

РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И УСКОРИТЕЛЕЙ

1. Новые тенденции в физике элементарных частиц
2. Ускорители заряженных частиц — главный инструмент исследования материального мира (современный ускорительный арсенал)
3. Международное сотрудничество ученых — фактор стабильности научных проектов. ОИЯИ — пример сотрудничества

Заключение

РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И УСКОРИТЕЛЕЙ*

1. НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

1.1. Что такое физика высоких энергий и немного истории

Физика элементарных частиц (или, что сегодня тождественно, физика высоких энергий) изучает природу на очень малых расстояниях с целью исследовать фундаментальные составляющие материи и их взаимодействия.

Проникновение в глубь материи требует все больших энергий сталкивающихся частиц, поскольку в силу принципа неопределенности существует определенная связь энергии и расстояний (так же как и характерных времен), на которых происходят процессы в микромире. Принцип неопределенности — это фундаментальный закон квантовой теории, утверждающий, что характеризующие физическую систему так называемые дополнительные физические величины (например, координаты и импульс, энергия и время) не могут одновременно принимать точные значения ($\Delta p \Delta x \sim \hbar$, где \hbar — постоянная Планка). Это отражает двойственную, корпускулярно-волновую природу элементарных частиц (волновые свойства материи были открыты в 1924 г. французским физиком Луи де Бройлем).

Переход ко все большим энергиям всегда сопровождался раскрытием принципиально новых физических явлений.

Чтобы получить представление о связи областей физики с пространственной и энергетической шкалой, вспомним, на каких расстояниях и при каких энергиях происходят те или иные явления физики:

- молекулярная физика — 10^{-5} – 10^{-7} см, энергии ~ 1 эВ — 1 кэВ;
- атомная физика, антиматерия — 10^{-11} см, энергии ~ 10 МэВ;
- ядерная физика — 10^{-13} см, энергии 100 МэВ — 1 ГэВ;

*Международная школа молодых ученых «Проблемы ускорения заряженных частиц», Дубна, 2–9 сент. 1996 г. Дубна, 1997. С. 5–37.

- физика высоких энергий, сильные взаимодействия, так называемая адронная физика — 10^{-13} – 10^{-15} см, энергии ~ 10 – 100 ГэВ;

- физика «сверхвысоких» энергий, процессы на сверхмалых расстояниях, меньших 10^{-15} см, энергии больше 100 ГэВ.

Сегодня исследователям доступны энергии порядка 1 ТэВ.

На рис. 1 приведены характерные масштабы расстояний, времени, энергии.

Только ось *в* (энергии) следовало бы перевернуть, так как все большим энергиям соответствуют все меньшие характерные интервалы времени и все меньшие пространственные интервалы, на которых разворачиваются события в микромире.

Сегодня мы находимся на уровне «масс *W*-, *Z*-бозонов» (по энергетической шкале), «времени жизни резонансных состояний» (шкала времени), «расстояний между кварками» (шкала расстояний).

Поражает тот факт, что за последнее столетие был достигнут поистине гигантский прогресс в физике элементарных частиц и атомного ядра.

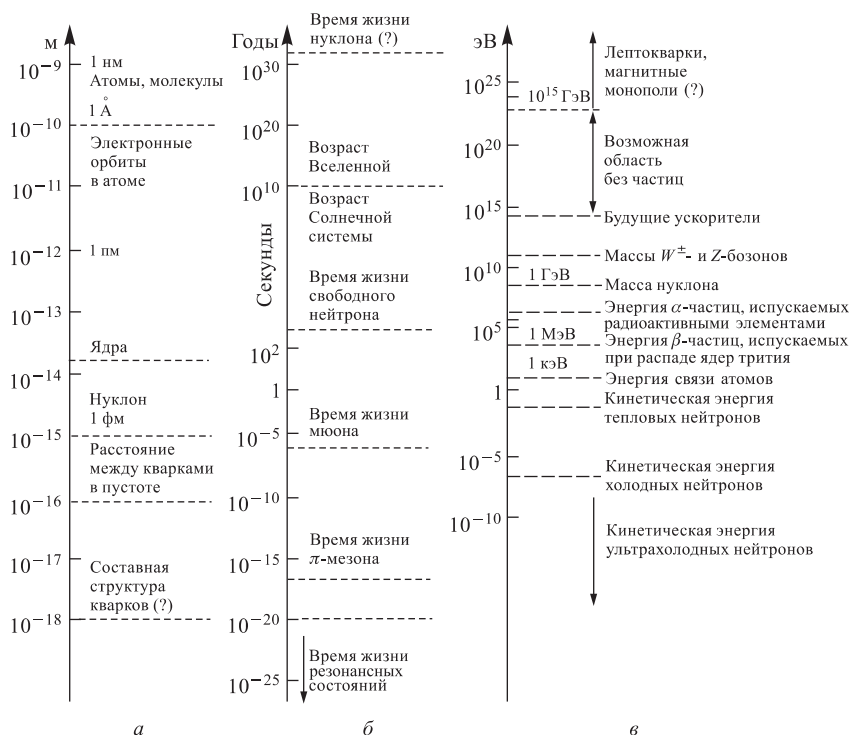


Рис. 1. Масштабы расстояний (*a*), времени (*b*) и энергий (*v*) в физике ядер и частиц

Ядерная физика начала свой отсчет за несколько лет до начала XX в.: ровно сто лет назад, в 1896 г., открыто знаменитое явление радиоактивности. Говоря о явлении радиоактивности, нельзя не упомянуть имена: английского физика Эрнеста Резерфорда — одного из создателей (совместно со своим соотечественником Фредериком Содди) теории радиоактивного распада (1903 г.), создателя планетарной модели атома (1911 г.); французских ученых Пьера и Марии Кюри, внесших основополагающий вклад в исследования радиоактивности; первооткрывателя радиоактивности французского физика Антуана Анри Беккереля.

В 1897 г. был открыт электрон (английский ученый Джозеф Джон Томсон), т. е. была найдена одна из важнейших составляющих атома. В 1932 г. был открыт нейтрон (английский физик Джеймс Чэдвик), т. е. была определена одна из составляющих атомного ядра.

Интенсивные исследования в области физики высоких энергий начались в 1950-е годы, после создания эффективных ускорителей заряженных частиц.

Таким образом, в цепочке основных составляющих материи (материя состоит из молекул, молекула состоит из атомов, атом — из электронов и атомных ядер, атомное ядро состоит из нуклонов — протонов и нейтронов, нуклон — из кварков...) значительная часть звеньев «возникла» фактически на глазах последних поколений исследователей.

Еще раз отмечу, что именно благодаря ускорителям с пучками частиц очень большой энергии (этим «супермикроскопам» для изучения микромира) стали возможны исследования материи на столь малых расстояниях*. В последние годы наблюдается взаимное проникновение между физикой на малых расстояниях и изучением свойств макроструктур Вселенной. Это — проявление единства физики высоких энергий и астрофизики.

Определяя, что такое физика высоких энергий, часто приводят высказывание Абдуса Салама. Он говорил, что раньше эту науку несла «тройка», состоящая из: 1) теории, 2) эксперимента, 3) ускорителей и детекторов. Затем к «тройке» пристегнули еще двух «лошадей»: 4) раннюю космологию, описывающую Вселенную начиная с 10^{-43} с после ее возникновения и до истечения первых трех минут, 5) чистую математику.

Попытаемся, используя «схему Салама», проследить сегодняшние тенденции развития физики элементарных частиц.

