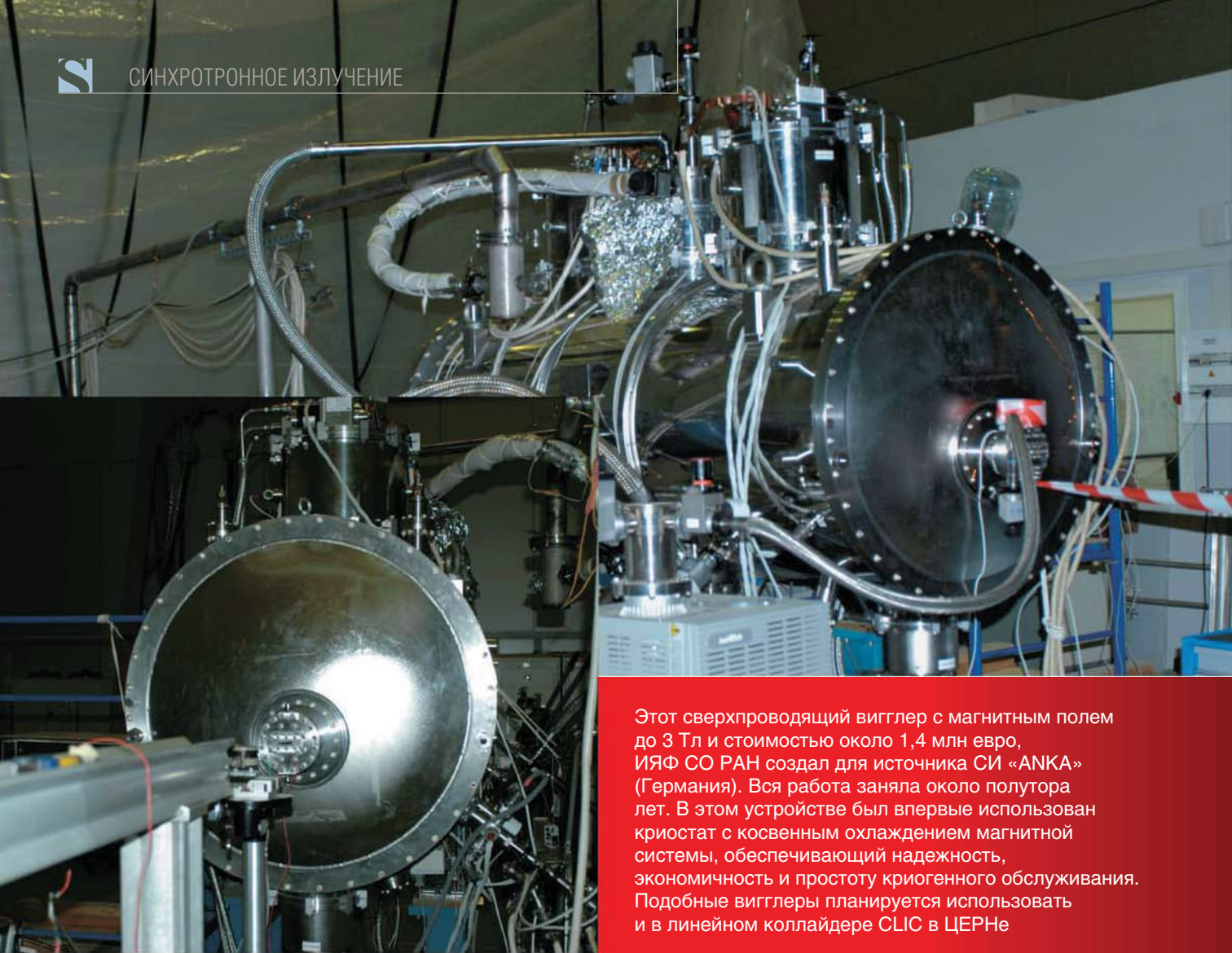
Новая станция для изучения детонационных процессов в зале СИ ВЭПП-4 рассчитана уже на заряды весом до 200 г.

Радиационный бокс станции «Рентгеновская фазоконтрастная микроскопия и микромография», работающий на пучках СИ из накопителя ВЭПП-4, сейчас используется для экспериментов по микропучковой терапии раковых опухолей совместно со специалистами ИЦиГ СО РАН (Новосибирск). На этой стадии работы эксперименты ведутся на лабораторных животных



Сейчас институтская группа, занимающаяся вигглерами, переориентируется на производство ондуляторов – сверхпроводящих устройств с большим числом полюсов и малым магнитным полем. В отличие от вигглеров, в этих устройствах излучение от отдельных полюсов идет в когерентном режиме, благодаря чему можно получить монохроматическое излучение с существенно большей спектральной яркостью. В подобных устройствах заинтересованы все современные центры. Например, предварительное соглашение о совместных работах в данной области заключено с британским «DLS».

Главной проблемой Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения было и остается отсутствие собственного специализированного источника СИ, при этом за последние десять лет было предложено, по крайней мере, пять (!) различных вариантов его создания. Все необходимые составляющие для этого, такие как опыт, технологии и производство, в ИЯФе есть. Отсутствует только плановое финансирование.



Этот сверхпроводящий вигглер с магнитным полем до 3 Тл и стоимостью около 1,4 млн евро, ИЯФ СО РАН создал для источника СИ «АНКА» (Германия). Вся работа заняла около полутора лет. В этом устройстве был впервые использован криостат с косвенным охлаждением магнитной системы, обеспечивающий надежность, экономичность и простоту криогенного обслуживания. Подобные вигглеры планируется использовать и в линейном коллайдере CLIC в ЦЕРНе

Надо сказать, что последний вариант нового источника отличается от всех предыдущих (и отвергнутых) тем, что он максимально экономичен. В проекте предусматривается использовать уже существующий тоннель, где сейчас располагается ВЭПП-3. Также предполагается расширить имеющийся экспериментальный зал, где будут расположены новые пользовательские станции. В качестве излучающих устройств планируется использовать сверхпроводящий вигглер и пару сверхпроводящих дипольных магнитов: специальная магнитная структура кольца будет сочетать предельную компактность с возможностью оптимизации яркости пучков.

В заключение хочется отметить, что за последние десятилетия в мире резко возрос интерес к исследованиям, проводящимся на стыке наук, и в нашем академическом центре сформировалось своего рода мультидисциплинарное научное сообщество, объединяющее исследователей из институтов новосибирского Академгородка и

других научных центров. Большая заинтересованность этих специалистов в исследованиях, проводимых с использованием СИ, гарантирует нескончаемый поток исследовательских материалов, защит, публикаций и, конечно, предельно эффективное использование всех имеющихся методов и установок. В новом источнике СИ должен быть заинтересован и Новосибирский государственный университет: в нашем синхротронном центре могут проходить практику студенты всех естественно-научных специальностей, как это делается во многих других университетах мира.

ИЯФ давно заслужил право перестать быть «сапожником без сапог», а Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения – получить свой специализированный источник СИ, в котором он остро нуждается. И для этого сейчас нужны лишь плановое централизованное финансирование и политическая воля. Несмотря ни на что, мы сохраняем оптимизм и веру в будущее.



НИКОЛЕНКО Антон Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 47 научных работ

КОСМОС И ПЛАМЯ

Станция синхротронного излучения КОСМОС была создана в 2007 г. в сотрудничестве с Государственным оптическим институтом (Санкт-Петербург). И первой работой, проведенной здесь, стала калибровка «Космического солнечного патруля» – набора спектрометров космического базирования, созданного в этом институте. Эти приборы предназначены для наблюдения за излучением Солнца в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом (ЭУФ) диапазоне – подобная информация крайне важна для исследований влияния солнечной активности на различные земные процессы, от погодных до биологических. Работать в земных условиях такие спектрометры не могут, поскольку атмосфера не пропускает излучение нужного диапазона, однако тестировать их приходится на Земле.

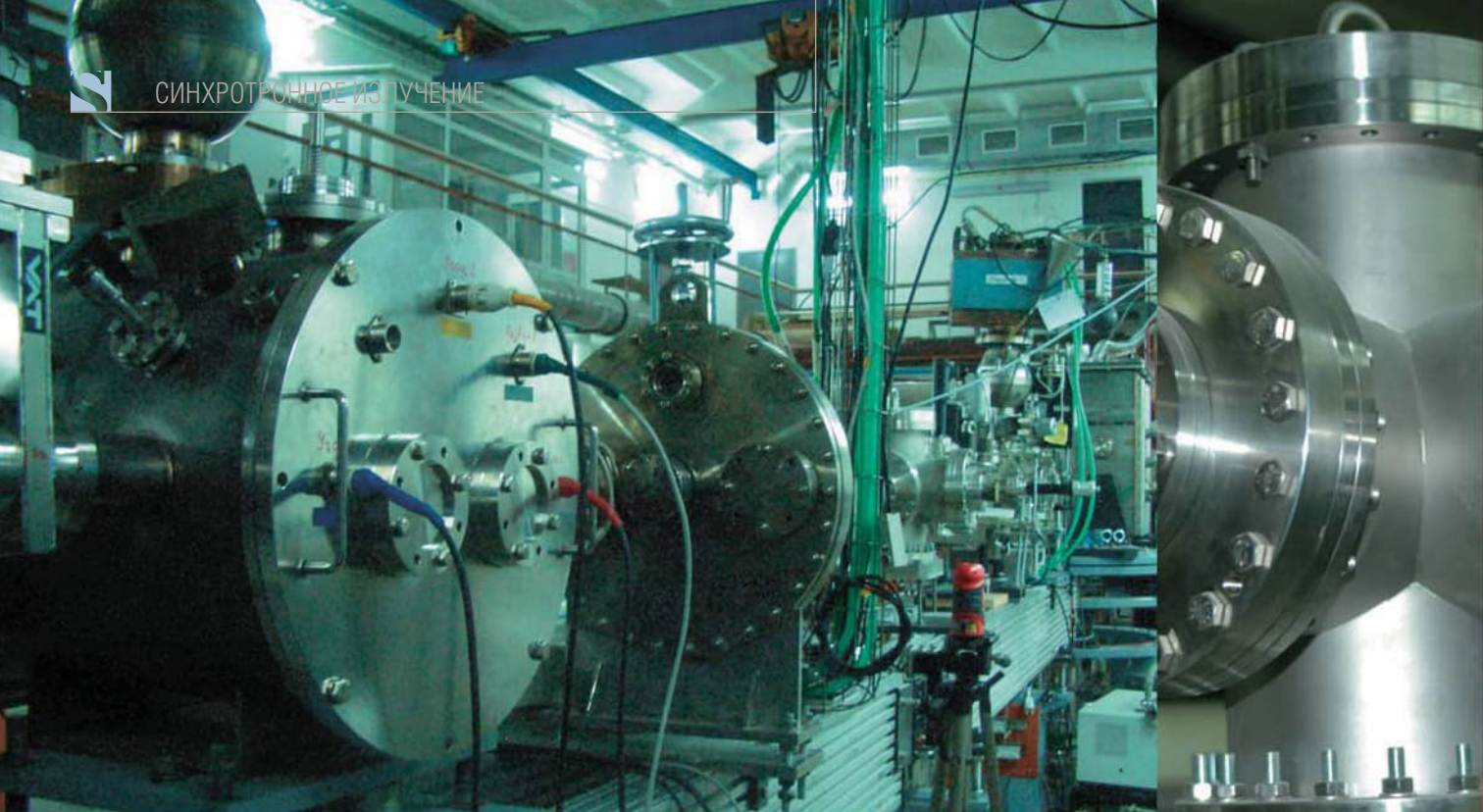
Так появилась наша станция – маленький кусочек «космического пространства», заключенный в вакуумную камеру, в которую приходит синхротронное излучение от коллайдера ВЭПП-4. Сочетание высокого вакуума и мощных потоков излучения создают в экспериментальных объемах станции условия, сходные с условиями околоземного космического пространства.

Синхротронное излучение обеспечивает поток фотонов в широком спектральном диапазоне – от видимого излучения до жесткого рентгеновского. Чтобы выделить из него фотоны с нужной энергией, на станции установлен монохроматор с дифракционными решетками и многослойными зеркалами. До недавнего времени мы использовали многослойные зеркала собственного производства, однако в настоящее время

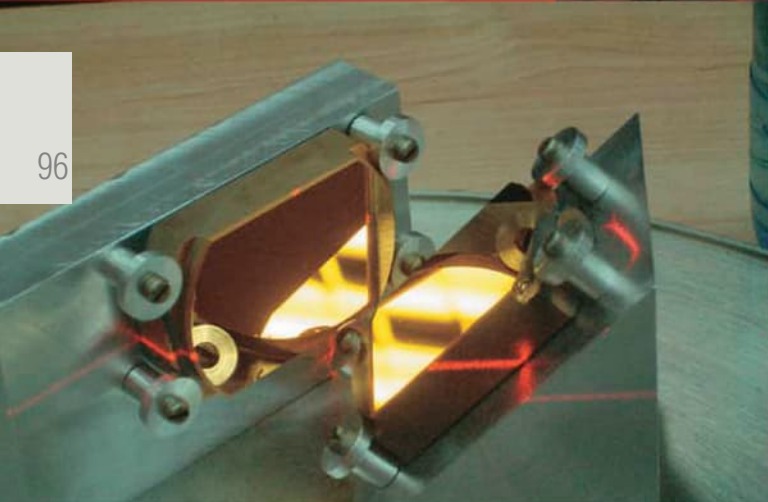
перешли на высококачественную многослойную оптику нижегородского Института физики микроструктур – лидера по производству подобных приборов в России, который известен и в мировом научном сообществе. КОСМОС же на сегодня является единственной отечественной станцией синхротронного излучения, работающей для нужд метрологии в мягком рентгеновском и ЭУФ-диапазоне.

Некоторое время назад мы на нашей станции проводили калибровку технологического образца спутникового оборудования для московского Института прикладной геофизики. Этот полетный образец создан совместными усилиями НПО «Тайфун» (Обнинск) и Физического института имени Лебедева (Москва) и будет размещен на солнечной панели космической станции «Электро-Л № 3». Правила космической технической приемки требуют для подобного рода устройств проведения обязательной калибровки, и именно мы даем прибору столь необходимый «билет на спутник». Наша станция также является единственной в России установкой, на которой можно провести подобную калибровку космического оборудования. Методика калибровки, отработанная на технологическом образце, была признана успешной, и в ближайшее время мы ожидаем прибытия полетного образца этого прибора, который и отправится на орбиту.

На станции ведутся и другие метрологические работы: здесь тестируются оптические элементы, работающие в излучении ЭУФ-диапазона, которые могут быть использованы для новейших технологий в производстве нанoeлектроники, а также детекторы, предназначенные для наблюдения за лазерной плазмой в экспериментах



Создание космических условий в небольшой по размерам рабочей камере станции КОСМОС требует большой аккуратности и тщательного соблюдения вакуумной «гигиены». Важнейшая часть установки – довольно объемный монохроматор, выделяющий из пучка синхротронного излучения фотоны с требуемой энергией (на фото *вверху*); на фото *внизу* – процедура лазерной юстировки золотых фокусирующих зеркал монохроматора



Станция ПЛАМЯ, в силуэте которой романтики усматривают сходство с конем, была разработана в ИХКиГ СО РАН и сейчас находится в стадии сборки. Работы по ее созданию начались два года назад, а первые измерения планируется получить уже ближайшей осенью. Все детали, устанавливаемые внутри станции, требуют тщательной промывки спиртом. А поскольку важной составляющей установки является вакуум, то во время работы постоянно требуется напряжение в 4 кВ для работы насосов и жидкий азот – для вакуумных ловушек. Станция будет выходить на рабочий режим в течение 10–12 ч



по управляемому термоядерному синтезу. Плазма генерирует очень короткие и яркие вспышки рентгеновского излучения, и чтобы «не ослепнуть», детектор должен обладать высоким быстродействием и низкой чувствительностью. Такие параметры детектора крайне затрудняют его калибровку на других установках, помимо нашей.

Тот же самый канал вывода синхротронного излучения, на котором установлена станция КОСМОС, используется и для другой станции с «говорящим» названием ПЛАМЯ, которая сейчас создается совместно с новосибирским Институтом химической кинетики и горения. Задача коллег из ИХКиГ СО РАН – собрать установку со встроенной горелкой для получения пламени, установить и запустить анализирующую аппаратуру. Наша – создать пучок синхротронного излучения с нужными параметрами, достаточно мощный и «чистый» по спектральному составу, который будет использоваться как тонко настраиваемый инструмент для выборочной ионизации продуктов горения.

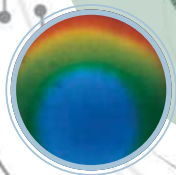
Пламя – это весьма сложное явление: между началом возгорания органики до превращения ее в конечные продукты (в идеальном случае – вода и углекислый газ) происходят тысячи разнообразных химических реакций. Для организации правильного, наиболее эффективного и экологически чистого процесса сгорания необходимо тщательное изучение промежуточных стадий реакции. Обычно для ионизации продуктов реакции используется электронный пучок, однако его частицы недостаточно «выровнены» по энергии, и использование его в качестве тестирующего пучка имеет свои ограничения. Синхротронное излучение в этом смысле существенно отличается в лучшую сторону: с его помощью можно будет прицельно рвать строго определенные химические связи внутри молекул, что даст возможность не только определять химические вещества, образующиеся в ходе горения, но даже различать изомеры одного и того же состава!

Наше ПЛАМЯ станет третьей такой синхротронной станцией в мире после США и Китая и первой в России. Как ожидается, первым исследуемым объектом станет биодизельное топливо – возобновляемый энергоноситель, не нарушающий баланса парниковых газов в атмосфере.



Государственные премии РФ — сибирякам

В День России, 12 июня 2010 г. в Георгиевском зале Большого Кремлевского дворца состоялось вручение Государственных премий Российской Федерации за 2009 г. Государственная премия РФ служит высшим признанием заслуг деятелей науки и культуры перед обществом и государством, и присуждается за выдающиеся работы, открытия и достижения, результаты которых существенно обогатили отечественную и мировую науку и оказали значительное влияние на развитие научно-технического прогресса. Премия носит персональный характер и присуждается, как правило, одному соискателю однократно. В этом году присуждение Государственных премий в области науки и технологий вылилось в настоящий триумф сибирской науки: две из трех премий получили новосибирцы, сотрудники Сибирского отделения РАН. Высшей государственной наградой были отмечены д. ф.-м. н. Н. А. Винокуров (Институт ядерной физики СО РАН) – за достижения в области разработки и создания лазеров на свободных электронах, и академик В. Н. Пармон (Институт катализа СО РАН) – за крупный вклад в развитие теории и практики каталитических методов глубокой переработки углеводородного сырья и использования возобновляемых ресурсов. Сегодня на страницах нашего журнала Н. А. Винокуров рассказывает о своей работе



2010

«НАУКА из первых рук», № 3(33)

На быстрых ЭЛЕКТРОНАХ

Лазеры на свободных электронах – мощные источники когерентного излучения, возникающего при движении заряженных частиц в периодическом магнитном поле и близкого к синхротронному излучению. Главная область применения таких установок – исследования в сфере материаловедения, химии, кристаллографии, физики твердого тела, молекулярной биологии

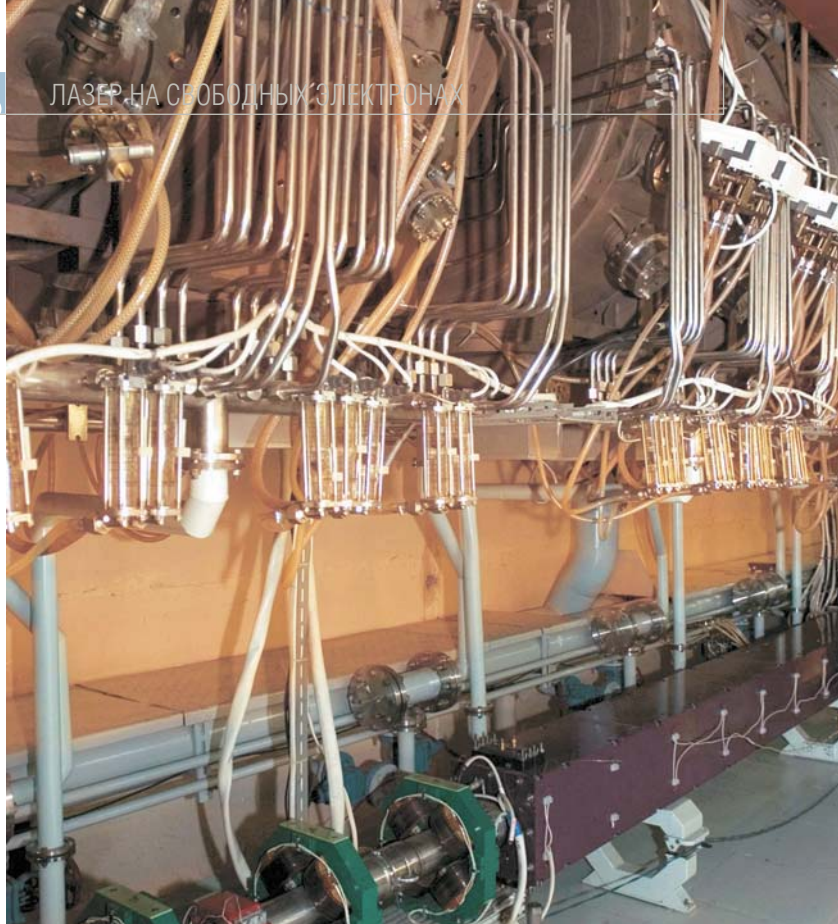
Устройства для преобразования энергии электронов, движущихся почти со скоростью света, в энергию электромагнитного излучения получили название *лазеров на свободных электронах* (ЛСЭ).

