

# РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И УСКОРИТЕЛЕЙ

А.Н.Сисакян

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

## Содержание

1. Новые тенденции в физике элементарных частиц.
  - 1а. Что такое физика высоких энергий и немного истории.
  - 1б. Теоретические представления о структуре частиц и взаимодействиях.
  - 1в. Некоторые экспериментальные достижения последних лет.
  - 1г. Математический взгляд на современную физику высоких энергий и новые задачи.
  - 1д. Ранняя космология.
2. Ускорители заряженных частиц — главный инструмент исследования материального мира (современный ускорительный арсенал).
3. Международное сотрудничество ученых — фактор стабильности научных проектов. ОИЯИ — пример сотрудничества.
4. Заключение.

## 1. Новые тенденции в физике элементарных частиц

### 1. а. Что такое физика высоких энергий и немного истории

Физика элементарных частиц (или, что сегодня тождественно, физика высоких энергий) — это наука, изучающая природу на очень малых расстояниях с целью определить и изучить 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 т.н. 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 (открытие волновых свойств материи, 1924 год, французский физик Луи де Бройль).

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  $\sim 1$  эВ— $1$  кэВ;
- атомная физика, антиматерия —  $10^{-11}$  см, энергии  $\sim 10$  МэВ;
- ядерная физика —  $10^{-13}$  см, энергии от 100 МэВ до 1 ГэВ;
- физика высоких энергий, сильные взаимодействия, т.н. адронная физика —  $10^{-13}$ — $10^{-15}$  см, энергии  $\sim 10$ — $100$  ГэВ;
- физика “сверхвысоких” энергий, процессы на сверхмалых расстояниях, меньших  $10^{-15}$  см, энергии больше 100 ГэВ.

Сегодня исследователям доступны энергии порядка 1 ТэВ.

Поражает тот факт, что за последнее столетие был достигнут поистине гигантский прогресс. Ядерная физика начала свой отсчет за несколько лет до начала XX века: ровно сто лет назад, в 1896 году, 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 в 1903 году, создателя планетарной модели атома (1911); французских ученых Пьера и Марию Кюри, внесших основополагающий вклад в исследования радиоактивности; первооткрывателя радиоактивности французского физика Антуана Анри Беккереля.

В 1897 году открыт электрон (английский ученый Джозеф Джон Томпсон), т.е. была установлена одна из важнейших составляющих атома. В 1932 году был открыт нейтрон (английский физик Джеймс Чедвик), т.е. была определена одна из составляющих атомного ядра. Интенсивные исследования в области физики высоких энергий начались в 50-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<sup>1</sup>. В последние годы наблюдается взаимное проникновение между физикой на малых расстояниях и изучением свойств макроструктур Вселенной. Это — проявление единства физики высоких энергий и астрофизики.

<sup>1</sup> 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.

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.

## 16. 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 конститuentов, которые мы называем кварками. Эти кварки являются постоянно "запертыми" (конфайнмент) благодаря сильным взаимодействиям.

Сильные взаимодействия<sup>2</sup> управляются фундаментальной теорией кварков и глюонов — квантовой хромодинамикой (QCD). В этой теории глюоны являются носителями сильных взаимодействий, которые удерживают кварк в протонах и нейтронах. Эта теория эффективно может быть использована для вычисления 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 (Глешоу, Вайнберг, Салам). "Кирпичиками мироздания" в электрослабом секторе выступают лептоны. Носителями же электрослабых взаимодействий являются два промежуточных бозона  $W$ ,  $Z$  и фотон ( $\gamma$ ).

Единая электрослабая теория и QCD (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 вы знаете, 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.

<sup>2</sup> Сильновзаимодействующие частицы носят название адроны.

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

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

Итак, на сегодня мы знаем, что в нашем 4-мерном пространстве-времени, наполненном условно-точечными с точностью  $10^{-16}$  см фермионами<sup>3</sup> (лептонами и кварками), действует три типа взаимодействий, обусловленных специальными носителями: **W-и Z-бозонами**,  $\gamma$ - и гипотетическими гравитонами.

### 1в. Некоторые экспериментальные достижения последних лет

Основной задачей большинства экспериментов последних нескольких лет являлась проведение традиционной проверки стандартной модели на различных ускорителях, но, в первую очередь, на LEP (CERN) 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:

ПОКОЛЕНИЯ	фермионы				
		кварки		лептоны	
	I	u	d	e	$\nu$
	II	c	s	$\mu$	$\nu_\mu$
III	t	b	$\tau$	$\nu_\tau(?)$	

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  $200 \text{ ГэВ}$ ) была разумно 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 обработку 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):

<sup>3</sup> 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.

$$I \sim \frac{n}{\text{сек} \times \text{см}^2}$$

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" (Ф-фабрика, Ст-фабрика, В-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 его массы.

Несколько ранее (начало 90-х годов) на ускорительном комплексе LEP было установлено, что на нынешнем витке познания мы имеем дело с тремя поколениями частиц. Была измерена с высокой точностью масса и полная ширина Z<sup>0</sup>-бозона, что позволило установить количество нейтринных каналов распада Z<sup>0</sup> 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<sup>-16</sup> 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-, d-кварков и электронов. Электронное нейтрино ν<sub>e</sub> не входит в состав атомов, но оно участвует в протон-протонном цикле ядерных реакций, идущих в недрах Солнца и обеспечивающих его "горение".

Фермионы II и III поколений являются утяжеленными аналогами u, d, e и ν<sub>e</sub> 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 году 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=2/3×e для кварков u, c, t и Q=-1/3×e для d, s и b. "Бесцветные" лептоны либо электрически нейтральны (все нейтрино), либо имеют заряд Q=-e для e, μ и τ.

Последние 2-3 года внесли много нового в понимание нуклонной структурной функции при очень больших переданных импульсах q<sup>2</sup> (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 Корнеле и др.

В экспериментальных программах ЦЕРН, BNL и Дубны 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 экспериментального арсенала современной физики элементарных частиц.

### 1г. 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 перенормализации) 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 (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 (квантовая хромодинамика) на больших расстояниях”, как обычно называют теорию кварк-глюонных взаимодействий в этой области, — предмет интенсивных исследований как в плане теоретическом, так и 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 сомножители 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. Мы их знаем поименно. Это  $\gamma$ ,  $W^\pm$  и  $Z^0$ . Фотон  $\gamma$ , подобно глюонам, является безмассовой частицей, тогда как векторные бозоны  $W$ ,  $Z^0$  имеют массы:

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

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

$$5.4 \text{ ГэВ} \leq M_{H^0} \leq 1000 \text{ ГэВ}. \quad (4)$$

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

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 “электро-слабое 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 проявление 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 эффективным 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 ответить 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 (1) описании бозонов и фермионов. В рамках СУСИ каждой частице сопоставляется суперчастица, спин которой отличается на  $1/2$ . Так, фотону,  $\gamma$ ,  $W$  и  $Z$ -бозонам, обладающим спином 1, соответствуют дираковские суперчастицы “фотино”  $\gamma$ , “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 доброжелательности и 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:

$$\begin{array}{lll} M_{\tilde{u}} \sim 25 \text{ ГэВ}, & M_{\tilde{t}} \sim 22 \text{ ГэВ}, & M_{\tilde{q}} \sim 26 \text{ ГэВ}, \\ M_{\tilde{e}} \sim 60 \text{ ГэВ}, & M_{\tilde{W}} \sim 28 \text{ ГэВ}, & M_{\tilde{Z}} \sim 30 \text{ ГэВ}. \end{array} \quad (6)$$

Как теоретическая схема СУСИ удовлетворяет самым высоким эстетическим требованиям. Те же 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 “конституентов” нет).