* Справедливости ради напомним, что важная информация о микромире была получена с помощью наземных, наводных и «спутниковых» детекторов (с компьютерными устройствами) при исследовании космических лучей, а также с использованием реакторных установок.

1.2. Теоретические представления о структуре частиц и их взаимодействиях

Сегодня мы знаем, основываясь на экспериментальных открытиях и теоретических построениях, что электроны, протоны и нейтроны, составляющие материю вокруг нас (т.е. атомы вещества), не являются, вообще говоря, элементарными «кирпичиками мироздания». Только электроны сегодня описываются как точечно-подобные элементарные частицы. Протоны и нейтроны «сделаны» из более фундаментальных составляющих, названных кварками.

*Сильные взаимодействия** описываются фундаментальной теорией кварков и глюонов — квантовой хромодинамикой (КХД). В этой теории глюоны являются носителями сильных взаимодействий, которые удерживают кварки в протонах и нейтронах (эффект «конфайнмента»). Эта теория эффективно может быть использована для исследования большинства наблюдаемых явлений физики сильных взаимодействий.

Другие силы, электромагнитные и слабые, проявляются как совершенно различные. Однако сегодня мы знаем, что они являются проявлениями *единой электрослабой теории* (Глэшоу, Вайнберг, Салам). «Кирпичиками мироздания» в электрослабом секторе выступают лептоны. Носителями же электрослабых взаимодействий являются два промежуточных бозона (W , Z) и фотон (γ).

Единая электрослабая теория и КХД (в целом называются стандартной моделью — СМ) определяют взаимодействия элементарных частиц (кварков и лептонов) в масштабе до 10^{-16} см.

Третье, кроме сильного и электрослабого, из известных типов взаимодействий — *гравитационное* — остается вне рамок стандартной модели. Это взаимодействие тесно связано с нашими представлениями о пространстве и времени. Как известно, пространство и время в рамках специальной теории относительности выступают вместе как единый 4-мерный мир.

В общей теории относительности геометрия этого 4-мерного мира неразрывно связана с гравитационным полем. Ряд интересных «спекуляций» на тему «неуникальности» мира, который мы наблюдаем, существует не только в научной фантастике, но и в теоретических научных построениях.

Отмечу, что выход за рамки стандартной модели сегодня исследуется по ряду направлений. О них мы скажем ниже.

Однако проходившая в июле 1996 г. в Варшаве XXVIII Международная (Рочестерская) конференция по физике высоких энергий констатировала, что стандартная модель согласуется со всеми имеющимися к настоящему времени экспериментальными данными.

* Сильновзаимодействующие частицы называются адронами.

Итак, на сегодня мы знаем, что в нашем 4-мерном пространстве-времени, наполненном условно-точечными с точностью до 10^{-16} см фермионами* (лептонами и кварками), действует три типа взаимодействий, обусловленных специальными носителями: глюонами, W - и Z -бозонами и гипотетическими гравитонами.

1.3. Некоторые экспериментальные достижения последних лет

Основной задачей большинства экспериментов последних нескольких лет являлось проведение традиционной проверки стандартной модели на различных ускорителях, но в первую очередь на LEP (ЦЕРН) и e^+e^- -коллайдере SLAC. Практически все измерения согласуются со стандартной моделью с поразительной точностью, на уровне 1%.

Прежде чем прокомментировать некоторые яркие экспериментальные результаты этих исследований, расположим «кирпичики мироздания» в виде таблицы (см. табл. 1).

Таблица 1.

Поколения	Кварки		Лептоны	
I	u	d	e	ν_e
II	c	s	μ	ν_μ
III	t	b	τ	ν_τ

Так, одним из наиболее крупных достижений последних двух лет было открытие топ-кварка (t). Это был последний из ненаблюдаемых кварков, который лежит в основе стандартной модели. Установленная масса (почти 200 ГэВ) была правильно оценена непрямыми методами (LEP). Открытие t -кварка было сделано на адронном коллайдере во FNAL с помощью двух больших детекторных комплексов (CDF и D0), использующих сложную методику обработки результатов, чтобы выделить редкие события. Здесь проявилась другая важная особенность современных ускорителей заряженных частиц, у которых кроме высоких энергий предусматриваются и высокие интенсивности (светимости в случае коллайдеров):

$$I \sim \frac{n}{c \cdot \text{см}^2},$$

*Экспериментальные факты указывают на то, что системы с целым спином (бозоны) подчиняются законам статистики Бозе–Эйнштейна, а системы с полуцелым спином (фермионы) подчиняются законам статистики Ферми–Дирака. В математической физике доказана теорема связи спина со статистикой.

т. е. количество частиц, пролетающих в единицу времени через единицу площади. Высокие светимости позволяют изучать редкие процессы (повышая вероятность их наблюдения). К ускорительным машинам с высокой светимостью применяют термин «фабрика» (φ -фабрика, s - t -фабрика, B -фабрика, Z -фабрика. . .).

Экспериментальные исследования и теоретическое осмысление физики t -кварка сегодня (и завтра) сводятся к тому, чтобы ответить на вопросы: *почему t -кварк так тяжел? Каковы его свойства?* Эксперимент также нацеливается на *прецизионное измерение массы t -кварка*.

Несколько ранее (начало 90-х годов) на ускорительном комплексе ЛЕР было установлено, что на нынешнем витке познания мы имеем дело с *тремя поколениями частиц*. Была измерена с высокой точностью масса и полная ширина Z^0 -бозона, что позволило установить количество нейтринных каналов распада Z^0 и определить число поколений.

Загадками для будущих экспериментов в физике высоких энергий являются вопросы: *а сколько всего семейств (поколений) имеется в природе? Есть ли структура у кварков и лептонов (на расстояниях меньше 10^{-16} см)?*

Эти вопросы относятся к категории классических фундаментальных проблем физики микромира. Они задают направления выхода за рамки наших сегодняшних представлений.

Вернемся, однако, немного назад и поясним роль поколений элементарных частиц.

Все атомы, т. е. химические элементы, грубо говоря, состоят из u - и d -кварков и электронов. Электронное нейтрино ν_e не входит в состав атомов, но оно участвует в протон-протонном цикле ядерных реакций, происходящих в недрах Солнца и обеспечивающих его «горение».

Фермионы II и III поколений являются утяжеленными аналогами u , d , e и ν_e и, как считается, играли важную роль в динамике ранней Вселенной. В современную эпоху они появляются в процессах, порожденных космическими лучами, и в столкновениях частиц на современных ускорителях.

Кварки, в отличие от лептонов, характеризуются *цветом* — дискретной переменной, принимающей три значения. Эта переменная была введена в 1965 г. Боголюбовым, Струминским, Тавхелидзе, Ханом и Намбу с целью сохранения принципа Паули в кварковой модели адронов.

Другим загадочным свойством кварков является дробность их электрических зарядов Q . $Q = 2/3e$ для кварков u , c , t и $Q = -1/3e$ для d , s и b . «Бесцветные» лептоны либо электрически нейтральны (все нейтрино), либо имеют заряд $Q = -e$ (e , μ и τ).

Последние 2–3 года внесли много нового в понимание *нуклонной структурной функции* при очень больших переданных импульсах q^2 (e^-p -коллайдер HERA, DESY и др.), что проясняет структуру адронов. Достигнуто значительное понимание *физики тяжелых кварков* (b -кварков) с помощью экспериментов на установке CLEO в Корнелле и др.

