

2006

«НАУКА из первых рук», № 2(8)



ЭКСКУРСИЯ ПО ГОСУДАРСТВУ

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 получая 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.

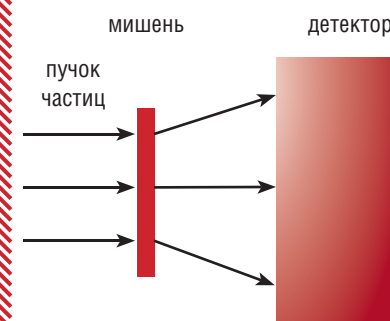
Высокоэнергетические столкновения элементарных частиц — основной метод, используемый в наше время для изучения их свойств, почему этот раздел физики носит также название *физики высоких энергий*. Высокий уровень кинетической энергии частиц достигается в огромных, окружённых в несколько миль, установках — *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  $2 \times 160$  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  $2 \times 7$  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

**СВЕТИМОСТЬ** — 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.

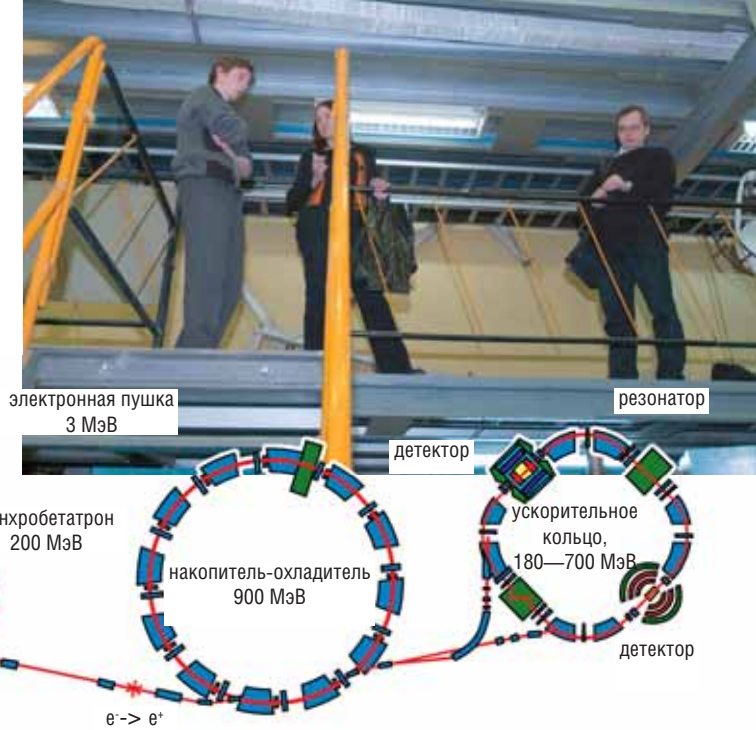
В 1999 г. в ИЯФе было принято решение о значительной модернизации комплекса ВЭПП-2М для повышения светимости и увеличения максимальной достижимой энергии до 2 ГэВ. Новый проект получил название ВЭПП-2000, где цифра 2000 означает не миллион, как думают многие, но как раз число «будущих» МэВ. Возникает 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



