

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

621.384.6

**СЛЕДУЮЩЕЕ ПОКОЛЕНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ
С ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫМИ ВСТРЕЧНЫМИ ПУЧКАМИ *)****Б. Рихтер**

(Лекция, посвященная памяти Будкера)

ПОСВЯЩЕНИЕ

Разработка методики встречных пучков началась немногим более 20 лет тому назад работами трех групп физиков — одной в Соединенных Штатах, одной в СССР и одной в Италии. Этими группами первопроходцев были содружество Принстон — Стэнфорд в США (В. Барбер, Дж. О'Нил, Б. Гиттелман и Б. Рихтер), новосибирская группа в СССР (Г. И. Будкер и его сотрудники) и группа Фраскати в Италии (Ф. Амман, Б. Тушек и сотрудники). На основе этих первых небольших ускорителей, по мере того, как изменялось наше понимание поведения интенсивных накопленных пучков, появлялись все более крупные установки со встречными пучками. На успех методики указывает тот факт, что все сооружаемые сейчас ускорители являются ускорителями со встречными пучками.

Профессор Будкер играл важную роль в этих разработках. Впервые я встретился с ним в 1965 г. и продолжал с тех пор видеть его каждые несколько лет. Мое первое впечатление на всем этом протяжении не изменилось — он был человеком с огромной энергией, большим обаянием и оригинальностью. Его смерть в 1977 г. стала потерей для всех физиков, связанных с ускорителями и физикой высоких энергий. Будь он еще жив, он также думал бы о работах над новым поколением ускорителей, и поэтому я посвящаю эти заметки его памяти.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вклад экспериментов на встречных электрон-позитронных пучках в физику высоких энергий в 70-х годах превзошел все ожидания. Исследования, проведенные на двух e^+e^- -ускорителях с наибольшей энергией — представителях современного поколения подобных установок *), привели

*) Richter B. The Next Generation of Electron-positron Colliding Beam Machines.—SLAC-PUB-2274, March 1979.—Перевод С. Н. Роднопова.

Представлено на собрании Американского физического общества (Вашингтон, 28 апреля 1978 г.) на сессии, посвященной памяти академика Г. И. Будкера — директора Института ядерной физики СО АН СССР в Новосибирске.

Лауреат Нобелевской премии, профессор Стэнфордского университета, Б. Рихтер работает в Центре Стэнфордского линейного ускорителя.

**) Речь идет о накопителях СПИР и ДОРИС. Однако в настоящее время уже вступили в строй более крупные установки ПЕП и ПЕТРА. (Прим. перев.)

к таким результатам, как открытие семейства пси-частиц и изучение их свойств, открытие очарованных частиц и тяжелого лептона, доказательство существования адронных струй и т. п. Быстрый рост числа новых открытий в физике на таких ускорителях объясняется двумя причинами. Во-первых, процесс e^+e^- -аннигиляции при современных энергиях является особенно простым и хорошо интерпретируемым, что делает особенно простой и проблему определения квантовых чисел и свойств новых частиц. Во-вторых, при e^+e^- -аннигиляции все конечные состояния осуществляются с примерно одинаковым весом, а малость сечений образования восполняется отсутствием приводящего к путанице фона. Например, скорость образования очарованных частиц на накопителе СПИР в Стэнфордском центре линейного ускорителя (СЛАК) и на накопителе ДОРИС в Лаборатории высоких энергий ДЭЗИ (Гамбург) на три-четыре порядка ниже скорости образования на ускорителе Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми (ФНАЛ) или на ускорителе СПС в ЦЕРНе. И все же впервые такие частицы были найдены на накопителях, где фоновые сечения сравнимы с сечением наблюдаемого процесса, и не были еще найдены непосредственно по адронным распадам на протонных ускорителях, где фоновые сечения на четыре порядка величины превышают «сигнальные» сечения. Сейчас в области e^+e^- -ускорителей предпринимается новый шаг. Скоро начнут работать ускорители ПЕП в СЛАК и ПЕТРА в ДЭЗИ при энергиях 35—40 ГэВ в системе центра масс (СЦМ), что дает возможность исследовать новые энергетические области. Мое выступление связано не с этими новыми крупными инструментами для исследований, а с поколением ускорителей, которые последуют за ними. Я верю, что изучение e^+e^- -аннигиляции при гораздо более высоких энергиях, нежели планируется сейчас, многому научит нас не только о структуре и динамике частиц, но и о природе слабого взаимодействия. В остальной части этого выступления я проведу обсуждение некоторых физических исследований, которые могут быть проведены на таких ускорителях, с целью получения представления о минимальной энергии, требуемой для нового поколения установок со встречными пучками, а затем мы обсудим некоторые параметры ускорителей, которые, как я думаю, нам следовало бы соорудить.

