

# Основные тенденции развития ускорителей

(По материалам XVII Международной конференции по ускорителям высоких энергий.  
Дубна, 7–12 сентября 1998 г.)

И.Н. Мешков

*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия*

В работе дан обзор современных проблем физики высоких энергий и рассмотрены основные тенденции развития ускорителей заряженных частиц по материалам XVII Международной конференции по ускорителям высоких энергий.

## Введение

XVII Международная конференция, прошедшая 7–12 сентября 1998 г. в Дубне, продемонстрировала значительный прогресс в этой области и выявила основные тенденции развития ускорительной техники. Прежде всего следует отметить, что хотя продвижение в область предельно достижимых энергий по-прежнему остается главной задачей, все больший интерес приобретают ускорители и, главным образом, коллайдеры, позволяющие обеспечить высокую светимость во всей шкале энергий, включая промежуточные (рис. 1). К последним относятся прежде всего так называемые “фабрики кваркониев” и частиц, составляющих “таблицу элементов” Стандартной Модели.

Для ускорителей с выведенным пучком основной задачей сегодня является генерация нейтринных пучков (см. п. 3.).

В приведенном ниже кратком обзоре ускорители и коллайдеры представлены с “привязкой” к тем физическим проблемам, на изучение которых они ориентированы, и отдельно рассматриваются ускорители близкого и отдаленного будущего. В век ИНТЕРНЕТа нет нужды давать детальное описание каждого из них, поэтому здесь приведены только основные параметры и наиболее интересные характеристики.

И, конечно, необходимо определить, что же такое “ускорители высокой энергии”. Граница достаточно условна. Для отбора докладов, представленных на HEACC'98, по предложению автора в качестве граничной была принята энергия генерации  $J/\Psi$ -мезона (3.1 ГэВ — энергия столкновения). Правда, было сделано исключение для “Ф-фабрики” DAΦNE, только что введенной в действие.

## 1. Проблема хиггс-частицы

Общепризнано, что завершение формирования Стандартной Модели состоится с открытием **хиггс-частиц**. Они “ответственны” за спонтанное нарушение электрослабой симметрии и появление масс частиц. Последние результаты теории на основе Стандартной Модели предсказывают массу хиггс-частиц порядка 150 ГэВ. Очевиден вопрос — почему эти частицы не были еще обнаружены в экспериментах на Тэватроне, где был открыт  $t$ -кварк с массой 176 ГэВ? Вполне резонно ответить, что проблема, видимо, состоит не только в энергии столкновения частиц.

Кандидаты для обнаружения хиггсов — Тэватрон, LHC и линейные  $e^+e^-$ - коллайдеры (см. п. 9.). Не исключено, что хиггс будет открыт на LEP2, энергию которого планируется довести до  $2 \times 100$  ГэВ.