В экспериментальных программах ЦЕРН, BNL и ОИЯИ значительное место занимают ядро-ядерные столкновения при высоких энергиях. Эта область исследования ставит своей целью обнаружение проявлений кварк-глюонных взаимодействий при соударении ядер и также дает новую информацию о строении материи (кумулятивный эффект, кварк-глюонная плазма и др.).

Очень трудно в ограниченное время лекции сделать полный обзор достижений последних лет. Выбор примеров (отчасти субъективный) имел целью дать общее представление о тенденциях в физике высоких энергий. Следуя «схеме» Салама, перейдем к математической подоплеке стандартной модели, оставив пока в стороне загадки ранней космологии и состояние ускорительного арсенала современной физики элементарных частиц.

1.4. Математический взгляд на современную физику высоких энергий и появление новых загадок

Говоря о влиянии чистой математики на развитие физики высоких энергий, надо понимать, что речь идет об углублении и совершенствовании математического аппарата теории частиц. Ранее чисто математическая теория групп, методы математической физики и многие другие математические теории теперь стали среди всего прочего аппаратом и языком для физиков.

В математическом отношении СМ представляет собой калибровочную квантовую теорию поля (со всеми ее преимуществами и недостатками типа расходимостей и перенормировок) с группой симметрии

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1). \quad (1)$$

Калибровочные теории замечательны тем, что в них практически однозначно фиксируется структура лагранжиана взаимодействия. При этом переносчиками взаимодействия являются векторные частицы, число которых равно числу параметров группы симметрии. Данные частицы не обладают какой-либо составной структурой, т. е. являются столь же элементарными, как, например, кварки и лептоны.

Группа (1) зависит от $8+3+1 = 12$ параметров. Восьмерка отвечает множителю $SU(3)_C$ — группе *цветовой* симметрии, лежащей в основе КХД. Соответствующий октет векторных бозонов, называемых *глюонами*, осуществляет взаимодействие между цветными кварками. Симметрия $SU(3)_C$ считается точной, а глюоны — безмассовыми.

Установлено, что на малых расстояниях (при больших передаваемых импульсах) эффективное кварк-глюонное взаимодействие убывает («асимптотическая свобода»). Поэтому в данной области можно применять для расчетов аппарат теории возмущений, например диаграммную технику Фейнмана, и получать надежные количественные предсказания.

На расстояниях 10^{-13} см хромодинамические силы должны быть большими хотя бы потому, что им надлежит связать кварки в адроны и обеспечить «сильное» взаимодействие последних. Теория возмущения в данном случае неприменима. «КХД на больших расстояниях», как обычно называют теорию кварк-глюонных взаимодействий в этой области, — предмет интенсивных исследований как в плане теоретическом, так и в плане экспериментальном. Проблемой номер один, являющейся откровенным вызовом теоретикам на протяжении уже многих лет, здесь можно считать разгадку механизма конфайнмента, т. е. объяснение причины удержания кварков внутри адронов и невозможности существования их в свободном состоянии.

Обратимся теперь к теории электрослабых взаимодействий (ЭСВ) в рамках стандартной модели. Эта теория была сформулирована Вайнбергом, Саламом и Глэшоу. Группа калибровочной симметрии ЭСВ включает в себя второй и третий множители из (1):

$$SU(2)_L \times U(1) \quad (2)$$

и задается, соответственно, числом параметров, равным $3 + 1 = 4$. Значит, калибровочных векторных бозонов здесь должно быть 4. Это γ , W^\pm , Z^0 . Фотон γ , подобно глюонам, является безмассовой частицей, тогда как векторные бозоны W , Z^0 имеют массы:

$$M_W = 80 \text{ ГэВ}, \quad M_Z = 90 \text{ ГэВ}. \quad (3)$$

Последнее обстоятельство указывает на то, что симметрия (2) не может быть точной, а должна неизбежно нарушаться.

Теория ЭСВ включает в себя *хиггсовский механизм* спонтанного нарушения $SU(2)_L \times U(1)$ -симметрии, который обеспечивает появление масс у W , Z^0 , кварков и лептонов без потери калибровочной инвариантности полного лагранжиана ЭСВ. В простейший вариант теории входит один нейтральный хиггсовский скалярный бозон H^0 , масса которого, однако, не предсказывается. По современным представлениям, она заключена в интервале

$$114 \leq M_H \leq 1000 \text{ ГэВ}.^* \quad (4)$$

Поиск H^0 непременно входит в перспективные экспериментальные программы крупнейших ускорительных лабораторий мира.

* По данным 2004 г., интервал, видимо, уже: верхняя граница около 260 ГэВ. — *Примеч. сост.*

В рамках $SU(2)_L \times U(1)$ -симметрии реализовано объединенное описание электромагнитного и слабого взаимодействий кварков и лептонов. Этот синтез оказался настолько глубоким, что употребление универсального термина «электрослабое взаимодействие» вполне правомерно.

Вообще физика знает немало примеров того, каким плодотворным может быть *единый* подход к описанию явлений, кажущихся на первый взгляд совсем не связанными и даже разнородными. Так, благодаря Ньютону земная и небесная гравитация соединились в одном понятии «всемирное тяготение». Фарадей обнаружил, что электрические и магнитные силы есть проявления одной сущности — электромагнетизма. Максвелл объединил электромагнетизм и оптику, поняв, что они описывают явления, имеющие общую природу. Он же, соединив аналитическую механику и термодинамику, развил кинетическую теорию газа.

В СМ кварк-глюонное взаимодействие, с одной стороны, и электрослабое — с другой, существуют совершенно независимо друг от друга. Попытки объединить эти взаимодействия в рамках более общей теоретической схемы с эффектным названием «великое объединение» пока, к сожалению, не привели к реальному успеху. Тем не менее продолжают разрабатываться и более грандиозные проекты, претендующие на создание «всеобъемлющей теории» («the theory of everything»). В первую очередь здесь имеются в виду уже упоминавшиеся суперструнные теории, в которых осуществляется синтез кварк-глюонного электрослабого и гравитационного взаимодействий, причем описание последнего согласуется с требованием квантовой механики.

В конечном счете теория «суперструны» объединила СМ и гравитацию, используя понятие крошечной струны вместо точечных частиц. Это еще одно из интересных направлений выхода за пределы стандартных представлений о физике микромира.

Несомненный интерес представляет построение теории, использующей понятие «фундаментальной длины» (Тамм, Кадышевский и др.), — это тоже одно из направлений исследований вне привычных рамок.

Что может служить надежным ориентиром для выхода за рамки СМ? На каких расстояниях (при каких энергиях) СМ заведомо перестанет «работать»? Для какой более общей теории СМ является низкоэнергетическим пределом? Только будущие эксперименты в состоянии дать ответы на эти вопросы. Они, как известно, могут быть двоякого рода. Первый предполагает продвижение в область малых расстояний с помощью ускорителей, разгоняющих частицы до *более высоких энергий*, второй — прецизионные измерения при уже достигнутых энергиях тех величин, в значение которых вносят вклад процессы, происходящие на малых расстояниях.

Твердого и надежного теоретического фундамента «физики за пределами СМ» не существует. Здесь можно пока говорить лишь об определенных направлениях исследований. Среди них наиболее популярны:

- суперсимметрия,
- составные кварки и лептоны,
- «великое объединение»,
- суперструны,
- техницвет

и некоторые другие.

Для суперструнных теорий характерным масштабом является планковская масса $M_P = 10^{19}$ ГэВ. «Великое объединение» взаимодействий должно наступать при энергиях порядка 10^{15} ГэВ.