Еще одна загадка в физике частиц относится к вопросам типа проблемы асимметрии материи-антиматерии во Вселенной. Есть два условия, которые могут объяснить это — нестабильность барионов - сильно взаимодействующих частиц (предмет исследования больших неускорительных экспериментов) и CP-нарушения (они будут исследованы в следующей генерации экспериментов с интенсивными K-мезонными пучками и на новых установках, наблюдающих CP-нарушения в распадах B-мезонов). Существует также спекулятивная 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 прошлые несколько лет дали точное подтверждение стандартной модели. Однако существует много загадок, которые дают теория и экспериментальные противоречия; усилия направлены сегодня на выход из этого. Направления "выхода" неоднозначны, и, не претендуя на полноту, мы рассмотрели лишь некоторые (будем надеяться, что основные) тенденции.

Теперь вернемся к самому началу...

## 1д. Ранняя космология

По современным представлениям, основанным на т.н. 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 вы знаете лучше, чем кто бы то ни было, 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 световых 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 *ф.в.э.* вносятся ценные эвристические идеи и ограничения. Это и имеет в виду А. 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  $\text{He}^4$  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 избытка 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  $\Lambda$ . Для самосогласованного описания ранней Вселенной введение этого параметра сейчас признается необходимым. С другой стороны, по астрономическим данным, в современную эпоху величина  $\Lambda$  очень мала ( $|\Lambda| \sim 10^{-56} \text{ см}^{-2}$ ), если вообще не равна нулю.

В квантовой теории поля, не использующей суперсимметрию, постоянная  $\Lambda$  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  $\Lambda$  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 года вспышки сверхновой SN1987A в Большом Магеллановом облаке.

Итак, ключ к решению некоторых актуальных проблем физики микромира может быть найден при изучении макрокосма, 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, мишени, энергии ускоренных частиц и других условий эксперимента.

Помимо ускорителей источником частиц (в т.ч. высоких энергий) может служить поток 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 дел (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 их стоимость 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 сообщества.

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 ускоренных частиц и частиц мишени осуществляются наиболее высокоэнергетические процессы, которые могут быть осуществлены человеком в земных условиях. Заряженные частицы ускоряются в вакуумной камере, для формирования траектории частиц создаются многокилометровые кольцевые магнитные системы, 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) закладывается предел 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, братьев Алиханьян, А.Л. Минца, А.Н. Скринского, Е.Т. Комара, А.А. Логунова, А.М. Балдина, М.А. Маркова, Г.Н. Флерова, М.Г. Мещерякова, В.П. Желепова, В.П. Саранцева и других. (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.

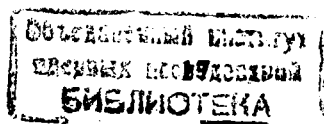
### 3. Международное сотрудничество ученых — фактор стабильности научных проектов

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 т.ч.:

- ◇ объединения существующих в природе взаимодействий (электрослабого, 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 макромира, 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 воздействовать 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 преувеличенным ожидать, что раскрытие тайн микромира, углубления его связи с космологией, решение ряда практических задач в рамках широкомасштабного международного сотрудничества покажут, какие сложные проблемы могут решать объединенные усилия ученых.

Роль международного сотрудничества ученых была еще раз понята в 1993 году. Печальный опыт закрытия SSC — проекта века в Далласе — проанализированный группой американских специалистов во главе со С. Дреллом, показывает, что международность научных проектов является мощным стабилизирующим фактором. SSC, несмотря на широкие коллаборации, 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, сотрудничества в рамках этих организаций и между ними.

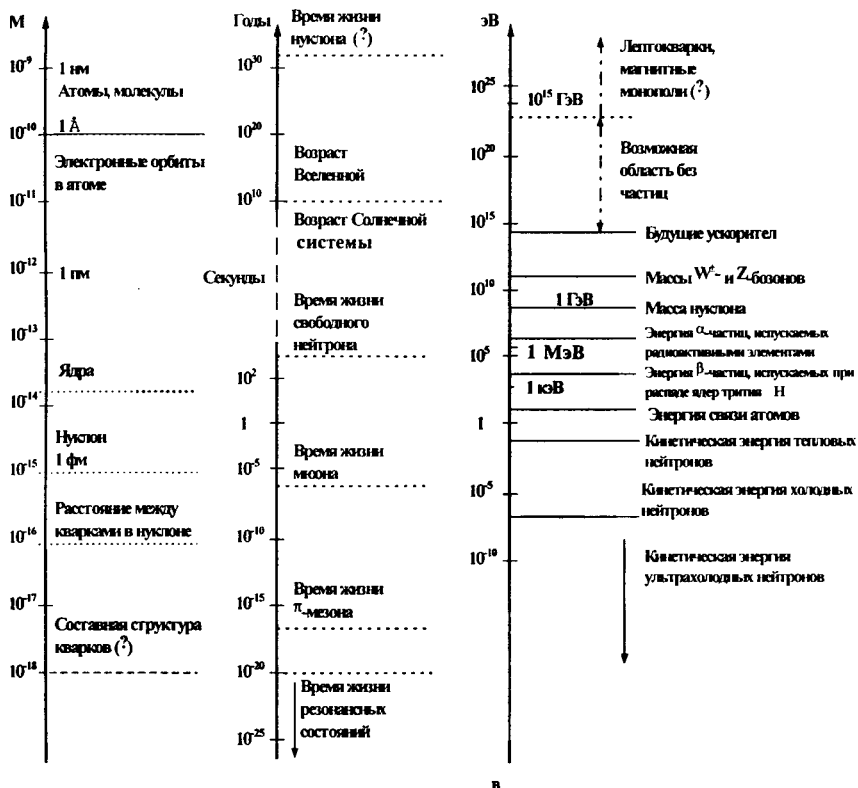
Позволю себе привести цитату из поздравления коллективу ОИЯИ, присланного в день 40-летия Института В.С. Черномырдиным:

“Прочные узы связывают ОИЯИ с ЦЕРН — Европейской организацией ядерных исследований, которая недавно тоже отметила свое 40-летие. Оба центра чрезвычайно интенсивно и плодотворно сотрудничают между собой с самого начала своего существования. Последний убедительный пример этому — участие Объединенного института в перспективной и многообещающей программе по реализации проекта гигантского ускорителя нового поколения, создаваемого в ЦЕРН.

Помимо замечательных научных открытий и разработок, исключительной 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 поприще “мирного атома”.

Мне представляется, что было бы весьма справедливо, если бы обе международные научные организации — ОИЯИ и ЦЕРН — были выдвинуты на соискание Нобелевской премии мира 1997 года. Как глава правительства России, являющейся страной-участницей ОИЯИ и страной наблюдателем в ЦЕРН, я готов поддержать такую инициативу.”

Добавить к этим словам что-либо достаточно трудно.



**Рисунок 1.** Масштабы расстояний (а), времени (б) и энергий (в) в физике ядер и частиц.

Это очень интересная таблица, где приведены характерные масштабы расстояний, времени, энергии.