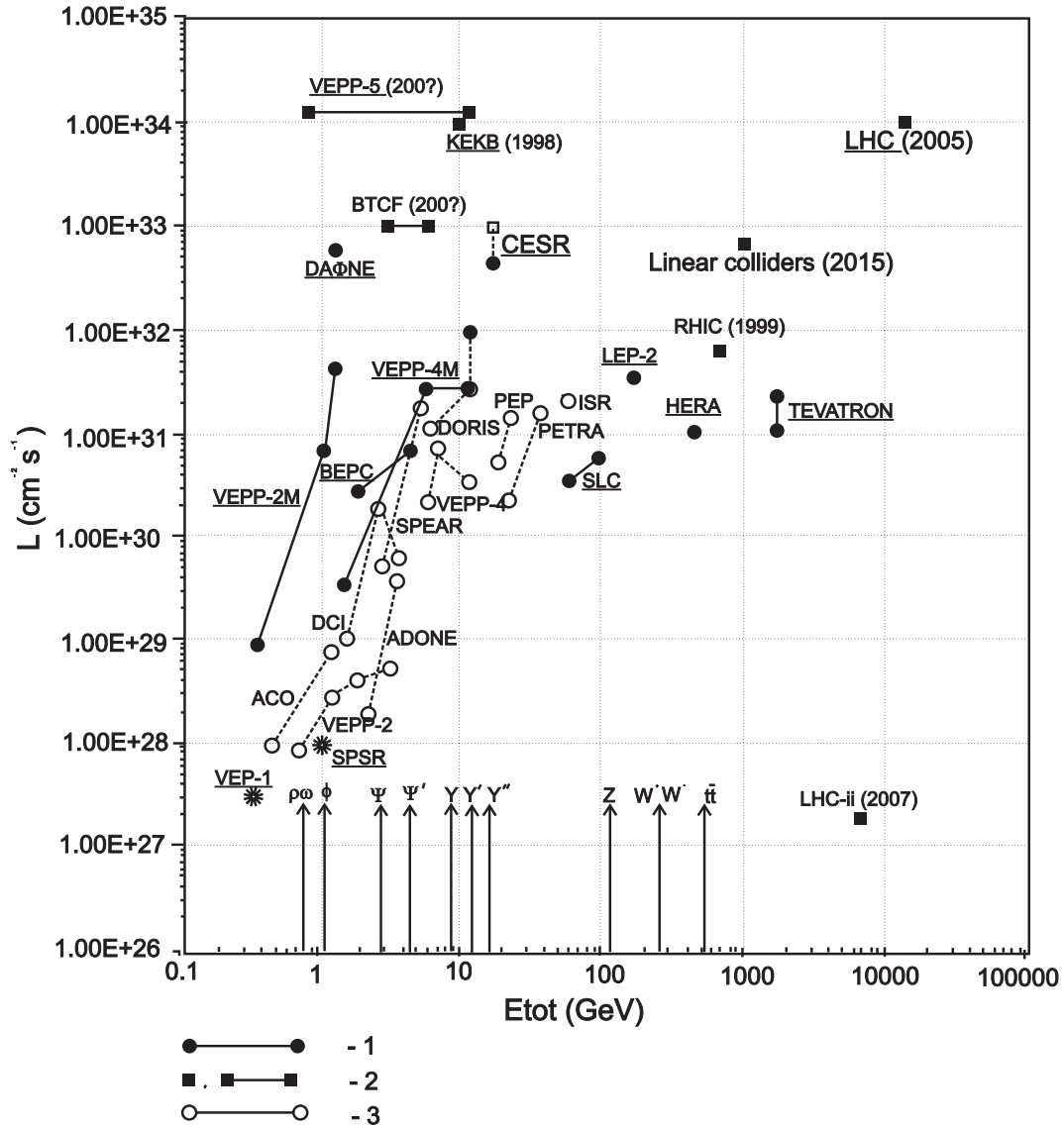


Рис. 1: \* — первые  $e^+e^-$ -коллайдеры ВЭП1, Новосибирск (ИЯФ им. Г.И. Будкера) и Стэнфорд-Принстонский накопитель (1965), 1 — действующие симметричные  $e^+e^-$ -коллайдеры: ВЭПП2М и ВЭПП4М (ИЯФ им. Г.И. Будкера), BEPC (ИФВЭ, Пекин), CESR (Корнельский университет), LEP2 (ЦЕРН), DAΦNE (Фраскатти, Италия); асимметричный протон-электронный коллайдер HERA — 820 ГэВ протоны  $\times$  30 ГэВ электроны; протон-антипротонный коллайдер Tevatron —  $2 \times 0.9$  ТэВ; 2 — строящиеся коллайдеры: ВЭПП5 (ИЯФ им. Г.И. Будкера) и BTF — симметричные  $e^+e^-$ -коллайдеры, асимметричный  $e^+e^-$ -коллайдер  $3.5 \times 8$  ГэВ КЕКВ (КЕК Японии), протонный коллайдер LHC, ионный ( $2 \times 100$  ГэВ/нуклон) и протонный ( $2 \times 250$  ГэВ) коллайдер RHIC (Брукхейвенская лаборатория, США); ВЛЭПП, линейные коллайдеры (см. табл. 3); 3 — закрытые коллайдеры: симметричные  $e^+e^-$ -коллайдеры ACO (Орсэ, Франция), ВЭПП2 и ВЭПП4 (ИЯФ им. Г.И. Будкера), ADONE (Фраскатти, Италия), SPEAR (SLAC, США), DCI — двухкольцевой  $e^+e^-$ -коллайдер (Орсэ, Франция), ISR (ЦЕРН) — симметричный двухкольцевой протон-протонный коллайдер. Стрелками показаны области “интересных” энергий — генерация кваркониев ( $\rho$ -,  $\omega$ -,  $\phi$ -,  $J/\psi$ -,  $Y$ -мезонов), переносчиков слабого взаимодействия  $Z$ -,  $W^\pm$ -бозонов и  $t$ -кварка.