2. ФИЗИКА

Выбор энергии для нового ускорителя всегда содержит много догадок. Легко сказать «сделать ее большой», но вопрос «насколько большой?» очень важен, очевидно, с точки зрения стоимости и технической осуществимости. Поскольку стоимость ускорителя быстро растет с его энергией, а стоимости новых ускорителей стали столь высокими, надо попытаться выбрать энергию следующего этапа достаточно большой для физики, но не столь большой, чтобы это заставило нас вечно собирать деньги, необходимые для его сооружения. Как обычно, обратимся к современным теоретическим идеям, чтобы получить грубое представление о том, что можно «увидеть» на e^+e^- -ускорителях при более высоких энергиях, и таким образом определить «порог» энергии нового ускорителя.

Рис. 1 ведет нас в воображаемое путешествие к очень высоким энергиям e^+e^- -аннигиляции. На нем я отложил то, что мы могли бы найти для величины R -отношения сечения образования новых лептонов к сечению образования μ -мезонов, как функцию квадрата полной энергии в СЦМ (s). Начнем с области $s \lesssim 9^*$, где действует так называемая «старая физика», затрагивающая u , d , s -кварки и образование обычных и странных мезонов

*) Величина s выражена здесь в ГэВ². (Прим. перев.)

и барионов. Эта сфера деятельности ускорителей АДОНЕ во Фраскати, ДСИ в Орсе и ВЭПП-2 в Новосибирске.

В области значений s вблизи 10 образование узких Ψ -резонансов сигнализирует об открытии каналов, содержащих c -кварки и очарованные частицы. Вблизи порога наблюдается резкое увеличение R и богатая структура резонансов очарованных частиц. Кроме того, сейчас неоспоримо доказано образование тяжелого t -лептона с массой около 1,8 ГэВ. Область значений s от 10 до 50 является сферой деятельности СПИР и ДОРИС.

По мере увеличения энергии мы движемся к границе известного. Ледерман и др. во ФНАЛ нашли доказательство образования трех частиц типа Ψ -частиц, которые они назвали семейством Υ -частиц. Проявив техническую смекалку, физики-ускорительщики ДЭЗИ довели энергию накопительного кольца ДОРИС до предела и наблюдали член этого семейства с наименьшей массой, подтвердив, что это, действительно, очень узкий резонанс, который по всей вероятности, содержит связанное состояние новой комбинации кварк-антикварк, каждый с зарядом $1/3$ (b -кварк).

Теперь мы переходим от известного к предположениям. Если на самом деле существует b -кварк, тогда должны бы вблизи значения $s = 100$ образовываться b -частицы, и мы, вероятно, обнаружим структуру резонансов b -частиц, похожую на резонансы очарованных частиц, наблюдаемые при значениях s около 10. Увеличение R составит только 6%, если заряд b -кварка, действительно, равен $1/3$. Область b -частиц будет перекрыта сооружаемыми сейчас новыми ускорителями ЦЕСР в Корнелле и ВЭПП-4 в Новосибирске.

Поскольку похоже, что новые семейства частиц появляются каждый раз при увеличении значения s на порядок величины (семейство странных частиц начинается при значениях $s \approx 1$), я считаю, что t -кварк с зарядом $2/3$ — партнер b -кварка, наличие которого требует большинство теоретических моделей, появится вблизи значений $s \approx 1000$. Он проявится, по-видимому, сначала в виде нескольких узких резонансов, а затем в виде увеличения R на 20%. Мы сможем найти также резонансы t -частиц и новый тяжелый лептон (почему бы и нет?), чтобы усложнить жизнь моим друзьям-теоретикам. Эта область значений s вблизи 1000 станет полем охоты для колец ПЕП и ПЕТРА.

При еще больших энергиях мы подходим к области, где слабое взаимодействие начинает конкурировать с электромагнитным взаимодействием, а затем и превосходить его. При значениях s около 10^4 калибровочные теории предсказывают появление Z^0 -резонансов — носителей слабого нейтрального тока. А при еще более высоких энергиях (несколько единиц $\times 10^4$ ГэВ²) будет достигнут порог образования заряженного векторного

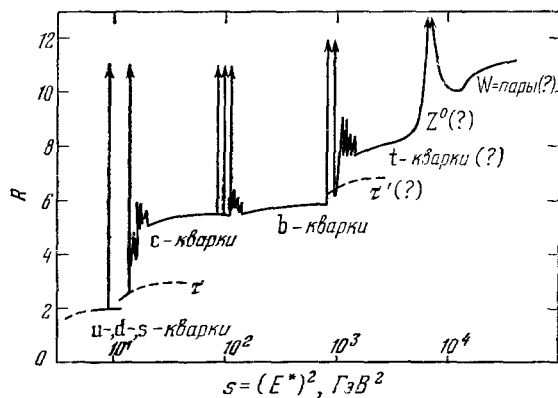


Рис. 1. Отношение (R) полного сечения образования частиц тяжелее μ -мезона к сечению образования пар μ -мезонов как функция s — квадрата полной энергии в СЦМ.