Только ось (в) (энергии) следовало бы перевернуть, т.к. все большим энергиям соответствуют все меньшие характерные времена 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)

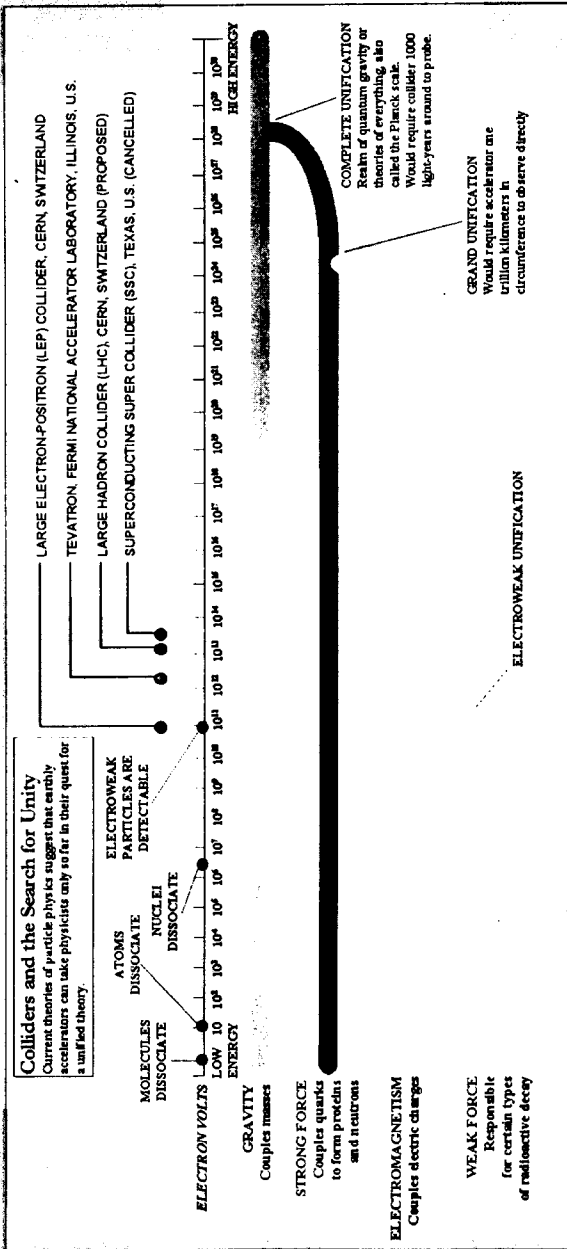
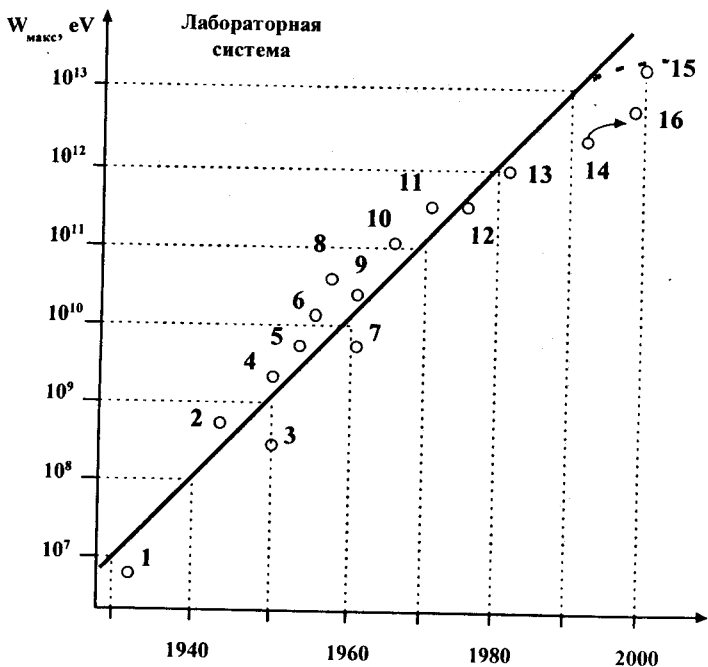


Рисунок 2. Этот рисунок дает сравнение шкалы энергий с предполагаемой картиной возникновения единичных теорий. Конечно, такая картинка носит гипотетический характер.

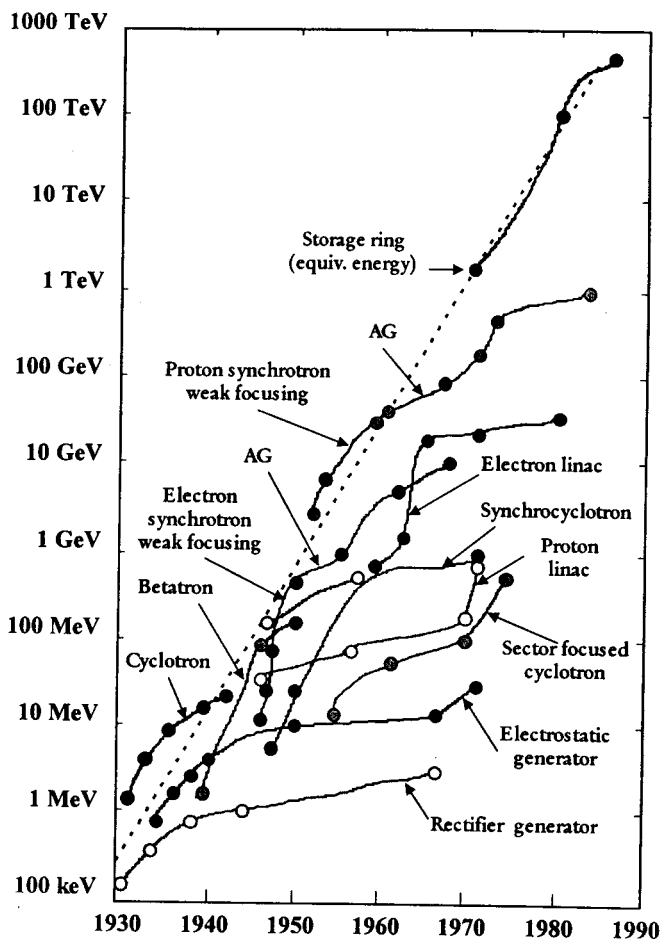
Сегодня мы располагаем энергиями ЛЕР и Теватрон ( $10^{11}$ - $10^{13}$ ) и уже достигли объединения электромагнитных и слабых сил. В районе  $10^{16}$  эВ предсказывается Великое объединение, а  $10^{24}$  эВ — полное объединение всех существующих сил природы.