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

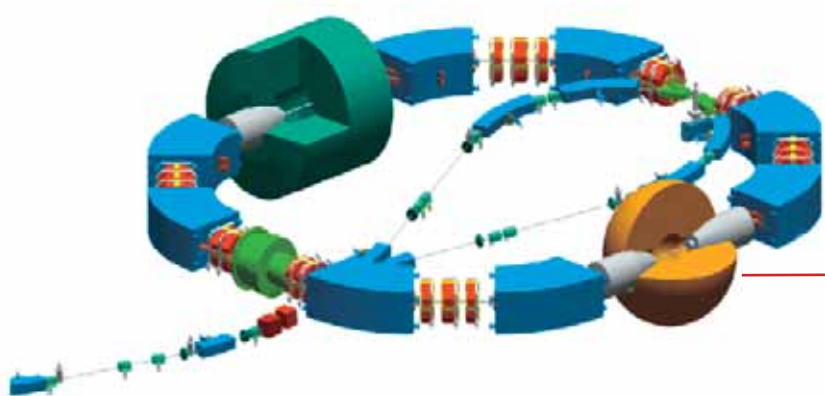


БЭП — накопитель электронов/позитронов на энергию до 900 МэВ



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

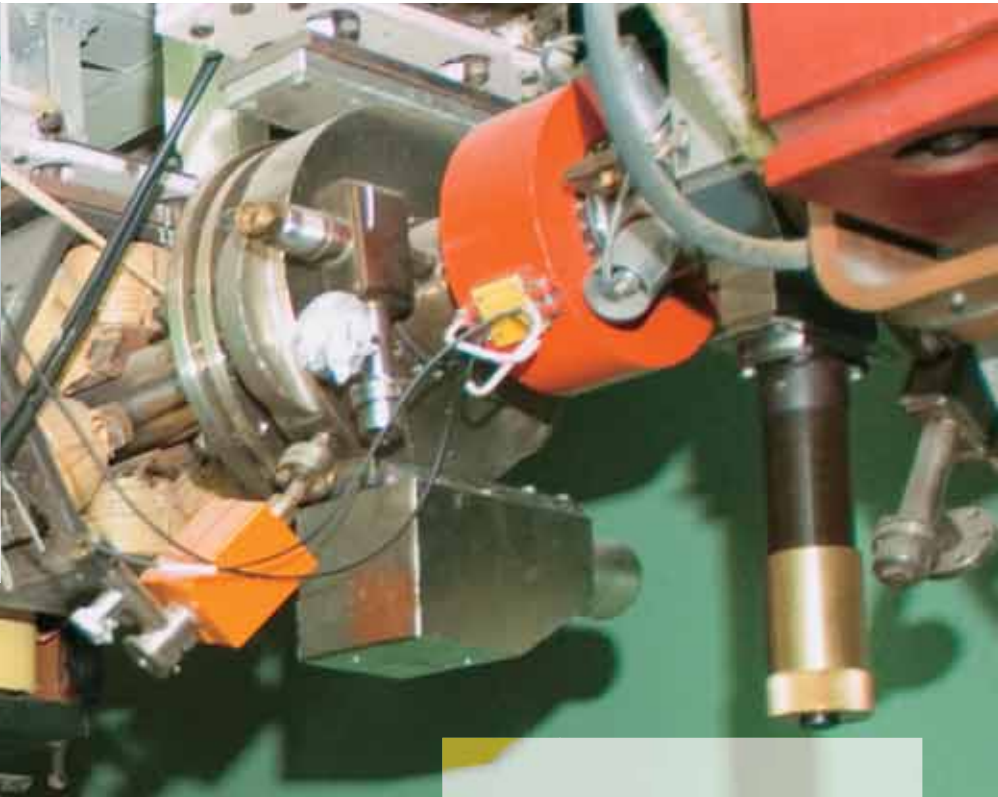


Сверхпроводящие соленоиды работают при очень низкой температуре, поэтому у каждого их блока есть буферный объем емкостью 200 л для хранения жидкого гелия (его температура — 4 °K или — 269 °C)





Евгений Михайлович БАЛДИН,  
научный сотрудник:



### Основной инструмент

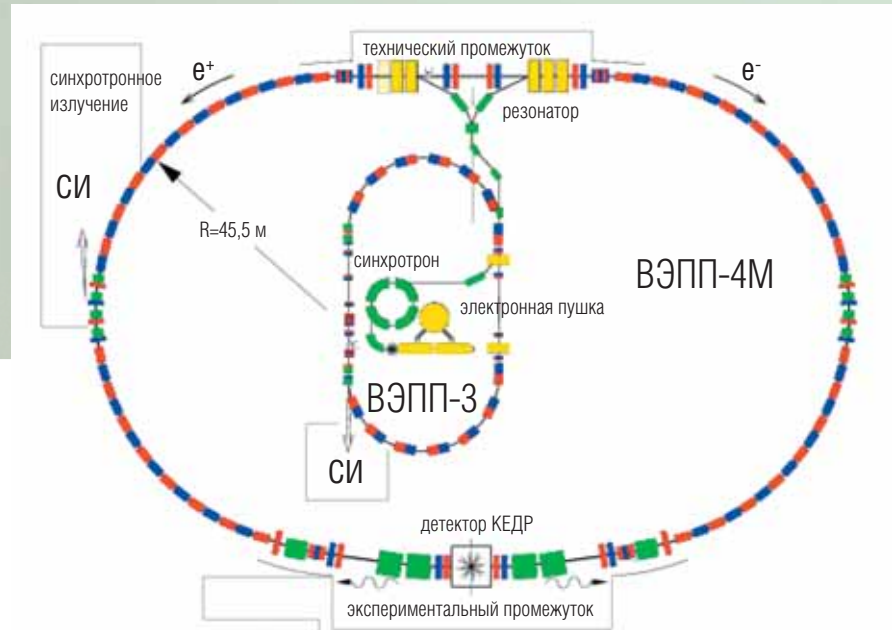
**В**ЭПП-4М — ускоритель на встречных электрон-позитронных пучках — представляет собой модернизированную установку, на которой ещё в 1980—1985 гг. в ИЯФе проводились исследования по физике высоких энергий. Сейчас это основной коллайдер института, на котором проводятся как эксперименты по физике высоких 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  $\Upsilon$ -мезонов ( $\psi$ -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  $\psi$ -мезонов ( $\psi$ -мезонов) и  $\tau$ -лептона, а во-вторых, что немаловажно, — жесткой конкуренции в области более высоких энергий. Одной