“Охота на хиггса” становится еще более многообещающей на Тэватроне после повышения его светимости до  $2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , когда к 2000 году будет введен в действие бустер-накопитель антипротонов Recycler. “Отработанный” антипротонный пучок будет замедляться в Тэватроне и сбрасываться в Recycler, электронно охлаждаться и получать свежую порцию антипротонов из Инжектора. Это позволит увеличить интенсивность антипротонного пучка в Тэватроне и, соответственно, его светимость.

Протон-протонный коллайдер LHC (ЦЕРН) обеспечит, как считается, на энергии  $2 \times 7 \text{ ТэВ}$  и при светимости  $10^{34} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  обнаружение хиггсов в широком диапазоне масс — от максимальных “тэватронных” порядка 1 ТэВ до 7 ТэВ. Следующему поколению лептонных коллайдеров — линейных электрон-позитронных и кольцевых мюонных, отведена роль инструментов для детального изучения физики (читай — “природы”!) хиггс-частицы.

## 2. Кварк-глюонная плазма

Ожидается, что она будет получена и изучена в столкновениях релятивистских ионов (RHIC, LHC в режиме столкновения ионов свинца). Первые указания на этот феномен уже получены в экспериментах с выведенным пучком ионов и фиксированной мишенью на SPS в ЦЕРН AGS (Брукхэйвен), а также, возможно, на Нуклотроне ОИЯИ. Правда, вопрос, при какой энергии и плотности взаимодействующих нуклонов начинается освобождение (deconfinement) кварков и образование плазмы, не имеет сегодня определенного ответа.

## 3. Нейтринные осцилляции

$\nu_e \longleftrightarrow \nu_\mu \longleftrightarrow \nu_\tau$ , предсказанные в свое время Б. Понтекорво (1957 г.), считаются наиболее горячей проблемой для современной нейтринной физики. Это явление, обнаруженное недавно в космических лучах, требует своего подтверждения в экспериментах на ускорителях.

Сегодня готовятся три таких эксперимента на пучках гэвных нейтрино, генерируемых протонными синхротронами и регистрируемых подземными детекторами, удаленными на сотни километров: в КЕК — детектор Super Kamiokande, база 250 км; Fermilab — детектор в шахте в штате Миннесота, база 730 км; ЦЕРН — детектор в подземной лаборатории Гран-Сассо, Италия, база 732 км. Так, ожидается, что от пучка из SPS с интенсивностью  $4.8 \times 10^{13}$  протонов за импульс детектор в Гран-Сассо будет регистрировать 0.3–70  $\nu_\tau$  в год благодаря  $\nu_e, \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  переходам за время пролета. Неопределенность оценки связана с современным знанием (точнее, незнанием) массы  $\nu_e$ .

## 4. Суперсимметрии

Проблема **нарушения симметрий** относится к числу фундаментальных в физике элементарных частиц, начиная, видимо, с 1956 года (открытие несохранения четности). И эта обширная область требует использования всего “букета” ускорителей для генерации различных видов частиц и квазиатомных систем, таких как мюоний, позитроний, а также антиатомов (антиводород). В физике высоких энергий эта проблема порождает гипотезу суперсимметрий, которая требует существования весьма населенного семейства “суперчастиц”, так называемых SUSY-particles (от англ. Super SYmmetry). На их обнаружение ориентированы действующий электрон (позитрон)-протонный коллайдер HERA в DESY (Гамбург) с энергией столкновения (в системе центра масс) 90 ГэВ, строящийся RHIC в Брукхэйвенской лаборатории (см. п. 7.) и линейные коллайдеры (см. рис. 1 и п. 9.).

Открытие этих частиц будет означать начало эры новой физики, которая придет вслед за Стандартной Моделью (но вряд ли ее полностью закроет).