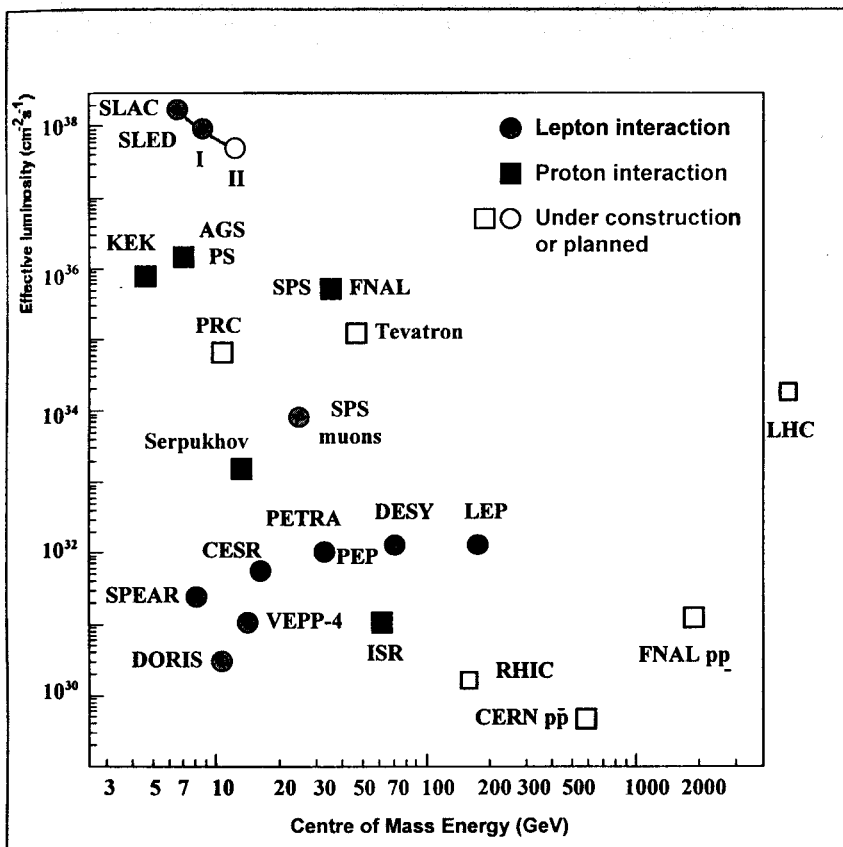


- |                           |                  |
|---------------------------|------------------|
| 1. ЦИКЛОТРОН              | 9. ПС БРУКХЕЙВЕН |
| 2. СИНХРОЦИКЛОТРОН (ОИЯИ) | 10. ПС ИФВЭ      |
| 3. ПС ФИАН                | 11. ПС ФНАЛ      |
| 4. ПС БРУКХЕЙВЕН          | 12. ПС ЦЕРН      |
| 5. ПС БЕРКЛИ              | 13. ПС ТЕВАТРОН  |
| 6. ПС ОИЯИ                | 14. УНК (ПРОЕКТ) |
| 7. ПС ИТЭФ                | 15. SSC (ПРОЕКТ) |
| 8. ПС ЦЕРН                | 16. LHC (ПРОЕКТ) |

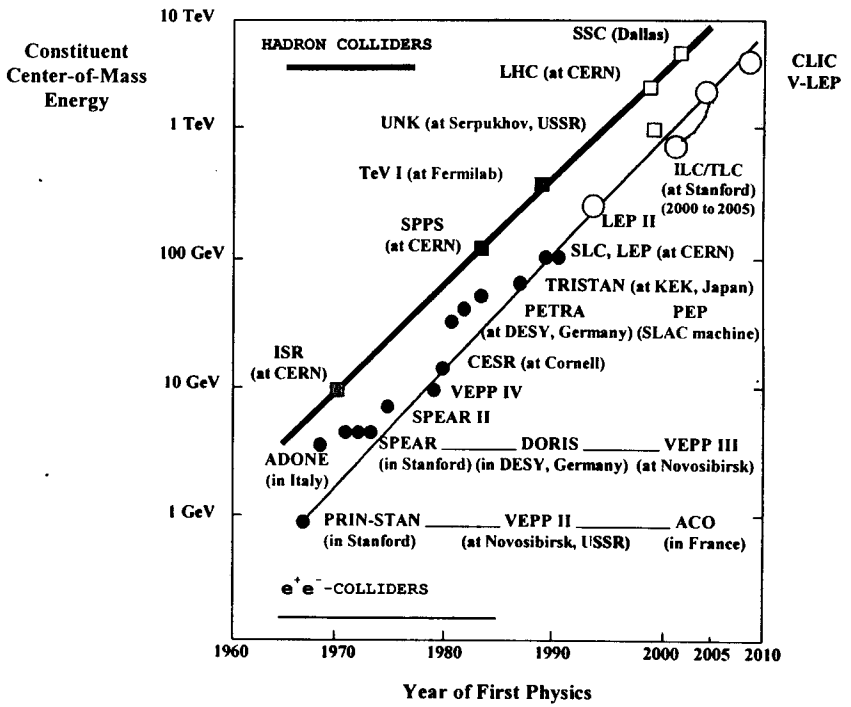
Рисунок 3. Этот график показывает связь достигнутых на ускорителях рекордных энергий с календарным временем. Следует подчеркнуть, что за прошедшие полвека на глазах одного поколения достигнут гигантский прогресс



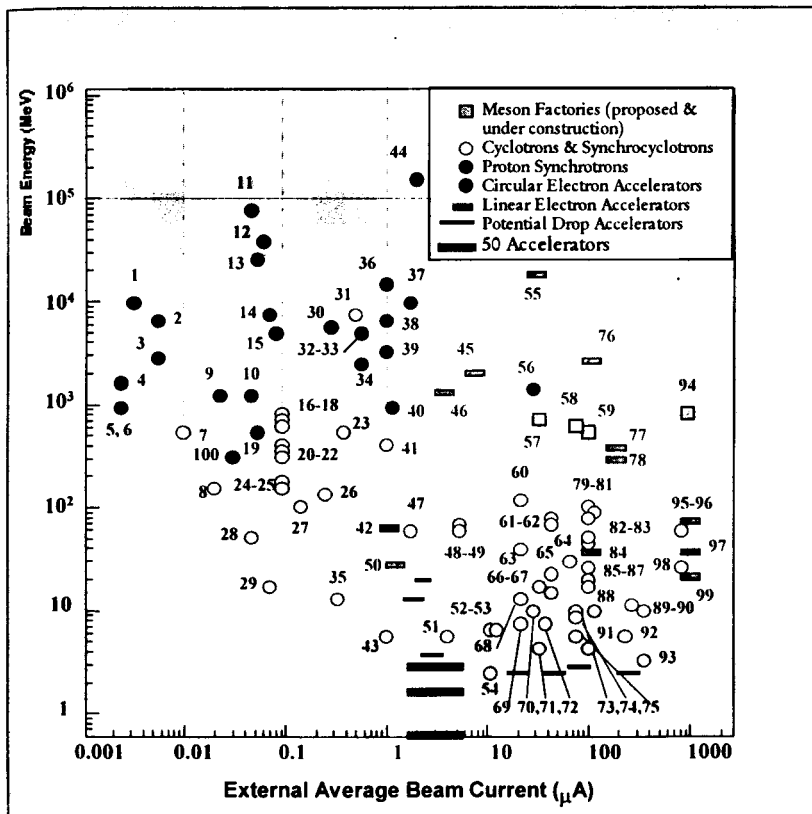
**Рисунок 4.** Этот же рисунок связывает “календарь” с достижениями ускорительной техники. Ось Y — это энергетическая шкала, а различные “веточки” и точки отвечают типу ускорителя, благодаря которому эти энергии могут быть достигнуты



**Рисунок 5.** На этом рисунке показаны достижения энергии и светимости — важнейших параметров — наиболее крупных действующих (и проектируемых) ускорительных машин



