

Глава 14

Инструментальная база физики частиц и ядер

Любые экспериментальные исследования невозможны без действующей и развивающейся инструментальной базы. Для физики элементарных частиц это – в первую очередь – ускорители частиц и ядер, оснащенные соответствующими экспериментальными установками. Как правило, время жизни ускорителей больше времени жизни установок хотя бы потому, что установки создаются для решения конкретных задач, тогда как ускорители с самого начала создаются для решения многих задач, в том числе и тех, о возможности постановки которых при проектировании машины даже не предполагалось. Поэтому очень важно на этапе проектирования обеспечить ускорительной установке то, что называется ”потенциалом для открытий”. Здесь требуется и смелость, и дальновидность, и убежденность тех, кто проектирует ускорительную установку. Это тем более важно, что правота или неправота проектировщика выясняется только через достаточно большое время, когда изменить принятые решения уже невозможно. Другой момент, который всегда присутствует при выборе главных параметров ускорителя обусловлен тем, что в науке во многих случаях возникают такие вопросы, когда выбор правильного ответа определяется глубиной знания предмета, а не мнением

большинства. Как говорят в таких случаях, "вопросы истины голосованием не решаются": мнение только одного является правильным, а мнение всех остальных может оказаться заблуждением. Примеров этому в истории науки достаточно. В этом смысле наука не демократична, но она же и не сословна и не авторитарна: истина открывается любому, кто для этого достаточно глубоко проник в суть исследуемого предмета. Этим-то она и прекрасна.

Как уже говорилось, можно говорить о физике высоких энергий, если энергия пучка частиц, падающих на покоящуюся в лаборатории мишень, выше 10-20 ГэВ (более-менее условно). Основу инструментальной базы экспериментов в этой области энергий составляют ускорители электронов и протонов.

Ускорители для физики высоких энергий подразделяются на два больших класса. Во-первых, это ускорители со встречными пучками (коллайдеры), которые в свою очередь бывают двух типов: симметричные (когда создаются два встречных пучка частиц одной и той же массы и энергии) и несимметричные (когда либо энергии встречающихся пучков разные, либо массы частиц пучка существенно различаются). Во-вторых, это ускорители с пучками, направляемыми на покоящиеся в лаборатории мишени (т. н. "ускорители для экспериментов с неподвижной мишенью"). Если принять во внимание тип орбиты пучка в ускорителе, то говорят о линейных (ускоряемый пучок движется по прямой линии) и циклических¹ ускорителях (в них орбита пучка — замкнутая линия, приближенно напоминающая окружность или отрезки окружности, соединенные отрезками прямых). Как правило, современные ускорители высоких энергий — циклические. Не так давно началось обсуждение проекта нового ускорителя для высоких энергий, который изначально проектируется как линейный и должен прийти на смену "Большому адронному коллайдеру" (ЛHC). Этот новый проект получил название "Международный линейный коллайдер" (ILC).

Одна из особенностей коллайдеров, которую нечасто отмечают в литературе, состоит в том, что экспериментальные установки интегрированы в ускоритель и строятся практически одновременно с ним. Поэтому они создаются как многоцелевые и их нелегко модифицировать. Когда возможности установок исчерпываются, заканчивает свою жизнь и сам коллайдер.

Главная особенность коллайдера с точки зрения кинематики со-

¹ Здесь термин "циклический" является калькой с английского cycle.

стоит в том, что экспериментатор (наблюдатель) находится в системе отсчета, неподвижной относительно центра масс сталкивающихся частиц (если коллайдер относится к т. н. "симметричному" типу, т. е. устраивается столкновение частиц одинакового типа и одинаковой, в с.ц.м., энергии). Поскольку лабораторной системой отсчета всегда считается та, где экспериментальная установка находится в покое, то в экспериментах на симметричных коллайдерах лабораторная система и система центра масс совпадают.

Пусть энергия одного из сталкивающихся пучков коллайдера равна E^* и пусть она много больше массы частиц соответствующих пучков. Тогда переменная Мандельштама s (квадрат полной энергии в системе центра масс) есть $s \approx 4E^{*2}$. Для того, чтобы получить такое же значение s в столкновении тех же частиц, но в кинематике, где в лабораторной системе только одна из них ("снаряд") ускорена, а другая ("мишень") покоится (такие эксперименты в последнее время называют экспериментами с "неподвижной" мишенью²), нужно иметь энергию E_{beam} ускоренного пучка

$$E_{beam} \approx \frac{s}{2m_{target}} = 2 \frac{E^{*2}}{m_{target}}, \quad (14.1)$$

как следует из соотношения (2.4). Таким образом, для достижения одного и того же значения s в опытах с "фиксированной" мишенью нужен в $2E^*/m_{target}$ более мощный ускоритель, чем в коллайдерных опытах. С другой стороны, для коллайдерных экспериментов фактически нужны два идентичных ускорителя (если рассматривать симметричный коллайдер). Другое обстоятельство, работающее **не** в пользу коллайдера, связано с понятием *светимости*, а именно: в опытах с "фиксированной" мишенью достаточно легко увеличивать светимость простым увеличением толщины мишени, тогда как достижение высокой светимости в коллайдерах обеспечивается за счет очень точного сведения пучков в точке встречи и уменьшения их поперечных размеров при увеличении интенсивности пучков. Техническое решение этой задачи довольно сложно. Есть и третье обстоятельство: одни области фазового пространства реакций экспериментаторам легче исследовать при выполнении коллайдерных экспериментов, другие, наоборот, в экспериментах с неподвижными мишенями. Именно поэтому неразумно ограничиваться только экспериментами одного из этих типов.

² В англоязычной литературе используется термин "fixed target experiments".

Понятие светимости.

Одна из важнейших характеристик любого ускорителя – интенсивность пучка, так как она определяет частоту появления (в единицу времени) исследуемых событий. В последние десятилетия стала популярной другая характеристика "интегрального" типа, а именно – **светимость**. Она удобна для коллайдеров, но полезна и для ускорителей "с фиксированной мишенью". В последнем случае светимость определяется интенсивностью и "фактором заполнения" ("duty factor"), т. е. длительностью импульса излучения и толщиной мишени (см. формулу (8.7)):

$$L = N_{nucl} \cdot \frac{I}{\tau} \cdot \delta = l \cdot \frac{\rho}{A} \cdot \frac{I}{\tau} \cdot \delta \cdot 6.022 \cdot 10^{23} \times n_{mol} = \frac{n}{\sigma}, \quad (14.2)$$

где N_{nucl} – число ядер-мишеней в одном см² на пути пучка, I – число частиц в импульсе излучения, δ – "фактор заполнения" ("duty factor"): $\delta = \tau/T$ (здесь τ – длительность импульса излучения, T – период повторения этих импульсов (все – в секундах)); l – толщина мишени (в см), ρ – плотность вещества мишени (в г/см³), A – молекулярный вес вещества мишени (в г/моль), n_{mol} – число атомов, содержащих ядра-мишени в молекуле вещества мишени, n – число событий исследуемого процесса в единицу времени (сек), σ – его поперечное сечение.

Оценка выхода исследуемых событий согласно (14.2) верна для очень тонких мишеней, когда поглощением частиц (пучковых и/или регистрируемых) можно пренебречь. Обычно учет мультипликативной поправки на поглощение делается отдельно, и даже тогда, когда она заметна, формула (14.2) используется для приближенной быстрой оценки выхода исследуемых событий, например, при планировании эксперимента. Еще одно очевидное предположение, скрытое в формуле (14.2), заключается в том, что мишень полностью перехватывает пучок, т. е. ее поперечное сечение не меньше поперечного размера пучка.