О ряде возможных теоретических схем мы уже говорили выше. Скажем несколько слов о суперсимметрии (СУСИ), которой в последние два десятилетия уделяется очень много внимания. СУСИ — это новая разновидность симметрии в мире элементарных частиц, основанная на объединенном описании бозонов и фермионов. В рамках СУСИ каждой частице сопоставляется суперчастица, спин которой отличается на $1/2$. Так, фотону, W - и Z -бозонам, обладающим спином 1, соответствуют дираковские суперчастицы «фотино», «вино» W и «зино» Z ; кваркам и лептонам отвечают скалярные «скварки» и «слептоны», скалярным «хиггсам» — «схиггсы» со спином $1/2$.

Все частицы и суперчастицы, входящие в один супермультиплет, должны иметь одинаковую массу. Однако ничего похожего на вырождение спектра масс у имеющихся фермионов и бозонов не наблюдается. Более того, если даже не принимать во внимание различия в массах, следует констатировать, что известные нам фермионы не могут быть интерпретированы как суперпартнеры существующих бозонов. Отсюда при оптимистическом отношении к самой концепции СУСИ следуют два вывода:

- суперсимметрия элементарных частиц реализуется в нарушенной форме с большим расщеплением масс в супермультиплетах;
- суперчастицы нужно открывать.

Несомненно, что обнаружение суперчастиц явилось бы ярким сигналом новой, *нестандартной* физики. Пока, однако, их поиск не увенчался успехом. Из имеющихся на сегодня данных получаются лишь оценки масс этих объектов:

$$\begin{aligned} M_\mu &\sim 25 \text{ ГэВ}, & M_\tau &\sim 22 \text{ ГэВ}, & M_q &\sim 26 \text{ ГэВ}, \\ M_c &\sim 60 \text{ ГэВ}, & M_W &\sim 28 \text{ ГэВ}, & M_Z &\sim 30 \text{ ГэВ}. \end{aligned} \quad (5)$$

Как теоретическая схема СУСИ удовлетворяет самым высоким эстетическим требованиям. Суперструнные теории своей привлекательностью во многом обязаны заложенной в них суперсимметрии.

Соединение идеи СУСИ с калибровочным принципом привело к нетривиальному обобщению теории тяготения — супергравитации. В рамках универсального суперсимметричного описания фермионов и бозонов стираются различия между структурными составляющими материи, с одной стороны, и переносчиками взаимодействий — с другой. Наконец, в суперсимметричных теориях поля теряет свою остроту проблема ультрафиолетовых расходимостей: либо они здесь совсем исчезают, либо соответствующая процедура перенормировки значительно упрощается.

Ранее было сказано, что с точностью до 10^{-14} см кварки и лептоны можно считать элементарными бесструктурными объектами и что именно такое представление об этих фермионах заложено в СМ. Однако повторяемость поколений и само обилие кварков и лептонов (в трех поколениях кварков фигурирует 18 кварков (с учетом цвета) и 6 лептонов), быть может, является намеком на их сложную природу. Соответствующих моделей предложено немало. Кварки и лептоны в них строятся из небольшого количества *более фундаментальных* фермионов (пракварков, субкварков, преонов... — общепринятого названия для этих «конституэнтов» пока нет).

Еще одна загадка в физике частиц относится к проблеме асимметрии материи-антиматерии во Вселенной. Есть два условия, которые могут объяснить это, — нестабильность барионов — сильновзаимодействующих частиц (предмет исследования больших неускорительных экспериментов) и CP-нарушения (они будут исследованы в следующей генерации экспериментов с интенсивными K -мезонными пучками на новых установках, позволяющих наблюдать CP-нарушения в распадах B -мезонов). Существует также гипотеза о существовании другой Вселенной, где в отличие от нашей преобладают античастицы.

Физика частиц может также дать ответ на загадку темной материи во Вселенной. Все наблюдения требуют новых форм небарионной темной материи. Это могут быть новые суперсимметричные частицы и/или массивные нейтрино. Существуют и другие возможности.

До сих пор нет ясного ответа на вопрос, есть ли у нейтрино масса. Эксперименты по прямому наблюдению массы нейтрино или трансформации одного нейтрино в другое («нейтринные осцилляции» Понтекорво и др.) планируются в программах будущих исследований на ускорителях.

В заключение этой части можно кратко резюмировать, что прошедшие несколько лет дали точное подтверждение стандартной модели. Однако существует много загадок, которые дают как теория, так и эксперименты, а усилия направлены сегодня на выход из создавшегося положения. Направления «выхода» неоднозначны, и, не претендуя на полноту, мы рассмотрели лишь некоторые (будем надеяться, что основные) тенденции.

Теперь вернемся к самому началу...

1.5. Ранняя космология

По современным представлениям, основанным на так называемой стандартной космологической модели, в первую микросекунду своего существования Вселенная была настолько горячей, что могла состоять лишь из элементарных частиц, связанных фундаментальными силами. Это была сотворенная самой природой уникальная лаборатория физики высоких энергий.

Ускоряя частицы и сталкивая их друг с другом в современных земных лабораториях, мы, в принципе, многое можем узнать о тех фундаментальных процессах, которые изначально происходили во Вселенной. При этом чем больше энергия сталкивающихся частиц, тем более ранний период истории Вселенной попадает в поле нашего зрения.

Однако известно, что габариты ускорителей довольно быстро растут с увеличением предельной энергии, на которую они рассчитаны. Здесь наши возможности будут довольно скоро исчерпаны, если не появятся принципиально новые идеи и технологические решения. Напомню, что ускорение частиц до энергии 10^{15} ГэВ, отвечающей «великому объединению» сильного и электрослабого взаимодействий, потребовало бы сооружения ускорителя размером с Солнечную систему. А если бы мы хотели продвинуться до «планковской» энергии 10^{19} ГэВ (на этом рубеже становятся существенными квантово-гравитационные эффекты), то пришлось бы строить ускоритель, кольцо которого имело бы протяженность порядка 10 св. лет.

Подобные машины могут существовать лишь в воображении писателей-фантастов. Однако теоретическая мысль смело проникает и в область практически недостижимых энергий. При этом реалистичность и жизнеспособность моделей, описывающих взаимодействие элементарных частиц во *всей* области энергий, определяются, в частности, при «сшивании» этих моделей со стандартной космологической моделью ранней Вселенной. В результате в физику высоких энергий вносятся ценные эвристические идеи и ограничения. Это и имеет в виду Салам, рассматривая раннюю космологию как одну из движущих сил современной физики элементарных частиц. Приведу примеры, иллюстрирующие правомерность такой точки зрения. Некоторые из них невольно будут перекликаться со сказанным выше.

На основании астрофизических оценок распространенности первичного ${}^4\text{He}$ можно судить о количестве различных типов легких нейтрино и, следовательно, о числе поколений лептонов и кварков. Наблюдаемая барионная асимметрия мира, возможно, связана с возникновением в ранней Вселенной преобладания кварков над антикварками во взаимодействиях, нарушающих закон сохранения барионного заряда и CP-симметрию.

Весьма важной и глубокой проблемой, в решении которой заинтересованы как космология, так и теория элементарных частиц, является оценка космологической постоянной Λ . Для самосогласованного описания ранней Вселенной введение этого параметра сейчас признается необходимым. С другой стороны, по астрономическим данным, в современную эпоху величина Λ очень мала ($|\Lambda| \sim 10^{-56} \text{ см}^{-2}$), если вообще не равна нулю.