Общепризнанным достоинством этого устройства, выделяющего его среди других лазеров, является возможность получения монохроматического излучения на любой длине волны в беспрецедентно широком диапазоне от 0,1 нм до 1 мм. При этом возможна относительно быстрая перестройка лазера с одной длины волны на другую в интервале до десятков процентов.

Ключевые слова: лазеры на свободных электронах, ускорители заряженных частиц, синхротронное излучение
Key words: free electron lasers, charged particle accelerators, synchrotron radiation



ВИНОКУРОВ Николай Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск). Специалист в области физики и техники лазеров на свободных электронах (ЛСЭ). Под его руководством созданы не только все ЛСЭ в Новосибирском научном центре, но и самый малогабаритный в мире ЛСЭ для Института атомной энергии в Корею. Более десяти лет представляет Россию в оргкомитете международных конференций по ЛСЭ. Лауреат Международной премии по лазерам на свободных электронах (1991), Премии им. Комптона (1995) и Государственной премии РФ (2010). Награжден орденом Дружбы (2007). Автор и соавтор около 200 научных публикаций, в том числе 150 – в международных изданиях



Первая очередь установки с ЛСЭ, запущенная в апреле 2003 г., в отличие от полномасштабного варианта имеет единственный канал транспортировки электронов

Усилитель излучения

Процесс излучения электрическим зарядом электромагнитной волны можно представить как отрыв части его электрического поля. Это означает, что в пустом пространстве излучают лишь заряды, движущиеся с ускорением, в то время как электрон движется по прямой линии с постоянной скоростью. Чтобы он начал излучать, надо заставить его двигаться волнообразно. Обеспечить такое движение можно, например, с помощью статического электрического или магнитного полей.

Еще в 1947 г. советский физик В. Л. Гинзбург предложил использовать периодическое поле для усиления интенсивности излучения быстрой заряженной частицы и рассчитал параметры такого излучения. Позже было создано устройство под названием *ондулятор*, создающее периодическое магнитное поле для организации особого движения электронов по волнистой траектории вдоль продольной оси прибора. Возникающее при этом усиление электромагнитного излучения составляет суть работы ЛСЭ, а сам усилитель электромагнитного излучения собственно и является лазером на свободных электронах.

Такое название можно объяснить тем, что в лазерах других типов используется излучение электронов, связанных со своим атомом, или в полупроводниковых лазерах – с кристаллом. Однако и в ЛСЭ электроны не совсем свободны, так как они совершают вынужден-

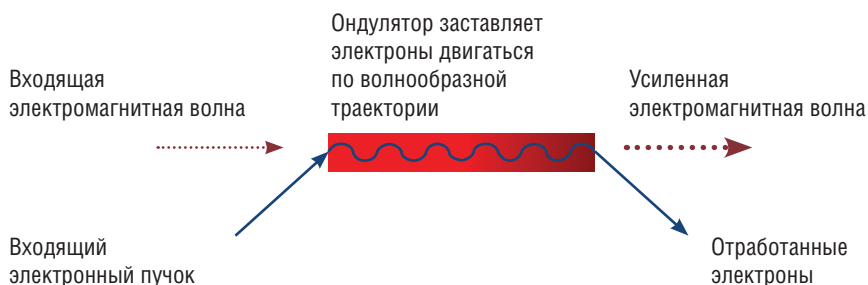
ные колебания в ондуляторе. Работа любого лазера основана на явлении вынужденного излучения, обусловленного соответствующей синхронизацией отдельных излучателей (электронов, атомов, молекул) внешней усиливаемой волной. В ЛСЭ синхронизация происходит за счет продольной группировки электронов.

К сожалению, электронный коэффициент полезного действия ЛСЭ (доля энергии электронов, преобразуемая в энергию электромагнитного излучения) весьма невысок – не более 1%. Это связано как раз с нарушением условия синхронизма для замедленных электронов пучка.

Циклическая подача излучения с выхода усилителя на его вход может приводить к самовозбуждению усилителя, превращая его в генератор. В случае ЛСЭ усилитель преобразуется в генератор с помощью *оптического резонатора* – двух зеркал, расположенных слева и справа от ондулятора на его продольной оси. Электромагнитная волна циркулирует между зеркалами, усиливаясь при каждом проходе через ондулятор (для компенсации дифракционной расходимости излучения зеркала часто делают вогнутыми).

Рост интенсивности излучения такого генератора, впрочем, имеет свои пределы, обусловленные, например, практически полной группировкой электронов во второй половине ондулятора.





Принципиальная схема устройства лазера на свободных электронах (ЛСЭ)

КАК ЛСЭ УСИЛИВАЕТ СВЕТ

Представим, что в ондулятор входят монохроматическая электромагнитная волна длиной λ и пучок быстрых электронов, равномерно распределенных вдоль продольной оси прибора и движущихся со скоростью v , почти равной скорости света.

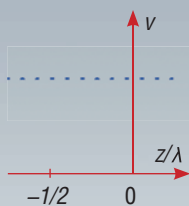
Каждый электрон движется в ондуляторе вдоль слабоволнистой траектории. Для сильного (резонансного) взаимодействия электрона и электромагнитной волны необходимо обеспечить выполнение условия синхронизма: при прохождении одного периода траектории электрон должен отставать от волны ровно на ее длину λ (в силу огромных скоростей величина λ очень мала). Если энергия электронов и длина волны таковы, что удовлетворяется условие синхронизма, то происходит перераспределение энергии частиц.

Сначала средняя энергия электронов не меняется, но происходит ее модуляция, и пучок разбивается

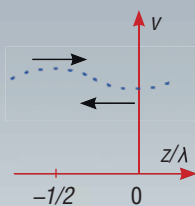
на слои толщиной $\lambda/2$ с чередующимся знаком отклонения энергии от начальной величины.

Однако частицы с меньшей энергией летят медленнее, а с большей – быстрее. В результате «быстрые» слои догоняют «медленные», что приводит к модуляции плотности электронов примерно с периодом λ .

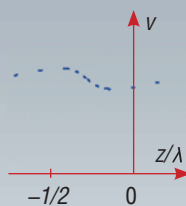
Во второй половине ондулятора повторяется то же самое: замедление и ускорение чередующихся слоев, но только теперь энергию теряют слои с большей плотностью частиц, а приобретают слои – с меньшей. При этом средняя энергия электронов падает и в соответствии с законом сохранения энергии мощность электромагнитной волны растет. Вот таким образом ЛСЭ усиливает электромагнитное излучение, используя энергию быстрых электронов



На входе в ондулятор все частицы имеют одинаковую скорость и равномерное продольное распределение



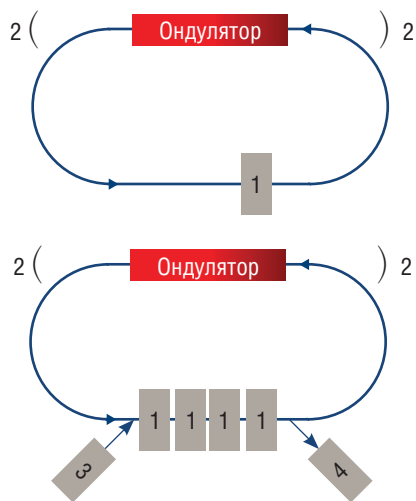
В средней части ондулятора одни частицы теряют энергию, другие – приобретают; их продольное распределение начинает меняться из-за различия в скоростях



Во второй половине ондулятора из-за относительного сдвига частиц образуются области их уплотнения и разрежения (вблизи $-1/4$ и $+1/4$ соответственно)

В ондуляторе под действием попутной электромагнитной волны меняется скорость электронов, что отражается на их продольном распределении

λ – длина волны;
 z – продольная координата электрона;
 v – скорость электрона



Стандартные схемы установки с ЛСЭ на базе электронного накопителя (вверху) и ускорителя-рекуператора. Стрелками показана траектория движения электронов. 1 – высокочастотный резонатор, 2 – зеркала оптического резонатора, 3 – источник электронов низкой энергии, 4 – поглотитель замедленных электронов

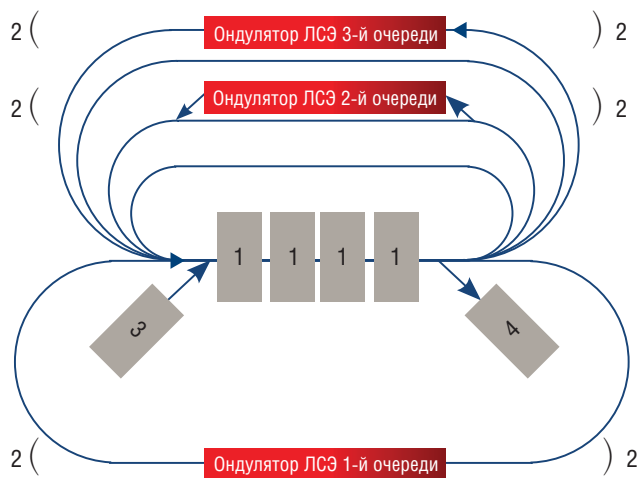


Схема (вверху) и общий вид (справа вверху) ► полномасштабной установки Сибирского центра фотохимических исследований. Замкнутыми линиями на схеме показаны электронно-оптические каналы транспортировки электронов (стрелки указывают направление)

ПОГОНЩИКИ ЭЛЕКТРОНОВ

Для хорошей работы ЛСЭ требуется высокоэнергетический электронный пучок с малыми поперечными размерами и небольшим разбросом по скоростям. Такие пучки можно получить только на электронных ускорителях, являющихся самой сложной, габаритной и дорогостоящей частью установок с ЛСЭ. Размеры современного электронного ускорителя могут составлять сотни метров, а его энергопотребление – десятки мегаватт. Из-за низкого электронного КПД ЛСЭ желательно возвращать энергию отработанных электронов в ускоряющую систему. В установках с ЛСЭ используются два типа ускорителей.

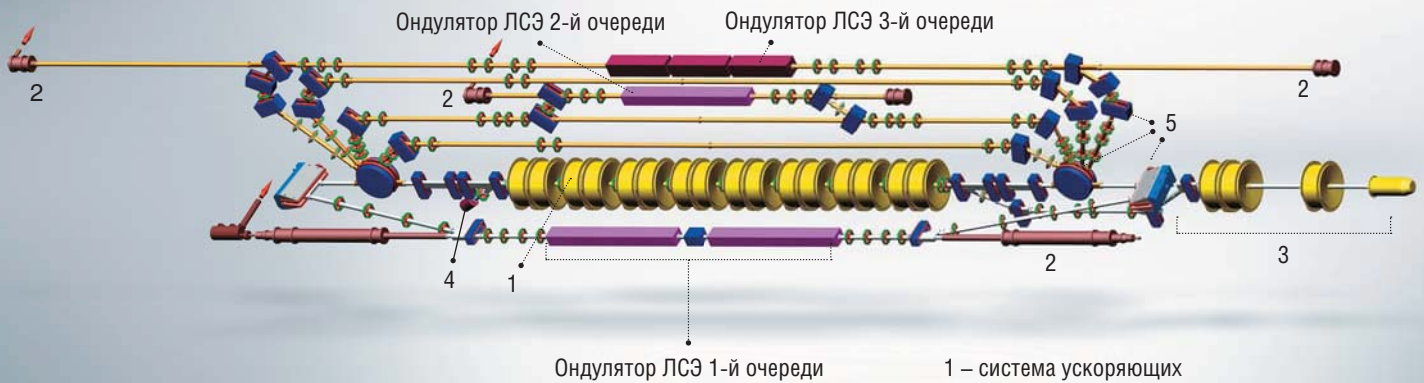
К одному из них относятся широко используемые в фундаментальных научных исследованиях *электронные накопители*, в которых электроны движутся вдоль замкнутой траектории (орбиты). При этом электрон может оставаться в накопителе несколько часов (время жизни ограничено рассеянием на молекулах остаточного газа, который всегда есть в вакуумной камере накопителя). Такие ускорители применяются в экспериментах по физике элементарных частиц и для генерации рентгеновского излучения.

При использовании накопителя пучок электронов, отдавший часть энергии в ондуляторе ЛСЭ, проходит через поворотные магниты ускорителя и снова возвращается в ЛСЭ для повторного использования. Поскольку при

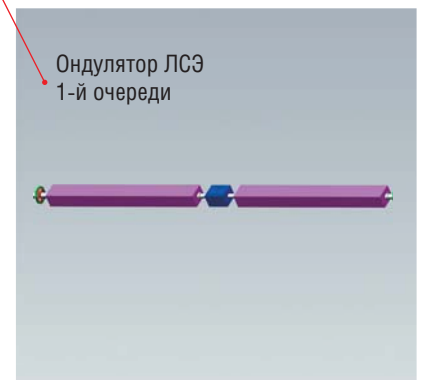
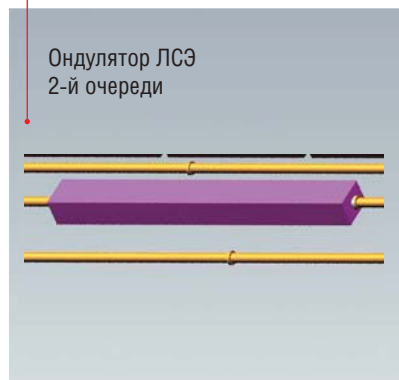
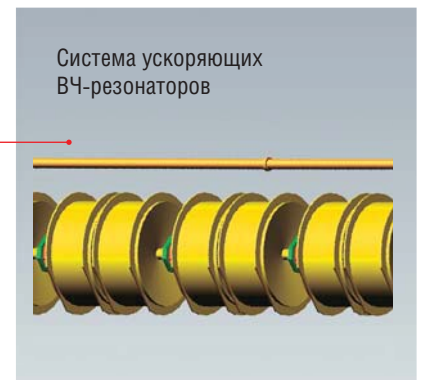
взаимодействии с излучением в ондуляторе одни частицы ускоряются, а другие – замедляются, каждый проход через ЛСЭ приводит к нарастанию энергетического разброса электронного пучка. Хотя средняя потеря энергии излучающими электронами восполняется высокочастотным (ВЧ) резонатором с продольным электрическим полем, растущий энергетический разброс частиц ограничивает среднюю мощность излучения ЛСЭ на базе накопителя несколькими ваттами.

Для повышения мощности излучения ЛСЭ в 1978 г. А. Н. Скринский и Н. А. Винокуров предложили применить так называемый *ускоритель-рекуператор (УР)*. При использовании такого ускорителя пучок электронов ускоряется в нескольких стоящих друг за другом ВЧ-резонаторах, отдает часть своей энергии в ондуляторе ЛСЭ, после чего замедляется в тех же ВЧ-резонаторах, возвращая энергию, затраченную на его ускорение. Применение УР позволяет получать большие средние токи электронов и существенно снижает радиационную опасность установки.

Современные лазеры на свободных электронах, использующие УР, генерируют излучение со средней мощностью более 10 кВт. Теоретически обоснована возможность применения таких установок для получения излучения со средней мощностью более 100 кВт



1 – система ускоряющих ВЧ-резонаторов, 2 – зеркало оптического резонатора, 3 – источник электронов низкой энергии, 4 – поглотитель замедленных электронов, 5 – поворотный магнит



На полномасштабной установке, генерирующей излучение для Сибирского центра фотохимических исследований, планируется иметь три ЛСЭ на базе единого ускорителя-рекуператора. Режим работы установки регулируется простым переключением поворотных магнитов

Инструмент познания

Для Института ядерной физики СО РАН создание ускорителей заряженных частиц является одной из основных и традиционных тематик, поэтому его устойчивый интерес к разработке ЛСЭ при наличии такой мощной базы вполне понятен.

Работы по созданию лазеров на свободных электронах начали проводиться в институте с 1977 г., когда А. Н. Скринский и Н. А. Винокуров предложили модификацию ЛСЭ (*оптический клистрон*), значительно повысившую усиление прибора по сравнению с классической схемой. В процессе разработки новых ЛСЭ в ИЯФе впервые в мире заработал ондулятор на постоянных магнитах с регулировкой амплитуды магнитного поля при помощи изменения рабочего зазора, а спустя несколько лет появились гибридные ондуляторы на постоянных магнитах. Как переменный зазор, так и гибридная конструкция ондуляторов сейчас стали общепринятыми и применяются на всех источниках синхротронного излучения.

Реализованная в 1988 г. оригинальная конструкция ондулятора большой длины в оптическом клистроне на накопителе ВЭПП-3 оказалась настолько удачной, что неоднократно использовалась позже в различных отечественных и зарубежных установках, а нам позволила получить излучение рекордно короткой (для ЛСЭ) длины волны 0,24 мкм в ультрафиолетовом диапазоне и небывало узкого (10^{-6}) спектра. Кстати, этот рекорд продержался более 10 лет.

Важнейшим этапом развития ЛСЭ в новосибирском Академгородке стала организация Сибирского центра фотохимических исследований на базе Института химической кинетики и горения СО РАН, который в начале девяностых годов возглавлял академик Ю. Н. Молин.

В институте к тому времени давно работала лаборатория лазерной фотохимии под руководством А. К. Петрова, сотрудники которой активно поддержали идею коллективного использования учеными различных специальностей излучения мощной лазерной установки на быстрых электронах, способной легко варьировать

его параметры в широких пределах. Несмотря на известные трудности переходного десятилетия и благодаря энтузиазму участников проекта, ЛСЭ 1-й очереди с длинами волн в диапазоне 120–240 мкм был запущен в 2003 г. Отмечу, что его средняя мощность 500 Вт является мировым рекордом для источников излучения в терагерцовом диапазоне частот.

Год назад начал работать ЛСЭ 2-й очереди. На этом лазере получено когерентное излучение с длинами волн в диапазоне 40–80 мкм с наибольшей в мире средней мощностью – около 500 Вт. В этом году излучение ЛСЭ 2-й очереди стало доступно ученым для проведения экспериментов в различных областях науки.

Генерируемое установкой лазерное излучение по каналу с сухим азотом доставляется к пользовательским станциям, на которых оно используется сотрудниками академических институтов и Новосибирского государственного университета для проведения исследований по физике твердого тела, химии и биологии, в том числе на наноструктурном уровне. Сейчас работает шесть таких экспериментальных станций.

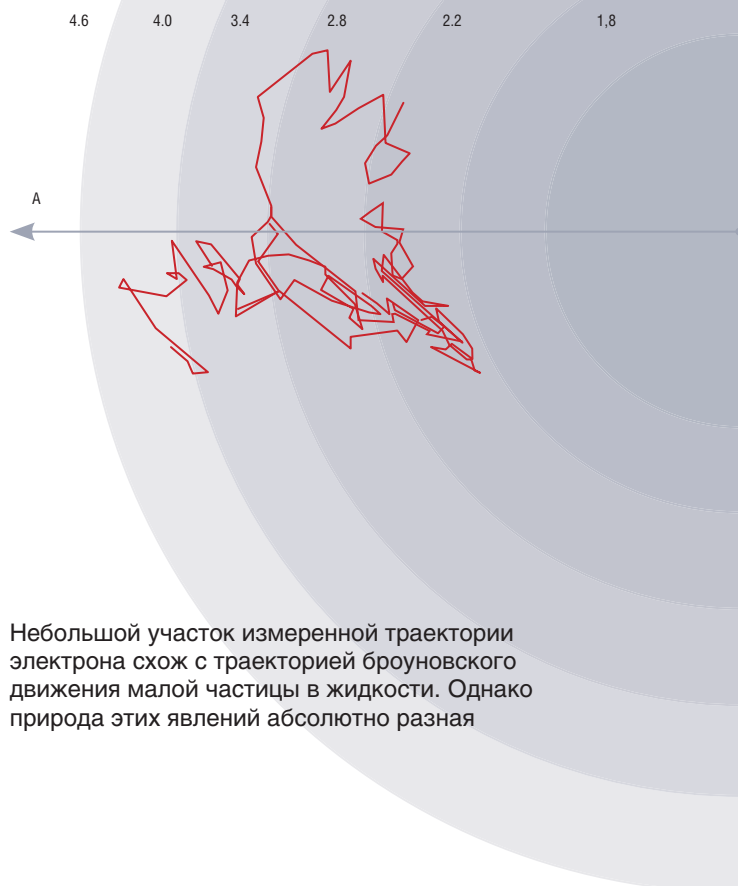
Использование мощного субмиллиметрового излучения с перестраиваемой длиной волны в качестве уникального исследовательского инструмента открывает перед учеными принципиально новые возможности и перспективы. Скажем, сотрудниками трех институтов СО РАН совместно разработан метод «мягкой абляции» для исследования биологических макромолекул (например, ДНК), использующий малость энергии фотона субмиллиметрового излучения. Энергия фотона настолько мала, что излучение не разрушает исследуемую молекулу и более того – сохраняет ее биологическую активность.

На ближайшее будущее планируется дальнейшее повышение мощности излучения действующих лазеров и размещение на установке ЛСЭ 3-й очереди с длинами волн в ближнем инфракрасном диапазоне 5–30 мкм. Планов в этой интересной и перспективной области познания всегда много.