Размерность светимости – 1/(см² · сек); поэтому ее обратная величина дает значение сечения, при котором нужные события появляются с частотой 1 Гц (т. е. один раз в секунду). В Табл. 14.1 даны характерные светимости при разных интенсивностях пучка, падающего на мишень толщиной 1 см при факторе $\delta = 1$.

Интенсивность пучка часто приводят в μA или mA ; полезно помнить, что для *однозарядных частиц* ток в 1 μA соответствует

Таблица 14.1. Светимости для мишеней толщиной 1 см при $\delta = 1$.

Вещество	ρ , г/см ²	A	L(I=10 ⁶ /сек)	σ (1 Гц)
H_2 (жидк.)	0.0708	2	$4.2 \cdot 10^{28}$	24 мкбн
CH_2	0.92-0.95	14	$4.02 \cdot 10^{28}$ (углерод)	25 мкбн
Al	2.7	27	$6.02 \cdot 10^{28}$	17 мкбн
Pb	11.35	207	$3.3 \cdot 10^{28}$	33 мкбн

$\approx 6.25 \cdot 10^{12} \approx 2\pi \cdot 10^{12}$ частиц/сек. Наоборот: интенсивность в 10^{12} частиц/сек соответствует току $\approx 0.16 \mu A \approx \frac{1}{2\pi} \mu A$.

14.1 Ускорители для физики высоких энергий.

Большинство действующих ускорителей для высоких энергий находится вне России. Некоторые из них (коллайдеры) упомянуты в книге [25], в частности:

(1) асимметричный (электрон/позитрон)-протонный коллайдер HERA (Германия, вблизи Гамбурга, центр DESY) с энергиями пучков, соответственно, 27.5 ГэВ/с $\times$ 920 ГэВ/с; поляризованные электроны/позитроны также были доступны. Свою работу он закончил.

(2) Симметричный протон-антипротонный коллайдер TEVATRON (ФНУЛ, США с энергиями пучков 1 ТэВ/с $\times$ 1 ТэВ/с).

(3) Симметричный протон-протонный и ядро-ядерный коллайдер LHC (ЦЕРН, Швейцария; 7 ТэВ/с $\times$ 7 ТэВ/с. Начал свою работу в 2009 году.

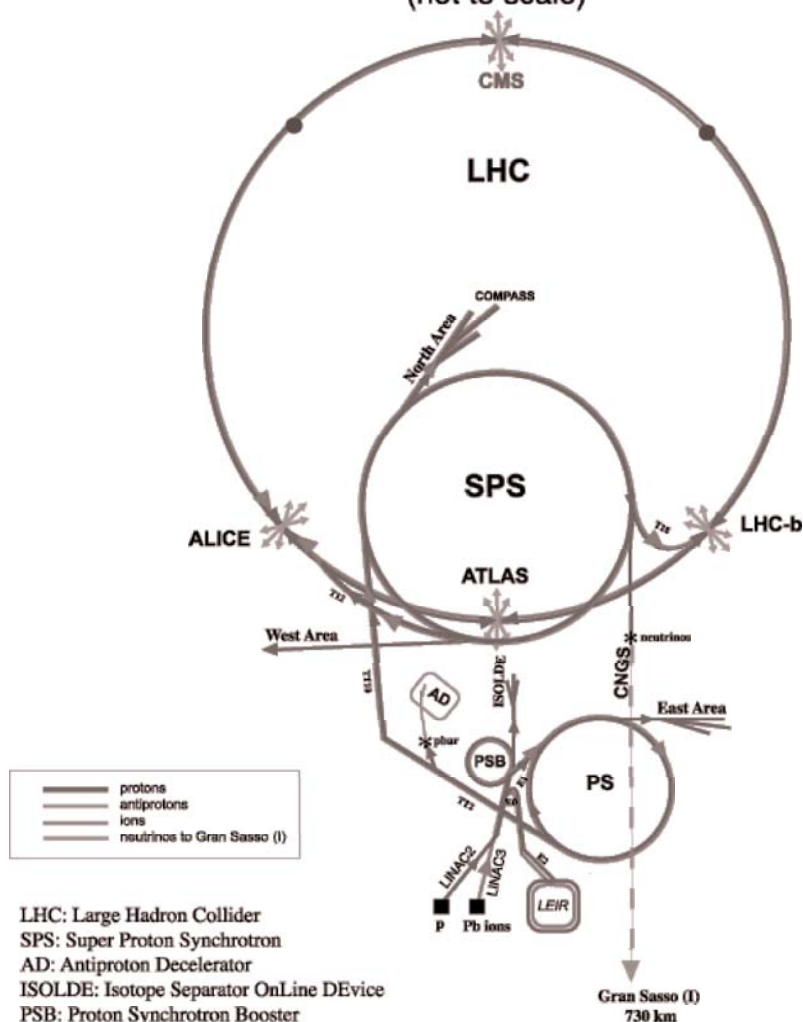
Действующие в настоящее время коллайдеры других центров:

- асимметричный электрон-позитронный коллайдер РЕР-II с пучками $9 \text{ ГэВ/с (e}^-) \times 3.1 \text{ ГэВ/с (e}^+)$ и светимостью $10^{33} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, работает в Стэнфорде (SLAC, США);
- асимметричный электрон-позитронный коллайдер КЕКВ в Японии с пучками $8 \text{ ГэВ/с (e}^-) \times 3.5 \text{ ГэВ/с (e}^+)$ и светимостью $10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$;
- В Институте физики высоких энергий (Пекин, Китай), прекрасно работает электрон-позитронный коллайдер с энергией пучков до $2.8 \times 2.8 \text{ ГэВ}$ и светимостью до $10^{31} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$;
- ядро-ядерный коллайдер RHIC в Брукхейвене (США), способен также работать с пучками протонов ($250 \text{ ГэВ/с} \times 250 \text{ ГэВ/с}$) и дейтронов, в том числе поляризованных (поляризованные протоны и поляризованные дейтроны).

Из циклических ускорителей, находящихся вне России, нужно также упомянуть:

- SPS, который не только служит промежуточным ускорителем в составе комплекса LHC, но и еще некоторое время продолжит свою работу в качестве самостоятельного ускорителя протонов с максимальным импульсом до 400 ГэВ/с (или ядер с таким же полным импульсом); схема ускорительного комплекса ЦЕРН показана на рис. 14.1;
- начавший свою работу протонный ускоритель JPARC в Японии с пучками до 50 ГэВ/с ;
- работающий с 1960 года ускоритель AGS (33 ГэВ/с , Брукхейвен, США).

CERN Accelerators (not to scale)



LHC: Large Hadron Collider
 SPS: Super Proton Synchrotron
 AD: Antiproton Decelerator
 ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice
 PSB: Proton Synchrotron Booster
 PS: Proton Synchrotron
 LINAC: LINEar ACcelerator
 LEIR: Low Energy Ion Ring
 CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

Rudolf LEY, PS Division, CERN, 02.09.96
 Revised and adapted by Antonella Del Rosso, EIT Div.,
 in collaboration with B. Desforages, SI Div., and
 D. Manglunki, PS Div. CERN, 23.05.01

Рис. 14.1. Ускорительный комплекс ЦЕРН. Общая схема.