## 5. Кварконии, $\tau$ -лептон и другие

**Кварконии** — мезоны, состоящие из “чистых” пар определенных кварков и их антикварков (без примеси других пар кварк-антикварк), — очень интересны для дальнейшего исследования Стандартной Модели. И именно этот факт объясняет отмеченную выше важность “ярких” коллайдеров во всей области энергий. Исследования проводятся и будут проводиться в основном на  $e^+e^-$ -коллайдерах (рис. 1). Большой интерес и научную значимость имеет здесь задача “топония” ( $t\bar{t}$ -мезон), пока еще не наблюдавшегося в эксперименте (задача для Тэватрона).

$\tau$ -лептон — самый тяжелый “квазиэлектрон”, частица, относящаяся к 3-му поколению, изучен еще очень слабо. Возможность генерации  $\tau$ -лептона в направленных пучках появляется с созданием асимметричных  $S\tau$ -коллайдеров, подобных КЕКВ, ВЭПП5, и ВСТФ (рис. 7.), первый из которых войдет в строй в 1998 г. Тем самым может быть получено новое качество экспериментов по изучению электрослабых взаимодействий с участием  $\tau$ -лептонов.

## 6. Спин

Природа **ядерного спина** остается загадкой современной физики элементарных частиц: ядерный спин не равен сумме спинов кварков, формирующих ядро. И это еще раз продемонстрировали недавние эксперименты на коллайдере HERA. Существует несколько гипотез на этот счет, однако, как всегда, слово за поляризационными экспериментами: поляризованные пучки и мишени. Традиционно это область физики промежуточных энергий — протонные и ионные накопители с электронным охлаждением (“кулеры”) COSY в Юлихе (ФРГ) и SELSIUS в Упсала (Швеция) и другие. Однако подобного рода эксперименты ведутся (HERA) и планируются (RHIC) на высоких энергиях.

## 7. На финише тысячелетия

В этом году, как уже сказано, введен в строй коллайдер DAΦNE, фабрика  $\varphi$ -мезонов ( $s\bar{s}$ -кварконий). Запускается PEP2 и должен быть запущен КЕКВ (см. рис. 7., табл. 1 и п. 8.).

В 1999 г. энергия коллайдера LEP2 будет доведена до 100 ГэВ и решено, что он будет работать до конца 2000 г. Вероятно, выйдет на светимость  $10^{33} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  самый “яркий” сегодня симметричный коллайдер CESR (рис. 1), работающий в области семейства  $Y$ -мезонов ( $b\bar{b}$ -кварконий). Его светимость в августе месяце 1998 г. составляла  $5 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . В этом же году ожидается запуск ионного коллайдера RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider, рис. 1 и табл. 2).

В России продолжают эксперименты на симметричном электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М (ИЯФ им. Г.И.Будкера), достигшем после недавней модернизации светимости  $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Основная его специализация — также физика  $Y$ -кваркония (рис. 1). Продолжает успешно работать на эксперимент протонный синхротрон У-70 в ИФВЭ, в котором интенсивность выведенного пучка доведена в конце 1997 года до  $1.6 \times 10^{13}$  протонов за цикл ускорения.

Таблица 1: Параметры  $e^+e^-$ -коллайдеров PEP2 и KEKB.

Параметр	PEP2		KEKB	
	LER	HER	LER	HER
Кольцо				
Частицы	$e^+$	$e^-$	$e^+$	$e^-$
Энергия, ГэВ	3.1 (3.1)	9.0 (9.0)	3.5	8.0
Энергия соударения, ГэВ		10.4		11
Полный ток, А	2.14 (0.05)	0.99 (0.75)	2.6	1.1
Время жизни, час	4	2.5	?	?
Светимость, $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$		1.0 (-)		1.0 (-)