**Рисунок 6.** Из этого рисунка видны годы начала физических экспериментов на крупнейших ускорителях мира



1. Dubna	19. Bonn	36. ZGS	53. Canberra	70. MUVEC	87. UPHAR
2. Moscow	20. PGH	37. Cornell	54. Nobel	71. UNNO	88. Argonne
3. Saturne	21. Liverpool	38. Yerevan	55. SLAC	72. CASI	89. Moscow
4. Cal-Tech	22. Columbia	39. Daresoury	56. Tokyo	73. NASA	90. UWASH
5. DELFI	23. Usnas	40. Stanford	57. Columbia	74. Nuffield	91. Oak Rodge
6. Birmingham	24. U Roch	41. Chicago	58. Zurich	75. UTINS	92. Kioto
7. CERN	25. Uppsala	42. Rutherford	59. TRIUMF	76. Stanford	93. UMICH
8. Harvard	26. Orsay	43. Osaka	60. UMO	77. Saclay	94. LASL
9. Frascati	27. MC Gill	44. Weston	61. UC Davis	78. MIT	95. MICH SF
10. LUND	28. Amsterdam	45. Kharkov	62. Orsay	79. USSRND	96. NBS
11. Serpukhov	29. Princeton	46. Orsay	63. Milan	80. RIC	97. RPI
12. AGS	30. Cambridge	47. Winnipeg	64. BNL	81. Berkeley	98. UCOL
13. CERN	31. AEC	48. Grenoble	65. Saclay	82. Alma-Ata	99. EPA
14. NIMROD	32. NINA	49. UCLA	66. ORNL	83. Manwell	100. Harwell
15. DESY	33. Bevatron	50. Phermex	67. Livermore	84. UMICH	
16. Dubna	34. P. Penn	51. Copenhagen	68. UILL	85. Philips Lab	
17. Berkeley	35. DELFI	52. UPITTS	69. Markle	86. Philips	

Рисунок 7. Здесь приведены данные об энергии пучков и среднем токе в пучке для крупных ускорителей

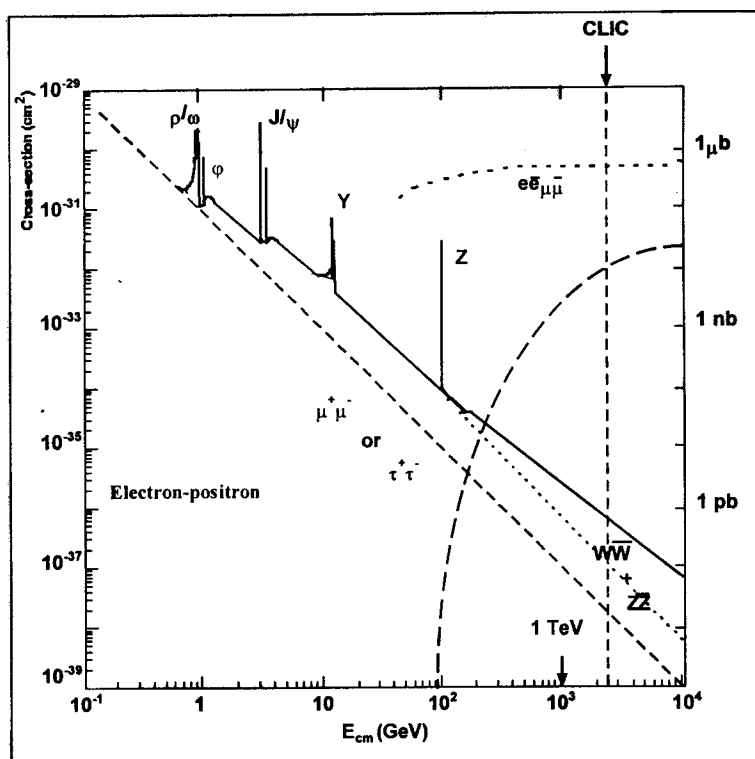
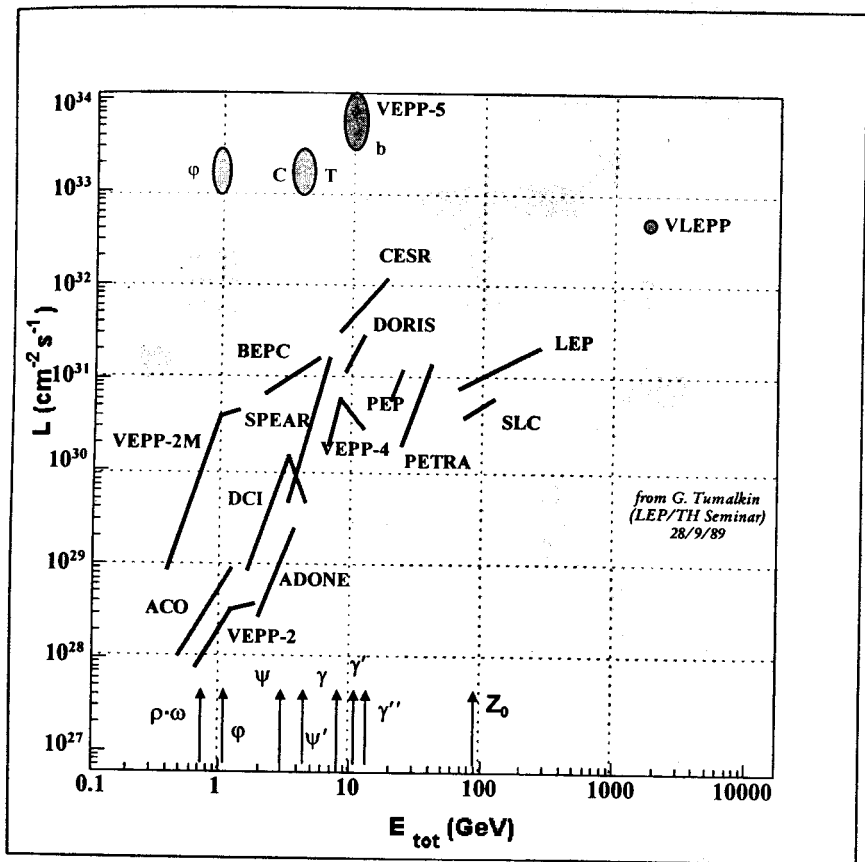


Рисунок 7'. Здесь показано, при каких энергиях становятся заметными сечения рождения ряда интенсивно изучаемых сейчас частиц ( $Z$  — энергии LEP,  $j/\psi$  — энергии BNL и т.д.)