В России для физики высоких энергий пока еще работают два ускорителя:

- протонный синхротрон в ИФВЭ (Протвино, энергия пучка до 70 ГэВ/с (см. рис. 14.2). Он запущен в 1967 году. Более подробную информацию об ускорителе и его истории можно найти на сайте ИФВЭ.
- Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М (ИЯФ им. Будкера в Новосибирске; 6 ГэВ/с $\times$ 6 ГэВ/с. Коллайдер ВЭПП-4 запущен 14 ноября 1979 г., в 1992 году он был модернизирован в ВЭПП-4М. (Рис. 14.3).

Основные параметры

Максимальная энергия	76 ГэВ
Энергия инжекции	1.32 ГэВ
Интенсивность пучка протонов в импульсе	1.7×10^{13}
Частота повторения импульсов	0.11 Гц
Периметр орбиты	1483.63 м
Радиус кривизны орбиты в магнитном блоке	194.12 м
Число магнитных блоков	120
Число суперпериодов магнитной структуры	12
Прирост энергии за оборот	170 кэВ
Частота ускоряющего напряжения	5.5–6.1 МГц
Длительность цикла	~9 сек
Индукция магнитного поля	0.355 кГс
Длительность плато	2 сек
Порядок фокусировки	FODO
Бетатронная частота	9.75–9.85
Кратность ускорения	30
Критическая энергия	8 ГэВ
Размеры гладкой вакуумной камеры	200 $\times$ 100 мм ²

Рис. 14.2. Основные параметры ускорителя У-70 в ИФВЭ, Протвино.

Electron-Positron Facility VEPP-4M

The VEPP-4M facility is an electron-positron collider of the State Research Center, Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Science, Novosibirsk.



Current status

See [VEPP-4 status](#)
to get current status (beam current, energy, etc.)

Recent view

Some [photos](#) of VEPP-4M facility

Date of Commissioning

The VEPP-4M is the updated facility of that having been operated during the period from 1979 to 1985. It's updating was undertaken for an increase in its luminosity and for the change of its detector. The booster storage ring [VEPP-3](#) was put into operation again in 1986 and the VEPP-4M was really commissioned in 1992.

The Most Important Subjects of Work

- Physics of Y-meson resonances
- Two-photon physics
- Generation of high energy beams of gamma-quanta
- Electro- and photo-nuclear physics
- The use of synchrotron radiation (SR) in research and applications

The Main Technical Parameters of the Facility

VEPP-4M is the only one in Russia collider with the high energy beams of electrons and positrons.

The VEPP-4M accelerator facility consists of the electron-positron collider VEPP-4M at an energy up to 6000 MeV, a synchrotron at an energy of 350 MeV, and linear accelerator which enables the obtaining of 7 MeV electrons or positrons. Both the storage ring [VEPP-3](#) and the VEPP-4M collider are used in experimental studies. These installations have rooms specially equipped for the operation with SR beams. At the VEPP-4M there is the [ROKK-1M](#) installation (Backward Scattered Compton Quanta), producing the polarized tagged gamma-quanta within the energy range from 50 to 1600 MeV, obtained with the method of the backward Compton scattering of the laser light on the VEPP-4M electron beam.

Рис. 14.3. ВЭПП-4М: общие сведения.

14.2 Циклические ускорители для физики переходной области.

В этом разделе кратко характеризуются ускорители для физики промежуточных энергий, действующие в России; характеристика ускорителей этого класса в других странах дана выборочно. Отобраны только те действующие машины, которые дают для экспериментаторов первичные пучки ускоренных протонов и ядер. Ускорители электронов или позитронов здесь не рассматриваются.

Примечательно, что в последние десятилетия возник заметный "перекос" в сторону ускорителей лептонов (электронов и позитронов), если обсуждать только ускорители для промежуточных энергий. Этой тенденции не видно пока только в Германии: набор ускорительных машин в этой стране более-менее сбалансирован.

Чем шире спектр доступных экспериментаторам снарядов, тем лучше; нужны как ускорители электронов и позитронов, так и адронные (с пучками ядер, протонов, нейтронов и вторичными пучками мезонов). Чтобы убедиться, что баланс между машинами обоих классов необходим, достаточно задаться простым вопросом: а много ли бы мы знали о ядерных силах (и нуклон-нуклонном потенциале в частности), если бы эксперименты проводились бы только (и исключительно) на ускорителях электронов?

14.2.1 Действующие в России ускорители.

Основной базой ядерной физики промежуточных энергий в России остается Объединенный Институт Ядерных Исследований в Дубне (ОИЯИ), основанный в 1956 году.

Ускорительный комплекс ЛФВЭ ОИЯИ.

До 2003 года ускорительный комплекс Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ им. Векслера-Балдина) Объединенного Института Ядерных Исследований состоял из двух ускорителей: Синхрофазотрона (старейший и единственный в мире из тех ускорителей с "мягкой" фокусировкой, которые проработали почти 50 лет) и Нуклотрона – первого в Европе действующего сверхпроводящего синхротрона с жесткой фокусировкой, построенного в самые тяжелые для

российской науки годы. Можно сказать, что он был введен в строй скорее вопреки господствовавшей в те времена политике в области науки и культуры, чем "благодаря..." (см. [99] и Табл.14.2).

Таблица 14.2. Технические характеристики ускорителей ЛФВЭ

Параметр	Синхрофазотрон	Нуклотрон
Макс. кинетическая энергия T_{max} протонов, ГэВ	9	12
Макс. кин. энергия ядер с $Z/A = 1/2$; T_{max} , ГэВ/А	4	6
Частота повторения (1/Т) циклов/сек	0.1	$0.1 \div 1.0$
Длительность вывода ("растяжка") τ , сек	0.5	до 10
Фактор заполнения (δ)	0.05	до ~ 1
Вакуум, торр	$10^{-6} \div 10^{-7}$	$10^{-10} \div 10^{-11}$
Потребляемая мощность, МВ	8	1.5
Макс. поле в диполях, Т	1.1	2.0
Периметр, м	207.1	251.5
Количество сверхпровод. диполей, шт.		96
Количество сверхпровод. квадрупольей, шт.		64
Апертура диполей, мм		110
Общая охлаждаемая масса, т		~ 80
Мощность гелиевых ожижителей при 4.5°К, кВт		2×1.6

Комплекс ЛФВЭ имеет довольно богатый набор ускоряемых пучков, включая поляризованные пучки дейтронов, протонов и нейтронов. Особенностью этого ускорительного комплекса является наличие поляризованной протонной или дейтронной мишени, которая может быть использована для экспериментов как на неполяризованных, так и на поляризованных пучках. Такое сочетание у нынешних ускорительных комплексов встречается довольно редко. На рис.14.6 представлена упрощенная схема комплекса и его пучков, а в Табл.14.3 приводится перечень ускоряемых частиц и ядер. Интенсивности пучков Нуклотрона в настоящее время соответствуют стадии I; стадия II требует создания бустера-накопителя, поэтому

Таблица 14.3. Прежние и проектные интенсивности пучков ускорительного комплекса ЛФВЭ (частиц/цикл); знаком * отмечены квазимонохроматические выведенные пучки нуклонов, получаемые из выведенных дейтронных пучков после реакции развала $d \rightarrow p$. Данные, помеченные знаком (*) – интенсивность, ожидаемая после ввода в эксплуатацию нового источника поляризованных ионов.