В скобках — состояние на август 1998

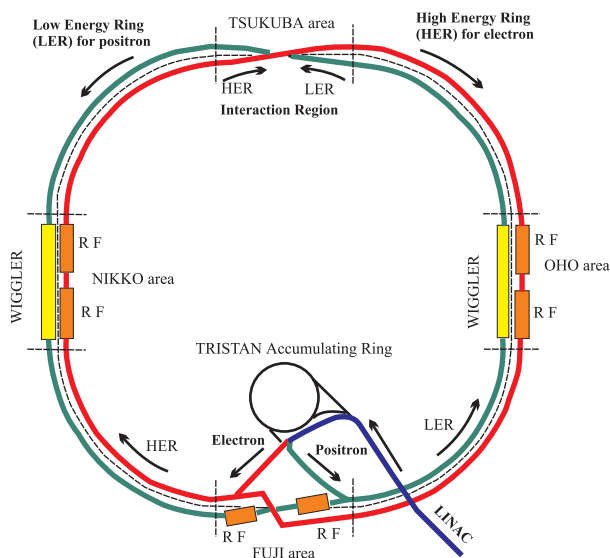


Рис. 2: Схема коллайдера KEKB.

LER, HER — кольца низкой и высокой энергии (Low and High Energy Rings).

Этим, к сожалению, исчерпывается перечень отечественных достижений в ускорителях высоких энергий. Проект УНК в ИФВЭ фактически остановлен, а продвижение по доводке ионного синхротрона “Нуклотрон” в ОИЯИ идет очень медленно: достигнута энергия циркулирующего пучка дейтронов 3.2 ГэВ/нуклон (поле в сверхпроводящих диполях 1.2 Т) при проектном значении 6 ГэВ/нуклон (2 Т).

Таблица 2: Параметры ионного коллайдера RHIC.

Ионы	Au (и другие)
Энергия, ГэВ/н	100
Число сгустков в пучке	60
Число ионов в сгустке	$1 \times 10^9$
Время жизни, час	10
Светимость, $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	1.0

## 8. В первом десятилетии XXI века

На рубеже тысячелетий развернется “охота на хиггса”: следом за закрывающимся LEP2 начнется (с 2001 г.) сооружение Большого Адронного Коллайдера (Large Hadron Collider = LHC) в ЦЕРНе, и в 2005 г. детекторы ATLAS и CMS зарегистрируют первые события в протон-протонных соударениях ( $2 \times 7$  ТэВ) на светимости  $1 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Но еще раньше закончится модернизация Тэватрона (см. п. 1.).

Не менее привлекательна проблема  $\tau$ -лептона — самого тяжелого из трех заряженных лептонов Стандартной Модели. По-видимому, будет реализован проект  $S\tau$ -фабрики —  $e^+e^-$ -коллайдера, позволяющего генерировать направленный поток  $\tau$ -лептонов. Для этого требуется асимметричный коллайдер на энергию столкновения (суммарная энергия в системе центра масс) порядка 10 ГэВ со светимостью порядка  $1 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  или выше. Первыми такими генераторами станут коллайдеры-“близнецы” PEP2 и КЕКВ (табл. 1). Можно надеяться, что будет реализован также проект ВЭПП5 в ИЯФ им. Г.И. Будкера (рис. 1).

Высокая светимость коллайдеров, работающих в области  $Y$ -кваркония, нужна еще и для обнаружения и изучения несохранения комбинированной четности (CP violation). Считается, что этот тонкий эффект удастся зарегистрировать на уровне интегральной светимости порядка 100 обратных фемтобарн ( $10^{38} \text{ см}^{-2}$  или три часа набора статистики на светимости  $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

Новые экспериментальные возможности на границе ядерной физики и физики частиц предоставят электрон-ионные коллайдеры. В Институте химии и физики RIKEN под Токио начнется сооружение грандиозного ускорительного комплекса MUSES (Multi USe Experimental Storage rings), в коллайдере которого электроны с энергией до 4 ГэВ будут сталкиваться с ионами, имеющими энергию до 3.5 ГэВ/нуклон. Начнется, видимо, разработка электрон-ионного коллайдера ENC (Electron-Nucleus Collider,  $E_e \sim 7$  ГэВ,  $E_i \sim 10 - 30$  ГэВ/нуклон) — совместный проект лаборатории GSI в Дармштадте и ИЯФ им. Г.И. Будкера.

## 9. Линейные коллайдеры

Разработка ведется с конца 70-х годов, начиная с первого предложения Г.И. Будкера и В.Е. Балакина (проект VLEPP, табл. 3), в первом десятилетии наступающего столетия они вступят в фазу технического проекта. Сегодня усилия лабораторий и международных коллабораций сконцентрированы на четырех проектах (табл. 3), а пятый, российский ВЛЭПП, к сожалению, приостановлен.