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





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

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 ( $\mu$ ) и пионы ( $\pi$ ) можно без особых проблем обнаружить в космических

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

лучах. А вот мезоны  $J/\psi$  и  $\psi'$  в достаточных для изучения количества рождаются только на эксперименте. Наиболее точные измерения масс  $J/\psi$ - и  $\psi'$ - 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  $\tau$ -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

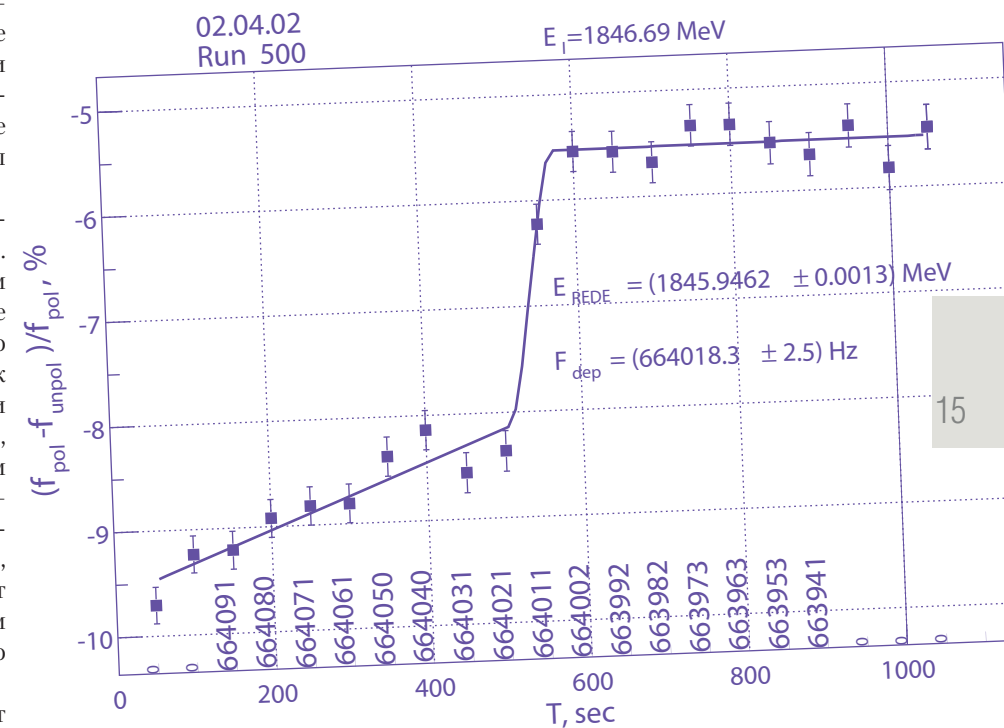
волчок. Это вращение невозможно ни ускорить, ни замедлить, поэтому у него есть даже специальное название — *спин*. В ускорителе само направление вращения *прецессирует* (вращается) вокруг направления магнитного поля ускорителя, причем скорость этого вращения зависит от энергии электрона. Поэтому, измеряя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