Пучок	Синхро- фазотрон	Нуклотрон (I)	Нуклотрон + бустер (II)
p	$4 \cdot 10^{12}$	10^{11}	10^{13}
n	10^{10}	$5 \cdot 10^8$	10^{11}
d	10^{12}	$5 \cdot 10^{10}$	10^{13}
d_{pol}	$(1 - 5) \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{10} (*)$	$2 \cdot 10^{10} (*)$
*p_{pol}	$\sim 2 \cdot 10^6$	$\sim 10^8$	$\sim 10^8$
*n_{pol}	$\sim 10^6$	$\sim 10^8$	$\sim 10^8$
³He	$2 \cdot 10^{10}$		
⁴He	$5 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{12}$
⁷Li	$2 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^{12}$
¹²C	10^9	$7 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{12}$
¹⁶O	$5 \cdot 10^7$		
²⁰Ne	10^4	$2 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^9$
²⁴Mg	$5 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^{11}$
²⁸Si	$3 \cdot 10^4$		
⁴⁰Ar		$3 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^9$
⁵⁶Fe			10^{11}
⁶⁵Zn			$5 \cdot 10^{10}$
⁸⁴Kr		$2 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^{10}$
⁹⁶Mo			10^{10}
¹¹⁹Sn			$2 \cdot 10^8$
¹³¹Xe		10^7	$2 \cdot 10^8$
¹⁸¹Ta			10^8
²³⁸U		$3 \cdot 10^6$	10^8

в таблице даны ожидаемые (расчетные) значения. В ноябре 2002 г. было успешно осуществлено ускорение поляризованных дейтронов в Нуклотроне и на выведенном из него пучке поляризованных дейтронов были проведены физические эксперименты.

В настоящее время началась работа над новым проектом ОИЯИ: созданием коллайдера для тяжелых ионов на базе Нуклотрона (проект НИКА). Контуры этого проекта даны в разделе 2.4.2.

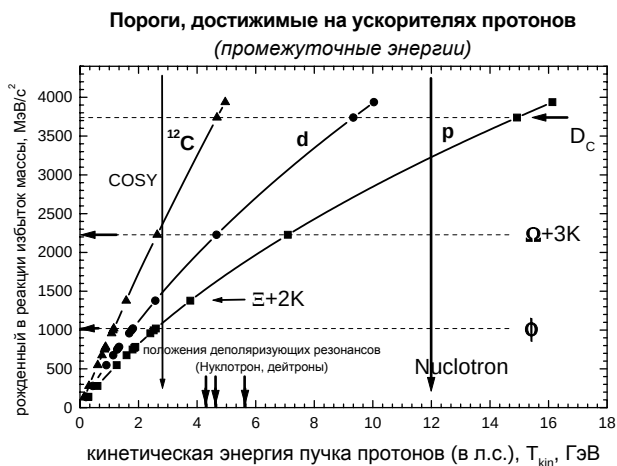


Рис. 14.4. Доступ к порогам рождения частиц в pp , pd и $p^{12}\text{C}$ взаимодействиях. Абсцисса: лабораторная кинетическая энергия протонного пучка (для ядер (дейтронов и т. п.) это соответствует кинетической энергии на один нуклон). Стрелки над осью абсцисс указывают положения слабых деполаризующих резонансов в Нуклотроне для поляризованного d пучка (см. работу [100]). Другие детали этого рисунка поясняются в Части II.

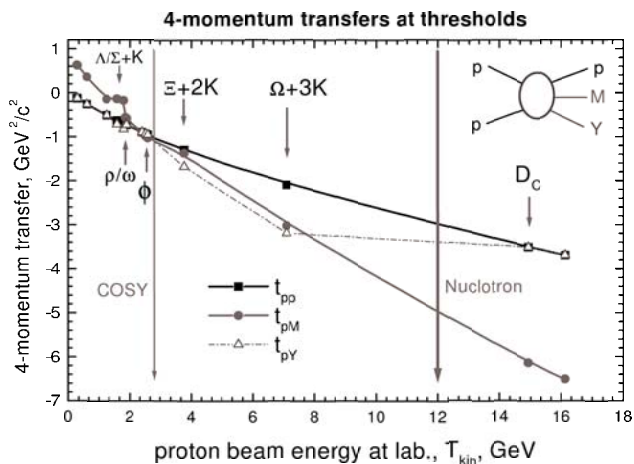


Рис. 14.5. Передачи 4-импульса при рождении частиц на пороге в pp взаимодействиях. Другие детали этого рисунка поясняются в Части II.

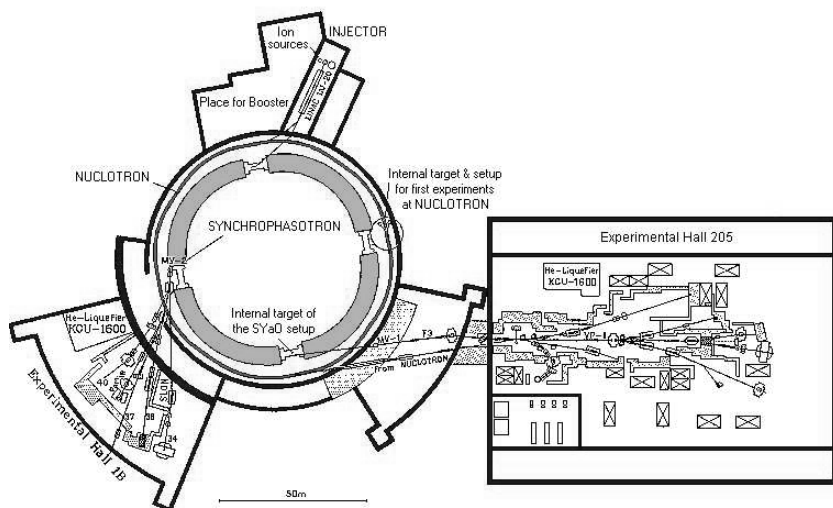


Рис. 14.6. Общая схема ускорителей ЛФВЭ ОИЯИ.

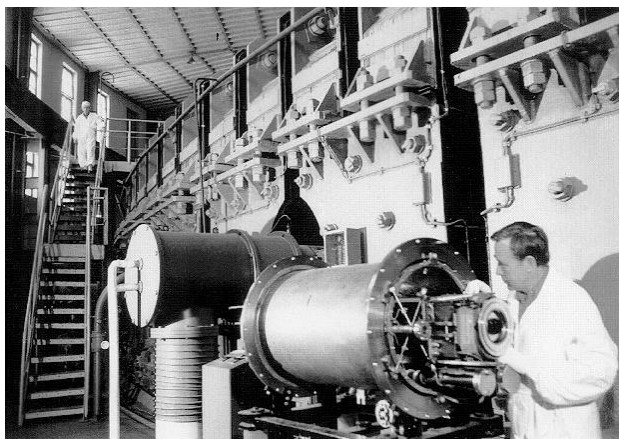


Рис. 14.7. Элемент Нуклотрона (дипольный магнит на переднем плане) в коже тепловой изоляции на фоне магнита Синхрофазотрона.

Синхроциклотрон ПИЯФ (Гатчина).

Информацию о ПИЯФ - Петербургском Институте Ядерной Физики, и его протонном ускорителе (макс. кинетическая энергия протонов около 1 ГэВ) можно найти на сайте ПИЯФ (см. [101] и перечисленные там же статьи); там же приводится краткий очерк истории физики частиц в ПИЯФ. Параметры ускорителя и выведенных пучков даны в Табл.14.4 и Табл.14.4-14.6.