БУДУЩЕЕ НЕ ВСПОМНИТЬ

Благодаря высокой яркости излучения из длинного ондулятора на электронном накопителе ВЭПП-3 удалось провести цикл уникальных экспериментов по изучению влияния квантовых флуктуаций на движение одного циркулирующего в накопителе электрона. Было показано, что это движение таково, как если бы оно было вызвано действием случайной силы, и схоже с броуновским движением малой частицы в жидкости. Однако причины случайности этих процессов кардинально различаются.

Траектория броуновского движения не является истинно случайной, поскольку при знании начальных скоростей молекул жидкости в принципе можно рассчитать и движение самих молекул, и движение частицы под их ударами. «Случайность» броуновского движения связана с нашим незнанием этих микроскопических параметров системы. В случае движения электрона все необходимые для расчета параметры известны, но при этом движение электрона принципиально непредсказуемо. Проведенные эксперименты дают один из немногих примеров истинно случайного процесса, который, в частности, доказывает принципиальную непредсказуемость будущего, демонстрируя, что «Бог играет в кости»



Небольшой участок измеренной траектории электрона схож с траекторией броуновского движения малой частицы в жидкости. Однако природа этих явлений абсолютно разная

Литература

Маршалл Т. Лазеры на свободных электронах / Пер. с англ. М.: Мир, 1987.

Агафонов А. В., Лебедев А. Н. Лазеры на свободных электронах. М.: Знание, 1987.

Кулипанов Г. Н. Изобретение В. Л. Гинзбургом ондуляторов и их роль в современных источниках синхротронного излучения и лазерах на свободных электронах // Успехи физических наук. 2007. 177, С. 384

Brau C. Free-Electron Lasers. Boston: Academic Press, Inc., 1990.

ЛСЭ:

А.К. ПЕТРОВ

МЯГКОЕ ПРИКОСНОВЕНИЕ ЛАЗЕРА

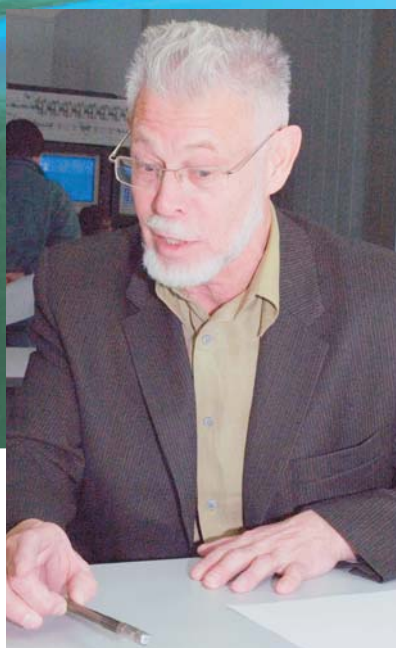
Чтобы перевернуть мир, Архимеду нужна была точка опоры. В науке ее роль зачастую играет любой новый метод исследования, чье появление вызывает резкий и неожиданный подъем в смежных науках. У лазера на свободных электронах из Сибирского центра фотохимических исследований — плода научного сотрудничества, созданного под «знаком сигмы», — есть все шансы стать в этом смысле хрестоматийным примером...

Широко ныне известный метод масс-спектрометрии в свое время произвел настоящую революцию в химии. По сей день для любого вещества, которое можно перевести в газовую фазу, может быть записан масс-спектр, на основе материнского пика которого можно определить его молекулярную массу, а по анализу масс-спектра фрагментов — структуру молекулы. Препятствием же к использованию масс-спектрального анализа в биологии до сих пор служили не столько огромная масса биологических макромолекул, сколько невозможность перевести их в газовую фазу.

2006

«НАУКА из первых рук», № 3(9)

ПЕТРОВ Александр Константинович — доктор химических наук, заведующий отделом лазероуправляемых процессов и лабораторией лазерной фотохимии, заместитель директора Института химической кинетики и горения СО РАН (Новосибирск)



Эта трудность была преодолена с появлением методики MALDI (*matrix assisted laser desorption/ionization*), при которой на вещество, помещенное в специальную матрицу, воздействуют мощным УФ-лазерным импульсом длительностью 10^{-9} – 10^{-6} с. При этом происходит процесс так называемой *абляции* (возгонки) исследуемого вещества, причем молекулы и их осколки вылетают с поверхности подложки в виде ионов и попадают в масс-спектрометр с высоким разрешением. Поскольку энергия кванта излучения таких лазеров довольно высока, происходит *фотохимическая диссоциация*, то есть разрушение молекул анализируемого образца.

Поэтому для исследователей было бы крайне заманчивым получить в свое распоряжение метод, позволяющий проводить «мягкую», без деструкции объекта, лазерную абляцию биологических макромолекул, которые затем можно регистрировать в газовой фазе в виде аэрозольных частиц. Идея эта была реализована в нашем Сибирском центре фотохимических исследований с запуском первой очереди лазера на свободных электронах (ЛСЭ), разработанного в ИЯФ СО РАН.

История Центра началась в 1992 г., когда директор ИЯФ ак. А. Н. Скринский пригласил все заинтересованные стороны на свой традиционный «круглый стол» и рассказал о проекте создания ЛСЭ, излучение которого можно было бы плавно перестраивать по длинам волн в инфракрасном диапазоне от 2 до 200 мкм. Это громадный диапазон, перекрывающий колебательные и вращательные спектры почти всех существующих молекул. Был задан вопрос: готовы ли химики использовать такое излучение? Ответ был моментальным: да, конечно!

Дело в том, что наше подразделение по сей день носит название лаборатория лазерной фотохимии. К тому времени у нас был накоплен 20-летний опыт исследований реакционной способности молекул, колебательно возбужденных под действием монохроматического излучения CO_2 -лазера. К сожалению, этот лазер генерирует излучение в достаточно узком диапазоне длин волн около 10 мкм, поэтому исследователи вынуждены подбирать молекулы, имеющие колебания именно в этой области. Очевидно, что появление универсального источника монохромати-

Вопрос об объединении усилий физиков и химиков для создания ЛСЭ решился на традиционном «круглом столе» в Институте ядерной физики СО РАН



ческого излучения позволило бы селективно воздействовать на любые колебания в любых молекулярных системах.

Однако для реализации задуманного недостаточно было иметь красивую физическую идею, тщательно просчитанный проект и даже сделанные «в железе» узлы и комплектующие. Нужно было соответствующее немаленькое помещение, желательное с радиационной защитой... Помог случай и тогдашний председатель СО РАН академик В. А. Коптюг. К этому времени были остановлены работы в специализированном корпусе Института химической кинетики и горения с 50-метровым ускорительным залом, защищенным трехметровым бетоном. Тут-то и появилась идея создания на этой базе объединения — центра коллективного пользования для проведения фундаментальных и прикладных исследований в физике, химии, биологии и медицине.

Постановление о создании Центра было подписано В. А. Коптюгом 15 декабря 1992 г. В нем предусматривалась перспектива «...придания Центру статуса международного», а базовыми институтами Центра были определены институты Химической кинетики и горения и Ядерной физики СО РАН.

К постановлению был приложен «План-график проектно-монтажных работ по созданию ЛСЭ»,

по которому «получение заданных параметров и работа на эксперимент» были намечены на 1996 г. Указаны были и источники финансирования: РАН, Министерство обороны России, дирекция СОИ США, Национальное агентство по космосу и авионавтике США и поступления по международным договорам ИЯФ. Однако вскоре пришли трудные для страны и для отечественной науки годы перестройки. Все источники финансирования рухнули. И хотя наличие готового подходящего здания почти в два раза удешевило проект, ситуация казалась безысходной...

Сегодня, оглядываясь в прошлое, хочется в прямом смысле слова пропеть гимн героическому коллективу ИЯФ, который продолжал работать и заметную часть заработанных по договорам средств вкладывал в создание ЛСЭ.

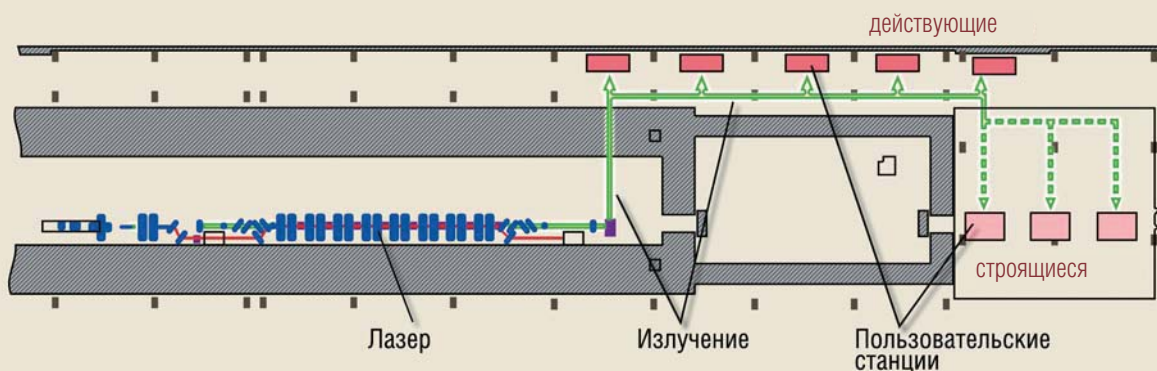
Трудности сплотили нас. Мы регулярно собирались на семинары, планерки, обсуждали текущие дела, радовались даже малым успехам, мечтали, строили планы на будущее. Как могли, помогали и поддерживали друг друга: за все годы, которые ушли на создание ЛСЭ, не могу вспомнить ни одного конфликта.

Все эти годы ИЯФ регулярно проводил международные конференции по синхротронному излучению и ЛСЭ. Сначала мы, химики, были благодарными слушателями и учениками, а через несколько лет уже сами

Сначала на конференциях по синхротронному излучению, где обязательно бывает ЛСЭ-секция, химики были лишь слушателями и учениками

SYNCHROTRON RADIATION CONFERENCE JULY 11 – 15





Сегодня в Сибирском центре фотохимических исследований излучение первой очереди ЛСЭ выведено на пять первых пользовательских станций, где работают ученые разных специальностей. А на подходе — вторая очередь лазера, излучение которого перекроет коротковолновый диапазон

стали делать научные доклады по использованию излучения ЛСЭ.

Дело в том, что в 1994 г. мы предложили использовать излучение ЛСЭ для разделения изотопов. Дж. Мэйди, профессор Университета Дюка (Северная Каролина) (первый, кто построил лазер на свободных электронах и дал ему такое название), пригласил нас к себе проверить эту возможность на его ЛСЭ, по энергии импульса в 1000 раз уступавшему нашему будущему лазеру. Шансов было мало, но мы рискнули, и за два непродолжительных визита в 1995—96 гг. мне и моим коллегам д. х. н. Е. Н. Чеснокову и к. х. н. С. Р. Горелику удалось разделить молекулы муравьиной кислоты и нитрометана с разными изотопами углерода, кислорода и азота.

Сама идея была прозрачной. Наличие изотопных атомов в молекуле приводит к соответствующему расщеплению в колебательном спектре. Излучение ЛСЭ можно резонансно настроить только на одну изотопную разновидность молекулы и, соответственно, диссоциировать только ее. Эта работа не осталась незамеченной научной общественностью, и в 2001 г. проф. Х. Курода из Токийского исследовательского университета предложил нам попытаться разделить



Наш ЛСЭ еще молод, но у нас уже есть свои исторические реликвии. Например, бутылка из-под шампанского, распитого 4 апреля 2003 г. — в день, когда было получено первое излучение. На ней оставили автографы все участники запуска



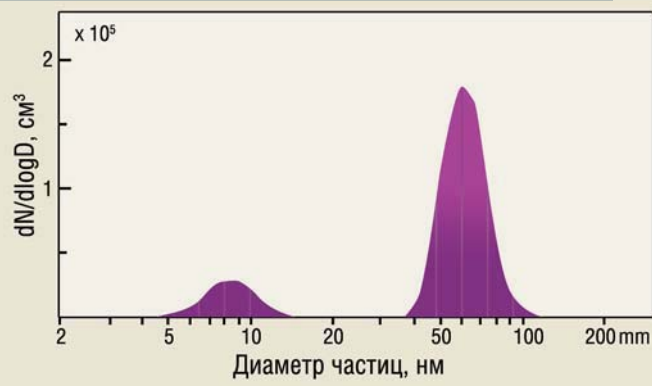
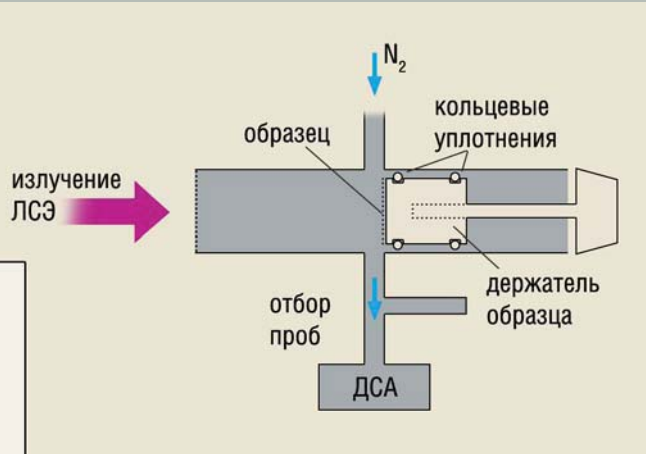
Коллектив единомышленников — к. ф.-м. н. В. М. Попик (ИЯФ), С. Б. Малышкин (ИХКиГ), к. б. н. С. Е. Пельтек и Т. Н. Горячкова (ИЦиГ), д. х. н. А. К. Петров и к. х. н. А. С. Козлов (ИХКиГ)

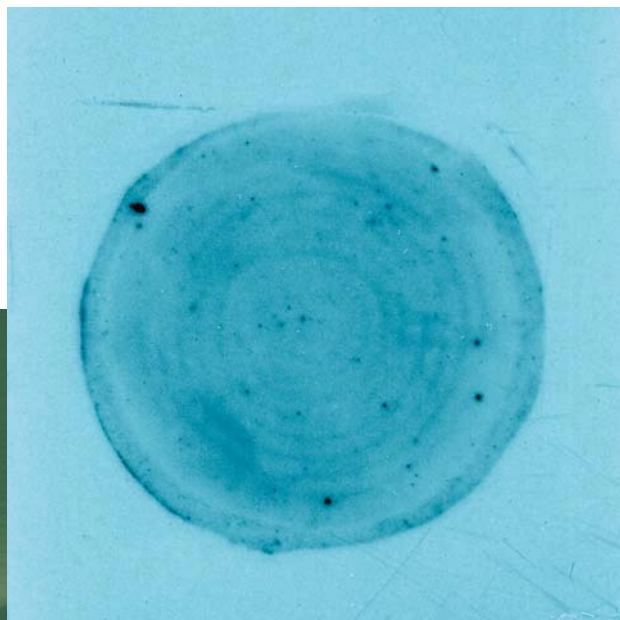
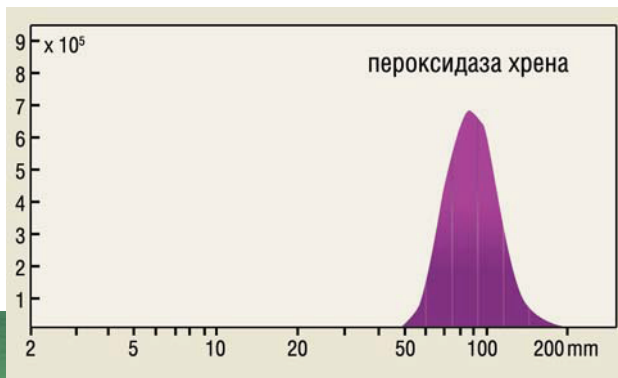
изотопы кремния — важнейшего элемента для высоких технологий — на своем ЛСЭ. К этому времени стало известно, что монокристалл из кремния-28, очищенного от других изотопов (29 и 30), обладает значительно более высокой теплопроводностью. За две недели подготовки и одни(!) сутки работы нам удалось увеличить содержание кремния-28 в молекуле фенилтрифторметана с 92 (природное содержание) до 98%.

Эксперименты были остановлены из-за поломки лазера, мощность которого была недостаточной для такой работы, но это стало убедительной демонстрацией возможностей нового метода. А с учетом возможностей нашего будущего лазера у последнего есть шансы перерасти в настоящую технологию.

Первым биологическим объектом нашего исследования стала ДНК фага. Образец нанесли на пористую подложку из оксида кремния, высушили и поместили под лазерное излучение. В результате «возгонки» получили частицы размером около 70 нм.

В следующем эксперименте в смесь добавили ДНК плазмиды, на порядок меньшую по массе. В этом случае ДСА — диффузионный спектрометр аэрозолей, созданный в ИХКиГ, — зафиксировал уже две фракции частиц, по размерам соответствующих 7 и 70 нм. Отсутствие частиц других размеров свидетельствует о том, что излучение не разрушило исходные биологические макромолекулы





Пока мы «резвились» на чужих установках, наши друзья-физики продолжали напряженно работать над монтажом сибирского лазера. И вот пятничным вечером 4 апреля 2003 г. была получена первая генерация излучения с перестройкой длины волны в диапазоне от 100 до 200 мкм.

Это был праздник, которого ждали 10 лет! Это значило, что расчеты, конструирование и монтаж верны, мы на правильном пути. Участники запуска, наши коллеги из ИЯФа д.ф.-м.н. Н. А. Винокуров, к.ф.-м.н. А. Д. Орешков, М. А. Щеглов, В. В. Кубарев, Д. А. Кайран, О. А. Шевченко; А. Н. Матвеевко, Л. Э. Медведев обзвонили всех кого могли. Приехали академики А. Н. Скринский и Г. Н. Кулипанов, мы с к.ф.-м.н. В. М. Попиком поспешили на импровизированное торжество прямо из сауны. Все собрались в пухляковой и пили за успех шампанское прямо из чайных чашек...

Вскоре в ускорительном зале были проведены первые эксперименты, за которыми наблюдали с помощью кинокамеры. Следующим этапом был вывод излучения из зала, поскольку находиться там во время работы ускорителя нельзя. На это ушел еще год. Уже на первой станции все потенциальные пользователи по очереди начали проверять свои идеи, ставить эксперименты. Еще через год у нас заработало пять экспериментальных станций, на которых сегодня реализуют свои проекты сотрудники самых разных институтов Сибирского отделения — физики, химики, биологи.

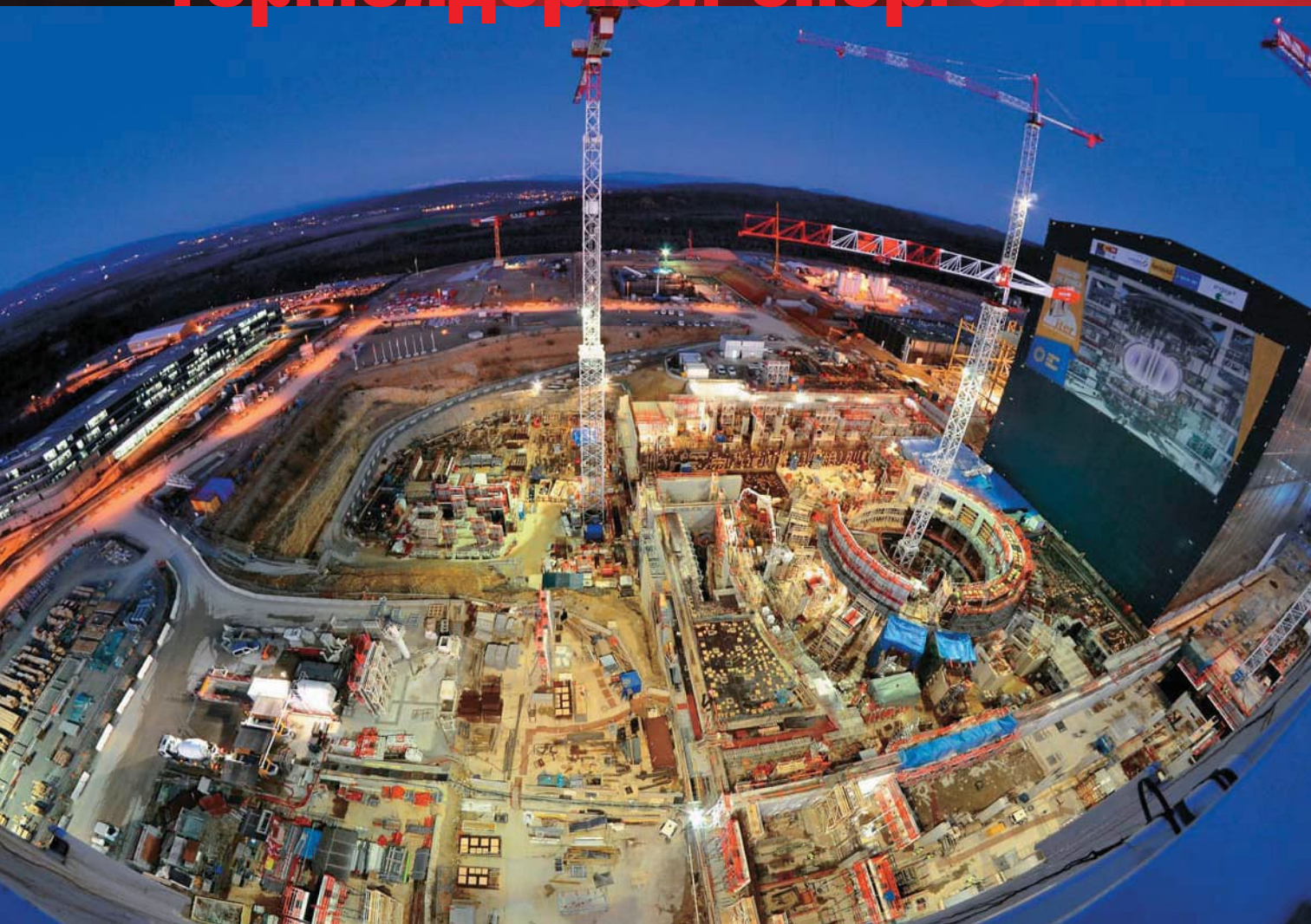
У ученых в руках появился новый исследовательский инструментарий с уникальными и не до конца познанными возможностями. Но, помимо научно-познавательного, у нашего лазера имеется огромный «технологический» потенциал в самых разных прикладных областях, включая биотехнологию, медицину, нанотехнологию, производство сверхчистых веществ... Один пример: «мягкая» абляция под действием субмиллиметрового излучения лазера не разрушает природную структуру перешедших в аэрозольную фазу биологических мак-

Основные наши усилия мы сосредоточили на совершенствовании технологии лазерной абляции белков для расширения возможностей протеомного (белкового) анализа. При воздействии излучения на ферменты лизоцим и пероксидазу мы получили аэрозольные частицы, размер которых хорошо соответствовал их молекулярной массе. Для проверки ферментативной способности пероксидазы аэрозольные молекулы фермента были собраны на фильтр, и наши партнеры из ИЦиГа провели гистохимическое окрашивание (по методу фирмы BioRad) полученного образца. Результат — фермент прореагировал с красителем, который дает качественную реакцию только на «рабочую» молекулу фермента! Результаты экспериментов ясно свидетельствуют о том, что при воздействии субмиллиметрового излучения лазера не происходит разрушения сложных белковых молекул, сохраняющих при этом свою ферментативную активность

ромолекул, которые можно «поймать» и закрепить на различных подложках. Вот вам прямой путь к созданию микрочипов, миниатюрных диагностических планшетов для медицинских целей.