Область, включающая три крупных пика вблизи значения $s = 100$, была исследована, и указанные особенности были замечены. Все остальное — плод моего воображения.

бозона. Это и есть та область энергий, которую мы хотим исследовать новым поколением электрон-позитронных ускорителей.

Взглянем слегка детальнее на ожидаемую феноменологию электромагнитных и слабых взаимодействий в этом высокоэнергетическом режиме, чтобы увидеть, нет ли здесь каких-то четко выраженных порогов, которые можно было бы использовать для определения минимальной энергии следующего поколения ускорителей. На рис. 2 показаны ожидаемые скорости образования точечных частиц (образование пар μ -мезонов) на большом e^+e^- -ускорителе со светимостью $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. На рисунке приведен как функция энергии в СЦМ вклад электромагнитного процесса однофотонной

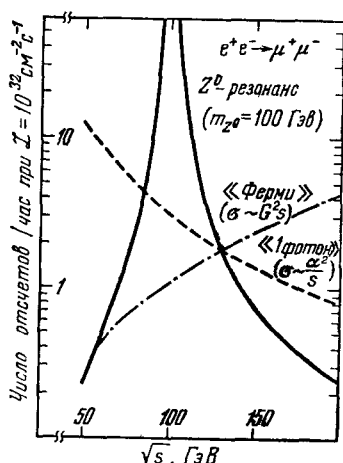


Рис. 2. Число отсчетов в час для образования пар μ -мезонов при светимости $10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ как функция энергии в СЦМ.

Кривая «1 фотон» дает вклад только от электромагнитного взаимодействия. Слабое взаимодействие с Z^0 -токами определяется массой Z^0 -бозона 100 ГэВ и $\sin^2 \theta_W = 0,25$. Кривая с надписью «Ферми» дает скорость счета для слабого взаимодействия без Z^0 -бозона.

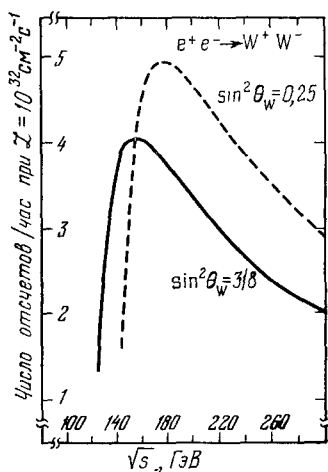


Рис. 3. Скорость образования W^+ -пар как функция энергии в СЦМ для двух значений угла Вайнберга θ_W .

аннигиляции и результаты расчета для двух моделей слабых взаимодействий (без учета интерференции электромагнитного и слабого взаимодействия). Модель Вайнберга — Салама дает громадный резонансный пик в сечении, положение которого зависит от массы Z^0 -бозона. Предсказываемая масса Z^0 -бозона со временем медленно возрастала и сейчас, по-видимому, лежит где-то вблизи 100 ГэВ ($\sin^2 \theta_W = 0,2$).

Кривая с надписью «Ферми» указывает то, что ожидается для бесконечно большой массы Z^0 -бозона при величине нейтрального тока, полученной в нейтринных экспериментах (G_3^0 составляет около 12% G_F^2).

Рис. 2 определяет минимальную энергию для следующего поколения ускорителей в интервале 120—150 ГэВ. Вблизи этой энергии слабое взаимодействие превосходит электромагнитное независимо от калибровочных теорий или, если калибровочные теории верны, независимо от величины массы Z^0 -бозона.

Второй порог можно определить с точки зрения конкретных моделей. Этот порог соответствует энергии, необходимой для образования пары заряженных W -мезонов — носителей заряженного тока слабых взаимо-

действий. На рис. 3 показана скорость образования W -пар как функция энергии в модели Вайнберга — Салама. Принимая во внимание, что эти кривые сильно зависят от теории, можно видеть, что второй порог существует при энергиях свыше 200 ГэВ в СЦМ.

Я прихожу к заключению, что слабое взаимодействие, как мы понимаем его сегодня, дает только один не зависящий от моделей порог для выбора энергии нового e^+e^- -ускорителя и что этот порог соответствует энергии 120—150 ГэВ в СЦМ. Мы не обладаем достаточной информацией, чтобы отождествить следующий порог слабых взаимодействий, но было бы желательно спроектировать новый ускоритель так, чтобы его энергия могла быть увеличена до ~ 200 ГэВ, т. е. перекрыта та область энергий, в которой современные теории предсказывают появление заряженных бозонов. Ускоритель на ~ 150 ГэВ даст для значений s выигрыш в 10—15 раз по сравнению с тем, что доступно для ПЕП и ПЕТРА. Если в качестве путевого проводителя использовать опыт прошлого, то можно было бы ожидать ряда сюрпризов в адронной физике, а также более детальных знаний о слабых взаимодействиях.

Далее я перейду к проекту электрон-позитронного ускорителя, руководствуясь четырьмя правилами:

- 1) Минимальная энергия 120—150 ГэВ.
- 2) Лучше больше, чем меньше.
- 3) Лучше раньше, чем позже.
- 4) Лучше дешевле, чем дороже.