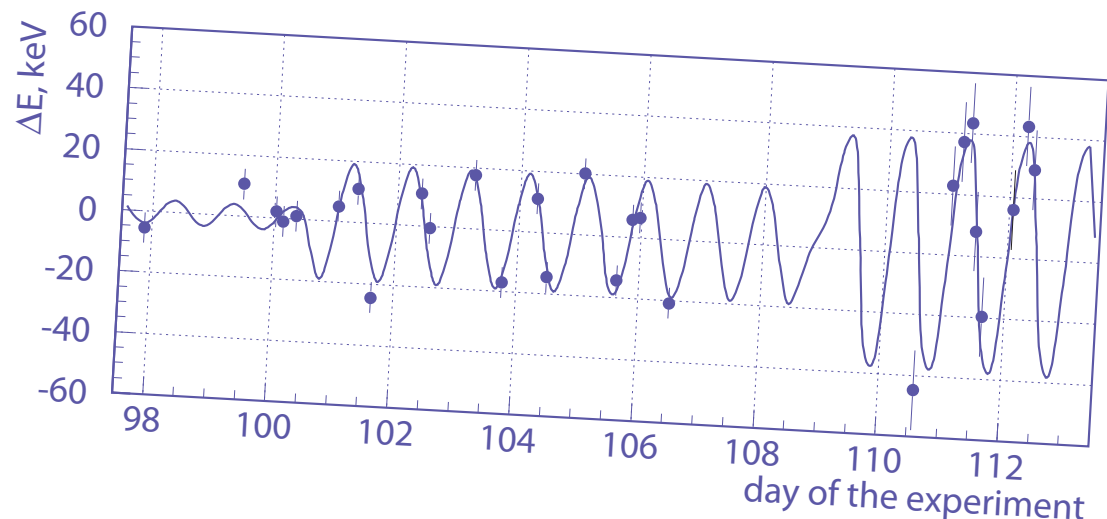


График колебаний энергии, достигнутой в ускорителе. По оси ординат указано расхождение между энергией измеренной и предсказанной, по оси абсцисс — время в сутках. Хорошо видна выраженная суточная динамика. Заметный рост амплитуды колебаний связан с весенним сезоном: сначала оттаяла одна половина ускорителя,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

Е. М. Балдин:

## Просто — КЕДР

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

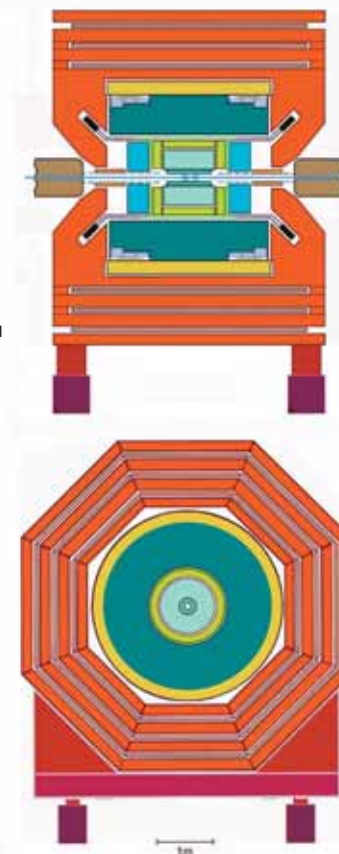
КЕДР — классический детектор элементарных частиц. Хотя в учебник включай: в той или иной степени в нем присутствуют все части или системы, из которых и состоят современные детекторы.

Детектор подобен матрешке: каждая из систем заключает 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