Реальная отдача от нашего ЛСЭ видна уже сегодня, и мы ожидаем, что в течение ближайшего времени число пользователей резко возрастет. Люди будут приходить в наш Центр, генерировать идеи, разрабатывать проекты... Ведь все только начинается.

О настоящем и будущем Термоядерной энергетике



Ключевые слова: термоядерная энергетика, ИТЭР, управляемый термоядерный синтез, физика плазмы, токамак, открытая ловушка.

Key words: fusion energy, ITER, nuclear fusion, plasma physics, tokamak, open trap

Строительная площадка ITER в Провансе, на юго-востоке Франции. Октябрь 2017.
Credit © ITER Organization



БУРДАКОВ Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 350 научных публикаций и 5 патентов

Стакан дейтерия, тяжелого изотопа водорода, присутствующего в обычной воде, по энергетическому «потенциалу» эквивалентен эшелону вагонов нефти. Этот поразительный факт при наличии необходимых технологий сулит человечеству в далеком будущем неисчерпаемый источник энергии. Проект Международного экспериментального термоядерного реактора (ITER), основанный на реакции слияния ядер двух тяжелых изотопов водорода, дейтерия и трития, в ядро гелия, призван показать миру возможность промышленного производства термоядерной энергии. И если эксперимент пройдет успешно, то это будущее может оказаться не таким уж и далеким

Первое упоминание о «звездном» термояде относится еще к 1928 г., но систематические работы по управляемому термоядерному синтезу начались лишь в 1950-х гг. сразу в трех странах: Англии, США и Советском Союзе. И, как нетрудно догадаться, поначалу далеко не в мирных целях: первый успех на этом пути прозвучал в СССР летом 1953 г. очень громко – взрывом первой в мире водородной бомбы. Тогда же появилась идея использовать термоядерную энергию в энергетике, но первоначальная эйфория перетекла в долгие годы исканий и напряженной работы.

Следующий шаг к управляемому термоядерному синтезу был сделан советскими физиками А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом, предложившими удерживать плазму с помощью магнитного поля. Нужно было только придумать технологию, с помощью которой вещество можно не только довести до необходимой температуры, но и удержать его. Другими словами, создать ловушку для плазмы.

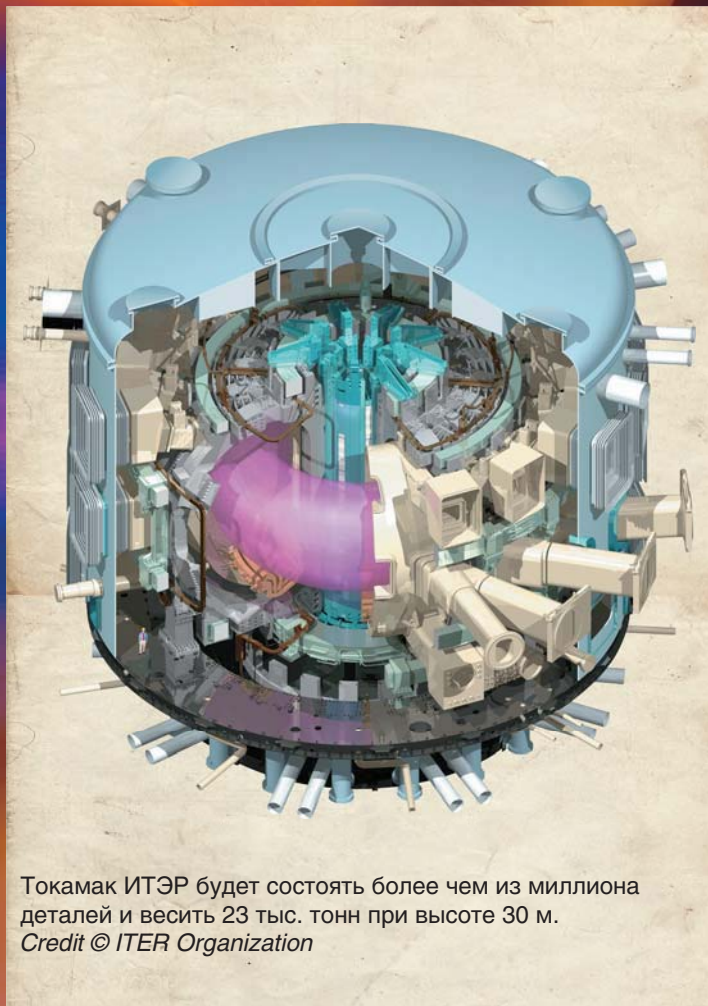
Наши ученые выдвинули идею *замкнутого* магнитного термоядерного реактора. Проблема в том, что магнитное поле сжимает и удерживает плазму в поперечном направлении относительно силовых линий, а вот вдоль них плазма течет свободно, как по рельсам.

Именно термоядерным реакциям обязаны своим существованием звезды, в том числе и ближайший к нам желтый карлик класса G-2 – Солнце.

Внизу – формирование активного солнечного протуберанца. 30 марта 2010 г.

Фото Solar Dynamics Observatory, NASA





Токамак ИТЭР будет состоять более чем из миллиона деталей и весить 23 тыс. тонн при высоте 30 м.
Credit © ITER Organization

Плазма – это полностью или частично ионизованный газ, в котором суммарные отрицательные и положительные заряды равны. В целом она представляет собой электрически нейтральную среду. Эта четвертая форма состояния вещества (после твердого, жидкого и газообразного) существует при температурах 10^4 °С и выше.

Плотная высокотемпературная плазма находится только в звездах, на Земле ее можно получить лишь в лабораторных условиях. Эта необычная для нас «лучистая материя» поражает воображение большим числом степеней свободы и одновременно способностью к самоорганизации и отклику на внешнее воздействие, такое как электрические и магнитные поля.

Плазму можно удерживать в магнитном поле, заставляя принимать различные формы, но она стремится занять наиболее энергетически выгодное для нее положение: подобно живому организму, она будет вырываться на свободу из жесткой «клетки» магнитной ловушки, если конфигурация последней ее не устраивает (Шошин, Аникеев, 2007)

«Запереть» плазму на пути магнитных силовых линий можно разными способами, но самой успешной оказалась отечественная идея *токамака* – тороидальной камеры с магнитными катушками, где силовые линии магнитного поля как бы навиваются на «бублик».

Именно советский токамак Т-3, на котором была получена поразительная для того времени температура плазмы, стал прародителем магнитных ловушек закрытого типа, начавших создаваться во Франции (TFR), США (Alcator A), Японии (JFT) и чуть позже в Китае. Работа над созданием токамаков стала важнейшим шагом на пути к термоядерной энергетике.

Мирный термояд – почти реальность

Одна из главных проблем, которую надо решить при создании термоядерной станции, – повышение ее КПД, т. е. отношение мощностей, полученной и затраченной в ходе термоядерной реакции. Этот параметр

(*фактор Q*), естественно, должен быть больше единицы. Для промышленной же электростанции значение *Q* должно быть не меньше пяти: только в этом случае заряженные альфа-частицы, которые вместе с нейтронами рождаются при термоядерной реакции, но, в отличие от последних, не покидают магнитную ловушку, будут способствовать поддержанию высокой температуры. Таким образом, при *Q*, равном пяти, достаточно один раз «зажечь» плазму, а потом никаких дополнительных манипуляций с реактором проводить уже не нужно. В идеале значение *Q* должно достигать десяти.

Но создание подобной установки не под силу ни одной стране мира в одиночку. Поэтому в 1980-х гг. советские физики-ядерщики выступили с инициативой строительства международного экспериментального термоядерного реактора – с проектом ИТЭР. Тогдашний глава СССР М. А. Горбачев, президенты Р. Рейган (США) и Ф. Миттеран (Франция) поддержали эту идею. Но прошло еще два десятилетия, прежде чем мир сделал очередной шаг к термоядерному будущему: было

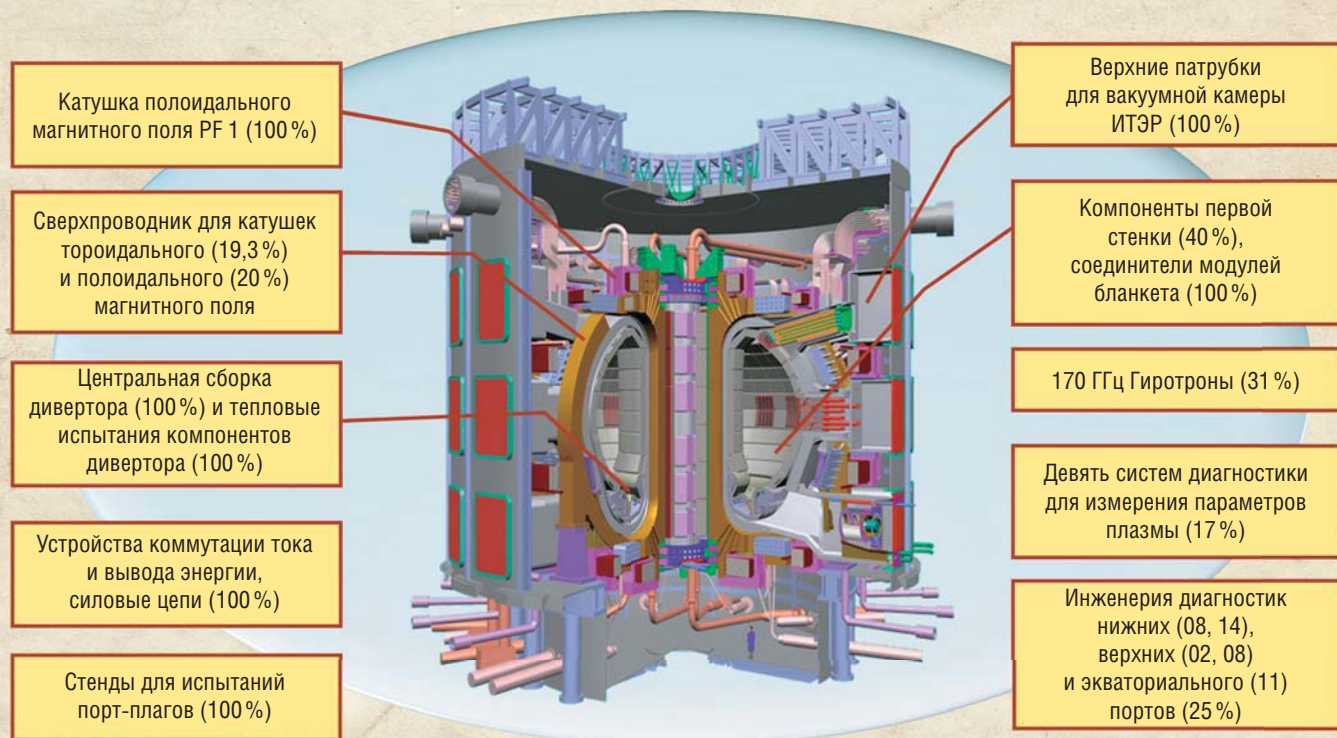


определено место для строительства экспериментального реактора.

Выбор пал на область Прованс на юго-востоке Франции. Это место соответствовало всем требованиям, включая комфортный климат и хорошую транспортную доступность, в том числе по морю. Последнее было важно, так как планировалась транспортировка громоздких деталей, вес которых мог достигать 100 т и более. Наконец, уже в середине первого десятилетия нового века, началось строительство токамака ИТЭР.



Строительная площадка ИТЭР, 2008–2017 гг.
Credit © ITER Organization



**А. В. КРАСИЛЬНИКОВ, Д. Ф.-М. Н.,
ДИРЕКТОР «ПРОЕКТНОГО ЦЕНТРА ИТЭР» (МОСКВА):**

«Еще в 1960-х гг. академик Л. А. Арцимович, внесший огромный вклад в реализацию советской программы по управляемому термоядерному синтезу, говорил, что термоядерная энергия будет освоена тогда, когда она действительно понадобится человечеству. Решение семерки технологически развитых стран (Евросоюза, России, Китая, Индии, Японии, Южной Кореи и США) о создании Международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР) свидетельствует о том, что это время пришло. Состоятельной и обоснованной критики проекта ИТЭР и термоядерной энергетики в целом на сегодня нет. Вся интеллектуальная собственность, создаваемая в рамках этого проекта, в полной мере принадлежит всем партнерам, включая РФ, вклад которой эквивалентен 9,09% стоимости проекта. В сборнике, недавно изданном нашим центром, представлено свыше трех десятков подобных новых технологий, которые уже активно внедряют в своих лабораториях и на производствах российские организации, участвующие в реализации проекта.

Но хотя проект ИТЭР сегодня является технологической платформой термоядерной энергетики, для создания самого термоядерного реактора необходимо развить еще ряд технологий, выходящих за рамки проекта. Например,

Зоны ответственности России в проекте международного экспериментального термоядерного реактора. ИЯФ СО РАН участвует в инженерии диагностик портов

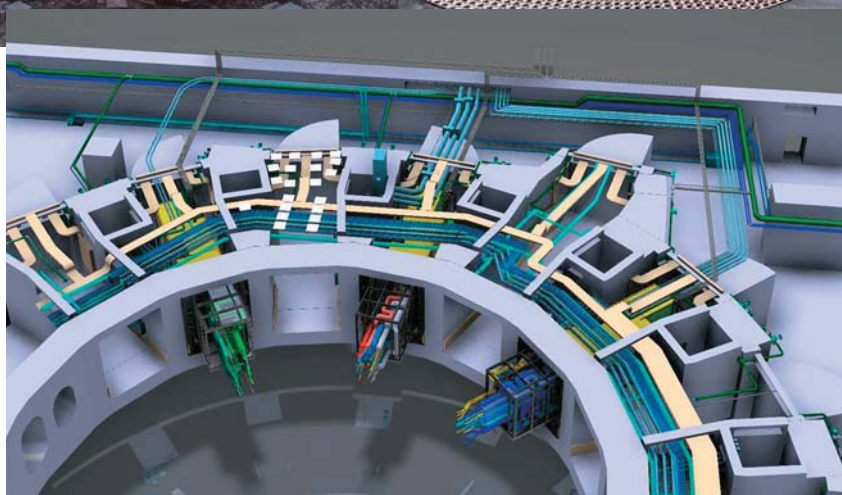
нужно решить проблемы с генерацией стационарного неиндуктивного тока, созданием электромагнитной системы из высокотемпературного сверхпроводника и т. п. Эксперименты, которые в дальнейшем будут проводиться на ИТЭР, дополняют этот перечень.

В программах термоядерных исследований всех технологически развитых стран в качестве горючего сегодня рассматривается дейтерий-тритиевая смесь. Изучение других вариантов термоядерного горючего (дейтерий-дейтерий, дейтерий-гелий-3, протон-бор-11) носит пока академический характер, так как по ряду существенных физико-технических факторов эти реагенты существенно уступают Д-Т-топливу.

Планируется, что полномасштабная реализация процессов горения термоядерной плазмы в ИТЭР будет достигнута во второй половине 2030-х гг. Должна быть получена термоядерная мощность в 500 МВт, что в десятикратном размере превысит мощность, «истраченную» на поддержание плазмы. Но потребуется еще около 15 лет, чтобы построить термоядерный реактор (ДЕМО), где будет генерироваться электрическая и тепловая энергия»



44 порта вакуумной камеры будущего термоядерного реактора обеспечат доступ для удаленных погрузочно-разгрузочных операций и диагностики, а также для систем нагрева и вакуумных систем. Полномасштабный прототип вакуумной камеры (справа) был создан специалистами из Японии, России и США.
 Credit © ITER Organization



Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН выполняет несколько работ по проекту ИТЭР. Одна из них – разработка и производство 4-х *порт-плавов*, устройств из стали с максимальным весом 46 т, которые выполняют роль первой стенки, примыкающей к плазме, нагретой до 100 млн °С. Порт-плав одновременно служит и «окном» в горячую область, так как является носителем многочисленных диагностических устройств, и «пробкой» на пути потока нейтронов, генерируемых в плазме.

В защитных модулях порт-плавов разместят диагностические системы, поставляющие информацию о состоянии вещества на центральный пульт. Подобные системы делают в России, Европе, Корее, Индии, США, Китае. На этом этапе ИЯФ исполняет еще одну роль – интеграционную. В 2019 г. в институте появится

особая площадка, где будут собраны эти диагностические устройства и начнется их монтаж в порт-плав. По окончании этой сложной инженерной работы узлы будут отправлены во Францию, на площадку ИТЭР.

Интеграционная площадка для сборки порт-плавов уже готовится. Это будет «чистое» помещение, где содержание пыли, микроорганизмов, аэрозольных частиц и химических паров будет постоянно контролироваться и поддерживаться на определенном уровне.

Один из порт-плавов, которые создаются в ИЯФ, – *экваториальный*, непосредственно контактирующий с плазмой, – должен быть готов к запуску токамака, запланированному на 2025 г. Поэтому все работы должны быть закончены уже к 2023 г. И сейчас у института горячее время, а через год станет еще горячее.



Каждая деталь – шаг в неизведанное

Создание каждой детали для ИТЭР не простое производство, но сложная исследовательская работа. К примеру, итоговый вариант экваториального порт-плага, за производство которого взялся ИЯФ, разительно отличался от первоначального.

Уже в процессе работы стало очевидно, что придется искать новые материалы и технологии. Так, для работы над проектом в институте освоили технологию глубокого сверления. В классическом варианте вращается деталь, а сверло неподвижно. А для того, чтобы убрать стружку, которая забивает полость сверления, в сквозное отверстие самого сверла пускают охлаждающую жидкость под большим давлением. Но если деталь большая и неподвижная, как в нашем случае, то вращаться должно сверло, и направить жидкость в полость сверления гораздо сложнее. Подобной технологии в ИЯФ не было, поэтому институт купил и модернизировал под свои нужды соответствующее оборудование. Теперь мы можем сверлить на два метра с двух сторон с хорошей точностью.

В работе по проекту ИТЭР новые технологии требуются буквально на каждом этапе. Одна технология рождает другую – это непрерывный и многоцелевой процесс. Как следствие, в институте появляется комплексное высокотехнологичное оборудование, которое ИЯФ будет использовать и для своих собственных проектов.

То же самое относится и к новым материалам. Например, когда в институте началась работа над нейтронной защитой первой стенки, было решено использовать *карбид бора* – материал, хорошо выдерживающий экстремальные температурные нагрузки, но дорогой. Сейчас мы совместно с Новосибирским электровакуумным заводом начинаем исследовательскую работу по разработке более дешевой технологии производства этого нужного материала.

Есть и физические задачи, которые также требуют решения. Основная из них – проблема взаимодействия плазмы с поверхностью. Когда токамак работает в *режиме хорошего удержания*, плазма сходит с поверхности «бублика» в специальное устройство (*дивертор*) порциями, а не сплошным потоком. И каждая такая порция несет разрушительную энергию: тепловая нагрузка на него оказывается больше, чем на внутренние стенки жидкостных ракетных двигателей. Поэтому, если не предпринимать никаких мер, материал конструкции быстро истончится.





Научный сотрудник ИЯФ СО РАН Д. Е. Гавриленко:

«Порт-плаги, которые примыкают непосредственно к плазме, не только несут диагностические комплексы, позволяющие судить о ходе термоядерной реакции, но и защищают от потока нейтронов. Поэтому сделаны они из стали, разработанной специально для проекта ITER, – марки 316L(N)-IG. Одна из особенностей этого материала – тщательно контролируемый химический состав, обеспечивающий нужный уровень примесей и легирующих элементов.