Основной особенностью (и преимуществом) линейных  $e^+e^-$ -коллайдеров является, как известно, исключение потерь на синхротронное излучение (СИ), неизбежных в кольцевых коллайдерах и катастрофически возрастающих с энергией (как четвертая степень!). Прототип таких линейных коллайдеров — действующий SLC (Stanford Linear Collider, рис. 3), в котором позитроны и электроны, ускоренные в двухмильном Стэнфордском Линейном Ускорителе (SLAC) до 50 ГэВ, сталкиваются, пройдя навстречу друг другу две полуокружности. В такой схеме потери на СИ минимальны.

Таблица 3: Проектные параметры линейных коллайдеров.

Лаборатория	DESY	КЕК	SLAC	CERN	BNP
Проект	TESLA	JLC(S)	NLC	CLIC	VLEPP
Энергия, ГэВ	500 (2×250)				
Светимость, $10^{33} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	6.0	6.1	5.5	6.4	9.3
Тип ВЧ системы	сверхпроводящая	теплая	теплая	теплая	теплая
ВЧ генератор	клистрон	клистрон	клистрон	электронный пучок	клистрон
Частота, ГГц	1.3	5.7	11.4	30	14
Мощность, МВт	8.2	3.2	4.8	4.5	2.4
Темп ускорения, МэВ/м	17.2	26.6	28.4	66.6	71.4
Полная длина (два линака), км	29	18.8	17.6	7.5	7

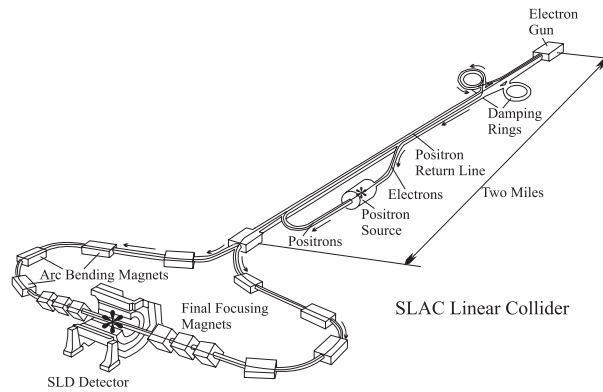


Рис. 3: Линейный коллайдер лаборатории Stanford Linear Accelerator Center (SLAC).

Первым из четырех будет, вероятно, реализован проект TESLA (Tev Electron Superconducting Linear Accelerator) лаборатории DESY на сверхпроводящих резонаторах, в опытных образцах которых уже получена напряженность электрического поля, обеспечивающая проектный темп ускорения 25 МэВ/м (опытный образец из 9 резонаторов с добротностью  $10^{10}$ ).

Основным ограничением дальнейшего повышения напряженности является холодная эмиссия из стенок резонаторов. Предельной для сверхпроводящей ускоряющей структуры сегодня считается локальная напряженность около 60 МэВ/м.

Для теплых резонаторов эта граница лежит заметно выше. В отдельных образцах достигнута напряженность, эквивалентная 70 МэВ/м. Однако в этом варианте ограничивающим фактором является низкая добротность резонаторов, т.е. соответственно, высокая энергия, потребляемая ВЧ-системой. Проекты Японского (Japan Linear Collider — JLC) и Стэнфордского (New Linear Collider — NLC) коллайдеров используют в ВЧ-генераторах клистроны типа SLAC или оригинальной разработки. Проект NLC, в частности, предполагает почти вдвое больший, чем в нынешнем SLAC, темп ускорения.

Наиболее перспективным, но и наименее продвинутом технически является проект ЦЕРН (Cern Linear Collider — CLIC), в котором для возбуждения ускоряющей структуры используется так называемый “драйверный” пучок электронов низкой энергии. На опытном стенде (Cern Test Facility — CTF2) достигнута напряженность ускоряющего поля 58 МВ/м.

После остановки LEP2 будет введен в действие стенд STF3, с использованием элементов ВЧ системы LEP, где планируется получить на драйверном пучке (100 МэВ×7 А) темп ускорения 150 МэВ/м в основной структуре длиной 0.5 м. (При этом драйверный пучок отдает около половины своей энергии.)