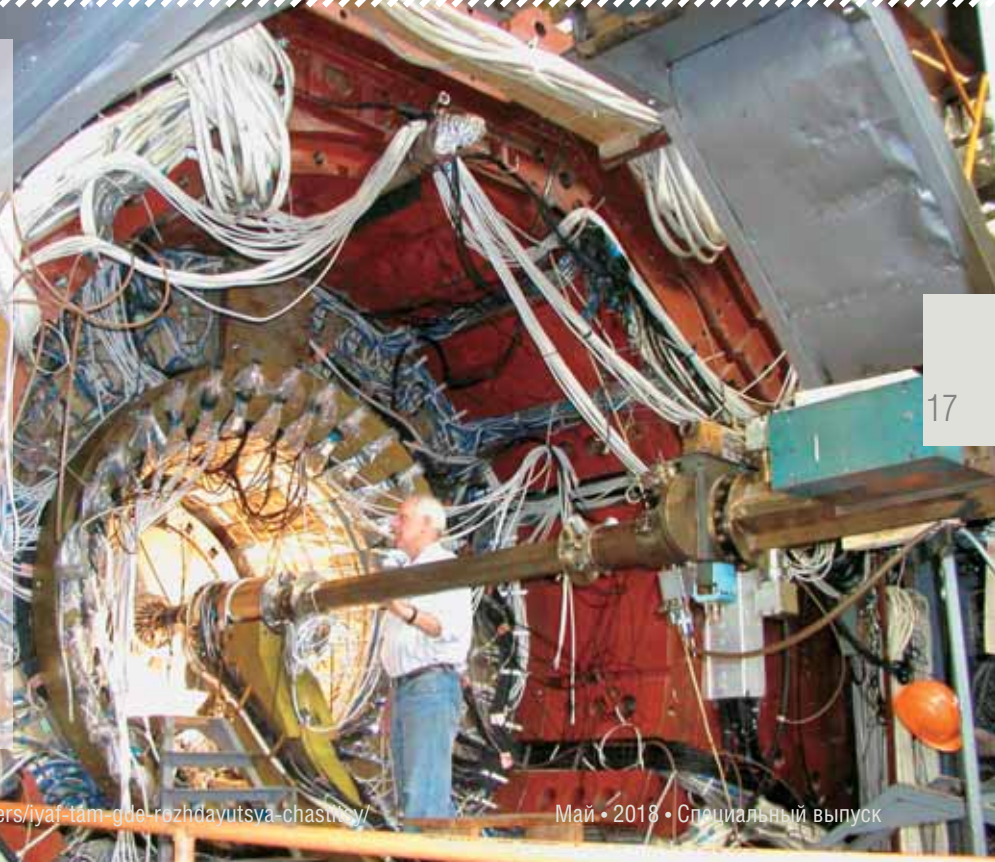


Детектор в рабочем (закрытом) состоянии во время сборки/разборки

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 проволочки 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.



КЕДР

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.

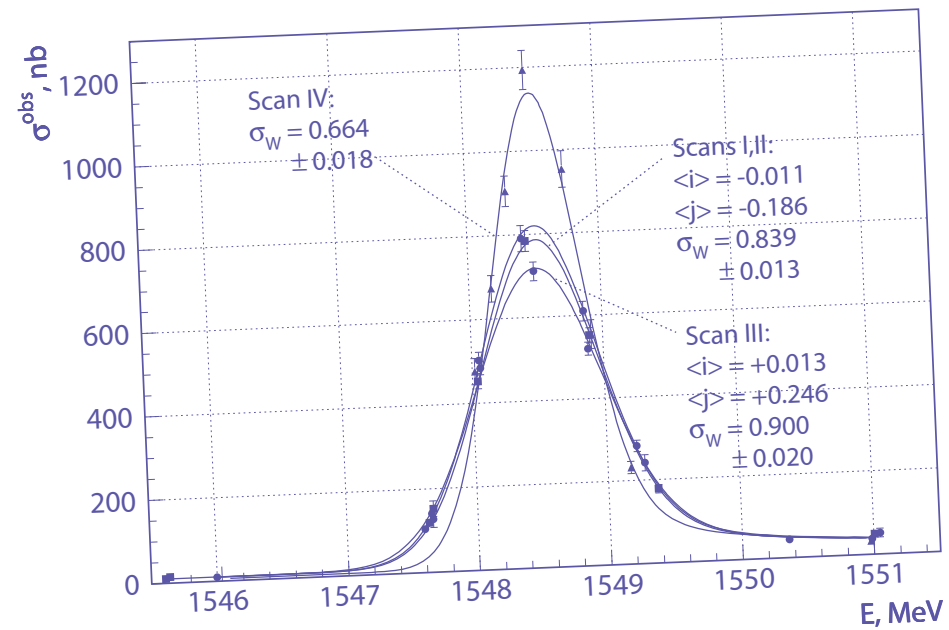


Дрейфовая камера работает примерно на том же принципе, что и вершинный детектор, только все проволочки-электроды расположены в одном большом объеме. Часть проволочек создают поле, в котором «дрейфуют» электронные «следы» от пролетевших частиц, а часть проволочек используется для измерения токового сигнала. (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  $J/\psi$ -мезона. Показаны четыре сканирования в области энергии  $J/\psi$  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 криптона (LKr-калориметр).

Попадая в вещество, частица может терять энергию. Часть потерянной энергии в торцевом калориметре преобразуется в видимый свет, собираемый с помощью фотоумножителей. В LKr-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.

LKr-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.