В ИЯФ создается и самый сложный порт – экваториальный. Пока сделан полномасштабный опытный образец элемента диагностического защитного модуля, другими словами, верхняя крышка.

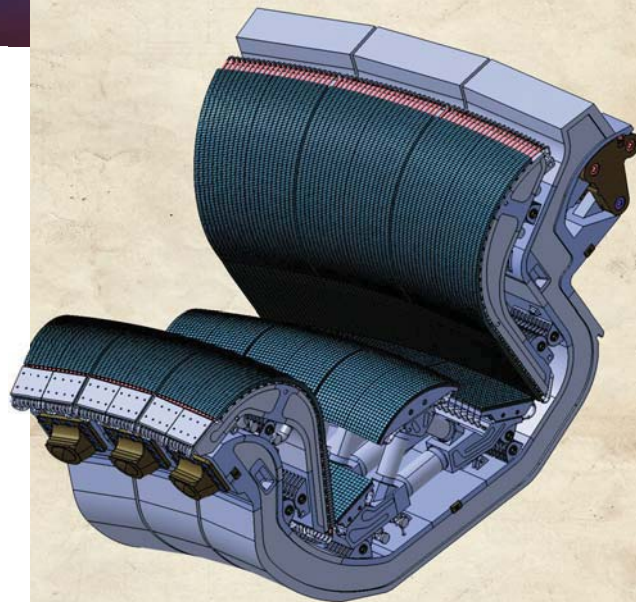
Работа ведется, можно сказать, по методу последовательного приближения: сначала создается макет, а затем по результатам испытаний происходит корректировка проекта вплоть до стадии прототипирования и постановки на производство. Такой регламент очень важен, так как любой инженерный просчет ставит под угрозу весь проект»



ИТЭР – это токамак, т. е. магнитная ловушка закрытого типа, однако ИЯФ является признанным мировым лидером в создании альтернативного варианта – открытых магнитных ловушек. Сейчас в институте работают две подобные установки: ГДЛ (газодинамическая ловушка) и ГОЛ-3 (гофрированная ловушка), а недавно была запущена новая экспериментальная установка СМОЛА. На этих установках наши специалисты занимаются не только собственными исследованиями физики плазмы, но и решают нетривиальные физические задачи для проекта ИТЭР.

Как работает такой научный обмен? Возьмем физику неустойчивостей, в которой мы работаем. Явления подобной природы проявляются одинаково как в закрытых, так и в открытых системах, где есть магнитное удержание плазмы. Например, на токамаках ученые научились бороться с желобковой неустойчивостью, и эти знания мы можем использовать в открытых ловушках.

Но есть вопросы, связанные, к примеру, со взаимодействием плазмы и материала, которые нельзя решить на существующих сегодня токамаках. В частности, на них нельзя достичь параметров плазменных потоков, которые будут контактировать со стенками термоядерного реактора. А вот на открытых ловушках в силу их геометрической конфигурации такие потоки получить можно. Поэтому подобные эксперименты проводятся в ИЯФ, а полученная информация используется в проекте ИТЭР



От самых первых токамаков ИТЭР отличается наличием дивертора – устройства для приема мощного потока плазмы из реактора.

Credit © ITER Organization

Винтовая секция СМОЛЫ, новой экспериментальной открытой магнитной ловушки для плазмы



Директор ИЯФ СО РАН
академик РАН П. В. Логачев
и руководитель ФАНО России
М. М. Котюков
на экспериментальном
производстве института



Еще время от времени и по неизвестным причинам происходит так называемый *срыв плазмы*, когда она переходит в неустойчивое состояние и полностью изливается в дивертор. Задача распадается на несколько составляющих: какие предельные нагрузки выдерживает дивертор, как уменьшить поток плазмы и есть ли способ ее перелизлучить, как ликвидировать или управлять таким срывом?

Можно смело утверждать, что термоядерная энергетика начнет реально удовлетворять энергетические потребности человечества уже в последней трети текущего века – именно тогда, когда ожидается энергетический дефицит, если учитывать прогнозы по выравниванию энергопотребления среди стран. Время термоядерной энергетике действительно пришло: промышленный термоядерный реактор очень скоро будет необходим всем развитым странам мира.

Что касается ИТЭР, то этот мировой научно-исследовательский проект явился настоящим шагом в неизведанное. К тому же помимо достижения основной цели – освоения «звездной энергии» и перехода на новую термоядерную энергетiku – все страны-участницы в процессе реализации проекта получают «бонусом» самые последние научные открытия и новейшие технологии, которые можно использовать здесь и сейчас.

ДИРЕКТОР ИЯФ СО РАН, АКАДЕМИК П. В. ЛОГАЧЕВ:

«Новое высокотехнологичное оборудование, которое мы приобрели и оптимизировали для работы над этим проектом, будет использоваться по максимуму: не только для ИТЭР, но и для другого проекта – безнейтронного термоядерного реактора в Калифорнии, в работе над которым ИЯФ также принимает участие. Важно и то, что оборудование и технологии, которые мы используем в работе для ИТЭР, помогут нам создавать установки для самостоятельных фундаментальных исследований, которые проводятся в институте. Таким образом, работая над проектом ИТЭР, ИЯФ СО РАН поддерживает и развивает свои научные школы и компетенции. Благодаря первоклассной команде инженеров, технологов и ученых, которая десятилетиями формировалась в нашем институте, и творческому подходу к решению задач мы получаем отличные результаты»

Литература

Кругляков Э. П. Звездные реакторы // НАУКА из первых рук. 2005. Т. 5. № 2. С. 54–61.

Шошин А. А., Аникеев А. В. Ловушка для термояда // НАУКА из первых рук. 2007. Т. 17. № 5. С. 6–19.

Burdakov A. V., Avrorov A. P., Arzhannikov A. V. et al. Recent experiments in GOL-3 Multiple Mirror Trap // The 10th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, August 26–29, 2014, Daejeon, Korea, Abstract Book of OS2014, p.23 (invited talk OS1-04), <http://www.os2014.org/sub0202>

Burdakov A. V., Ivanov A. A., Kruglyakov E. P. et al. Axially symmetric magnetic mirrors: history of development and future prospects. // Abstracts of 9th Intern. Conf. on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Tsukuba, Japan, 27-31 August 2012, <http://www.prc.tsukuba.ac.jp/OS2012/abstract-download/>.

Kruglyakov E. P., Burdakov A. V., Ivanov A. A. Fusion Prospects of Axisymmetric Magnetic Mirror Systems // Proceedings of 24th IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, USA, 8–13 October 2012, OV/P-07.



В ИЯФ СО РАН ГОТОВЯТ «КОНФЕТКУ» СМОЛА



2018

«НАУКА из первых рук», № 5/6(76)





СУДНИКОВ Антон Вячеславович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 24 научных работ

Ключевые слова: управляемый термоядерный синтез, токамак, открытые магнитные ловушки, ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН, винтовая ловушка.

Key words: controlled fusion, tokamak, magnetic mirrors, Budker INP, helical mirror

«Токамак» – это аббревиатура от словосочетания «тороидальная камера магнитная», которую предложил ученик академика И. В. Курчатова, И. Н. Головин. Создатель первой тороидальной системы Н. А. Явлинский предложил для благозвучия заменить букву «г» на «к». В таком виде это слово вошло во все языки мира

© А. В. Судников, 2017

Новосибирские физики вместе со своими российскими и зарубежными коллегами работают над созданием первого в мире термоядерного реактора ИТЭР, запуск которого станет важнейшим шагом к термоядерной энергетике будущего. ИТЭР – токамак, замкнутая магнитная установка для удержания плазмы. Сегодня в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН разрабатывается и новый формат альтернативного варианта магнитных ловушек – открытого типа. Согласно прогнозам ученых, концепция использования магнитного поля со спиральной симметрией, которая легла в основу создания винтовой ловушки СМОЛА, позволит открытым ловушкам сравняться с топовыми токамаками по показателям удержания плазмы

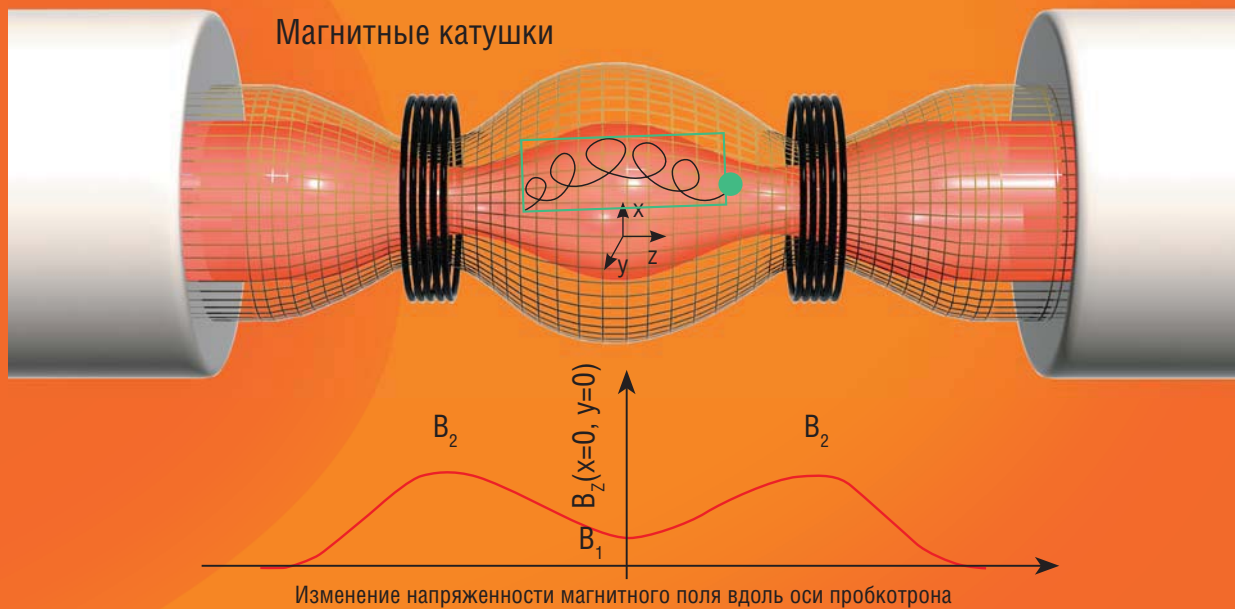
Ученые серьезно задумались о возможности управляемого термоядерного синтеза после испытания первой водородной бомбы, и первой задачей в этом направлении стало «приручение» высокотемпературной плазмы. Другими словами, нужно было добиться определенных параметров температуры, плотности и времени удержания этого «звездного» вещества.

Как удержать плазму

Если на Солнце плазму удерживает гравитационное поле, то на Земле решили работать с магнитным. Уже в 1950 г. советские физики А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм выдвинули идею создания термоядерного реактора на основе принципа магнитного удержания и предложили концепцию замкнутой магнитной ловушки. Так появился *токамак* – тороидальная камера с магнитными катушками, или, по-простому, «бублик» с током. Работы по созданию токамаков возглавил Л. А. Арцимович, руководитель советской программы по управляемому термоядерному синтезу с 1951 г.

Конфигураций «закрытых» ловушек было разработано несколько, но именно на токамаке Т-3 в московском Курчатовском институте были получены первые, ошеломительные для того времени результаты: плазма с температурой свыше 10 млн °С! Об этих результатах впервые сообщили на Международной конференции МАГАТЭ по физике плазмы и управляемым термоядерным реакциям, которая прошла в новосибирском Академгородке в 1968 г., а токамаки с тех пор стали основой мировой термоядерной программы.

Впрочем, однозначно сказать, что «победили» именно токамаки, нельзя, пока нет ни одной промышленной термоядерной станции. Сегодня активно исследуются и запускаются другие, более сложно устроенные замкнутые ловушки – *стеллаторы*, предложенные еще в 1951 г. американцем Л. Спитцером, а также альтернативные установки – *ловушки открытого типа*. В простых по геометрии открытых магнитных ловушках плазма удерживается в определенном объеме «продольного» магнитного поля,



причем для предотвращения ее вытекания по силовым линиям используются разные виды магнитных «пробок» и специальных расширителей.

Концепция открытой магнитной ловушки была предложена в 1953 г. независимо друг от друга двумя учеными: Г. И. Будкером (СССР) и Р. Постом (США). Через шесть лет справедливость этой идеи была подтверждена в эксперименте С. Н. Родионова, сотрудника только что созданного новосибирского Института ядерной физики СО АН СССР. С тех пор ИЯФ является лидером в проектировании, строительстве и экспериментах с ловушками открытого типа.

Конечно, современные установки новосибирских ученых экспериментальные, а поэтому небольшие, импульсные. Но теоретически такой тип магнитных ловушек перспективен для использования в промышленном термоядерном реакторе, поскольку они имеют ряд потенциальных преимуществ по сравнению с замкнутыми: у них более простое инженерное решение, большая эффективность использования энергии магнитного поля, т. е. более высокая экономичность. К тому же работа этих устройств в стационарном режиме в отличие от токамаков не вызывает проблем.

Сегодня группа физиков из плазменных лабораторий ИЯФ работает над свежей идеей: использовать для подавления продольных потерь плазмы из открытой ловушки магнитное поле с винтовой симметрией, позволяющее управлять вращением плазмы. Для проверки этой концепции была разработана и построена экспериментальная установка СМОЛА (*Спиральная Магнитная Открытая Ловушка*).

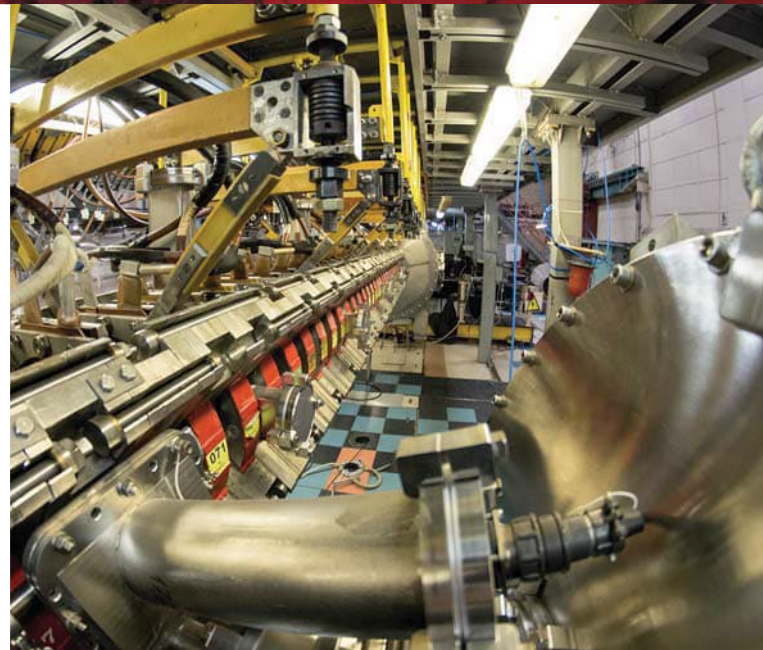
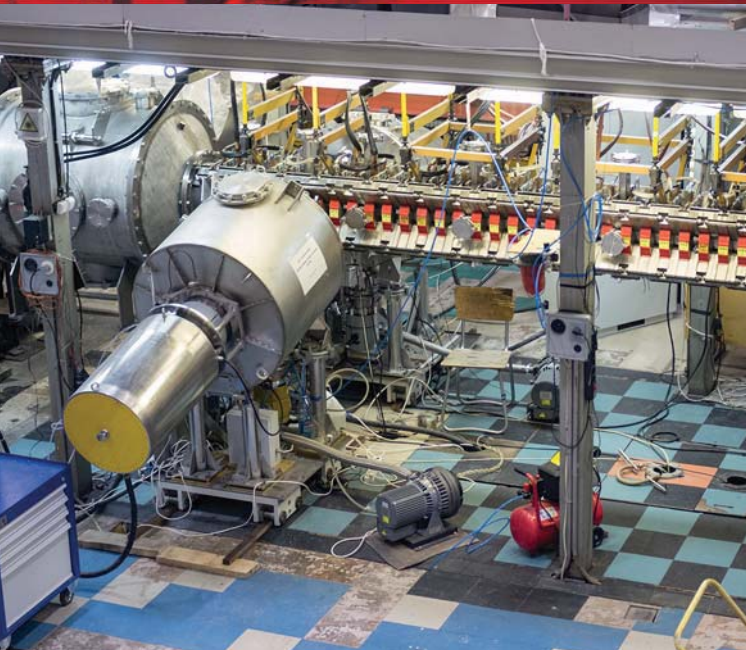
В пробкотроне Будкера-Поста для удержания плазмы используется особая конфигурация магнитного поля. На схеме пробкотрона (*вверху*) показана часть траектории захваченной частицы. *По: (Шошин, 2007)*

«Мясорубка» для плазмы

Что же представляет собой новая открытая ловушка, и чем она отличается от «прародителей»?

Принципиальная особенность всех открытых ловушек в том, что силовые линии магнитного поля в них не замкнуты, и плазма удерживается посередине. А на концах установок, вдоль силовых линий, плазма может вытекать, и наша задача – уменьшить этот поток. Для уменьшения потерь на концах таких ловушек ставят *магнитные пробки*, т. е. резко усиливают силу магнитного поля. В *газодинамической ловушке* (ГДЛ) таким способом удается очень сильно сузить «горлышки» бутылки, из которой истекает плазма, но полностью избежать потерь нельзя.

В *гофрированной ловушке* (ГОЛ) с каждой стороны стоит не одна магнитная пробка, как в ГДЛ, а несколько в зависимости от конфигурации. Например, в установке ГОЛ-3 их было 52, а в ГОЛ-NB – по 14 на каждом конце. В результате такой конструкции плазма не просто течет через гладкую трубу, а как бы трется о «гофрировку» магнитного поля. Из-за силы трения скорость потока становится ниже звуковой, а значит, и потерь будет меньше. Так как расстояние между пробками жестко задано, сделать их бесконечно близкими нельзя,



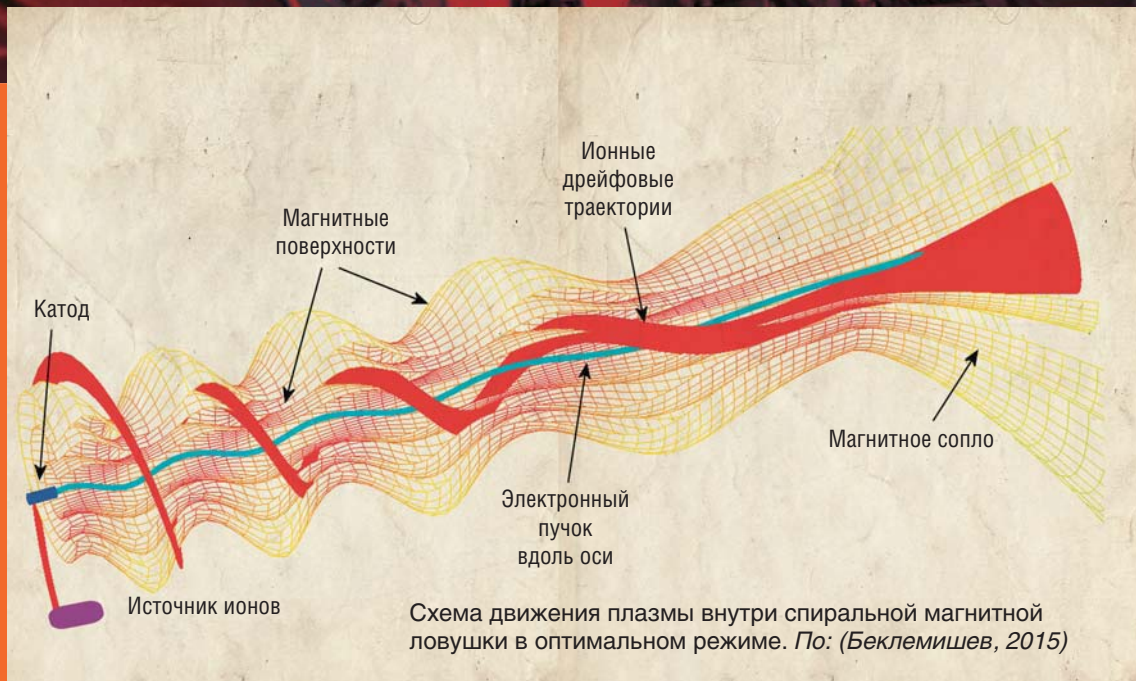
Установка ГОЛ-NB в ИЯФ СО РАН, созданная на основе гофрированной магнитной ловушки ГОЛ-3. На этой и других открытых ловушках в институте проводятся эксперименты по изучению физики плазмы

но можно увеличить длину этих многопробочных секций.

Чтобы уменьшить скорость истечения плазмы, многопробочные секции теоретически следовало бы в прямом смысле слова перемещать к центру установки. В этом случае сама плазма будет «стоять», а вдоль нее – «пролетать» магнитные пробки, создавая силу трения и увлекая вещество за собой. Идея двигать пробки возникла одновременно с самой идеей многопробочной ловушки, но в то время задачу посчитали невыполнимой и нерентабельной: чтобы создать подобное «бегущее» поле, нужна невероятная мощность.