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

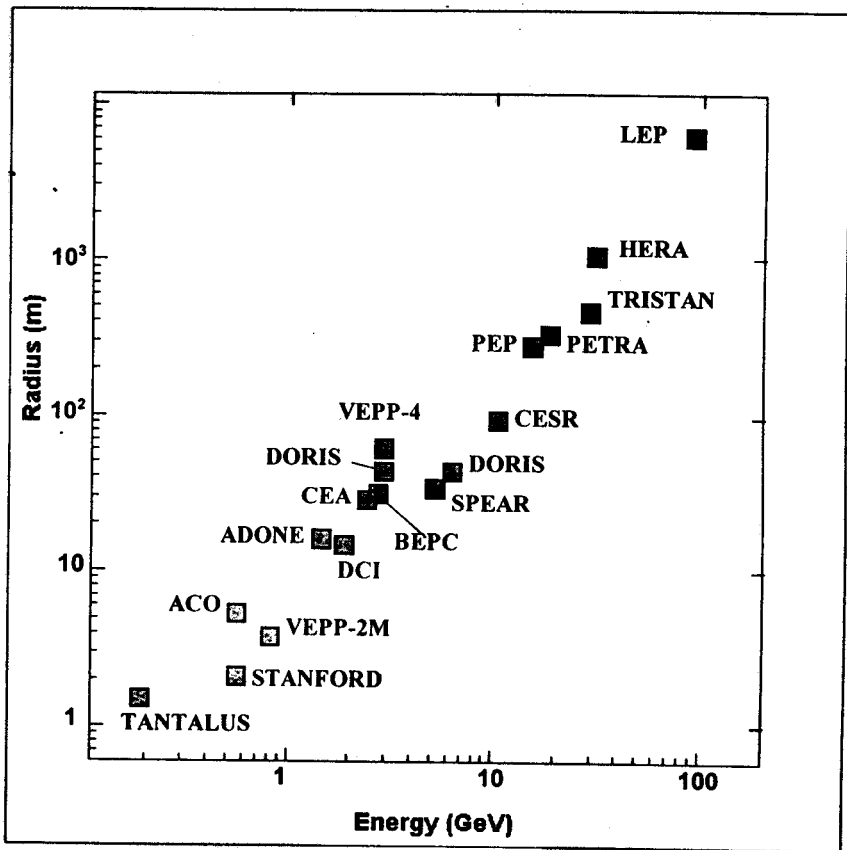


Рисунок 8'. Высокие энергии требуют (к сожалению) и большого размера кольца ускорителя (если не появятся принципиально новые методы ускорения)



	TESLA*	SBLC	JLC(S)	JLC(C)	JLC(X)	NLC	VLEPP	CLIC
Initial energy (c. of m.) (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 ( $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>†</sup>	2.6	2.2	6.2	7.3	6.1	6.3	12.3	7.3-4
Actual Luminosity ( $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) <sup>††</sup>	6.1	3.76	4.3	6.1	6.2	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	.63	.66	20	.8
No. of bunches/pulse	800	126	50	72	86	90	1	1-10
Bunch separation (nsec)	1000	16.0	5.6	2.8	1.4	1.4	—	.57
Beam power/bunch (MW)	16.5	7.26	1.3	2.9	3.2	4.2	2.4	8-3.9
Damping ring energy (GeV)	4.0	3.16	2.0	2.0	2.0	2.0	3.0	2.15
Main linac gradient, unloaded/loaded <sup>†††</sup> (MV/m)	26/26	21/17	31/—	40/32	73/58	60/37	100/81	60/78
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
$\gamma_c/\gamma_s$ (mrad $\cdot 10^{-5}$ )	2000/100	1000/50	330/4.8	330/4.8	330/4.8	600/5	2000/7.5	300/16
$\beta_{\text{eff}}$ (mm)	26/2	22/8	10/1	10/1	10/1	100/1	100/1	10/18
$\sigma_{\text{eff}}$ (nm) before pinch	1000/64	670/28	260/3.0	260/3.0	260/3.0	320/3.2	2000/4	247/7.4
$\sigma$ ( $\mu\text{m}$ )	1000	600	120	120	90	100	750	200
Crossing Angle at IP (mrad)	0	3	6.4	6.0	6.1	20	6	1
Disruptions $D/D_0$	0.56/8.7	36/3.5	29/26	20/18	096/8.3	077/3	4/215	29/9.8
$H_D$	2.3	1.8	1.6	1.4	1.4	1.34	2.0	1.42
Upsilon <sub>0</sub> sub-zero	.02	.037	.20	.14	.12	.069	.069	.07
Upsilon <sub>0</sub> effective	.03	.042	.22	.144	.12	.090	.074	.075
$\delta$ , %	3.3	3.2	12.7	6.5	3.5	2.4	13.3	3.6
$n_L$ (no. of $\gamma$ 's per e)	2.7	1.9	2.2	1.6	.94	.8	5.0	1.36
$N_{\text{load}} D_{\text{r}} = 20 \text{ MeV/c}$ , $g_{\text{load}} = 0.15$	19.0	8.8	31.6	10.3	2.9	2.0	1700	3.0
$N_{\text{beam}} \times \text{crossing}$	0.17	0.10	98	23	.05	.03	45.9	0.06
$N_{\text{line}} \cdot 10^{-2}$ , $d_{\text{Dr}} = 3.2 \text{ GeV/c}$	0.16	0.14	3.4	0.66	0.14	0.08	56.4	0.10

\* Refer to Table 1.1 regarding possible TESLA parameter changes.

†  $\gamma_c/\gamma_s$  is the ratio of functions; the nominal luminosity is simply defined as  $N_{\text{load}} \times g_{\text{load}} \times$  times the number of bunches per second, and is not corrected for hour-glass effect and so forth. The actual luminosity accounts for all these effects, including crossing angle, where applicable. SBC calculations are for the case of 100 bunches.

†† The loaded gradient includes the effect of single-bunch (at modes) and multi-bunch beam loading. Beam loading has been taken into account. Beam loading is based on bunch charge in the linac, which are approximately 2.5-3.5.

Рисунок 9. Эта таблица дает параметры проектируемых линейных коллайдеров

Приведу в заключение лишь очень краткую “визитную карточку” нашего Института, в котором сегодня открылась наша школа.

За четыре десятилетия своей деятельности Объединенный институт стал крупнейшим многоплановым физическим комплексом. Сегодня это всемирно известный центр фундаментальных ядерных исследований, объединяющий 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, Польша, Россия, Румыния, Словакия, Узбекистан, Украина и Чехия.

В Институте работают более 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 упомянутых синхротрона 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** (1969 г.) и **ИБР-2** (1984 г.).

Перспектива фундаментальных исследований связана с реализуемой в Институте программой создания современных базовых установок. В 1994 году 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 далеком не полном списке фундаментальных достижений физики высоких энергий, было немало имен дубненских физиков.

Надеюсь, что за дни работы школы вы сумеете не только познакомиться с лабораториями нашего Института, но и полюбить **ОИЯИ** и Дубну.

#### 4. Заключение

Перенесемся теперь мысленно в 1928 год... 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 Гайзенбергу, открывшему матричную форму квантовой механики, что тот имеет дело ни 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.