В квантовой теории поля, не использующей суперсимметрию, постоянная Λ выражается через энергию вакуума и формально является бесконечной величиной. Если в соответствующие расходящиеся фейнмановские интегралы вводить разумное обрезание, то полученная в результате оценка $|\Lambda|$ будет отличаться от астрономической на 50–100 порядков. Однако в суперсимметричной теории поля происходит сокращение всех расходящихся вакуумных диаграмм, что эквивалентно $\Lambda = 0$. В этой связи возникает вопрос: можно ли, отказавшись от точной суперсимметрии, подобрать такой механизм ее нарушения, чтобы космологическая постоянная Λ была отличной от нуля, но малой величиной?

Отметим, что ценная информация для физики элементарных частиц поступает и из астрофизических наблюдений, не имеющих прямого отношения к ранней космологии. Так, своеобразным стимулом для поиска новых нейтральных частиц служит вывод астрофизиков о том, что около 95 % массы нашей Вселенной составляет таинственное «темное вещество» («dark matter»). Особое место занимает нейтринная астрофизика, для которой событием первостепенной важности явилось наблюдение в феврале 1987 г. вспышки сверхновой SN1987A в Большом Магеллановом облаке.

Итак, ключ к решению некоторых актуальных проблем физики микромира может быть найден при изучении макрокосмоса, и наоборот, отдельные яркие фрагменты физической картины макрокосмоса основаны на закономерностях, обнаруженных при исследовании микромира.

2. УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ — ГЛАВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛЬНОГО МИРА (СОВРЕМЕННЫЙ УСКОРИТЕЛЬНЫЙ АРСЕНАЛ)

Ускорители — это источники ускоренных частиц (электронов, протонов и т. д.), которые «просвечивают» (как свет в микроскопе) физическую материю, атомные ядра или элементарные частицы, вызывая сложные взаимодействия, зависящие от типа ускоренных частиц, мшени, энергии ускоренных частиц и других условий эксперимента.

Помимо ускорителей источником частиц (в том числе высоких энергий) может служить поток частиц, рожденных в космосе, — так

называемые космические лучи. Однако интенсивность «космических» источников мала и быстро уменьшается с ростом энергии.

В настоящее время ускорители применяются для решения практических задач (материаловедение, стерилизация медицинской техники, дефектоскопия, субъядерные фильтры, терапия опухолей, сохранение сельскохозяйственных продуктов, экологические задачи и т. д.), но самые мощные и дорогостоящие ускорители создаются для научных целей. Длина магнитной дорожки ускорителя (по которой, двигаясь, ускоряются элементарные частицы) сегодня достигает уже многих километров, а стоимость ускорителя с необходимой исследовательской аппаратурой исчисляется многими миллионами рублей. Сооружение ускорительной установки для фундаментальных исследований является событием, требующим привлечения больших материальных и людских ресурсов, а также разработки новых приборов и технологий. Не один год обсуждается возможность сооружения VBA — «очень большого ускорителя» — одного для всего физического содружества.

Однако для научных нужд требуются различные ускорительные комплексы — для ускорения электронов, протонов, тяжелых ионов, со встречными пучками и неподвижной мишенью. Поэтому в настоящее время международное сообщество физиков идет по пути согласования типов ускорителей, которые должны быть построены в различных регионах, участия различных стран в разработке и сооружении ускорителей и особенно исследовательской аппаратуры — детекторов.

Еще раз подчеркнем: с помощью ускорителей при соударении скоренных частиц и частиц мишени осуществляются процессы при достаточно высоких энергиях, которые могут быть достигнуты человеком в земных условиях. Заряженные частицы ускоряются в вакуумной камере. Для формирования траектории частиц создаются многокилометровые кольцевые магнитные системы, и ускорение частиц осуществляется высокочастотным электрическим полем.

Вследствие установленной Альбертом Эйнштейном эквивалентности массы и энергии максимальная энергия процесса, происходящего при столкновении частиц, определяет и максимальную массу материального объекта, который может быть порожден в результате этого процесса. Поэтому уже в самом проекте ускорителя (предельная энергия, встречные пучки или неподвижная мишень, интенсивность пучков) закладываются ограничения на параметры частиц, которые могут быть на нем изучены.

Говоря о развитии физики и техники ускорителей заряженных частиц, хочется отметить выдающийся вклад отечественных специалистов: физиков, ускорительщиков, инженеров, и среди них Г. И. Будкера, В. И. Векслера, А. И. Алиханова, А. И. Алиханьяна, А. Л. Минца, А. Н. Скринского, А. П. Комара, А. А. Логунова, А. М. Балдина, М. А. Маркова, Г. Н. Флерова, М. Г. Мещерякова,

В. П. Джелеева, В. П. Саранцева и др. (С одной стороны, трудно избежать упоминаний имен при изложении материала, с другой стороны, многие фамилии крупных ученых невольно остаются за строкой. Приношу извинения людям и памяти людей, с которыми так получилось.)

В приведенных ниже таблицах и рисунках даны характеристики параметров крупнейших ускорителей мира (действующих и строящихся) и показаны возможности современного ускорительного арсенала.

Рис. 2 дает сравнение шкалы энергий с предполагаемой картиной возникновения единых теорий. Конечно, такая картинка носит гипотетический характер.

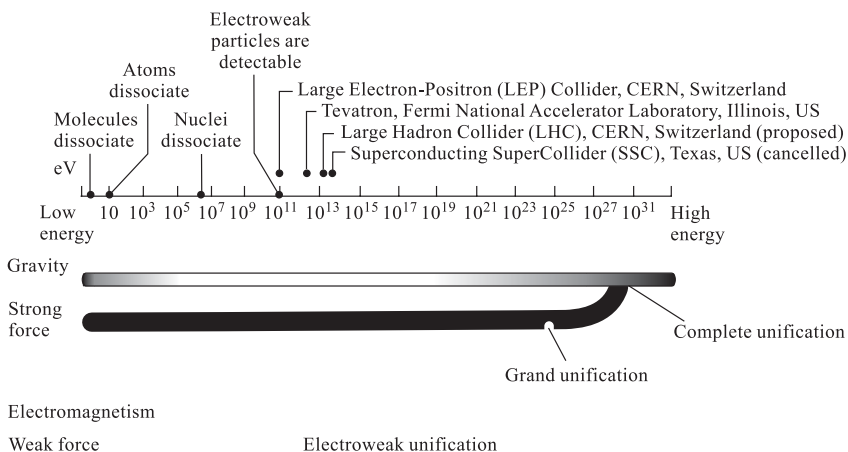


Рис. 2.

Сегодня мы располагаем энергиями ЛЕР и тэватрона (10^{11} – 10^{12} эВ) и уже достигли объединения электромагнитных и слабых сил.

В районе 10^{24} эВ предсказывается великое объединение, а в области 10^{28} эВ — полное объединение всех существующих сил природы.

На рис. 3 представлен график, показывающий связь достигнутых на ускорителях рекордных энергий с календарным временем. Следует подчеркнуть, что за прошедшие полвека на глазах одного поколения достигнут гигантский прогресс.

Рис. 4 связывает «календарь» с достижениями ускорительной техники. Ось ординат — это энергетическая шкала, а различные «веточки» и точки отвечают типу ускорителя, благодаря которому эти энергии могут быть достигнуты.

На рис. 5 показаны достижения энергии и светимости — важнейших параметров — наиболее крупных действующих и проектируемых ускорительных машин.