Мысль «обмануть» вещество, создать такую конфигурацию стационарного магнитного поля, чтобы плазме «казалось», что оно движется к центру, возникла в конце 2012 г.





Как известно, плазма в открытой ловушке всегда вращается, и есть задачи, когда ее нужно целенаправленно вращать. Вопрос был простой: можно ли это вращение использовать для чего-то еще?

Идея состояла в том, чтобы создать магнитное поле в виде винта. Представьте себе шнек мясорубки, который крутит измельченное мясо в нужном направлении. У нас аналогично с двух сторон от центрального отсека с плазмой создается винтовая нарезка поля, но при этом разная – с правым и левым винтом. С одной стороны магнитное поле тащит плазму влево, с другой – вправо. Таким образом, обе эти концевые секции закачивают

плазму обратно. Конечно, полностью избавиться от потерь при этом нельзя: когда поток плазмы слабеет, частицы друг с другом даже не сталкиваются. Но если удалось сделать поток таким редким, значит, мы на порядок-два выиграли по параметрам удержания плазмы.

Новая концепция позволяет создать установку, которая по своим характеристикам может быть сравнима с лучшими нынешними токамаками. Сложность только в том, что пока эта идея теоретическая. В ноябре 2017 г. мы физически запустили установку СМОЛА и перешли к новому этапу – экспериментальному.

Для нашего уникального эксперимента нужно не так уж и много: одна винтовая магнитная пробка, узел, где



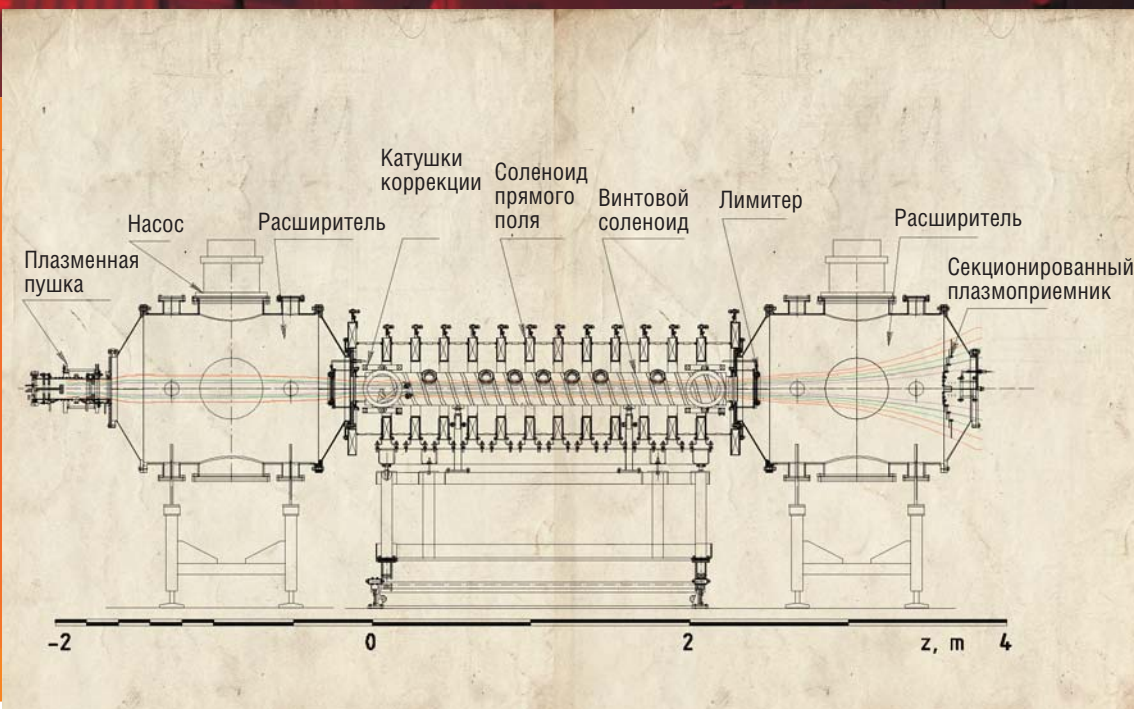
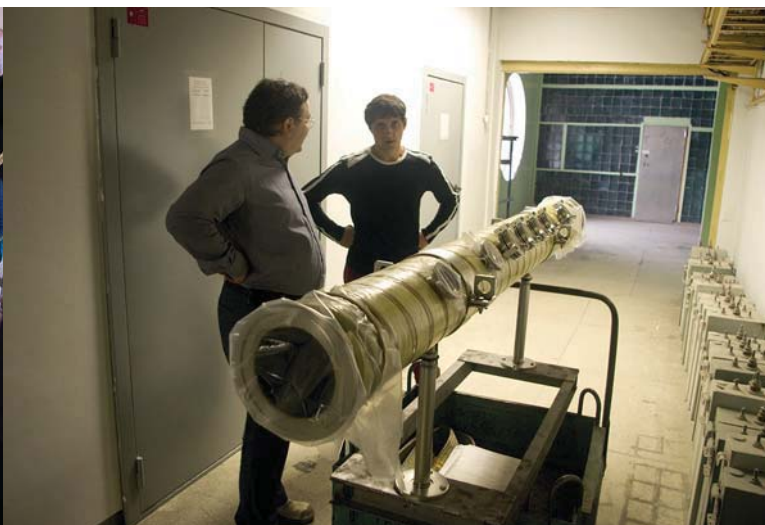
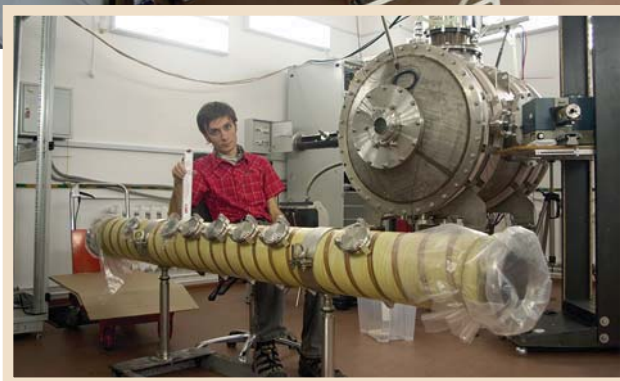


Схема экспериментальной открытой винтовой магнитной ловушки СМОЛА, созданной в ИЯФ СО РАН

создается плазма, и ее приемник, а также расширитель, вытягивающий вещество в магнитное поле. Сейчас, запустив установку, мы начали «ощупывать» плазму и смотреть, как изменяются ее характеристики на разных режимах работы. Чтобы подтвердить теоретические расчеты, нам нужно показать стабильное улучшение характеристик плазмы в устройстве с винтовой магнитной пробкой по сравнению с обычным.





Установка СМОЛА на этапе сборки. Слева и справа от винтовой секции – баки источника и приемника плазмы

Через одно-два поколения открытых ловушек можно будет говорить о создании полноценных термоядерных реакторов, причем работающих на бестритиевых топливах (например, с использованием реакции синтеза дейтерий-дейтерий или протон-бор). Токамаки же работают с реакцией дейтерий-тритий, из-за чего возникает серьезная проблема радиационной защиты. Недаром так много внимания в проекте ИТЭР уделяется созданию сверхпрочных материалов и мощной биозащиты. В реакторе, работающем на реакции синтеза двух ядер дейтерия, на конструкциях не оседает радиоактивный тритий, что делает его системы безопасности намного более простыми.

Преимущество термоядерной реакции синтеза дейтерий-тритий лишь в том, что человечество уже получает с ее помощью термоядерную плазму. Чтобы стала возможна другая, энергетически менее доступная реакция, требуются намного большие температуры, плотность и время удержания плазмы, но таких технологий еще не создано.

Впрочем, говорить о безнейтронных реакторах как о далеком будущем тоже не стоит. На открытой ловушке с улучшенным удержанием плазмы теоретически можно достичь параметров, необходимых для реакции дейтерий-дейтерий, тогда как экспериментально доказано, что в случае токамаков для этого есть серьезные ограничения.

Естественно, нашу «винтовую» модель еще нужно проверять и оптимизировать, для чего потребуются большая научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа. Но уже сейчас ясно, что это начало интересной научной истории, и в конце нас ожидают результаты, которые могут оказаться очень важными для термоядерной энергетики будущего.

Может показаться, что шаг, который мы сделали на пути улучшения конфигурации открытых ловушек, – это шаг в сторону, потому что весь мир сегодня работает с ловушками замкнутой конфигурации. Но мы надеемся экспериментально показать преимущества открытых форм. И если удастся доказать, что несмотря на технические сложности винтовая форма открытой магнитной ловушки дает существенный выигрыш в удержании плазмы, то в устройства следующего поколения, которые планируется создавать в ИЯФ, будут встраиваться винтовые секции. Уже сейчас мы видим тот путь, который нужно пройти, и практические применения нашей технологии.

Винтовые ловушки могут использоваться как нейтронные источники для исследования поведения материалов при контакте с плазмой, создания *подкритических* (неспособных самостоятельно поддерживать ядерную реакцию) реакторов, но в первую очередь для создания «обычных» атомных электростанций. Некоторые конфигурации винтовых ловушек увеличивают скорость потока плазмы до 100 км/с, что служит необходимым условием для двигателей космических кораблей, транспортирующих спутники с геосинхронной орбиты, к примеру, на орбиту Луны.



Торжественная церемония запуска экспериментальной установки СМОЛА. Слева направо: директор ИЯФ СО РАН, академик П. В. Логачев, мэр г. Новосибирска А. Е. Локоть, зам. врио губернатора Новосибирской области А. К. Соболев, руководитель Сибирского территориального управления ФАНО России А. А. Колович, председатель СО РАН, академик В. Н. Пармон

Литература

Beklemishev A. D. Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps // *Fusion Sci. Technol.* 2013. V. 63. N. 1. P. 355–357.

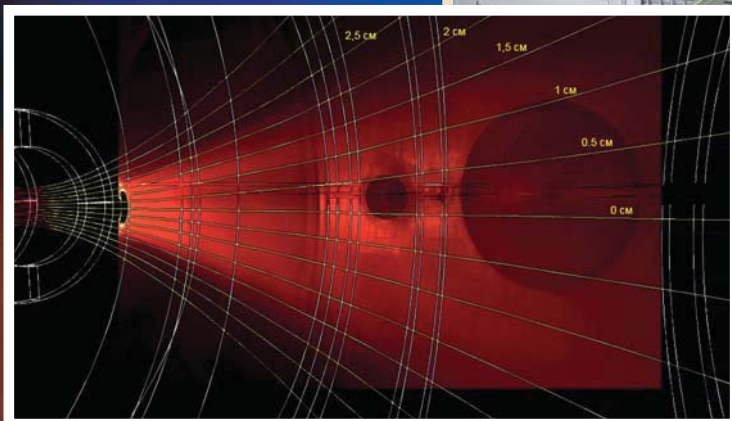
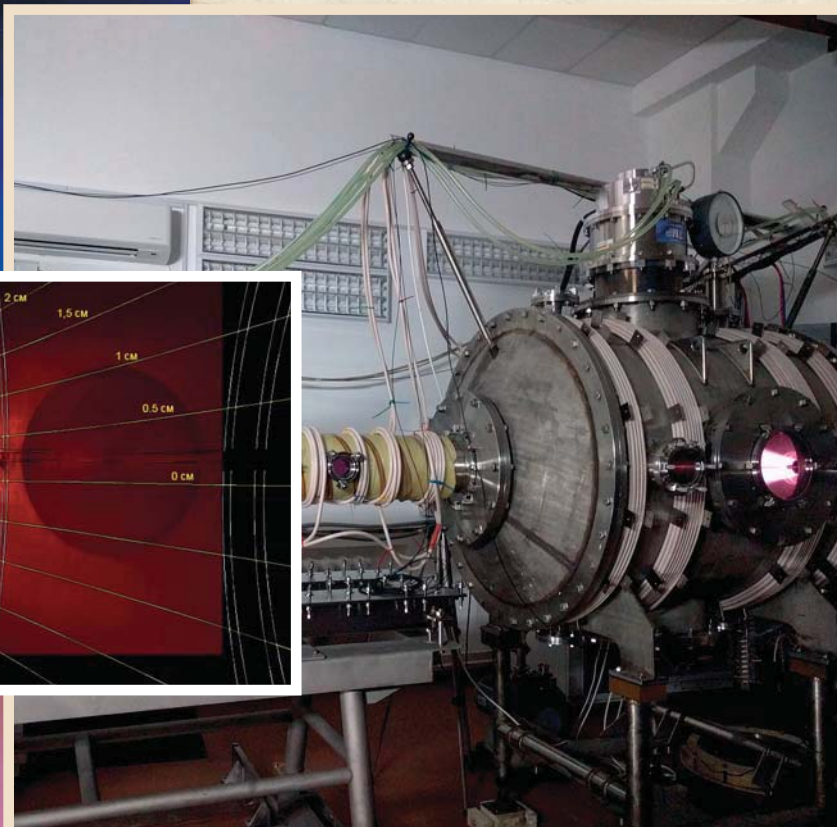
Beklemishev A. D. Radial and Axial Transport in Trap Sections with Helical Corrugation. *AIP Conference Proceedings*. 2016. DOI: 10.1063/1.4964191.

Beklemishev A. D. Helical plasma thruster // *Phys. Plasmas*. 2015. V. 22. N. 10. DOI: 10.1063/1.4932075.

Budker G. I., Mironov V. V., Ryutov D. D. Gas dynamics of the dense plasma in corrugated magnetic field // *International conference on plasma theory. Kiev, 1971. Published by ITP AS USSR, 1972, p. 145.*

Postupaev V. V., Sudnikov A. V., Beklemishev A. D. & Ivanov I. A. Helical Mirrors for Active Plasma Flow Suppression in Linear Magnetic Traps // *Fusion Eng. Design*. 2016. V. 106. P. 29–33.

Sudnikov A. V., Beklemishev A. D., Postupaev V. V. et al. SMOLA device for Helical Mirror Concept Exploration // *Fusion Eng. Design*. 2017. V. 122. P. 86–93.

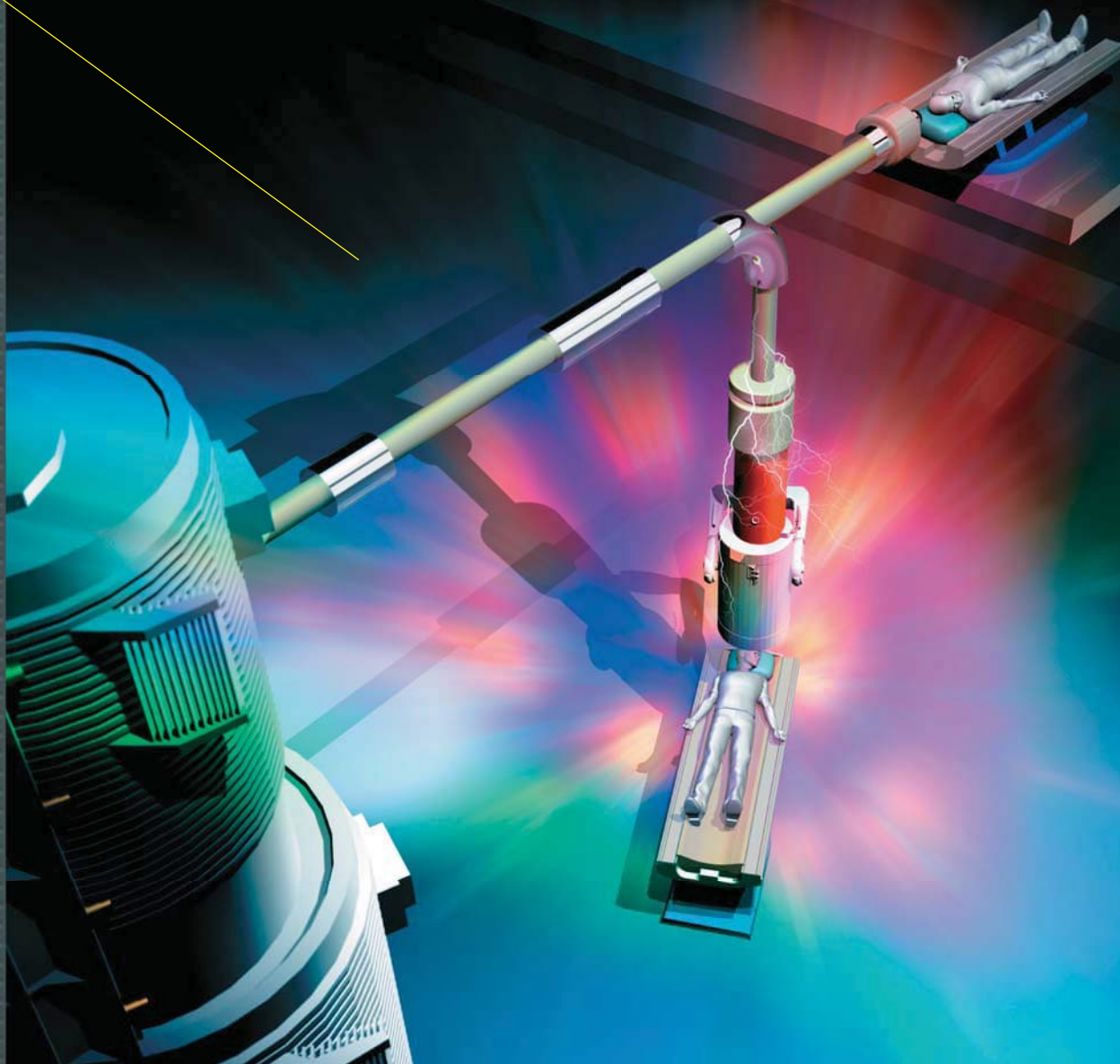


В публикации использованы фотографии из архива автора

Работа поддержана грантом РФФ 14-50-00080 «Развитие исследовательского и технологического потенциала ИЯФ СО РАН в области физики ускорителей, физики элементарных частиц и управляемого термоядерного синтеза для науки и общества»

БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНАЯ

на финишной прямой



2016

«НАУКА из первых рук», № 5/6(71/72)

ТЕРАПИЯ РАКА:

Несмотря на достигнутый за последние годы огромный успех в лечении онкозаболеваний, они до сих пор остаются одной из ведущих причин смертности в развитых странах, где растет продолжительность жизни. Многие злокачественные опухоли мозга, такие как глиобластомы, до сих пор считаются неизлечимыми: только в России от них ежегодно умирает около 4 тыс. человек. Идея облучать опухолевые клетки, насыщенные изотопом бора-10, потоком нейтронов определенного энергетического диапазона родилась много десятилетий назад. Но несмотря на свою кажущуюся простоту, эта методика «клеточного ядерного взрыва» оказалась настолько сложной в реализации, что в мире до сих пор нет ни одного специализированного комплекса для лечения рака с помощью бор-нейтронозахватной терапии. Благодаря работам новосибирского Института ядерной физики СО РАН, где был создан компактный ускорительный источник нейтронов нового типа, у нашей страны есть все шансы стать мировым лидером в этой перспективной области терапии наиболее агрессивных раковых опухолей

Ключевые слова: рак, опухоли мозга, бор-нейтронозахватная терапия, ускоритель-танDEM, источник эпителиевых нейтронов, литиевая мишень.