Таблица 14.4. Важнейшие параметры синхроциклотрона ПИЯФ.

Параметр	Значение
Диаметр полюсов, м	6.85
Зазор между полюсами, см	50
Макс. поле на радиусе вывода	1.78 Т
Амплитуда ускоряющего поля	8 кВ
Частота повторения	40-60 Гц
Частота в ускоряющих электродах	30-13 МГц
Макс. ускоряющее напряжение	500 кВ
Интенсивность внутреннего пучка	3 μ А
Эффективность вывода	30%
"Фактор заполнения"	50%
Вакуум	10^{-6} торр
Общий вес	8000 тонн

Таблица 14.5. Параметры протонных пучков в ПИЯФ.

Пучок, Назначение	T_{kin} , ГэВ	$\Delta T/T$, %	Интенс., 1/сек
протоны Основной p -пучок	1	1	$< 6 \cdot 10^{12}$
протоны Медицинский пучок, поперечный размер 3-5 мм ²	1	1	10^8
протоны Спектрометрический пучок	1	10^{-1}	10^8
протоны Второй p -пучок с фокусом в зале ускорителя	1	1	10^{10}

Таблица 14.6. Параметры вторичных пучков ПИЯФ.

Частицы	Импульс, МэВ/с	$\Delta p/p$, %	Интенс., 1/сек	Примечание
π^+	450	6	10^6	Ахроматический режим
π^-	450	6	$3 \cdot 10^5$	
π^+	250	2.5–12	$3 \cdot 10^6 - 1.6 \cdot 10^7$	Ахроматический режим
π^-	250	2.5–12	$3 \cdot 10^5 - 10^6$	
μ^+	29	12	$3 \cdot 10^4$	
μ^+	175	10	$3 \cdot 10^5$	Разделенные пучки
μ^-	160	10	$9 \cdot 10^4$	

Таблица 14.7. Нейтронный пучок ПИЯФ.

T_{kin}	Интенсивность 1/сек	Длительность, нсек	Частота, Гц
10^{-2} эВ – 100 МэВ	$3 \cdot 10^{14}$	10	50

В опытах, выполненных на этом ускорителе, было очень подробно изучено рассеяние протонов на большом числе ядер и получено много прецизионных данных об упругом и неупругом рассеянии с возбуждением ядерных уровней, структуре ядер и распределении плотности ядерного вещества в различных ядрах. Здесь существенную роль сыграл удачный выбор энергии ускорителя во время его проектирования (ускоритель запущен в 1967 г. и вышел в эксплуатационный режим в апреле 1970 г.): при кинетической энергии около 1 ГэВ для анализа данных по упругому и неупругому (с возбуждением ядерных уровней) рассеяния хорошо применима теория рассеяния Глаубера-Ситенко.

Ускоритель ИТЭФ (Москва).

Этот ускоритель относится к классу синхротронов с жесткой фокусировкой. Он был построен в Москве, в ИТЭФ, как прототип-модель

70-ГэВного ускорителя ИФВЭ (Протвино) и способен ускорять протоны до энергии 10 ГэВ, т. е. работает практически в том же диапазоне, что и ускорительный комплекс ЛФВЭ ОИЯИ. Протонный пучок используется как сам по себе, так и для генерации пучков вторичных частиц (мезонов). Физическая программа исследований на этом ускорителе включает в себя большое число экспериментов по ядерной физике промежуточных энергий с акцентом на исследования кумулятивных процессов и подпорогового рождения каонов и антипротонов. В этом направлении было получено много интересных и важных результатов.

Перечисленными машинами исчерпывается список” адронных” ускорителей на промежуточные энергии, действующих в России.

14.2.2 Действующие вне России ускорители.

Ускоритель COSY (Юлих, Германия).

Ускоритель COSY в Юлихе – современная машина с электронным охлаждением пучка. Его максимальная проектная энергия протонов (кинетическая) была 2.5 ГэВ. В настоящее время она доведена до 2.83 ГэВ, что немного выше порога рождения ϕ -мезонов в протон-протонных столкновениях. Ускоритель способен ускорять дейтроны а также обеспечить ускорение поляризованных протонов. Основные проектные параметры даны в Табл.14.8; более детальная информация о проекте этого ускорителя может быть найдена, например, в докладе [102] и на сайте по указанному там же адресу. Экспериментальные установки ориентированы, в основном, на работу с внутренними мишенями, в том числе – струйными мишенями с атомными пучками поляризованных протонов и дейтронов. Инфраструктура выведенных пучков недостаточно развита (например, по сравнению с ОИЯИ или с превосходным, но уже давно демонтированным, ускорителем САТУРН-II, см. раздел 14.2.3), как можно видеть из рис.14.8.

Таблица 14.8. Основные параметры ускорителя COSY

Параметр	Значения
p_{max}	3.30 ГэВ/с
p_{max}^{actual}	3.65 ГэВ/с
$\delta p/p$	$0.5 \cdot 10^{-4}$
Интенсивность ускоренного пучка	$2 \cdot 10^{11}$
Интенсивность выведенного пучка (резонансный вывод)	$5 \cdot 10^9$ 1/сек
Интенсивность выведенного пучка (медленный вывод)	$2 \cdot 10^{10}$ 1/сек
duty cycle, внутренний пучок	0.2 – 1 (зависит от эксперимента) ≈ 1 (микроструктура)
duty cycle, выведенный пучок	0.99 (зависит от эксперимента)
светимость (внутр. пучок)	$10^{28} \div 10^{34}$ 1/(см ² сек)
размер выведенного пучка (ширина на полувысоте)	0.5×0.5 мм

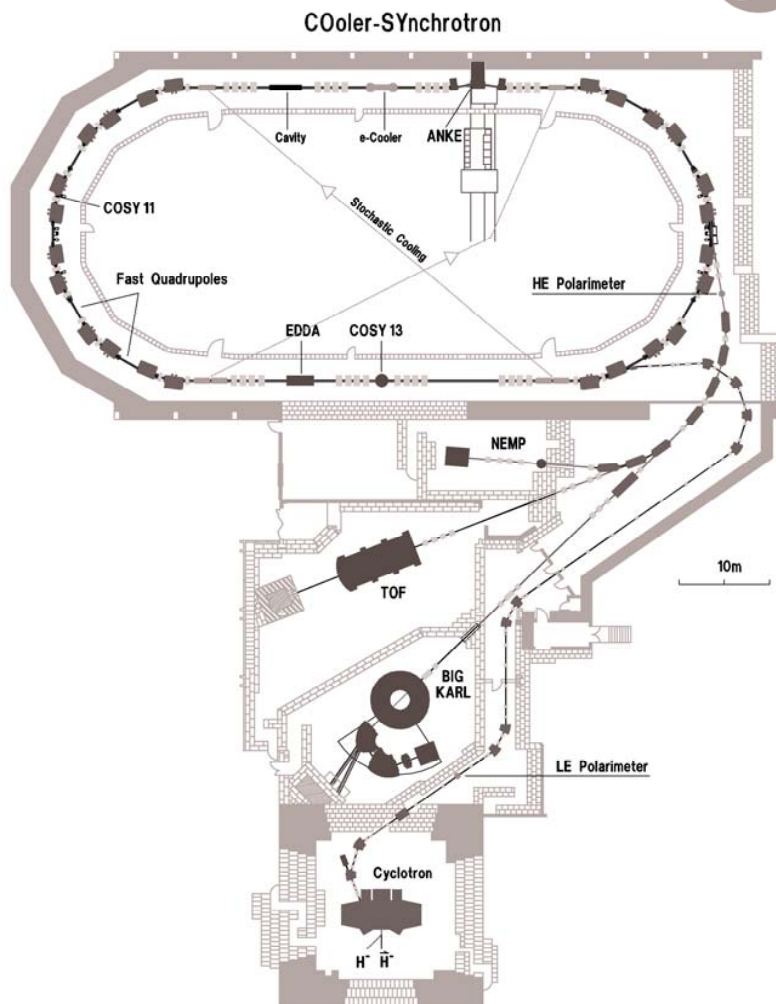


Рис. 14.8. Общая схема ускорителя COSY.