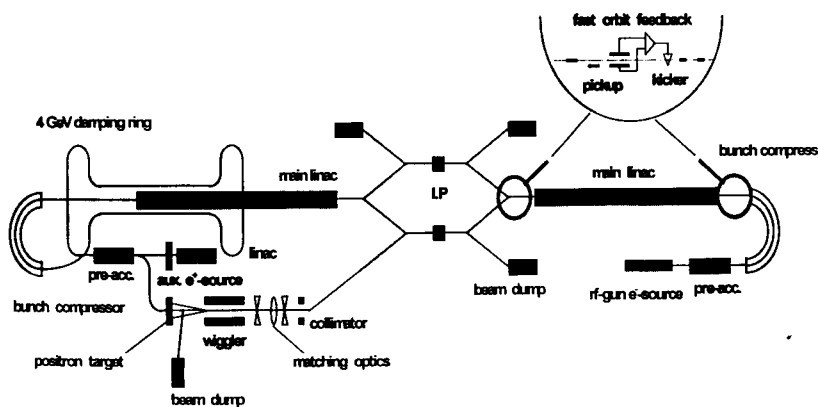


Рисунок 10. Общая схема TESLA

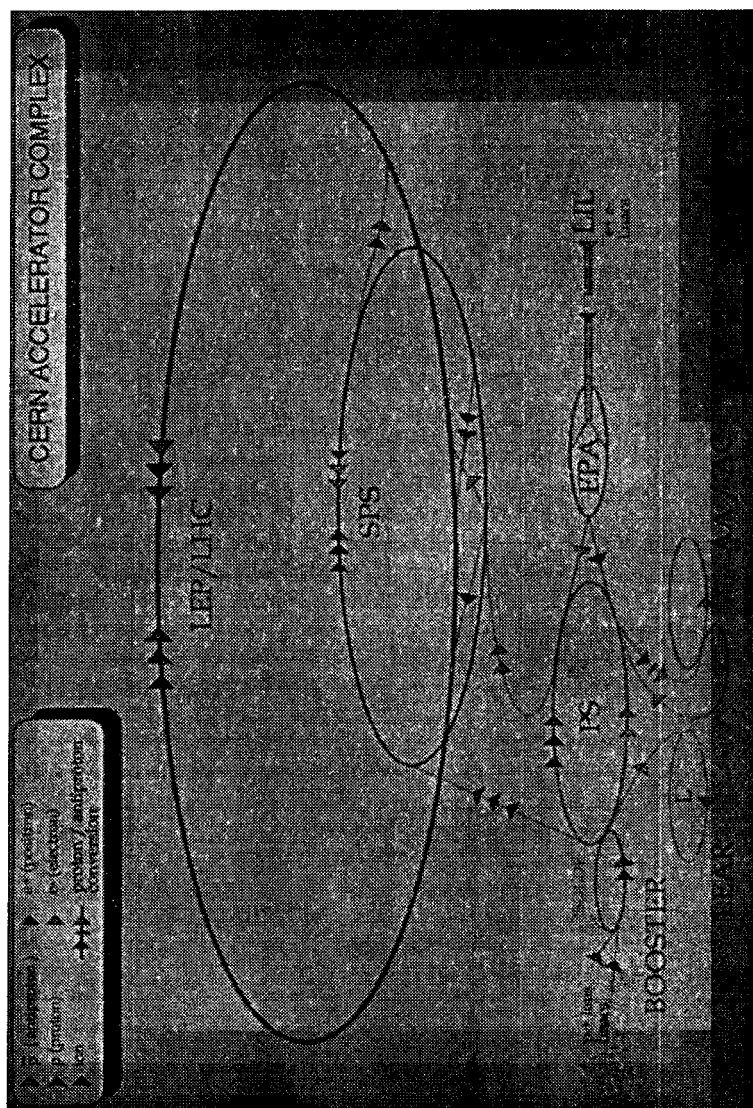


Рисунок 11. На этом рисунке представлен комплекс ускорителей ЦЕРНа

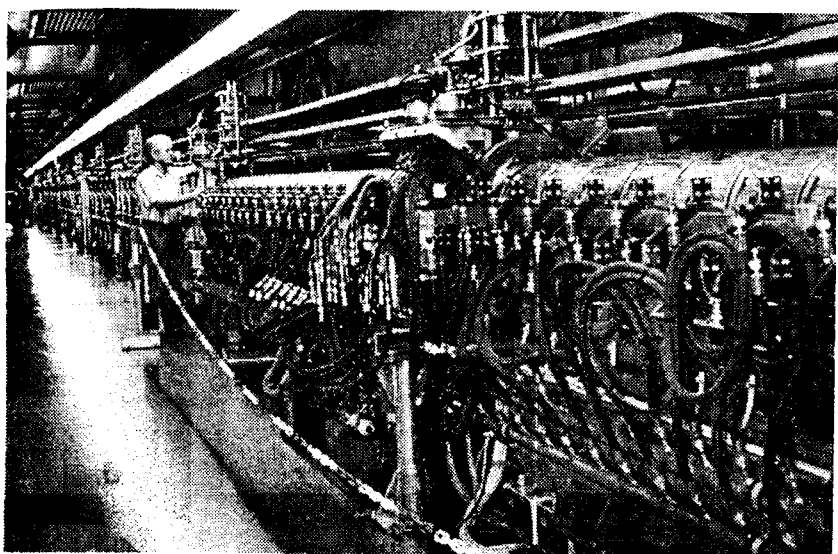


Рисунок 12. LINAC-инжектор для LEP (LIL)