Key words: cancer, brain tumor, boron neutron capture therapy, vacuum insulation tandem accelerator, epithermal neutron source, lithium target

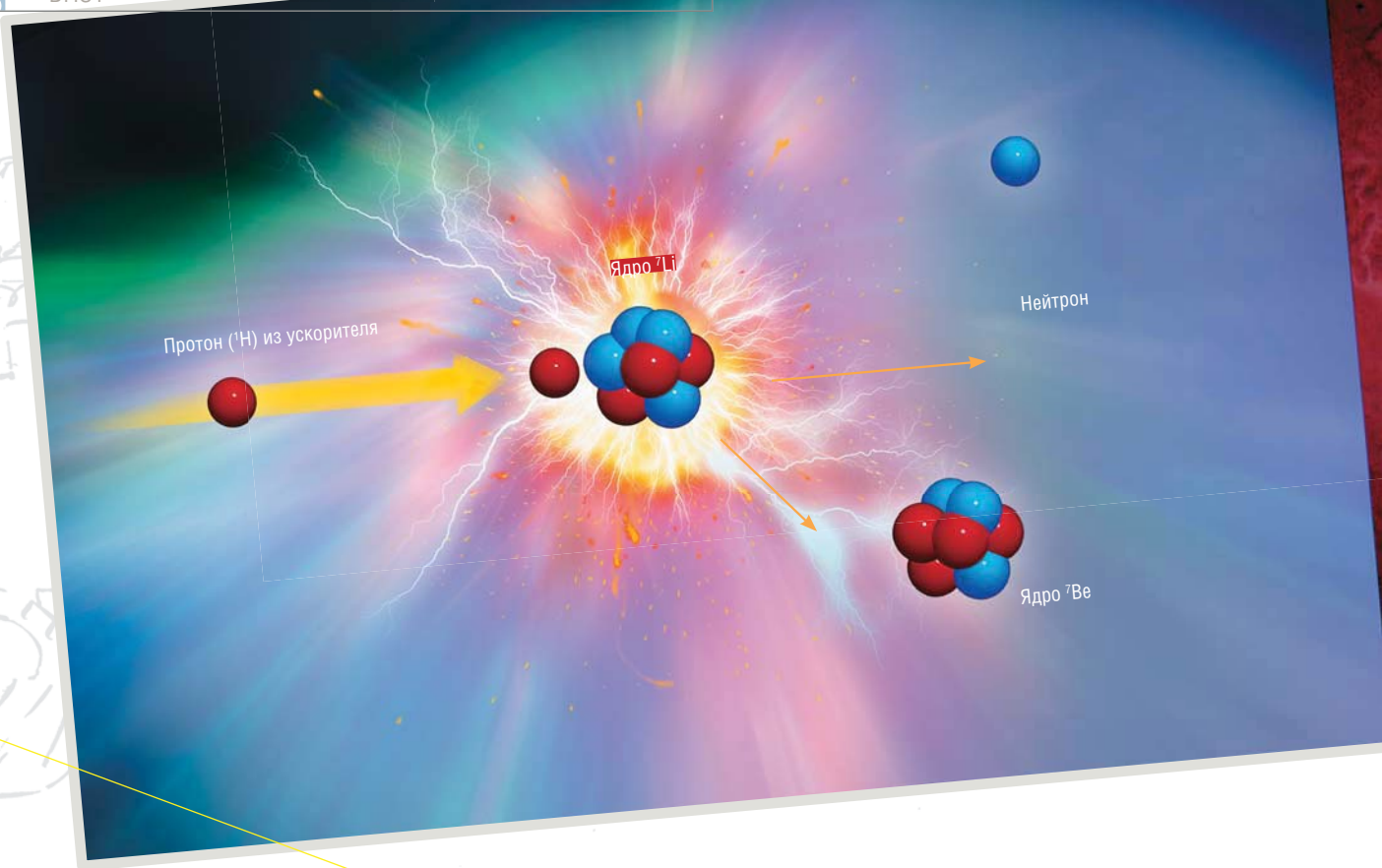
© С. Ю. Таскаев, 2016



ТАСКАЕВ Сергей Юрьевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН им. Г. И. Будкера (Новосибирск), заведующий лабораторией бор-нейтронозахватной терапии Новосибирского государственного университета, автор и соавтор 240 научных работ и 12 патентов

Первый пучок нейтронов на нашей установке для бор-нейтронозахватной терапии рака (БНЗТ, BNCT) был получен в 2008 г. Главное достижение последних лет в том, что мы не только привели установку в рабочее состояние, но и поняли процессы, которые в ней происходят, и внесли соответствующие изменения в конструкцию. Это важно, потому что мы имеем дело с абсолютно новым типом ускорителя заряженных частиц.

На сегодня в мире используется десяток разных типов ускорителей, но ни на одном из них прежде не удавалось получить протонный пучок большого тока, необходимый для бомбардировки «мишени» – источника нейтронов с конкретными энергетическими характеристиками. При создании нашей установки мы не пошли проторенными путями и, похоже, это оказалось правильным решением. Конечно, в этой области было много гораздо более опытных специалистов, чем мы, но здесь сработал «эффект дилетанта»: появились совершенно новые, нестандартные идеи, которые помогли разрешить ряд казавшихся неразрешимыми проблем в создании компактных медицинских установок для БНЗТ.

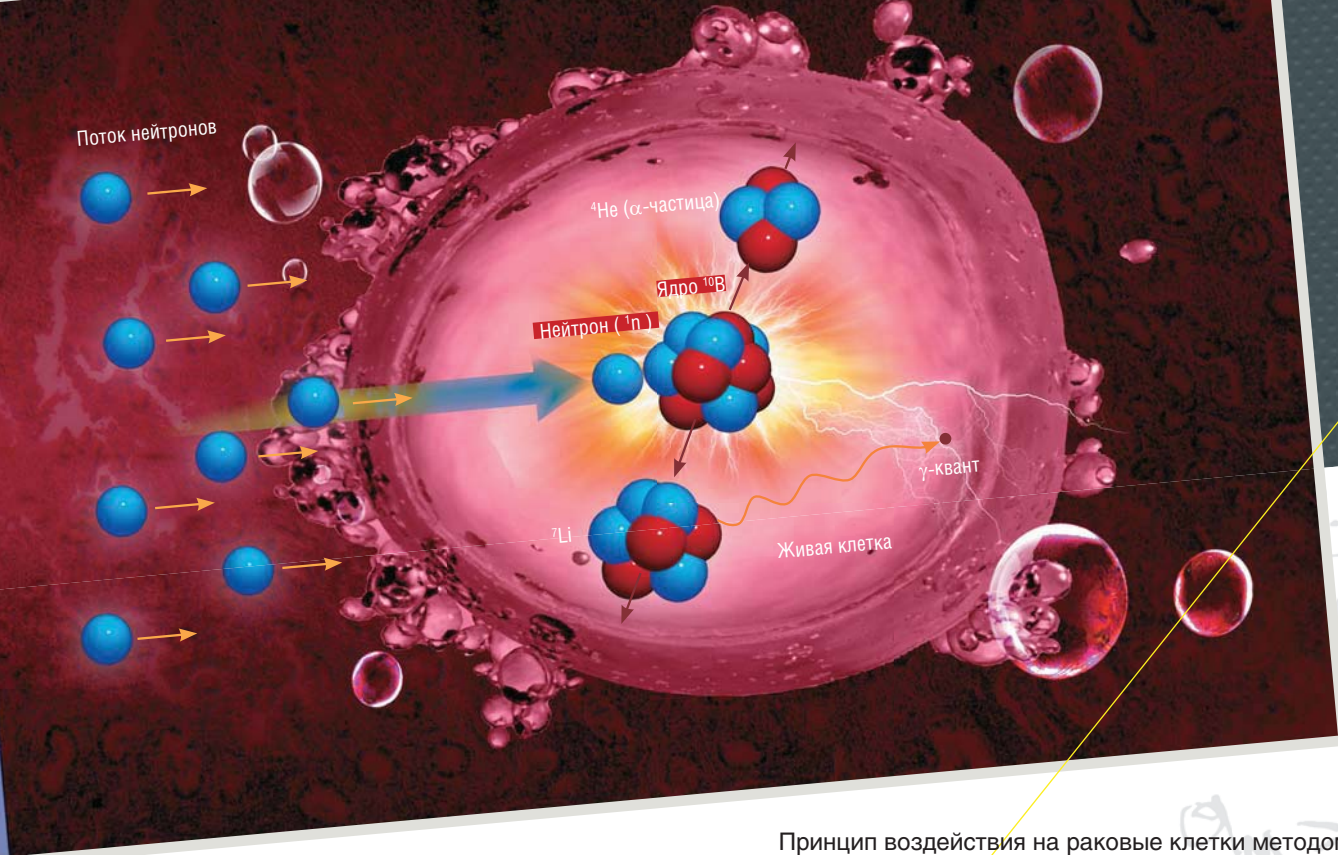


Наша история началась почти двадцать лет назад, когда Г.И. Сильвестрову, руководителю лаборатории ИЯФ СО РАН, позвонил его друг и сокурсник, который был участником конференции в Китае, посвященной перспективам и нуждам бор-нейтронозахватной терапии. Григорий Иванович часто говорил, что он многое знает и умеет как физик, но хотел бы сделать что-то осязаемо полезное для человечества. Увлечись идеей создать ускорительный источник нейтронов для БНЗТ, он сформировал команду энтузиастов. Сам Сильвестров умер в 2003 г., когда еще никакого «железа» не существовало – только идеи, расчеты да первые эксперименты на прототипах, но работа продолжилась. Уже в 2007 г. ускоритель обрел зримые очертания, а на следующий год был получен первый нейтронный пучок

Из России – с идеей

Все наши открытия и разработки запатентованы – российских патентов у нас более десятка. Пример наших разработок – *нейтроногенерирующая мишень*. Когда мы только начали заниматься созданием нашей установки, в одной научной статье уважаемых специалистов было сказано, что лучшей является литиевая мишень, но сделать ее не представляется возможным. У нас такая мишень прекрасно работает уже почти десять лет.

Недавно произошел примечательный казус, когда меня пригласили в Институт науки и технологий Окинавы – японский аналог нашего Сколково, в который были вложены безумные средства. Одна из задач лаборатории, которую возглавил бывший директор КЕКа (знаменитого японского ускорительного комплекса), – создание нейтроногенерирующей мишени. Изучив этот вопрос, японский руководитель также пришел к мысли, что такую мишень сделать невозможно, но мои друзья и его коллеги из КЕКа убедили его, что еще как можно! И я на их лабораторном семинаре рассказал, что есть совсем простая альтернативная идея, как ее сделать. До сих пор помню потрясенное выражение их лиц... Сейчас подобные мишени делаются во всем мире: в первой статье обычно ссылаются на наши работы, потом



забывают. Это нормально: чтобы защитить свои идеи, надо не топтаться на месте, а придумывать что-то новое.

В октябре 2016 г. в г. Колумбия американского штата Миссури состоялся Конгресс по нейтрон-захватной терапии, который проводится раз в два года. Там собираются все – химики, биологи и физики, всего около 200 человек. В этот раз от России было два представителя – я и В. И. Брегадзе из Института элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН (Москва), который занимается созданием соединений адресной доставки бора. Это показывает, какие отечественные команды достигли реальных успехов в этой области.

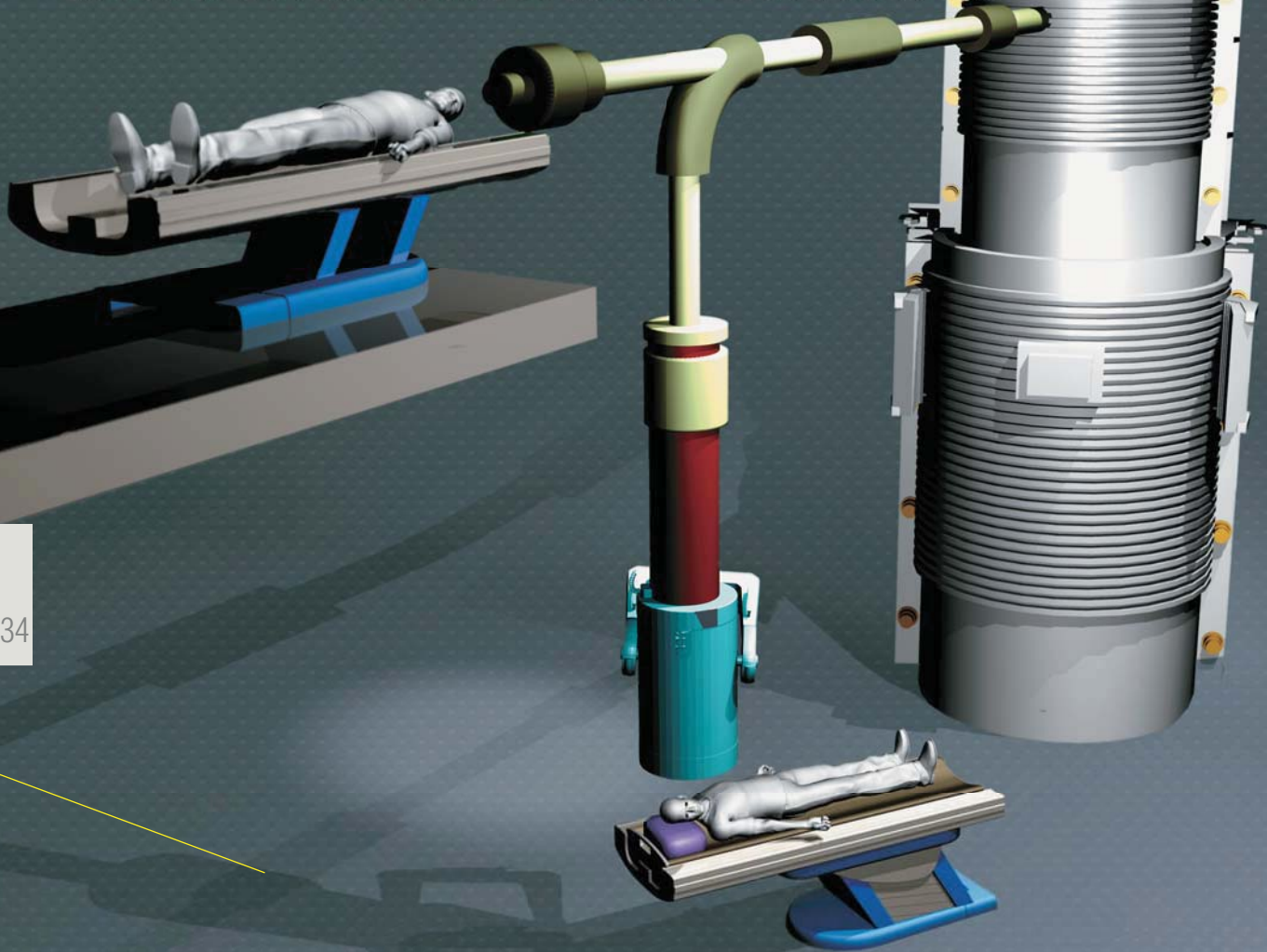
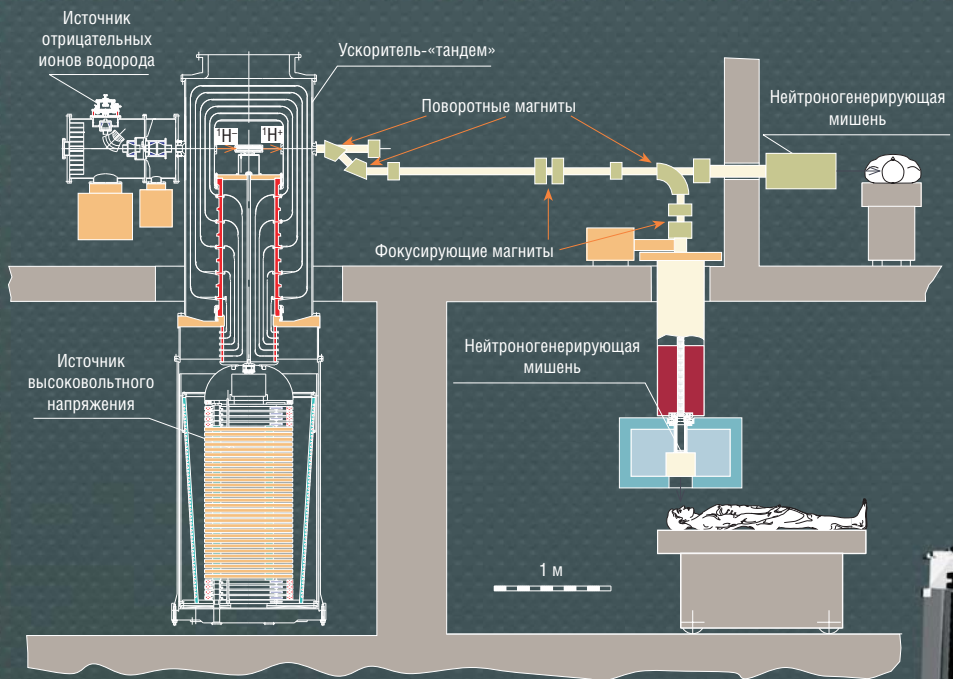
Я знаю в мире еще лишь две группы, которые, как говорят, получили пучок с нужными параметрами на ускорителях другого типа, одна бельгийско-японская, другая американская, но только наши результаты на сегодняшний день опубликованы. На том же конгрессе от российской стороны было представлено 7 докладов, три из которых докладывали японцы. И на первом же выступлении прозвучал вопрос: зачем они вообще поехали в Сибирь? Ответ был прост: там единственный источник нейтронов, который реально работает.

Из российских специалистов я бы хотел отметить еще В. Н. Митина, руководителя ветеринарной клиники при Российском онкологическом научном центре им. Н. Н. Блохина, который с помощью БНЗТ довольно успешно лечил собак на учебном ядерном реакторе соседнего МИФИ. После его смерти 11 лет тому назад эти работы прекратились.

Принцип воздействия на раковые клетки методом бор-нейтронозахватной терапии достаточно прост. При ударе нейтрона об атом бора-10 нестабильный продукт их слияния моментально распадается на два осколка, разлетающихся с огромной скоростью. Их кинетическая энергия не настолько велика, чтобы они могли покинуть клетку, однако до своей полной остановки они причиняют клетке повреждения, приводящие к ее гибели

ВЗРЫВ В КЛЕТКЕ

Идея бор-нейтронозахватной терапии была впервые предложена еще в 1936 г. – спустя 4 года после открытия нейтрона. Суть ее в том, что раковые клетки, насыщенные стабильным изотопом бора-10, облучают потоком тепловых нейтронов. Ядро бора-10 способно очень эффективно захватывать такой нейтрон, даже когда он «пролетает» мимо на расстоянии в десятки и сотни раз большем размера самого ядра. При поглощении нейтрона происходит образование двух массивных частиц. Благодаря быстрому торможению продуктов распада бора около 80% энергии этой ядерной реакции выделяется внутри раковой клетки, что приводит к ее необратимому разрушению. Поток нейтронов должен иметь достаточную плотность, а максимум их поглощения должен приходиться на глубину, где расположена опухоль. Лучшее всего этим требованиям соответствуют так называемые эпитепловые («промежуточные») нейтроны с энергией от 0,5 эВ до 10 кэВ. При этом распределение по энергии должно быть предельно узким, чтобы вклад сопутствующих потоков медленных и быстрых нейтронов, а также гамма-лучей был минимальным



187

В обычных ускорителях заряженные частицы накачивают энергией в ускорительной трубке, представляющей собой ряд металлических колец – электродов, на которые подается последовательно возрастающий потенциал. Они разделены кольцами из диэлектрика, на которые при большом токе попадают вторичные частицы и ультрафиолетовое излучение, что может вызывать пробой. Это снижает энергетическую эффективность и стабильность устройства.

В новом ускорителе-тандеме вместо стандартной ускорительной трубки используется конструкция в виде «кочана капусты», где на «кочерыжке»-изоляторе в вакууме висят «листья»-электроды. Пучок отрицательно заряженных протонов проходит через центр «кочана» под углом 90° к «кочерыжке». Так как электроды в этом случае не разделены изоляторами, их можно расположить ближе друг к другу, что обеспечивает больший темп ускорения частиц



Мил
81-2
2

Главная часть установки для БНЗТ – ускоритель нового типа, генерирующий пучок эпитепловых протонов.

На фото – сотрудник лаборатории бор-нейтронозахватной терапии Александр Макаров рассказывает о принципах работы уникального ускорителя очередной экскурсии новосибирских школьников

Кстати сказать, подобное лечение очень недешевое: стоимость препаратов адресной доставки бора довольно высока, так как при достаточно сложном производстве спрос невелик. Сегодня доза препарата, необходимая для лечения одного больного, обойдется в случае борфенилаланина примерно в 0,25 млн рублей, боркаптата – раза в 4 больше. Но 15 лет назад эти препараты стоили еще на порядок дороже, а сейчас на каждой конферен-

ции по БНЗТ предлагаются и обсуждаются сотни новых препаратов адресной доставки бора. Правда, каждый раз новые... В России таких соединений вообще не выпускают, мы используем препараты, произведенные чешской компанией *Katchem*.

Если же перейти к глобальным вещам, то, по моему мнению, физики свою работу сделали. Сейчас мы проводим модернизацию нашей машины, чтобы к лету

ИДЕАЛЬНАЯ МИШЕНЬ

Воздействие мощного протонного пучка приводит к разогреву облучаемого материала, а так как температура плавления металлического лития составляет всего 182 °С, требуется очень эффективный теплосъем. Первоначально для охлаждения мишени использовали жидкий галлий, но впоследствии ограничились обычной водой. В результате удалось подобрать условия, позволявшие сохранять литий в твердом состоянии, что ограничило распространение радиоактивного изотопа бериллия-7, неизбежно образующегося вместе с нейтронами.

Еще одна ахиллесова пята литиевой мишени – сопутствующее паразитное гамма-излучение. Эффективная генерация эпитепловых нейтронов происходит только в очень узком поверхностном слое лития, поэтому по мере продвижения протонов вглубь нейтроны перестают генерироваться, а гамма-кванты по-прежнему излучаются. Оказалось, что уровень гамма-радиации существенно уменьшается, если дальнейшее торможение протонов происходит не в литии, а в более тяжелом металле. Для этого тонкий (50—100 мкм) слой металлического лития наносят на подложку. Однако протоны, «проскочившие» литиевый слой, при торможении почти не рассеиваются и «застревают» практически на одной глубине, где со временем накапливается водород. При росте давления газа поверхность мишени начинает вспучиваться. В ходе экспериментов исследователям удалось подобрать максимально устойчивый материал подложки – при клиническом использовании такую мишень достаточно менять раз в неделю

2017 г., независимо от финансирования, получить нейтронный пучок, который пригоден для терапии пациентов, с большей глубиной проникновения и т.п. И этот пучок будет идеальным в моем понимании – я не вижу принципиальных идей, которые позволят сделать его лучше. Недаром я добавляю к английскому названию нашего проекта BNCT букву *i* от слова «идеальный» – *i*BNCT. Возможно, технически что-то еще можно сделать лучше, но улучшить качество нейтронного пучка на сегодняшнем уровне развития укоротительной техники невозможно. Хватит улучшать – пора внедрять!

Физики свое дело сделали

Когда мы еще только планировали свой ускоритель, мы поставили задачу достичь тока протонного пучка 10 мА, а получили поначалу в 100 раз меньше. Такая же история год назад приключилась с нашими японскими коллегами из Университета Цукубы, которым компания *Mitsubishi* делает подобную машину, но на другом типе



ускорителя: при той же плановой цифре они вообще получили 0,1% от желаемого.