Ускорительный комплекс GSI/FAIR.

Этот ускорительный комплекс находится вблизи Дармштадта (Германия); он предназначен для исследований реакций взаимодействия тяжелых ионов релятивистских энергий. Его нынешняя программа исследований сформировалась под заметным влиянием научной программы ОИЯИ, чему способствовало давнее сотрудничество Германии с ОИЯИ.

Таблица 14.9. Проектные параметры пучков комплекса SIS100/300.

Программа	Макс. энергия	Интенс. за цикл	Средн. интенс.	Структура импульса
Пучки радиоактивных ионов	$0.4 \div 1.5 \text{ GeV/u}$ все эл-ты до урана	$5 \cdot 10^{11}$ для опытов на накопителе	$3 \cdot 10^{11}/\text{сек}$ большой duty cycle для внешн. мишеней	$\leq 60 \text{ нс}$ (накоп.)
Антипротоны	29 ГэВ/с	$4 \cdot 10^{13}$	...	$\approx 25 \text{ нс}$
Плотная ядерная материя	до 34 ГэВ/u U	...	$2 \cdot 10^9/\text{сек}$ большой duty cycle	медл. вывод
Физика плазмы	ионы $0.4 - 1 \text{ ГэВ/u}$	$1 \cdot 10^{12}$	...	$100\text{-}50 \text{ нс}$ (фикс. мишени)
Атомная физика	ионы $1 - 10 \text{ ГэВ/u}$	...	$10^9/\text{сек}$ большой duty cycle	медл. вывод

Комплекс состоит из двух ускорителей и накопительного кольца (UNILAC, SIS и ESR), предназначенных для ускорения тяжелых ионов, создания пучков нестабильных (радиоактивных) ядер и исследований их взаимодействий. О проектных параметрах нынешнего комплекса можно найти информацию в работах [103].

В настоящее время комплекс способен ускорять ядра вплоть до ^{238}U до максимальной кинетической энергии $\sim 2 \text{ ГэВ/нуклон}$ (или $\sim 4 \text{ ГэВ}$ для протонов). Интенсивность ограничена эффектами про-

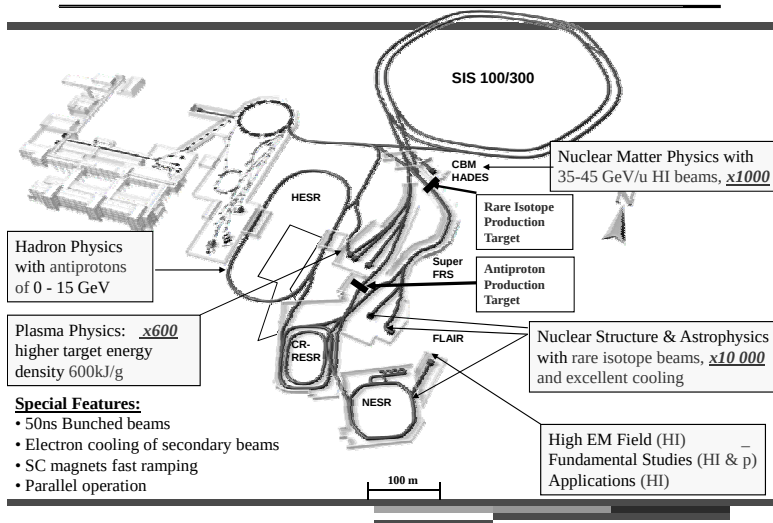


Рис. 14.9. Существующий ускорительный комплекс GSI показан слева в сером оттенке; он включает линейный ускоритель UNILAC, тяжёлоионный синхротрон SIS18, сепаратор фрагментов FRS и накопительное кольцо для экспериментов ESR. В тёмном оттенке показаны будущие элементы: синхротрон для тяжёлых ионов (двойное кольцо) SIS100/300, накопительные кольца (для высоких энергий HESR, кольцо собирания CR, кольцо для ядерных фрагментов NESR), сверхпроводящий сепаратор фрагментов Super-FRS и детекторные станции (PANDA, CBM) для экспериментов. Комплекс UNILAC/SIS18 выступает в роли инжектора для SIS100/300. Врезки поясняют назначение отдельных элементов комплекса.

странственного заряда пучка, влияющими на динамику ускорения (для ядер неона эти эффекты уже существенны при интенсивности около $4 \cdot 10^{10}$ частиц/цикл). "Растяжка" пучка - от 0.02 сек до 4 сек, энергии выведенных пучков - от 100 МэВ/А до 2 ГэВ/А. ESR (с электронным охлаждением) обеспечивает пучки ядер от *C* до *U* с энергиями до 0.8 ГэВ/А.

В 2002 г. начато проектирование нового будущего крупного ускорительно-инструментального комплекса FAIR. В нем активно участвуют физики и инженеры России и ОИЯИ.

Таблица 14.10. Важнейшие параметры синхротронов и накопителей с охлаждением пучка будущего нового комплекса FAIR.

Кольцо	Периметр, м	Откл. способность, Тм	Макс. энергия	Особенности
Синхротрон SIS100. Быстроцикл. магниты 2 Т, 4 Т/с	1083.6	100	2.7 ГэВ/и U^{28+} 29 ГэВ протоны	Сжатие сгустка до 60 нс раб. вакуум $5 \cdot 10^{-12}$ мбар
Синхротрон SIS300. Цикл. сверхпров. $\cos\theta$ магниты 6 Т, 1 Т/с	1083.6	2300	34 ГэВ/и U^{92+}	Медл. вывод с высоким duty cycle, раб. вакуум $5 \cdot 10^{-12}$ мбар
Кольцо-коллектор CR. Быстрое стохаст. охлаждение радиоактивных ионов и $\bar{p}$, масс-спектрометр для короткоживущих ядер	212	13	740 МэВ/и, $A/q=2.7$; 3 ГэВ антипротоны	Акцептанс для $\bar{p}$ 240×240 mm.mrad, $\Delta p/p =$ $\pm 3 \cdot 10^{-2}$
Накоп. кольцо RESR. Накопление $\bar{p}$ после предв. охлаждения в CR	245	13	740 МэВ/и, $A/q=2.7$; 3 ГэВ антипротоны	Быстрое (1 Т/с) замедление короткожив. ядер

Таблица 14.11. Важнейшие параметры синхротронов и накопителей с охлаждением пучка будущего комплекса FAIR (продолжение).