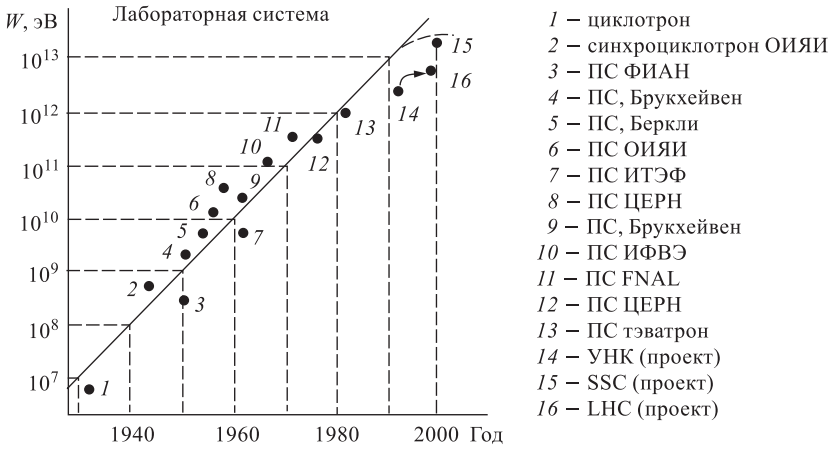


Рис. 3.

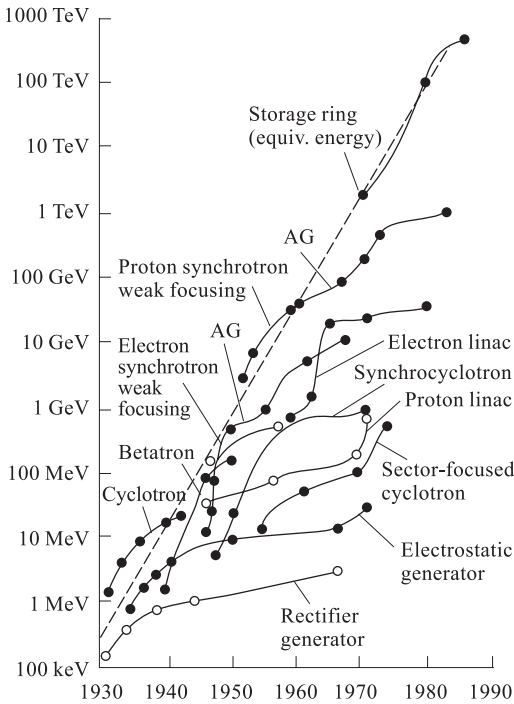


Рис. 4.

Из рис. 6 видны годы начала физических экспериментов на крупнейших ускорителях мира.

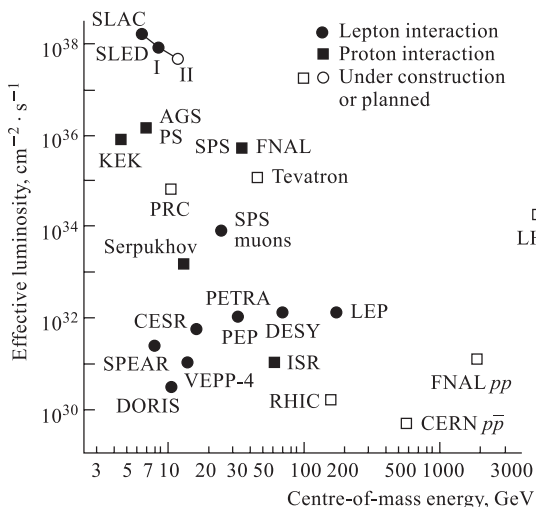


Рис. 5.

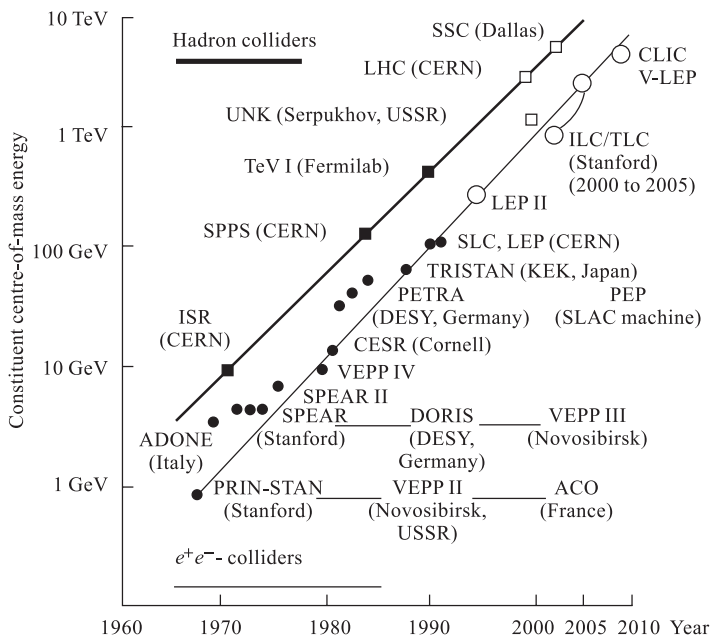


Рис. 6.

На рис. 7 показано, при каких энергиях становятся заметными сечения рождения ряда интенсивно изучаемых сейчас частиц (Z — энергии LEP; J/ψ — энергии BNL и т. д.).

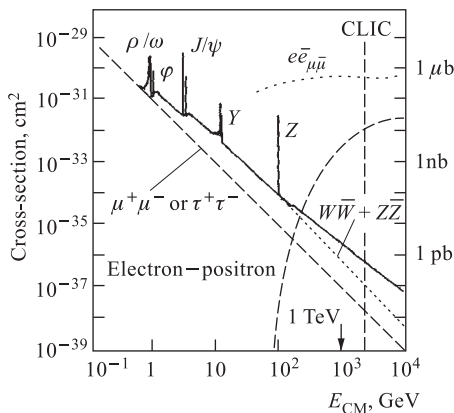


Рис. 7.

Из рис. 8 можно сделать вывод, при каких светимостях работают крупнейшие ускорители мира (какие частицы при этом рождаются и могут быть изучены).

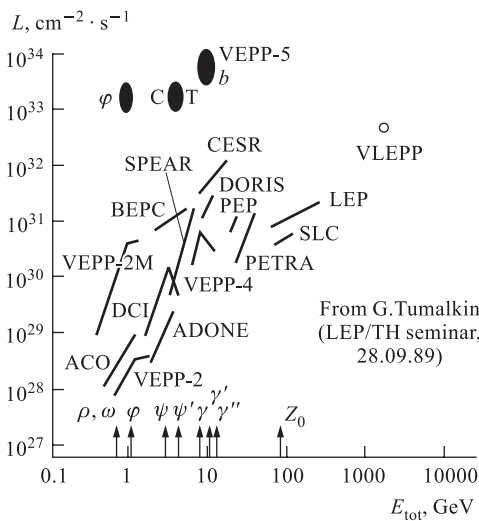


Рис. 8.

Высокие энергии требуют (к сожалению) и большого размера кольца ускорителя (если не появятся принципиально новые методы ускорения) (см. рис. 9).

В табл. 2 приведены параметры проектируемых линейных коллайдеров.