3. ЗАКОНЫ ПОДОБИЯ ДЛЯ e^+e^- -КОЛЕЦ

Законы подобия энергии для любого ускорителя определяются подбором параметров машины при заданной энергии так, чтобы минимизировать затраты при заданной технике и эксплуатационных качествах. В отличие от протонных синхротронов, в накопительных кольцах или в электронных синхротронах на высокие энергии стоимость высокочастотной энергии (требуемой для возмещения потерь энергии частиц на синхротронное излучение) становится главной частью полной стоимости установки. Взаимосвязь стоимости высокочастотной энергии (напряжение на оборот $\propto E^4/R$) и стоимость магнитов, здания и т. п. (приблизительно $\propto R$) определяет размер ускорителя. Ниже будет дан короткий обзор методики минимизации *).

Основным уравнением, влияющим на проектирование электрон-позитронного ускорителя, является:

$$\mathcal{L} \cdot 10^{32} = 1,23 \cdot 10^{33} \frac{\Delta v^* P_B (\text{МВт}) \rho (\text{м})}{E_B^3 (\text{ГэВ}) \beta_v^* (\text{м})}, \quad (1)$$

где \mathcal{L} — желаемая светимость в каждом месте соударения (это скорость реакции в расчете на единицу сечения; она выражается в $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$), E_B — энергия каждого из пучков в кольце, P_B — высокочастотная энергия, требуемая для возмещения потерь на синхротронное излучение частицами обоих пучков, ρ — радиус кривизны, Δv^* относится к фокусирующему воздействию одного пучка на частицы второго в месте соударения, а β_v^* отражает свойства ведущего поля. Ясно, что величину β_v^* следует сделать как можно меньшей, и я приму ее равной 0,1 м. Для β_v^* возникает нижний предел, так как эта величина не может быть сделана меньше длины сгустка в накопительном кольце (5—6 см); ее нельзя сделать существенно меньшей

*) Детали приведены в работе Б. Рихтера, опубликованной в «Nuclear Instruments and Methods» (1976, v. 136, p. 147).

0,1 м также без чрезмерного сокращения свободного пространства для экспериментов в области взаимодействия.

Параметр $\Delta\nu^*$ — это линейный сдвиг частоты в каждом месте взаимодействия. На основе экспериментов со многими типами электронных накопительных колец при различных энергиях эта величина не зависит от конструкции машины и имеет максимальное значение, равное приблизительно 0,06 (как представляется, для протонных колец $\Delta\nu$ должно быть значительно меньше, примерно, 0,005).

Введем новый параметр δ , равный энергии пучка в единицах 100 ГэВ, после чего уравнение (1) можно переписать в следующем виде:

$$P_B \text{ (МВт)} \rho \text{ (км)} = 136 \mathcal{L} \delta^3. \quad (2)$$

Задачи физических исследований на ускорителе четко устанавливают значения δ и \mathcal{L} . Как правило, проект ускорителя определяется величинами P_B и ρ , а их произведение ограничено уравнением (2).

Далее мы нуждаемся в процедуре определения величин P_B и ρ для минимизации стоимости проекта. Поскольку нас интересуют законы подобия, я опущу тонкости, интересные для создателей ускорителя, как, например, различие между радиусом кривизны и геометрическим радиусом *), а также тонкости, представляющие интерес для экономистов, например, учетный процент. Тогда стоимость ускорителя можно разбить на пять частей: во-первых, стоимость основного кольца, включая магниты, вакуумные камеры, опоры, силовое питание, туннели, охлаждение, систему управления, кабели и т. п. (k_1 миллионов долларов на км), во-вторых, стоимость высокочастотной энергии, включая клистроны, силовое питание, волноводы, охлаждение, коммутаторы, управление и т. п. (k_2 миллионов долларов на МВт); в-третьих, стоимость ускоряющей структуры, включая резонаторы, опоры, настроечные элементы, охлаждение, управление, помещения и т. п. (k_3 миллионов долларов на км); в-четвертых, стоимость эксплуатационной энергии (k_4 миллионов долларов на 10 МВт-годов); в-пятых, стоимость лабораторий и экспериментальной программы, включая дороги, мастерские, помещения для работы, экспериментальные залы, приборы и т. п. (этот пункт зависит не от деталей проекта ускорителя, а от размаха экспериментальной программы; следовательно, он исключается из проводимой ниже процедуры оптимизации).