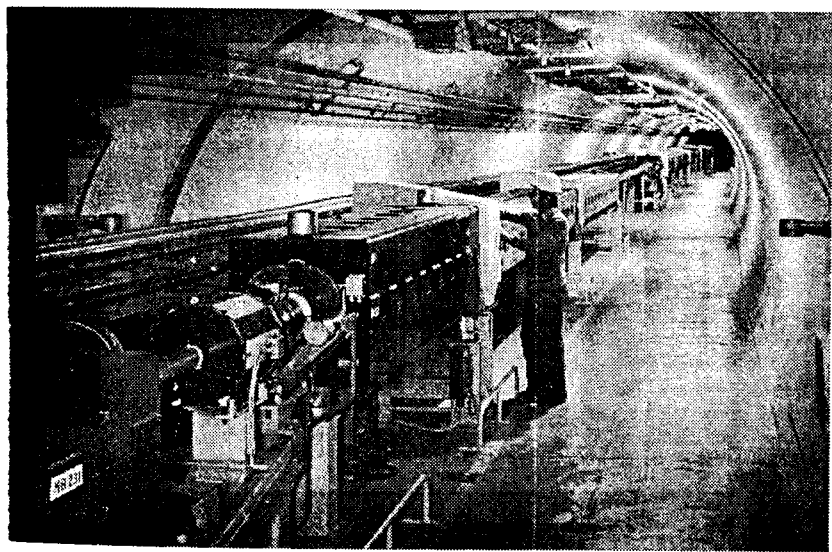


Рисунок 13. SPS (SuperProton Synchrotron)-тоннель

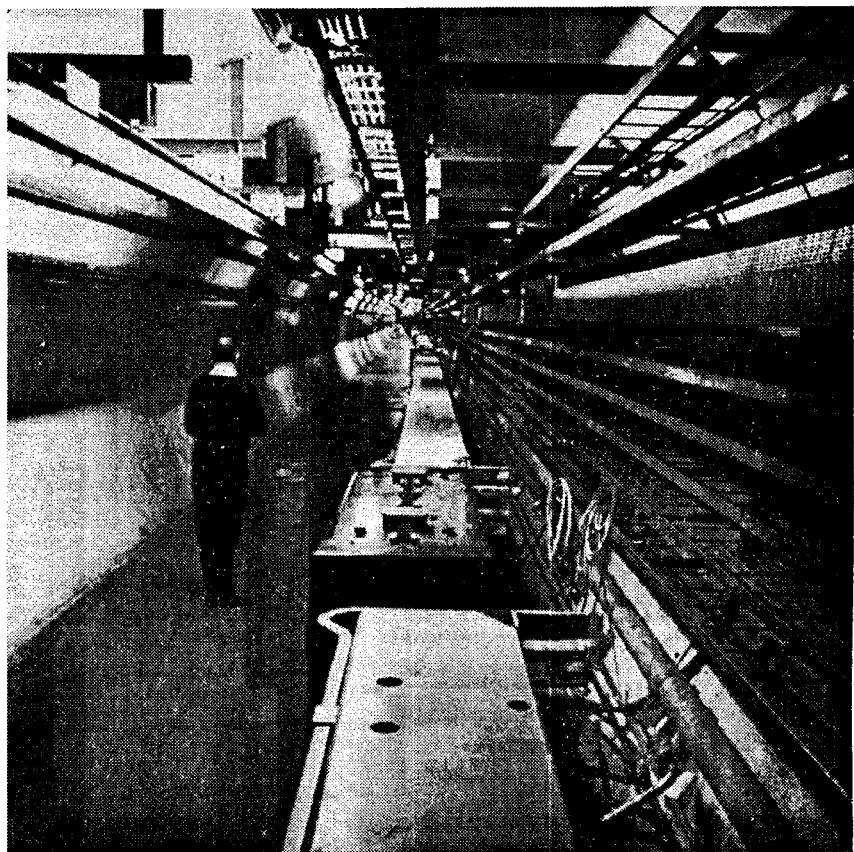


Рисунок 14. Тоннель LEP-коллайдера

Facilities	Particles Obtained	Energy of particles	Number of particles per sec	Irradiation impulse rate	Irradiation depth	Neutron flux behind shielding	Absorption dose in the beam Gr/sec
Synchro-phasotron	protons	8-10 GeV	$4 \times 10^{11}$	.14+.09	$3 \times 10^4$	$2 \times 10^{11}$	200
	deutrons	3.6 GeV/nuci	$10^{11}$	— " —	— " —	$2 \times 10^{10}$	50
	$^3\text{He}$	— " —	$4 \times 10^8$	— " —	— " —	$2 \times 10^8$	0.8
	$^4\text{He}$	— " —	$6 \times 10^8$			$3 \times 10^8$	12
	Li	— " —	$4 \times 10^8$			$2 \times 10^8$	2
	C	— " —	$2 \times 10^8$			$10^8$	4
	O	— " —	$2 \times 10^8$			$10^8$	$7 \times 10^{-2}$
	F	— " —	$6 \times 10^5$			$3 \times 10^5$	$2 \times 10^{-2}$
	Mg	— " —	$10^4$			$5 \times 10^5$	$10^{-4}$
	Si	— " —	$3 \times 10^3$			$10^3$	$2 \times 10^{-4}$
Nuclotron	protons	12 GeV	$5 \times 10^{11} \text{ A/q}^2$	.5+.09	$3 \times 10^4$	$10^{10}$	—
	$^2\text{H} + ^{238}\text{U}$	6 GeV/nuci.	— " —	— " —	— " —	$10^{10}$	—
Phasotron	protons	660+680 MeV	$4 \times 10^{13}$	240	1.1; 140	$5 \times 10^8$ ( $E \leq 20$ ) $3 \times 10^{10}$ ( $E \leq 0$ )	$5 \times 10^3$
Cyclotron U-400	ions B+Zr	20+5 MeV/nuci.	$10^{13} \times 10^{12}$	150	3+6	$2 \times 10^8$	—
Cyclotron U-400M	ions B+Zr	120+5 MeV/nuci.	$5 \times 10^{11} + 10^{12}$	— " —	— " —	$4 \times 10^8$	—
Reactor IBR-2	neutrons $\gamma$ -quanta	fission spectrum	2 MBT — " — — " —	5 — " — — " —	$10^3$ — " — — " —	$10^8$	$4 \times 10^{-3} + 3 \times 10^{-3}$ $10^{-3}$

**Рисунок 15.** ОИЯИ обладает уникальным арсеналом базовых установок (ускорительных реакторов). Основные параметры указаны на приведенном рисунке

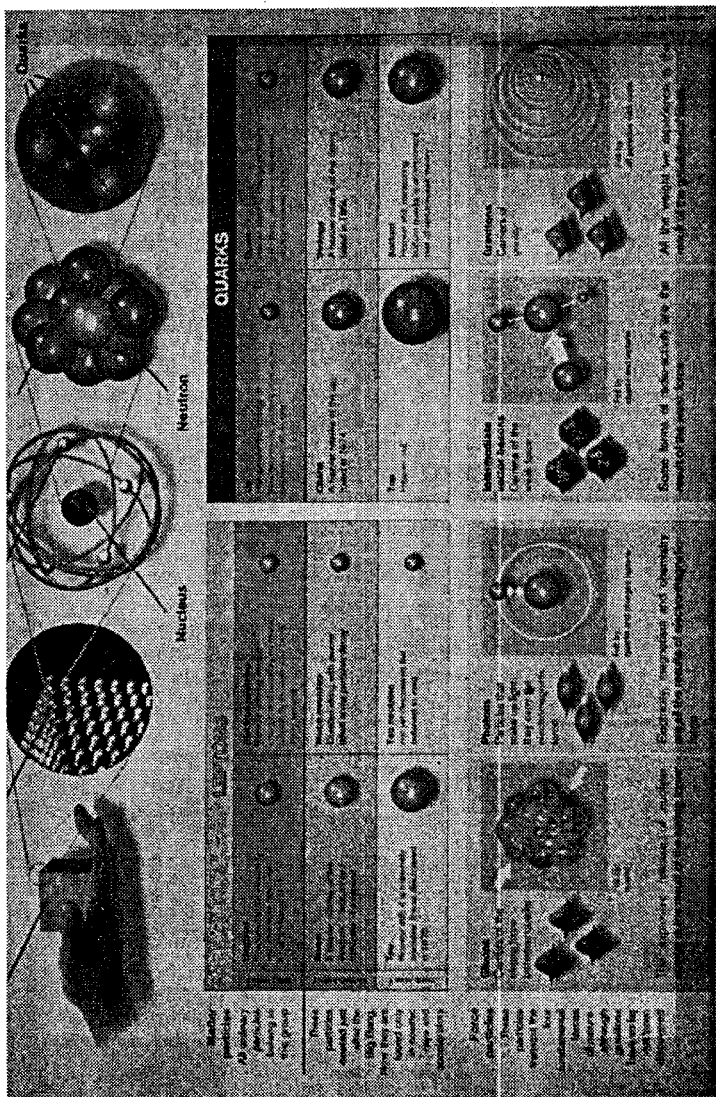


Рисунок 16. Эта таблица дает исчерпывающие представления о структуре материи в рамках существующих "стандартных" представлений



## Литература

1. Abdus Salam. "Particle Physics (1987)". IC/87/402.
2. Р. Фейнман. КЭД — странная теория света и вещества. Библиотечка "Квант", выпуск 66. Москва, "Наука". Главная редакция физико-математической литературы, 1988.
3. Stephen W. Howking. Brief History of Time. Bantom Books, 1988.
4. Л.Б. Окунь. Лептоны и кварки. Москва, "Наука". Главная редакция физико-математической литературы, 1981.
5. С. Rubbia. The "Future" in High Energy Physics, CERN-EP/88-130, 5 October, 1988.
6. J.D. Bjorken. Topics in B-Physics, FERMILAB-Conf-88-134-T, Sept. 1988.
7. В.Г. Кадышевский. Лекция на Международной школе молодых ученых по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1988 г.
8. Труды XXVIII Международной конференции по физике высоких энергий, Варшава, 1996.