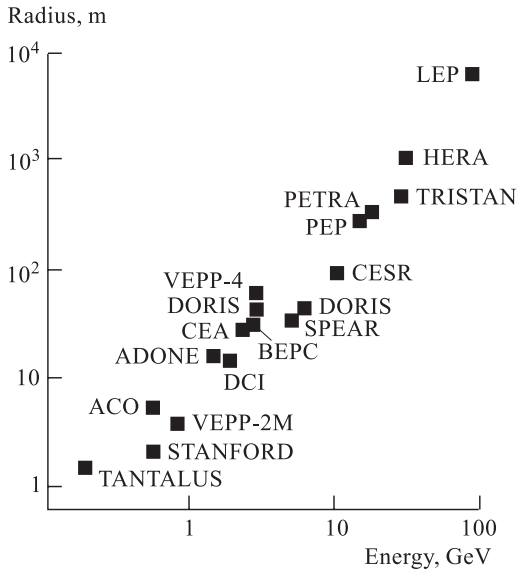


Рис. 9.

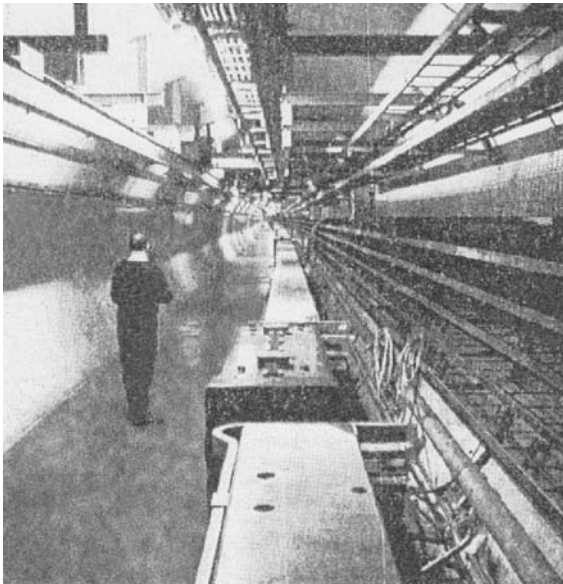


Рис. 10. Тоннель LEP-коллайдера

Таблица 2.

Parameter	TESLA	SBLC	JLC(S)	JLC(C)	JLC(X)	NLC	VLEPP	CLIC
Initial energy (CM), GeV	500	500	500	500	500	500	500	500
RF frequency of main linac, GHz	1.3	3	2.8	5.7	11.4	11.4	14	30
Nominal luminosity, $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	2.6	2.2	5.2	7.3	5.1	5.3	12.3	0.7-3.4
Actual luminosity, $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	6.1	3.75	4.3	6.1	5.2	7.1	9.3	1.07-4.8
Linac repetition rate, Hz	10	50	50	100	150	180	300	2530-1210
No. of particles/bunch at IP (10^{10})	5.15	2.9	1.44	1.0	0.63	0.65	20	0.8
No. of bunch/pulse	800	125	50	72	85	90	1	1-10
Bunch separation, ns	1000	16.0	5.6	2.8	1.4	1.4	—	0.67
Beam power/beam, MW	16.5	7.26	1.3	2.9	3.2	4.2	2.4	0.8-3.9
Damping ring energy, GeV	4.0	3.15	2.0	2.0	2.0	2.0	3.0	2.15
Main linac gradient, unloaded/loaded, MV/m	25/25	21/17	31/—	40/32	73/58	50/37	100/91	80/78
Total two linac length, km	29	33	22.1	18.8	10.4	15.6	7	8.8
Total beam delivery length, km	3	3	3.6	3.6	3.6	4.4	3	2.4
$\gamma E_x/\gamma E_y$, mrad $\cdot 10^{-8}$	2000/100	1000/50	330/4.8	330/4.8	330/4.8	500/5	2000/7.5	300/15
β_x/β_y , mm	25/2	22/0.8	10/0.1	10/0.1	10/0.1	10/0.1	100/0.1	10/0.18
$d\sigma$ before pinch, nm	1000/64	670/28	260/3.0	260/3.0	260/3.0	320/3.2	2000/4	247/7.4
σ , μm	1000	500	120	120	90	100	750	200
Crossing angle at IP, mrad	0	3	6.4	6.0	6.1	20	6	1
Disruptions D_x/D_y	0.55/8.7	0.36/8.5	0.29/25	0.20/18	0.096/8.3	0.07/7.3	0.4/215	0.29/9.8
H_D	2.3	1.8	1.6	1.4	1.4	1.34	2.0	1.42
Upsilonon sub-zero	0.02	0.037	0.20	0.14	0.12	0.089	0.059	0.07
Upsilonon effective	0.03	0.042	0.22	0.144	0.12	0.090	0.074	0.075
$\delta\beta$, %	3.3	3.2	12.7	6.5	3.5	2.4	13.3	3.6
n_γ (no. of γ 's per e)	2.7	1.9	2.2	1.5	0.94	0.8	5.0	1.35
N_{pairs} ($p_\gamma = 20 \text{ MeV}/c$, $\theta_{\text{min}} = 0.15$)	19.0	8.8	31.6	10.3	2.9	2.0	1700	3.0
$N_{\text{hadrons/crossing}}$	0.17	0.10	0.98	0.23	0.05	0.03	45.9	0.05
$N_{\text{jets}} \cdot 10^{-2} \text{ s}$ ($p_\gamma = 3.2 \text{ GeV}/c$)	0.16	0.14	3.4	0.66	0.14	0.08	56.4	0.10

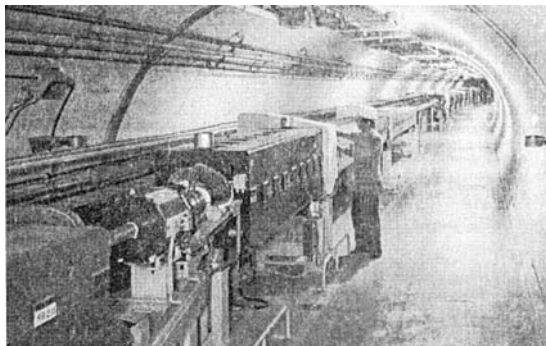


Рис. 11. Тоннель SPS (SuperProton Synchrotron)

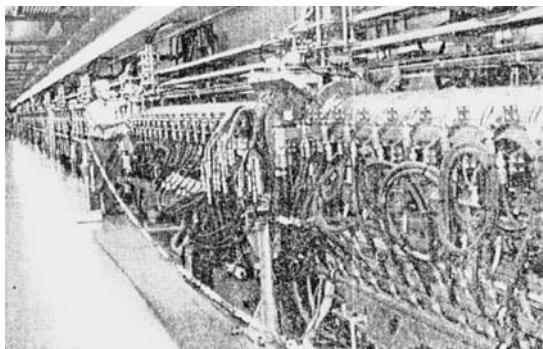


Рис. 12. Linac — инжектор для LEP (LIL)

3. МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО УЧЕНЫХ — ФАКТОР СТАБИЛЬНОСТИ НАУЧНЫХ ПРОЕКТОВ. ОИЯИ — ПРИМЕР СОТРУДНИЧЕСТВА

Объединение усилий ученых в области физики высоких энергий — это не только дань традиции сотрудничества физиков, но и настоятельная необходимость, примета времени. Сегодня уже все три составляющие опыта по физике высоких энергий (ускоритель, детектор, электронно-вычислительная машина) — это уникальные дорогостоящие установки. Чтобы не отстать от стремительного прогресса в этой области науки, сегодня есть только один способ — объединять усилия.

От ускорителей следующего поколения физика ждет решения ряда фундаментальных проблем, в том числе:

- объединения существующих в природе взаимодействий (электро-слабого, сильного и гравитационного);
- создания систематики элементарных частиц (т. е. в конечном счете раскрытия их структуры).