Тогда стоимость ускорителя, включая затраты на эксплуатационную энергию в течение 10 лет, может быть записана в виде

$$C = 2\pi k_1 R + (P_B + P_D) k_2 + L k_3 + k_4 (P_B + P_D) \varepsilon^{-1}, \quad (3)$$

где R — радиус ускорителя (км), P_D — рассеиваемая в ускоряющей структуре мощность (МВт), L — длина ускоряющей структуры (км), а ε — эффективность преобразования электроэнергии в высокочастотную энергию. Уравнение (3) можно свести к функции двух переменных, R и P_D , используя уравнение (2) и следующие соотношения:

$$P_D = \frac{V^2}{LZ}, \quad (4a)$$

$$V = \frac{\delta^4}{\rho}, \quad (4б)$$

$$L = \frac{1,04 \cdot 10^5 \delta^8}{P_D R^2 Z}. \quad (4в)$$

*) Поскольку в структуру накопителя входят прямолинейные секции без магнитного поля, геометрический радиус всегда больше радиуса кривизны. (Прим. перев.)

Уравнение (4а) связывает рассеиваемую мощность с напряжением на резонаторе, длиной резонатора и его шунтовым сопротивлением; уравнение (4б) связывает напряжение на резонаторе с энергией пучка и радиусом ускорителя; уравнение (4в) является следствием двух предыдущих.

Минимум стоимости находится путем приравнивания к нулю частных производных уравнения стоимости по R и P_D . Результатом является закон подобия радиуса для ускорителя минимальной стоимости с учетом затрат на эксплуатационную энергию в течение 10 лет работы:

$$R = \sqrt{a\delta^3 + b\delta^4}.$$

В ускорителе, рассчитанном на тот диапазон энергий, который требуется для изучения слабого взаимодействия, преобладает член δ^4 и в этом случае радиус и стоимость оказываются пропорциональными квадрату энергии. Используя значение констант, полученные из опыта по сооружению накопительного кольца ПЕП в СЛАК (стоимость энергии 3 цента за кВт·ч,

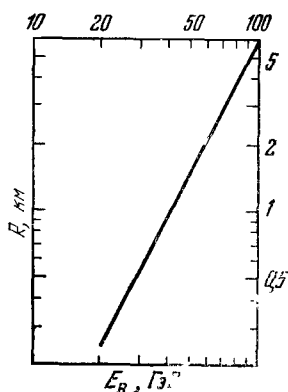


Рис. 4. Оптимизированный по стоимости радиус кривизны как функция энергии пучка для электрон-позитронного накопительного кольца при использовании обычной высокочастотной техники и с учетом стоимости установки ПЕП.

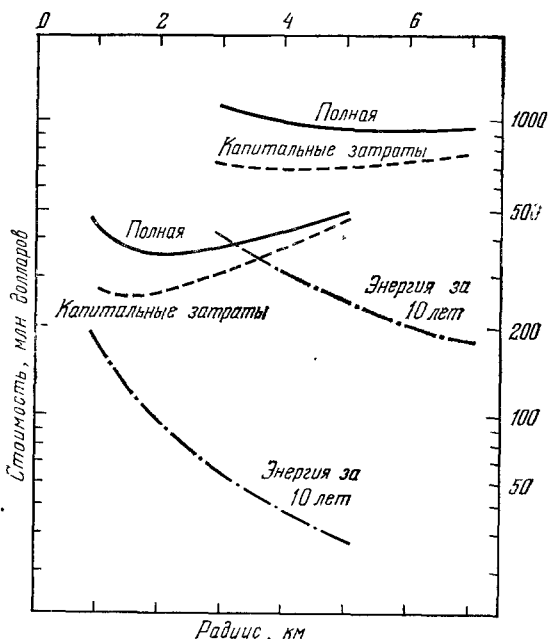


Рис. 5. Стоимость ускорителей с энергией 60 и 100 ГэВ в каждом пучке как функция радиуса.

Цифры основаны на стоимости установки ПЕП (в ценах 1976 г.); не включены затраты на сооружение зданий, лабораторных помещений и т. п.

$k_1 = 12,6$, $k_2 = 0,6$, $k_3 = 80$, $k_4 = 1,8$), и экстраполируя к. п. д. преобразования электроэнергии до 0,75, получаем зависимость оптимального радиуса от энергии, приведенную на рис. 4. Ускоритель с энергией 70×70 ГэВ имеет радиус, приблизительно равный 2,7 км. Конечно, для проекта ускорителя надо сделать гораздо больше, чем установить радиус, но как только радиус задан, остальные параметры последуют довольно естественно.

Как видно на рис. 5, минимум у кривой стоимости довольно плоский. На этом рисунке приведены стоимость сооружения ускорителя, эксплуатационные расходы на энергию и полная стоимость установки для двух

примеров — в одном случае для 120 ГэВ в СЦМ и во втором для 200 ГэВ в СЦМ. (Обратите внимание, что приведенные здесь капитальные затраты включают расходы только на сам ускоритель и на обслуживающий персонал. В стоимость эксплуатационной энергии включено только то, что идет на высокочастотные системы. Приведен радиус дуги ускорителя, а не геометрический радиус. Затраты даны в ценах 1976 г. с учетом ожидаемой инфляции и непредвиденных расходов.) Минимум кривой капитальных затрат всегда лежит при меньших радиусах, чем минимум кривой полных затрат. Можно значительно изменить радиус ускорителя ценой лишь незначительных изменений полной стоимости установки.