## 10. Фотонный коллайдер

Предложенный в начале 80-х годов группой авторов из Новосибирска (И. Гинзбург, Г. Коткин, В. Сербо, В. Тельнов) фотонный коллайдер является развитием идеи линейных  $e^+e^-$ -коллайдеров. Предлагается генерировать фотоны высокой энергии в остронаправленных потоках при рассеянии лазерного излучения на сгустках электронов и позитронов в линейных  $e^+e^-$ -коллайдерах (рис. 4). Возникающее жесткое рентгеновское излучение высокой интенсивности и пространственной плотности обеспечивает значительную светимость фотонных коллайдеров. Другой рассматриваемый вариант этой схемы — **электрон-фотонный коллайдер**. Считается, что фотонный коллайдер, даже значительно проигрывая в светимости линейным  $e^+e^-$ -коллайдерам, позволит генерировать сопоставимое количество  $t$ -кварков, хиггсов,  $W^\pm$ -бозонов благодаря бóльшим, по крайней мере на порядок, сечениям их рождения при соударении реальных фотонов.

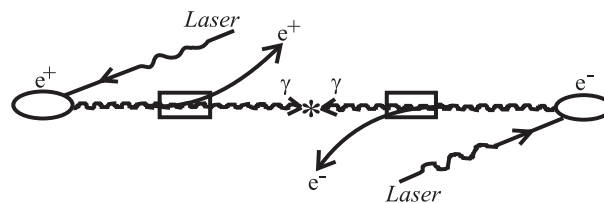


Рис. 4: Схема генерации встречных фотонных пучков при обратном томпсоновском рассеянии лазерного излучения на сгустках частиц линейного коллайдера.

## 11. Мюонные коллайдеры

Идея мюонных коллайдеров была высказана более четверти века тому назад (Г. Будкер, А. Скринский), она успела за это время испытать приливы оптимизма, переходящего в энтузиазм (“пора строить”) и отливы, периоды пессимизма. Сегодня общепризнанной является схема, в которой преимущественно используется “ионизационное охлаждение”. Его не удастся использовать для охлаждения адронов, но мюоны, не испытывающие сильного взаимодействия, можно с успехом охлаждать, пропуская через специальную мишень. Мюонный коллайдер (рис. 5 и табл. 4), благодаря низкому уровню потерь на СИ для мюонов, позволит, как считается, продвинуться в тэвный диапазон энергий для соударения точечных (лептоны!) частиц. Именно точечность лептонов делает их существенно отличными от адронов с точки зрения энергии, передаваемой во взаимодействие.

В последних лишь только часть энергии ускоренных частиц, порядка 1/5 от полной (“3 кварка + 3 глюона”!), передается во взаимодействие их точечных составляющих — кварков. Именно эта “полезная” энергия и может быть потрачена на образование других частиц (“Constituent Centre Mass Energy” — CCME).



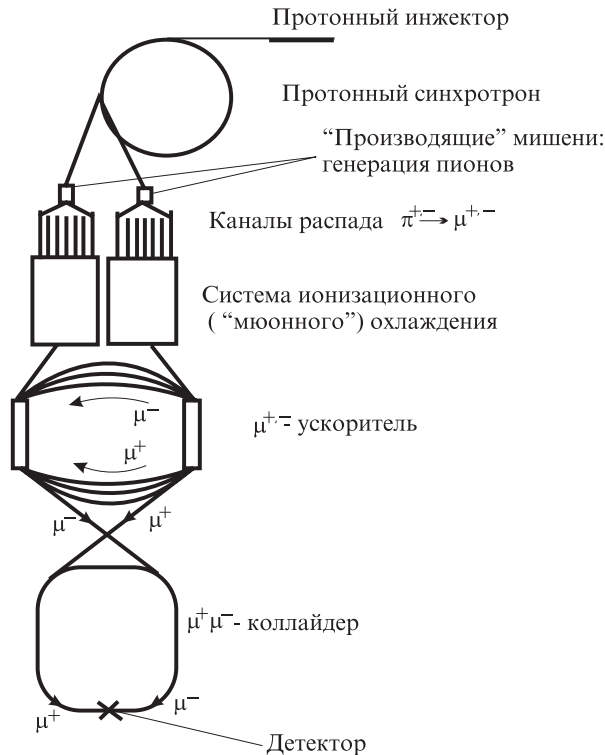


Рис. 5: Схема мюонного коллайдера.