Новое эксперимен- тальное накоп. кольцо NESR	222	13	740 МэВ/ц, A/q=2.7; 3 ГэВ антипротоны	Электронное охлажд. р/активных ионов пучком e^- до 450 КэВ, прецизионн. масс- спектрометр; накопл. и стохастич. охлажд. $\bar{p}$, опыты на внутр. мишенях с атомами и электронами, рассеяние электронов ядрами.
Накопит. кольцо для высоких энер- гий HESR	574	50	14 ГэВ анти- протоны	Стохастич. охлаждение $\bar{p}$ до 14 ГэВ, электрон- ное охлаждение $\bar{p}$ до 9 ГэВ

Циклотрон Института им. Пауля Шеррера (Швейцария).

В Институте им. Пауля Шеррера (PSI) есть несколько машин, кото-
рые используются для прикладных исследований или ядерной физи-
ки низких энергий, но секторный сильноточный циклотрон в основ-
ном был нацелен на задачи физики частиц и ядерной физики про-
межуточных энергий (вблизи нижней границы этой области). Это
протонный ускоритель с возможностью ускорения поляризованных
протонов. Высокая интенсивность протонного пучка (большой ток)
позволяет получать достаточно интенсивные нейтронные и пионные
пучки (поэтому его относят также к "мезонным фабрикам"). В на-
стоящее время работы на этой машине ориентированы, главным об-
разом, на прикладные исследования.

Основные параметры машины можно найти, например, в спра-
вочнике [104]; некоторые из них даны в Табл.14.12.

Перечисленные в этом разделе ускорители для адронной физики
промежуточных энергий расположены в европейской части Евразий-
ского континента. В этом списке нет появившихся недавно в Китае

Таблица 14.12. Важнейшие параметры ускорителя PSI.

Параметр	Значение
Энергия инжекции (МэВ)	72
Макс. энергия выведенного пучка (МэВ)	595
Степень монохроматичности выведенного пучка	2%
Макс. ток выведенного пучка (квазипостоянный, миллиампер)	1.5
Макс. интенсивность выведенного пучка	$9.4 \cdot 10^{15}$ /сек
Длительность сгустка	~ 1 нсек
Длительность интервала между сгустками	19.75 нсек
Частота в ускоряющих электродах	50.63 МГц

аналогичных ускорителей; не охарактеризованы также и машины, существующие (или вступающие в число действующих) в Японии (кроме циклотрона Университета г. Осаки, см. далее).

Ускорители адронов с максимальными энергиями выше 1 ГэВ/нуклон на других континентах либо отсутствуют, либо прекратили работу в качестве самостоятельного источника адронных пучков промежуточных энергий для исследований по фундаментальной физике (как в США, где протонный ускоритель на 800 МэВ в Лос-Аламосе используется теперь исключительно для исследований по военной тематике; в Брукхейвенской Национальной Лаборатории машина AGS работает как инжектор для коллайдера релятивистских тяжелых ионов RHIC).

Кольцевой циклотрон в RCNP (Университет Осаки).

Этот ускоритель [105] похож на секторный циклотрон в Виллигене (Институт им. Пауля Шеррера, Швейцария), но отличается более высокой степенью монохроматичности пучка из-за более современной ускоряющей ВЧ системы. Он способен ускорять протоны, дейтроны, ядра ${}^3\text{He}$ и α -частицы, а также другие легкие ионы до энер-

Таблица 14.13. Важнейшие параметры кольцевого циклотрона университета Осаки

Параметр	Значение
Число секторов магнита	6
Зазор между полюсами	6 см
Макс. поле	1.75 Т
Радиус инжекции	2 м
Радиус вывода	4 м
Общий вес	2200 тонн
Частота в ускоряющих электродах	30-52 МГц
Макс. ускоряющее напряжение	500 кВ
ВЧ мощность	250 КВт/резонатор
Число резонаторов	3
Дополнительный резонатор	"Flat-top"
Частота "Flat-top" резонатора	90 – 156 МГц
Среднее расстояние между сгустками	~ 60нс
"Ширина" (σ) сгустка во времени	0.35 нс

гий (кинетических) 400, 200, 510, 400 и $400 \cdot Q^2 / A$ МэВ соответственно. Интенсивность выведенных пучков – до $1 \mu A$ – ограничена требованиями радиационной безопасности. Система инжекторов обеспечивает возможность ускорения поляризованных протонов, дейтронов и ядер 3He с варьируемой ориентацией поляризации выведенного пучка. Эта машина хорошо приспособлена для проведения экспериментов по ядерной физике, равно как и опытов по рождению пионов вблизи порога, включая кумулятивную (для пинообразования) область. Особенность ускорительно-инструментального комплекса, привлекающая экспериментаторов: высокое качество выведенных пучков и отличные спектрометры.

Ядро инструментальной базы этого комплекса состоит из время-пролетного нейтронного спектрометра и двух высококачественных спектрометров заряженных частиц (Grand Raiden и Спектрометр с Большим Аксептансом – LAS), которые могут работать вместе как двухплечевая установка. Основные характеристики машины и спектрометров приведены в Табл.14.13, 14.14. Спектрометр Grand Raiden имеет в своем составе также дипольный магнит для вращения спина, что позволяет измерять параметры вращения спина вторичных частиц. Каждый из спектрометров имеет в фокальной плоскости детектор с дрейфовыми камерами и поляриметром для измерения поляризации вторичных частиц.

Таблица 14.14. Важнейшие параметры спектрометрического комплекса Grand Raiden–LAS.

Параметр	Grand Raiden	LAS
Средний радиус траектории в анализирующем магните	3 м	1.75 м
Полный угол отклонения	162°	70°
Диапазон углов рассеяния в горизонт. плоскости	–5° – –90°	–10° – –135°
Макс. значение $B \cdot \rho$	5.5 Тм	3.2 Тм
Захват по импульсу	5%	30%
Горизонт. увеличение	-0.42	-0.40
Вертик. увеличение	-0.42	-0.40
Макс. разрешение по импульсу	37076	4980
Макс. разрешение по энергии (до 1.1 ГэВ/с протонов)	1/20000	
Общий вес	600 тонн	150 тонн

В том же энергетическом диапазоне, что и ускоритель центра RCNP, работает ускоритель в ЮАР.

14.2.3 Ускорители недавнего прошлого.

Комплекс CELSIUS (Упсала, Швеция).

Этот ускоритель, как и COSY, имел систему электронного охлаждения пучка. Сведения о его основных параметрах можно найти в работах [106] и в Табл.14.15. Ускоритель был рассчитан на работу исключительно с внутренними мишенями. В настоящее время его работа закончена, ускоритель и его установки демонтированы; одна из них (WASA) перебазирована в Германию, на комплекс COSY и продолжает эксплуатироваться там.

Таблица 14.15. Важнейшие физические параметры ускорителя CELSIUS

Параметр	С охлаждением	Без охлаждения
T_{kin}^{max} (протоны), МэВ	550	1360
$\Delta p/p$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Интенсивность (протоны)	10^{10}	10^{11}
Размер пучка в области внутренней мишени (гориз.×верт.)	2×1 мм	5×2.5 мм

Ускоритель Национальной Лаборатории САТУРН (Сакле).

В 1958 г. в ядерно-физическом центре Сакле (вблизи Парижа) было завершено строительство и началась регулярная работа протонного ускорителя, ставшего базовой установкой образованной к тому времени Национальной Лаборатории САТУРН (LNS).