Главная моя мечта тогда была – достичь хотя бы 3 мА, чтобы можно было начать лечить людей. И вот к началу 2015 г. мы получили сразу 5 мА, в 50 раз увеличив ток! Фактически сегодня уже не конструкция ускорителя лимитирует возможность дальнейшего увеличения тока. К тому же, по моему мнению, этих характеристик более чем достаточно для медицинских целей. Тем не менее в следующем году мы планируем достичь заявленной цифры – это уже дело принципа.

А. И. Кичигин, И. М. Щудло,
С. Ю. Таскаев возле
нейтроногенерирующей мишени

Следующей мечтой стало доказать пригодность нашей машины с точки зрения не только физики, но и потребителя. Для этого нужно было поработать с клеточными культурами и лабораторными животными. Чтобы решить первую задачу, мы завели дружбу с японским Университетом Цукуба, при котором есть известная медицинская клиника. О ней могу лишь сказать, что протонная терапия рака, которая в прошлом году заработала в подмосковном наукограде Протвино, о чем было гордо доложено В. В. Путину, в прайсе этой клиники появилась еще в 1983 г., т.е. 33 года назад! А в 2001 г. японцы заменили протонную установку на более современную.

И вот в июне 2015 г. я встретился с директором клиники Акиро Мацумура, который в числе прочего рассказал, что *Mitsubishi* никак не может запустить ускоритель для БНЗТ. Так мы договорились о совместной работе. Это сотрудничество – взаимовыгодное. У нас – установка, у японцев – большой опыт проведения подобных исследований и, более того, лечения людей методом БНЗТ на реакторе JRR-4 (Токай), который впоследствии закрыли.





БОРНАЯ «ВЗРЫВЧАТКА»

В качестве препаратов нейтронозахватной терапии рака сейчас используются соединения, которые содержат атомные ядра стабильного (нерадиоактивного) изотопа бора-10. Основные требования к таким соединениям – возможность селективного накопления бора в клетках опухоли по сравнению со здоровыми тканями, низкая токсичность и способность растворяться в воде.

Сегодня для БНЗТ обычно используется боркаптан (борный сульфгидрил) и борфенилаланин на основе ароматической аминокислоты. В последние годы в мире активно ведется поиск и синтез новых потенциальных боросодержащих препаратов. В качестве носителей бора тестируются самые разные вещества, как низкомолекулярные (производные аминокислот, предшественника и аналога нуклеиновых кислот, дипептиды, производные сахаров и др.), так и высокомолекулярные, такие как антитела и их фрагменты. Основной задачей по-прежнему остается решение проблемы селективной доставки бора в клетки опухоли и накопление его там в необходимых количествах (около 10^9 атомов бора на клетку). Для доставки бора в опухоль

Рядом с ускорителем «Тандем»-БНЗТ – один из его создателей С.Ю.Таскаев (ИЯФ СО РАН, Новосибирск) и разработчик бор-содержащих антираковых соединений В.И. Брегадзе (ИНЭОС РАН, Москва)

можно использовать также наночастицы в виде липосом – замкнутых пузырьков с водным содержимым и липидными стенками. Борсодержащие препараты могут включаться как во внутреннюю полость липосом, так и в их оболочку (Шмалько и др., 2013). Недавно ИЯФ СО РАН запатентовал способ доставки борсодержащих препаратов для БНЗТ внутрь опухолевой клетки с помощью модифицированных липосом, в липидную часть которых введен люминесцентный краситель одного цвета, а в водную часть – другого. Контроль доставки препарата производится сопоставлением изображений, полученных в разном цвете (Таскаев и др., 2016)

Для наших исследований были приобретены в Институте цитологии РАН (Санкт-Петербург) четыре клеточные культуры, включая две стандартные контрольные и две – «опухолевые» – глиом и глиобластом человека. С помощью японских коллег и специалистов Института молекулярной и клеточной биологии СО РАН (Новосибирск) были проведены серии экспериментов по облучению этих клеточных культур. Чтобы точно знать концентрацию бора в тканях и клетках – с прицелом на возможную будущую терапию – мы экипировались дорогим (стоимостью около 10 млн рублей) масс-спектрометром японского производства для измерения концентрации растворенных веществ. Купили его на средства гранта РФФИ, которые и тратятся преимущественно на приобретение необходимого оборудования.

В конце концов мы получили практически идеальный результат, когда при определенной, достаточно большой дозе облучения выживаемость здоровых клеток падала всего на 5%, а раковых, в которых накапливался бор, – на 98%! Этот результат свидетельствует о высоком качестве нейтронного пучка, основную часть которого составляют «правильные» эпитепловые нейтроны, которые захватываются преимущественно атомами бора.

Параллельно со специалистами из Института цитологии и генетики СО РАН (Новосибирск) были проведены эксперименты уже на животных – имму-

нодефицитных лабораторных мышах, которым в мозг была привита «человеческая» опухоль – глиобластома. Обычно примерно через пять недель такие мыши погибали. Мы решили облучить их (правда, без особой надежды) за 5 дней до дня предполагаемой смерти. Для экспериментов были сделаны специальные контейнеры, с подогревом, куда помещались усыпленные животные.

В самом удачном испытании у трех из пяти животных опухоль рассосалась полностью, что было подтверждено результатами томографии, и животные стали здоровыми – они прожили в виварии еще два месяца и были усыплены просто потому, что результат эксперимента был достигнут. Это поистине фантастический результат. Ведь борфенилаланин, который мы вкалываем, накапливается не только в опухоли, но и в печени и почках. При этом мышь – животное маленькое, поэтому, в отличие от человека, ее облучают целиком, из-за чего больше страдают здоровые ткани. Нужно еще учитывать, что на поздних стадиях развития опухоли в результате гибели раковых клеток может возникнуть масштабный некроз. Но даже при всех этих отягчающих обстоятельствах мы вылечили животных!

на стр. 142

Аспирант ИЯФ СО РАН
И. М. Шудло, аспирант
Л. Заиди (University
of Sciences and Technology
Houari Boumediène,
Algiers), магистрант НГУ
Л. М. Гвоздева готовят
эксперимент





СТАДИЯ – ДОКЛИНИЧЕСКАЯ

На ускорителе ИЯФ проводятся доклинические исследования влияния как нейтронного облучения, так и собственно бор-нейтронозахватной терапии на опухолевые клеточные культуры, а также на лабораторных животных (мышей с врожденным иммунодефицитом).

В исследованиях на клеточных культурах используются различные линии как здоровых, так и опухолевых клеток, которые представлены преимущественно опухолями головного мозга. Клетки инкубируют в среде, обогащенной изотопом бор-10, а после этого облучают на ускорителе. После облучения проводят клоногенный анализ: проверяется жизнеспособность клеток, в частности, их способность делиться и образовывать новые колонии.

На основе экспериментов по облучению животных уже дана оценка последствий воздействия бор-нейтронозахватной терапии в зависимости от дозы облучения. Задача измерения дозы, которую получает пациент при проведении БНЗТ, является одной из самых сложных, поскольку суммарная доза состоит из нескольких компонент, измерение каждой из которых затруднено: от сопутствующих гамма-квантов из литевой мишени и ускорителя, от быстрых нейтронов, от тепловых нейтронов и от захвата нейтрона бором. Каждая из этих компонент зависит от текущей геометрии литевой мишени, а также от параметров протонного пучка. Плюс к этому доза от захвата нейтрона бором также зависит еще и от типа, формы и расположения опухоли, а также от распределения бора в ней и в окружающих тканях.

Расчет всех четырех дозовых компонент и предсказание воздействия на здоровые и опухолевые ткани при проведении БНЗТ являются значительно более сложными задачами, чем определение доз в традиционной лучевой терапии, которое обычно опирается на полуэмпирические алгоритмы и измерения в водном фантоме. Одним из вариантов создания эмпирического алгоритма планирования терапии являются эксперименты на лабораторных животных, для которых хорошо известны кривые доза–эффект. То есть по биологическим последствиям облучения в тканях животных можно более точно определять полученную дозу, чем с помощью расчетов.

Все животные без опухоли после облучения остались живы, признаков патологического воздействия на здоровые ткани не обнаружено. Сейчас более углубленно изучается влияние облучения на клеточном уровне, включая процессы кроветворения, состояние тканей жизненно-важных органов и воздействия борсодержащих препаратов на организм животного, чтобы подобрать оптимальную дозу.

После окончательной отработки технологии на животных планируется перейти к клиническим испытаниям, т. е. терапии на пациентах, больных раком.

А. И. Кичигин, к. ф.-м. н. А. Н. Макаров

А. И. Кичигин проверяет состояние мышей после облучения



**ИЗ ЛЕКЦИИ д. х. н., профессора В. И. БРЕГАДЗЕ
(Институт элементоорганических соединений
им. А. Н. Несмеянова РАН, Москва):**

Нам нужно смотреть в будущее и искать соединения, которые будут более селективно накапливаться в опухоли. Основной принцип их получения – создавать молекулярные конъюгаты из борсодержащего компонента и части, отвечающей за адресную доставку в клетки опухоли. При этом особую важность имеет расстояние между ними, так как активная часть конъюгата может негативно отражаться на свойствах «транспортёра».

На роль транспортной молекулы в первую очередь претендуют аминокислоты, а также другие низкомолекулярные соединения (порфирины, нуклеотиды и нуклеозиды, липопротеины и т. п.). Все эти соединения востребованы опухолевыми клетками, имеют к ним сродство и, соответственно, в них накапливаются.

Мы уже получили конъюгаты производных полиэдрических соединений бора с различными порфиринами, конкретно с хлорином Е6. Все синтезированные нами соединения мы отдаем на тестирование в Институт биоорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова (Москва), чтобы оценить их накопление в опухолях и здоровых тканях. Исследования показали, что интенсивность накопления борсодержащего конъюгата в клетках карциномы легкого действительно выше в случае большего расстояния между борной частью и молекулой хлорина Е6. Максимальное соотношение концентраций препарата в опухолевой и здоровой ткани, которого нам удалось добиться на сегодня, равно 5:1. Это лучше, чем для используемого сегодня борфенилаланина (3:1), но надо стремиться к большему

Пора внедрять!

БНЗТ на сегодня является новой для нашей страны, перспективной и, главное, проверенной методикой лечения раковых опухолей, так что со стороны государства и крупного бизнеса будет большой глупостью ее не поддержать. Та же Япония сейчас развивает пять вполне успешных проектов по БНЗТ на разных типах ускорителей в рамках сотрудничества государства и таких промышленных гигантов, как *Mitsubishi* и *Toshiba*. Фактически, все это государственные вложения.

Самый короткий и простой для нас путь обеспечить финансирование строительства терапевтической установки БНЗТ – получить грант в рамках прорывного научного проекта на базе программы САЕ (стратегических академических единиц) Новосибирского государственного университета. Согласно проекту, в течение очень небольшого срока (государственное софинансирование

рассчитано на 4 года) мы должны будем построить установку непосредственно для медицинского использования и пролечить не менее 10 пациентов. Это достаточно амбициозный план, который будет непросто выполнить, но нам не привыкать ставить перед собой цели, на первый взгляд кажущиеся невыполнимыми. Фактически подготовительная работа по реализации этого проекта уже началась.

В рамках проекта также планируется разработка улучшенного препарата адресной доставки бора – российского аналога борфенилаланина. Этим будет заниматься Институт органической химии СО РАН (Новосибирск), у которого есть свое опытное производство, совместно с Институтом элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН (Москва).

Как известно, НГУ планирует подать заявку на вторую очередь строительства, которая будет включать создание клиники, где будет практиковаться и БНЗТ. Но это – дело туманного будущего, поэтому в заявке по прорывному проекту университета изложен и другой сценарий. Согласно «запасному» варианту ИЯФ модернизирует одно из своих зданий, где будет размещен ускоритель, а также помещения для приема и лечения больных. Пропускная способность такой установки будет достаточно большой, так как сама процедура БНЗТ длится час, а делается обычно однократно.

Пока мы занимались созданием своей установки – искали идеальные решения, нам «попутно» пришлось решить много проблем, далеко выходящих за рамки ускорительной физики. Вместе с нейрохирургом Владимиром Каныгиным из Дорожной клинической больницы на ст. Новосибирск-Главный ОАО «РЖД» мы разработали и запатентовали систему формирования правильного пучка нейтронов, позволяющую менять его направление. Простое техническое решение, которое удалось найти, не только позволило облучать пациента с любой стороны, но и улучшило качество пучка.

В беседах с нашими японскими коллегами родилась абсолютно новая идея дозиметрии для БНЗТ, на которую уже тоже получен патент. А однажды на лыжне мы разговорились с коллегой по институту Андреем Соколовым, в результате чего появился патент на генерацию монохроматических нейтронов для поиска темной материи. Сейчас вместе с Александром Шмаковым из Института катализа СО РАН и Сергеем Громиловым из Института неорганической химии СО РАН обсуждаем возможность приспособить нашу машину для нейтронной дифрактометрии, которая позволит определять структуру легких элементов вещества.

Все эти идеи, которые мы патентуем, по большому счету очень тривиальны, но почему-то они приходят в голову лишь тому, кто не обогащен грузом опыта, т. е. дилетанту. Как я уже упоминал, именно так была



создана наша установка, и я, будучи изначально специалистом по плазме, а не ускорительщиком, честно говоря, до сих пор удивляюсь, как у нас все это получилось.

За последние пять лет мы из специалистов, потенциально привлекательных в области БНЗТ, превратились в реальных игроков на этом поле деятельности. Последний же год мы фактически работали на потребителя. И это очень важно, ведь физики часто думают: вот, мы сделали что-то очень хорошее, почему же пользователи не бегут и не отхватывают это с руками? С таким подходом ничего не получится: надо самому прикладывать много усилий, чтобы работа по внедрению в практику твоих идей и разработок принесла конкретные плоды.

На сегодня в мире с помощью БНЗТ пролечено около двух тыс. человек, для чего использовались уже существующие исследовательские и учебные ядерные реакторы, многие из которых уже не работают. Важность же подобной терапии не нужно объяснять: с ее помощью можно лечить такие практически неизлечимые на сегодня опухоли, как глиобластомы и раковые

метастазы. Но до сих пор эта методика остается, по сути, экспериментальной, и специалисты должны приложить еще немало усилий по разработке адекватных стратегий и методик лечения.

Наша установка на сегодня является единственным в мире работающим компактным источником пучка нейтронов, пригодного для БНЗТ. Мы готовы создать действующий медицинский ускоритель, на котором можно будет лечить пациентов уже в ближайшие годы. Но оба наших гранта – от Минобрнауки России на усовершенствование установки и от РФФИ для проведения биологических исследований – заканчиваются в декабре этого года. Что будет завтра?

Литература

Neutron Capture Therapy: Principles and Applications. Eds.: W. Sauerwein, A. Wittig, R. Moss, Y. Nakagawa. Springer, 2012. 533 p.

Таскаев С. Ю., Каныгин В. В. Бор-нейтронозахватная терапия. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 216 с.

В публикации использованы фото Александра Макарова

К 100-летию академика Г. И. Будкера

ВСЕЛЕННАЯ БУДКЕРА

Предисловие академика П. В. Логачева

ОГЛАВЛЕНИЕ

.01

УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

- 06 **Ю. А. Роговский, Е. М. Балдин, И. Б. Николаев, В. С. Бобровников, Т. В. Рыбитская**
Экскурсия по государству ИЯФ: там, где рождаются частицы
- 24 **А. Н. Скринский**
ИЯФ вырос из леса вместо грибов
- 38 **Г. Н. Кулипанов**
Академгородок – место встреч
- 50 Каждый «выстрел» – 20 млрд позитронов!

.02

ЭЛЕКТРОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

- 54 **В. В. Пархомчук**
История создания электронного охлаждения
- 66 **В. В. Пархомчук**
«Ионная» терапия рака

.03

ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

- 68 **Л. М. Барков, И. Б. Хриплович**
Зеркальная асимметрия в атомных явлениях.
К 30-летию открытия новосибирских физиков

.04

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

- 82 ЭПОХА УСКОРЕНИЯ.
Экскурсия по государству ИЯФ: девять лет спустя
- 88 **К. В. Золотарев, П. А. Пиминов**
СИ в ИЯФ: формула успеха
- 95 **А. Д. Николенко**
КОСМОС и ПЛАМЯ

.05

ЛАЗЕР НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

- 98 **Н. А. Винокуров**
На быстрых электронах
- 106 **А. К. Петров**
ЛСЕ: мягкое прикосновение лазера

.06

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

- 112 **А. В. Бурдаков**
О настоящем и будущем термоядерной энергетики
- 122 **А. В. Судников**
В ИЯФ готовят конфетку СМОЛА

.07

БНЗТ

- 130 **С. Ю. Таскаев**
Бор-нейтронозахватная терапия рака: на финишной прямой





НАУКА
из первых рук

SCIENCE
First Hand

www.scfh.ru

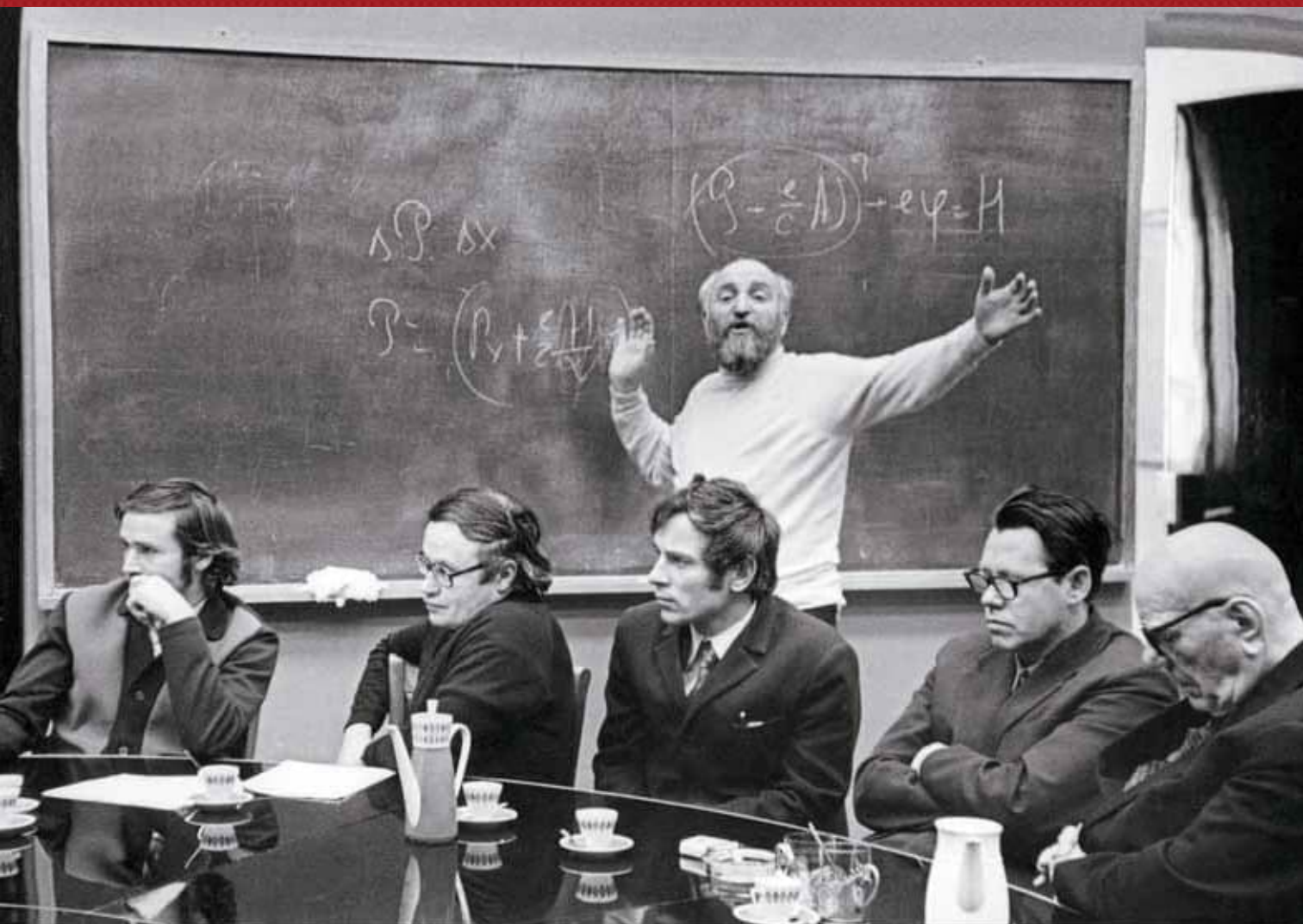


ВСЕ
ВЫПУСКИ журнала

С 2004 по 2018 г.
<http://scfh.ru/archive/> — на русском языке
<http://scfh.ru/en/archive/> — на английском языке

*«Естественное желание
хороших людей —
добывать знание» Леонардо да Винчи*

**«НАУКА
ИЗ ПЕРВЫХ
РУК»**



Однажды Андрей начал лекцию со слов: «Физика — это же такая красавица». И «красавица» была к нему благосклонна. Он был физиком от рождения, не экспериментатор, не теоретик, а физик с большой буквы. Я счастлив, что близко знал и многому научился у этого замечательного человека и великого физика, и горжусь тем, что он считал себя моим учеником.

Академик АН СССР А. М. Мигдал