Таблица 4: Типичные параметры мюонного коллайдера.

Энергия соударения, ТэВ	3	0.4	0.1
Периметр, км	6.0	1.0	0.35
Энергия протонов, ГэВ	16	16	16
Светимость, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$7 \times 10^{34}$	$10^{33}$	$1.2 \times 10^{32}$
Хиггс/год	$10^6$	$10^4$	$2 \times 10^3$

## 12. Что там, за “горизонтом”?

Прогресс в ускорителях (рис. 6) вывел эксперимент в область масс “элементарнейших” частиц, превышающих 100 ГэВ (масса топ-кварка  $176 \text{ ГэВ}/c^2$ ). Надежды на дальнейший значительный рост энергии в обозримом будущем связаны скорее всего с проектом мюонного коллайдера (п. 11.). Альтернативное предложение — сооружение Очень Большого Адронного Коллайдера (Very Large Hadron Collider), фактически новая версия несостоявшегося проекта SSC. Правда, для VLHC предлагается использовать сверхпроводящие диполи с низким, всего 2 Т, полем, что позволяет резко снизить стоимость и использовать диполи с железным ярмом типа “Нуклотрон” ОИЯИ. Пока обсуждается  $pp$ -коллайдер на энергию  $50 \times 50 \text{ ГэВ}$  периметром 500 км в “окрестностях” Фермилаб. Главным аргументом апологетов низкополевого направления считается высокая стоимость сверхпроводящих магнитов типа LHC (поле 8.3 Т), с чем едва ли можно согласиться: наверняка к началу строительства VLHC прогресс в сверхпроводимости позволит заметно снизить стоимость сильнополевых магнитов и получить в 3–5 раз большую энергию в том же туннеле. Впрочем, возможно, это и будет классический пример “щей из топора”.

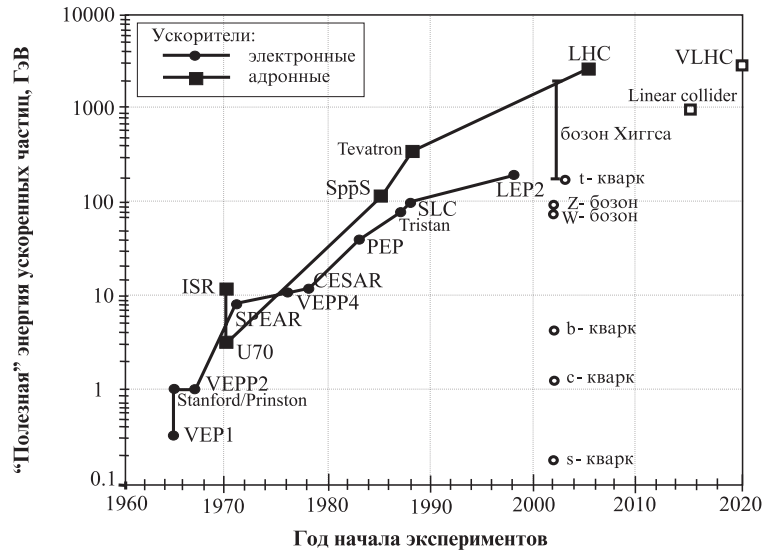


Рис. 6: Прогресс в развитии ускорителей высоких энергий и массы элементов таблицы Стандартной Модели.

### Заключение

Итак, сегодня ускорительщики всерьез обсуждают выход на уровень ССМЕ порядка 20 ТэВ. А что же дальше?

Размеры планеты ограничены, и единственная надежда — на резкое увеличение темпа ускорения. Поэтому — очередь за линейными коллайдерами будущего, в которых будет достижим гораздо более высокий темп ускорения. Первые обнадеживающие результаты по ускорению частиц в поле плазменной волны, возбужденной лазерным или ”драйверным” электронным пучком, уже получены: темп 5 ГэВ/м, но, правда, в ячейке длиной 2 см (100 МэВ/2 см) уже достигнут, и это обнадеживает.