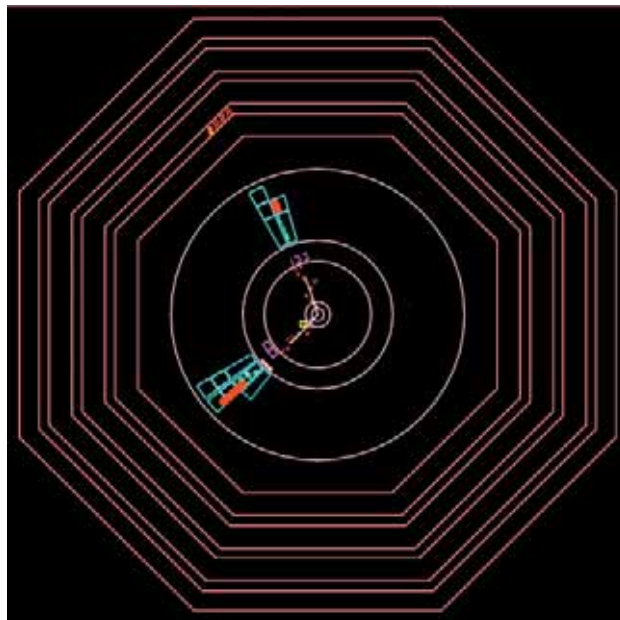
Кстати сказать, фон от космических частиц — проблема при проведении эксперимента, так как он может имитировать «полезный» сигнал. Но в то же время космические частицы позволяют проверить работоспособность всех систем детектора, не включая ускоритель. Даже в «помехе» можно найти что-то полезное.



Внутренние внешние хранилища LKr-калориметра: в экспериментах на КЕДР 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...*



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



## Будущее строится сегодня

Основная задача строящегося в ИЯФе инжекционного комплекса ВЭПП-5 — производство интенсивных позитронных и электронных пучков 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, попадающих 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 пучков, поэтому инжекционный комплекс разработан для производства электронов и позитронов в накопительном режиме.

Татьяна Викторовна РЫБИЦКАЯ, аспирант, старший лаборант

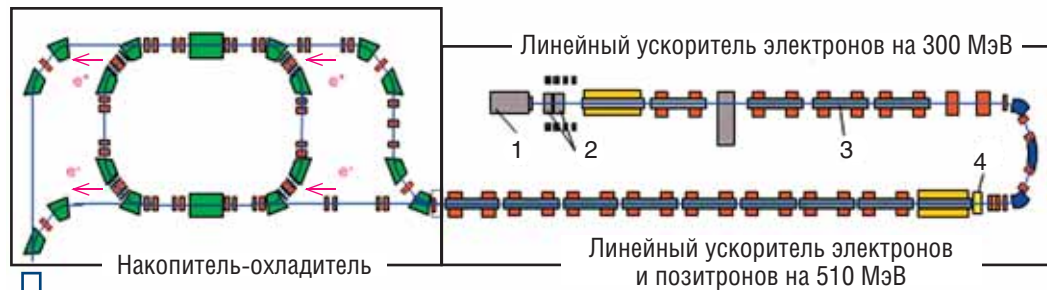


Узел конверсионной системы — источника позитронов

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

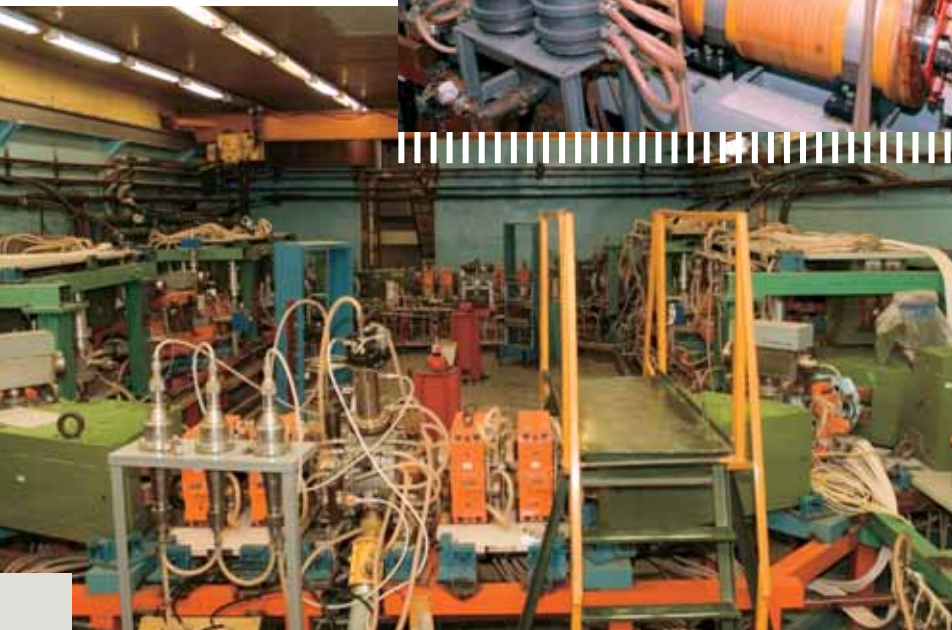
Электроны из первого ускорителя после поворота в магнитном поле на 180° попадают на *конверсионную мишень* и производят позитроны, часть из которых затем ускоряется до 510 МэВ во втором ускорителе. Перед позитронной мишенью установлены два импульсных магнита, отклоняющие электроны в противоположных направлениях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