В 1978 году, двадцать лет спустя, этот ускоритель был реконструирован, оснащен бустером-накопителем МИМАС, введены в эксплуатацию новые источники ионов, включая источники поляризованных частиц (протонов, дейтронов и ядер ${}^6\text{Li}$). Реконструированный ускоритель был назван САТУРН-II, был оснащен превосходными (для того времени) спектрометрами, что позволило выполнять на нем первоклассные исследования. После 1992 года стало возможным

ускорять тяжелые ядра, с отношением заряда к атомному номеру $Z/A \geq 0.22$.

Таблица 14.16. Диапазон энергий пучков ускорителя САТУРН-II

Z/A	$\min T_{kin}/A,$ МэВ/А	$\max T_{kin}/A,$ МэВ/А
1	100	2950
2/3	46	1746
1/2	26	1169
0.4	16.7	839
0.3	9.4	532
0.25	6.5	392

Кроме пучков неполяризованных частиц и ядер (см. Табл. 14.16, 14.17), ускоритель позволял проводить эксперименты с пучками поляризованных протонов (с поляризацией до 90%), поляризованных дейтронов (причем их векторная поляризация была до 60%, а тензорная – до 90%) и поляризованных ядер лития-6 (с интенсивностью до 10^{10} частиц/цикл). Длительность импульса излучения могла выбираться от 100 миллисекунд до 1 секунды, период повторения импульсов излучения был (при максимальной энергии пучка) около 4.5 секунд.

На САТУРН-II был исследован ряд методов пересечения деполяризующих резонансов, созданы квазимонохроматические пучки нейтронов, для чего использовалась реакция развала $d \rightarrow n$. Эти результаты нашли применение на других действующих ускорителях.

Комплекс имел хорошо развитую инфраструктуру выведенных пучков, оснащенных высококачественными многоцелевыми спектрометрами и поляризованной мишенью. Все это сделало LNS привлекательным международным центром исследований в области физики частиц и ядер при промежуточных энергиях. Во многих отношениях эта машина и ее инструментарий превосходили ускоритель COSY (достаточно сравнить их параметры), обеспечивая физикам больше возможностей для экспериментов. За 20 лет ее работы было получе-

но немало первоклассных физических и методических результатов (см. сборник [107]).

К сожалению, потенциал этого ускорителя не был реализован в полной мере: в декабре 1997 года, через 20 лет после превращения САТУРН-I в САТУРН-II, он был остановлен. Это недальновидное решение было принято на основе не столько научных, сколько политических причин. В настоящее время адронных ускорителей для промежуточных и высоких энергий во Франции (да и в других европейских странах, кроме России, Германии и Швейцарии) нет.

Таблица 14.17. Интенсивности пучков ускорителя САТУРН-II (частиц/цикл)

Частицы	Неполяризованные	Поляризованные
p	$7 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$
d	$5 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$
³He	$4 \cdot 10^{11}$	
⁴He	$4 \cdot 10^{11}$	
¹²C	10^9	
¹⁴N	10^9	
¹⁶O	$2 \cdot 10^8$	
²⁰Ne	$2 \cdot 10^8$	
⁴⁰Ar	10^8	
⁸⁴Kr	$2 \cdot 10^6 (30^+)$	
⁸⁴Kr	$8 \cdot 10^6 (26^+)$	
¹²⁸Xe	$2.5 \cdot 10^6$	

14.3 Проект коллайдера НИКА в ОИЯИ.

Исследовательскую программу ОИЯИ в области физики частиц и атомных ядер промежуточных энергий на 2010-2017 годы планируется сосредоточить вокруг следующих проблем:

- Прощупывание разных областей диаграммы состояния для горячей и плотной адронной материи, а именно:

- поиск фазовых переходов:
 - * КХД материи в адронную и ("ароматизированную") барионную материю,
 - * переходы типа "жидкость-туман" (в том числе, на последней стадии эволюции сильно взаимодействующей КХД материи, то есть на стадии адронизации/конденсации).
- Поиск смешанной фазы и критической точки (или точек): существуют ли они?
- Свойства экзотических ядер (в том числе понимание природы стабилизирующей роли странности, внедренной в ядерную материю; свойства гипер-ядер).
- Поиск и исследование сигналов о нарушениях фундаментальных симметрий при столкновениях релятивистских тяжелых ионов.
- Исследования поляризационных (зависящих от спина) явлений в реакциях взаимодействия нуклонов и легчайших ядер между собой и с атомными ядрами (от легких до тяжелых).

Для осуществления этой программы необходимы новые инструменты, и в ближайшие 5-6 лет в ОИЯИ планируется создать новый ускорительный комплекс для физики релятивистских тяжелых ионов, включающий в себя Нуклотрон, накопитель-коллайдер тяжелых ионов НИКА и соответствующие современные многоцелевые детекторы.

Коллайдер будет составлен из двух колец со сверхпроводящими магнитами с максимальной магнитной жесткостью 45 Тм и периметром ≥ 340 м; максимальное поле в диполях будет ~ 2.0 Т. В настоящее время рассматривается схема с двумя точками пересечения пучков; в этих точках будут расположены детекторы MPD (многоцелевой детектор для исследований горячей и плотной сильно взаимодействующей КХД материи) и SPD (детектор для изучения поляризационных явлений).

Комплекс Нуклотрон-НИКА должен обеспечить:

1. проведение экспериментов по физике ядро-ядерных взаимодействий в интервале кинетических энергий пучков $1 \div 4.6$ ГэВ/нуклон (с возможностью pA столкновений);

2. работу с поляризованными пучками протонов (протон-протонные столкновения) в области кинетических энергий пучков $5 \div 12.3$ ГэВ (с возможностью $p \uparrow A$ столкновений);
3. работу с поляризованными пучками дейтронов (и возможностью $d \uparrow A$ столкновений) в интервале кинетических энергий пучков $2 \div 5.7$ ГэВ/нуклон.

Предусматривается сохранение возможности проведения экспериментов с пучками, выведенными из Нуклотрона в экспериментальный зал на неподвижные (в лаб. системе) мишени, равно как и с внутренними мишенями в кольцах Нуклотрона и коллайдера.

Работа коллайдера планируется при фиксированной энергии (без ускорения пучка в кольцах): она будет определяться Нуклотроном.

Важнейшей целью создания коллайдера является обеспечение экспериментов пучками релятивистских тяжелых ионов типа Au, Pb или U с кинетическими энергиями в области $1 \div 4.5$ ГэВ/нуклон при светимости не менее $1 \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (при $T_{kin} \approx 3.5$ ГэВ/нуклон). В протон-ядерной моде работы ожидается примерно такой же уровень светимости.

При работе с пучками поляризованных протонов и дейтронов ускорительный комплекс должен обеспечить уровень светимости не ниже $1 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ во всем планируемом диапазоне энергий. Необходимость использования бустера для получения пучка поляризованных протонов анализируется. Для получения пучка поляризованных дейтронов явной необходимости использовать бустер нет.

Вторичные пучки поляризованных протонов и нейтронов для экспериментов на покоящихся мишенях могут быть получены из пучка поляризованных дейтронов, если использовать реакцию развала дейтрона.

Для сохранения поляризации *протонных* пучков во время ускорения в Нуклотроне и проведения измерений после их накопления в коллайдере, предусматривается установка соответствующего оборудования в кольцах этих машин. Проблемы пересечения деполяризующих резонансов в Нуклотроне для дейтронных пучков практически нет, т. к. для дейтронов в нем нет резонансов "неидеальности".