4. НЕКОТОРЫЕ ВАРИАНТЫ УСКОРИТЕЛЕЙ И ДОСТОИНСТВА ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ

А теперь я перейду к обсуждению некоторых примеров ускорителей, в том числе и с неоптимальным радиусом. В таблице приведены параметры и стоимости (без затрат на лабораторные разработки) ряда ускорителей: с энергией 100 ГэВ в СЦМ, которая, как я считаю, ниже нужной энергии, но которая, по убеждению горячих приверженцев современных калибровочных теорий, достаточна для образования Z^0 -бозона; с энергией 140 ГэВ

Т а б л и ц а

Некоторые параметры ускорителей с разными энергиями в СЦМ и радиусами. Стоимости основаны на стоимости установки ПЕП и приведены в ценах 1976 г. (в миллионах долларов). Высокочастотные системы обычные

| | Оптимал- ный, 100 ГэВ | Большой, 100 ГэВ | Оптимал- ный, 140 ГэВ | Большой, 140 ГэВ | Оптимал- ный, 200 ГэВ | Малый, 200 ГэВ |
|---------------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|
| ρ , км | 1,4 | 2,7 | 2,7 | 5,4 | 5,4 | 2,7 |
| P_B , МВт | 12 | 6 | 17 | 9 | 25 | 50 |
| P_D , МВт | 17 | 9 | 34 | 17 | 70 | 140 |
| L , км | 0,6 | 0,3 | 1,2 | 0,6 | 2,5 | 5,1 |
| Капитальные затраты | 180 | 250 | 345 | 500 | 700 | 740 |
| Затраты на энергию за 10 лет | 70 | 36 | 122 | 60 | 225 | 400 |

в СЦМ, которая находится как раз в середине моего «порогового» диапазона; с энергией 200 ГэВ в СЦМ, которая лежит вблизи определенного выше второго порога. Я включил в эту таблицу неоптимальные ускорители из-за скромности (я могу простить физиков, не занимающихся высокими энергиями, за возможное мнение, что любой группе лиц, могущих задумываться над расходом такого количества долларов, какое указано в таблице, не должно быть знакомо значение понятия «скромность»), потому что мы не знаем природу с той определенностью, на которую часто претендуем. Природа обычно удивляет нас и мы должны допустить возможность того, что сделанное нами окажется как раз ниже наиболее интересной области. Разумно проектировать ускорители, энергия которых может быть увеличена, если создание возможности увеличения энергии не приведет к возрастанию стоимости проекта на большую величину.

Такая идея возможности увеличения энергии не нова для мира ускорителей высоких энергий. Примером ускорителя такого типа являются ФНАЛ и СПС, энергия которых была увеличена на 25—50% по сравнению с начальными проектными величинами еще до завершения их сооружения. Энергия линейного ускорителя в СЛИАК и синхротрона в Корнелле выросла на 25% после завершения их сооружения благодаря увеличению высоко-

частотной мощности. Энергия ФНАЛ удвоится на основе новой техники для магнитов — сверхпроводимости. Энергия накопительного кольца СНИР выросла на 50 % после замены высокочастотных систем и отдельных источников питания. Есть много других примеров. Общая черта всех этих примеров заключается в том, что возможность увеличения энергии была заранее предусмотрена проектировщиками и включена за малую стоимость в основной проект ускорителя. Нам следует включить возможность увеличения энергии в проект нового e^+e^- -ускорителя.

Вернемся к табл. 1. В первых двух столбцах приведены стоимости ускорителя на 100 ГэВ в СЦМ с оптимальным радиусом и с радиусом больше оптимального. При увеличении радиуса возрастает стоимость ускорителя, а эксплуатационные расходы падают, так что полная стоимость с учетом эксплуатационной энергии за 10 лет возрастает всего на 15 %. В третьем и четвертом столбцах таблицы приведены стоимости оптимального ускорителя на энергию 140 ГэВ в СЦМ и такого же ускорителя, но с большим радиусом. Опять компромисс между капитальными затратами и стоимостью энергии таков, что десятилетние затраты на большой ускоритель всего на 20 % превышают расходы на вариант с меньшим размером при той же энергии. В последних двух столбцах указаны ускорители на 200 ГэВ в СЦМ при оптимальном радиусе и при радиусе меньше оптимального. Машина с меньшим радиусом стоит, примерно, на 20 % больше машины с большим радиусом, хотя в данном случае это 20 % от очень большой величины.

Мой вывод из этой таблицы заключается в том, что ускоритель на 200 ГэВ слишком дорог, чтобы сооружать его на основе обычной высокочастотной техники средствами любого одного региона мира физики высоких энергий. Оптимальный ускоритель на 100 ГэВ — это плохой выбор, поскольку его энергия является промежуточной и достаточной лишь для достижения того, что, как сейчас предполагается, должно быть « Z^0 -порогом» (порог, который значительно вырос за последние несколько лет).