ВЭПП-4М  
ВЭПП-2000

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

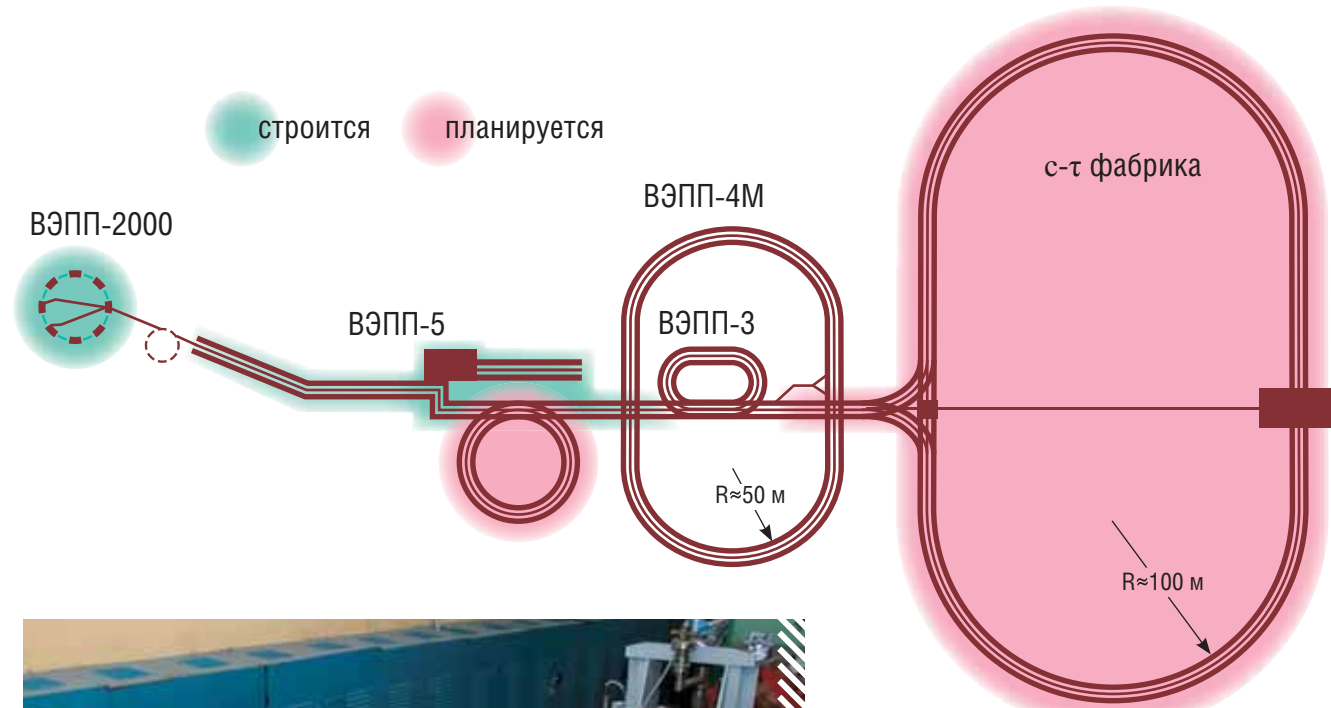


Ю.А. Роговский: В состав оборудования современных ускорителей входят системы наблюдения и измерения параметров пучка, т.к. их электронная оптика нуждается в постоянной точной настройке. Подобное оборудование используется уже на этапе отладки накопителя для изучения характеристик магнитной системы. Затем 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.

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...



22 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