Достижение этих результатов окупило бы колоссальные интеллектуальные и материальные затраты, на которые общество пошло ради них. Была бы построена (на данном витке познания) картина микромира, это послужило бы гигантским толчком научно-технического прогресса. Достаточно вспомнить последствия объединения электрических и магнитных сил в электромагнитное взаимодействие, расщепление атома и ядра. . . Следует подчеркнуть, что кроме своей генеральной задачи, какой является проблема формирования наших представлений о микромире, физика высоких энергий таит в себе богатые возможности воздействия на технический прогресс как благодаря открытиям в рамках физики, так и благодаря ее влиянию на другие науки. Эту совокупность аспектов рассматриваемой проблемы можно условно отнести к прямым эффектам от фундаментальных исследований в физике элементарных частиц. Но следует учесть, что кроме этого существуют эффекты и косвенного влияния этих исследований на технический прогресс, которым весьма трудно дать экономическую оценку, в то время как польза от них чрезвычайно велика. Дело в том, что развитие фундаментальной физики сопровождается появлением принципиально новой очень современной физической аппаратуры, принципиально новой техники и методики, которые находят применение во многих областях науки и техники.

Не будет преувеличением ожидать, что раскрытие тайн микромира, углубление его связи с космологией, решение практических задач в рамках широкого международного сотрудничества покажут, какие сложные проблемы можно решать объединенными усилиями ученых.

Роль международного сотрудничества ученых была еще раз понята в 1993 г. Печальный опыт закрытия SSC — проекта века в Далласе, — проанализированный группой американских специалистов во главе с С. Дреллом, показывает, что международность научных проектов является мощным стабилизирующим фактором. SSC, несмотря на широкое сотрудничество, создавался в рамках национальной программы. «Нет национальной науки — как нет национальной таблицы умножения. Если наука национальна — это уже не наука», — это чеховское высказывание процитировали специалисты в своем отчете о закрытии SSC.

В историю сотрудничества между физиками-ядерщиками Востока и Запада вписано немало ярких страниц, демонстрирующих его высокую эффективность. В этом отношении показательными являются примеры ЦЕРН и ОИЯИ, сотрудничество в рамках этих организаций и между ними.

ОИЯИ и ЦЕРН — Европейский центр ядерных исследований* имеют тесные научные связи. Эти научные центры чрезвычайно пло-

* В сентябре 2004 г. ЦЕРН исполняется 50 лет.

дотворно сотрудничают между собой с начала своего существования. Хорошим примером является участие Объединенного института в перспективной научной программе по реализации проекта большого адронного коллайдера (ЛНС), создаваемого в ЦЕРН. Помимо этого, несомненной заслугой ОИЯИ и ЦЕРН является то, что всей своей деятельностью, начавшейся в первое послевоенное десятилетие, они способствовали делу сближения народов, объединению усилий ученых десятков стран на ниве «мирного атома».

Приведу в заключение лишь очень краткую «визитную карточку» нашего Института.

За четыре десятилетия своей деятельности Объединенный институт* стал крупнейшим многоплановым центром фундаментальных ядерных исследований, объединяющим усилия ученых в их стремлении понять, как устроен окружающий нас мир.

Членами Института в настоящее время являются 18 государств: Азербайджан, Армения, Белоруссия, Болгария, Вьетнам, Грузия, Казахстан, КНДР, Куба, Молдавия, Монголия, Польша, Россия, Румыния, Словакия, Узбекистан, Украина и Чехия.

В Институте работают около 6000 человек (вместе с обслуживающими подразделениями), из них более 1000 — научные сотрудники, около 2000 — инженерно-технический персонал. В составе Института 7 крупных лабораторий, каждая из которых по масштабам и объему проводимых исследований сопоставима с большим институтом.

ОИЯИ располагает уникальными в своем классе источниками излучения частиц и ядер в широком диапазоне энергий. Помимо синхроциклотрона и синхрофазотрона здесь построены и действуют ускорители тяжелых ионов У-200 и У-400. В 1993 г. получен выведенный пучок ионов из циклотрона У-400М. В 1994 г. введен в действие сверхпроводящий ускоритель релятивистских ядер нуклотрон, ведутся исследования с помощью импульсных реакторов на быстрых нейтронах ИБР-30 (с 1969 г.) и ИБР-2 (с 1984 г.).

Перспектива фундаментальных исследований связана с реализуемой в Институте программой создания современных базовых установок. В 1994 г. началась реализация проекта ИРЕН, направленного на создание высокопоточного импульсного источника резонансных нейтронов. Разрабатываются проект с-тау-фабрики — электрон-позитронного коллайдера с универсальным детектором и проект специализированного источника синхротронного излучения.

Можно было бы много говорить о научных направлениях ОИЯИ и его широком сотрудничестве, но вы, наверное, обратили внимание, что среди имен, упомянутых мною в далеко не полном списке ученых,

*ОИЯИ (как международная организация) на полтора года младше ЦЕРН (день подписания Соглашения об образовании ОИЯИ 26 марта 1956 г.). — *Примеч. сост.*

внесших значительный вклад в развитие физики высоких энергий, было немало имен дубненских физиков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перенесемся теперь мысленно в 1928 г. . . Профессор Макс Борн, встречая группу посетителей Геттингенского университета, говорил: «Физика, насколько мы ее понимаем, закончится через 6 месяцев». Надо сказать, что у Борна была к тому времени очень высокая репутация как физика-теоретика и ему никак нельзя было отказать в проницательности. Именно он разъяснил Гейзенбергу, открывшему матричную форму квантовой механики, что тот имеет дело не с чем иным, как с матрицами. Ему же принадлежала вероятностная трактовка квантово-механической волновой функции.

Иллюзия «конца физики» возникла у Борна не случайно. Незадолго до этого Дирак открыл свое замечательное уравнение, которое, как полагал автор, описывает сразу и электрон и протон. Поскольку в то время только эти частицы и были известны и поскольку уравнение Дирака в принципе решало проблему согласования друг с другом требований квантовой механики и теории относительности, Борну показалось, что физика как наука себя исчерпала.

С тех пор прошло не 6 месяцев, а почти 70 лет. Физика не только не закончилась, а, наоборот, все эти годы неуклонно, иногда непредсказуемо, развивалась. Явным лидером ее стала *физика высоких энергий*. Именно в этот период времени возникли и усовершенствовались ускорители, произошла настоящая революция в развитии физических измерительных средств. В итоге совместными усилиями ускорительщиков, экспериментаторов и теоретиков было открыто множество важных и глубоких закономерностей микромира. И прав был Паскаль, когда сказал: «Скорее воображение устанет постигать, чем Природа поставлять». Вот этим я и хотел бы закончить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Salam A.* // Particle Physics. 1987. IC/87/402.
2. *Фейнман Р.* КЭД — странная теория света и вещества. М.: Наука, 1988. (Библиотечка «Квант», вып. 66).
3. *Hawking S. W.* Brief History of Time. Bantom Books, 1988.
4. *Ожунь Л. Б.* Лептоны и кварки. М.: Наука, 1981.
5. *Rubbia C.* The «Future» in High Energy Physics: CERN-EP/88-130. Geneva, 1988.
6. *Vjorken J. D.* Topics in B-Physics // Fermilab-Conf-88-134-T.
7. *Кадышевский В. Г.* Лекция на Междунар. школе молодых ученых по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1988.