Ускорители во втором, третьем и шестом столбцах таблицы — это почти один и тот же ускоритель, за исключением установленной высокочастотной системы. Стоимости магнитов трех этих ускорителей различаются незначительно, так как количество железа в таких магнитах со слабым полем определяется скорее структурными требованиями, чем насыщением железа. Мне кажется ясным, что наиболее подходящим курсом было бы сооружение ускорителя с радиусом кривизны, грубо говоря, 3 км и оборудованием его *поначалу* высокочастотной системой, достаточной для перехода через то, что, как сейчас предполагается, должно быть первым порогом, — через массу Z^0 -бозона. Таким образом, мы получим ускоритель на минимальную желаемую энергию при затратах, не очень превышающих стоимость оптимального ускорителя на данную энергию, и в то же самое время допускаем возможность значительного увеличения энергии в будущем.

5. НОВАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКОВ

В перспективе для электрон-позитронных накопительных колец наиболее интересной является новая высокочастотная техника. Именно стоимость энергии делает радиус таких ускорителей большим, а значительная часть энергии при обычной высокочастотной технике идет на нагревание стенок резонаторов (P_D в таблице).

Лаборатории во всем мире занимаются двумя направлениями разработки новой техники. Первый из них — это высокочастотная сверхпроводимость, которая заметно сокращает рассеиваемую в резонаторах энергию благодаря увеличению шунтового импеданса резонатора в 10^4 — 10^5 раз.

Второй — это то, что я называю нестационарными высокочастотными схемами, когда на резонаторе нет напряжения все время между прохождением пучка. Сверхпроводимость, или нестационарные схемы могут, в принципе, резко уменьшить высокочастотную энергию, не идущую в пучки. Важность этих направлений новой техники будет полностью определяться их стоимостью по сравнению со стоимостью обычных высокочастотных систем. Если затраты окажутся меньше, чем для обычных систем, то можно уменьшить стоимость ускорителя с данной энергией или же перевести ускоритель данного радиуса на более высокую энергию. Вторую альтернативу я нахожу наиболее интересной.

Независимо от того, существует ли Z^0 -бозон, мы будем стремиться к достижению более высоких энергий в e^+e^- -системе. Если Z^0 -бозон будет найден, то важной областью для работы станет следующий порог — образование W^\pm -пар. Если Z^0 -бозон не будет найден, нам потребуются более высокие энергии, чтобы получить указания о массе переносчика слабых взаимодействий, или для того, чтобы попытаться понять вид слабых взаимодействий. Указанные направления новой техники могут позволить увеличить энергию конкретного ускорителя ценой значительно меньших затрат, чем при старой технике. Однако мы не будем знать в течение нескольких лет, практична ли новая техника или сколько она стоит.

Для ускорителя, имеющего возможность увеличения энергии, нет необходимости ждать эту новую технику в надежде на некий крупный экономический выигрыш. «Большой» ускоритель на 100 ГэВ, указанный в таблице, расходует на обычную высокочастотную технику только малую часть капитальных затрат (10—15%). Новая высокочастотная техника не может дать в этом случае значительного экономического выигрыша. Крупный эффект от такой новой техники можно получить при увеличении энергии ускорителя до 150 или 200 ГэВ в СЦМ. Новая техника может значительно уменьшить стоимость ускорителя на 100 ГэВ с оптимальным радиусом, но энергию такой машины нельзя увеличивать до такой же величины, как энергию машины с большим радиусом, поскольку максимальная энергия данного накопительного e^+e^- -кольца ограничена не только деньгами, но и энергетическим разбросом из-за квантовых флуктуаций, передачей высокочастотной энергии пучку и т. п.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Физические результаты, которые могут быть получены на электрон-позитронном накопительном кольце, работающем в диапазоне энергий, где доминируют слабые взаимодействия, станут решающими для понимания слабого взаимодействия и его связи с электромагнитным взаимодействием. Для следующего поколения e^+e^- -ускорителей существует пороговая энергия где-то вблизи 120 ГэВ в СЦМ. Мой взгляд на правильную стратегию заключается в том, чтобы построить ускоритель с радиусом выше того оптимального, который требуется для этой пороговой энергии, и запланировать с самого начала увеличение энергии ускорителя в более позднее время. Степень увеличения энергии должна зависеть от физических результатов, полученных в начальном рабочем диапазоне энергий. Увеличение энергии может быть осуществлено добавлением обычных или новых высокочастотных средств. Нет необходимости ждать новую технику, ибо на первом этапе работы не должно быть получено значительной экономии.

Нам надо начинать как можно раньше, так как мы нуждаемся в ответах, которые можно получить в экспериментах на таком ускорителе, чтобы понять связь слабых сил с электромагнитными силами и уменьшить таким образом число законов внешне независимых сил Природы.

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

821.484.6

СЛЕДУЮЩЕЕ ПОКОЛЕНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ *)**Б. Рихтер****1. ВВЕДЕНИЕ**

Я являюсь как физиком-экспериментатором в области элементарных частиц, так и создателем ускорителей. И с той, и с другой стороны я рад, что имею возможность, закрывая эту конференцию, поразмышлять о следующих поколениях ускорителей. Эти ускорители будут очень большими, и для их завершения потребуются соответственно большие интеллектуальные, промышленные и финансовые ресурсы. Их параметры должны быть хорошо выбраны, поскольку мы можем позволить себе строить и эксплуатировать все меньше ускорителей по мере того, как они становятся все более крупными.

Потребность в ускорителях, увеличивающих доступные в настоящее время величины параметров (энергия, ток или типы частиц), поддерживается необходимостью иметь новую качественную (типы частиц) или количественную (энергия или ток) информацию, чтобы ответить на самые неотложные физические вопросы того периода, когда ускоритель проектируется. Полученная в экспериментах на новой машине информация служит путеводителем к более фундаментальному пониманию природы. Часто это происходит путем подтверждения правильности одной из нескольких конкурирующих моделей, каждая из которых может объяснить большинство явлений, наблюдаемых на ускорителях предыдущего поколения. Профессора Триллинг и Бьёркен в предыдущих выступлениях обсуждали, что мы узнали с помощью современного поколения ускорителей и какие направления были выбраны в теории на основе этих наблюдений. Я сделаю некоторые предположения относительно типов ускорителей, которые потребуются для проверки критических деталей современных моделей структуры и взаимодействия элементарных частиц, а также для более глубокого исследования некоторых явлений, не объясненных этими моделями.

Проходит около десяти лет от появления первого схематического проекта нового ускорителя до того момента, когда пучок в первый раз попадает на мишень. Физические вопросы, для ответа на которые и проектируется ускоритель, должны быть поставлены достаточно широко, чтобы остаться справедливыми спустя десятилетие. Тип ускорителя и сам проект

*) Richter B. The Next Generation of Accelerators.— IEEE Trans. Nucl. Sci., 1979, v. NS-26, p. 4261.— Заключительный доклад на Национальной конференции по ускорителям заряженных частиц. Сан-Франциско, США; 12—14 марта 1979 г.— Перевод С. Н. Родионова.

Должны выбираться так, чтобы давать достаточно большое увеличение параметров, позволяющее получать ответы даже на еще не поставленные вопросы. (Существует очень мало примеров ускорителей, которые оказали наибольшее воздействие на развитие физики путем осуществления экспериментов, помещенных в список наиболее важных в физической главе эскизного проекта.) Существенной частью каждого нового проекта должна стать возможность увеличения параметров ускорителя.

Отправной точкой для любого обсуждения будущих ускорителей является то, что имеется сейчас, и это отражено в табл. I. В ней я поместил

Таблица I

Краткий список ускорителей с наивысшей энергией, которые в настоящее время действуют (а), сооружаются (б) и находятся на стадии развернутого проектирования (в)

| Тип частиц | Ускоритель и лаборатория | Энергия, ГэВ | Дата запуска |
|------------|--------------------------------|--------------------|--------------|
| (а) | | | |
| e^+e^- | ПЕТРА (ДЭЗИ) | 18×18 | Работает |
| e^+e^- | ПЕП (СЛАК) | 18×18 | » |
| e^- | СЛАК | 35 | » |
| p | ФНАЛ | 450 | » |
| p | СПС (ЦЕРН) | 450 | » |
| pp | ИСР (ЦЕРН) | 31×31 | » |
| (б) | | | |
| p | Удвоитель энергии (ФНАЛ) | 1000 | 1982 г. |
| pp | Накопитель антипротонов (ЦЕРН) | 300×300 | 1982 г. |
| pp | ИЗАБЕЛЛА (Брукхейвен) | 350×350 | 1986 г. |
| (в) | | | |
| e^+e^- | ЛЭП (Европа) | 80×80 | 1988 г.? |
| p | УНК (СССР) | 3000 | 1988 г.? |
| pp | ТЕВАТРОН (ФНАЛ) | 1000×1000 | 1985 г.? |

сведения об ускорителях с наибольшей энергией, которые в настоящее время работают, сооружаются или находятся на стадии развернутого проектирования. Все ускорители первой группы, за исключением ПЕП и ПЕТРА, работают уже несколько лет. Именно эти ускорители, а также e^+e^- -машины СПИР и ДОРИС дали нам информацию, которая привела к современному взгляду на элементарные частицы.

Среди второй группы машин удвоитель энергии Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми является первой попыткой создать крупный ускоритель со сверхпроводящими магнитами. По современному расписанию он должен быть окончен в 1982 г., и даст значительное увеличение энергии в системе центра масс (СЦМ) для экспериментов с неподвижной мишенью.

В проекте накопителя антипротонов ЦЕРНа используется методика стохастического охлаждения для создания сгустков антипротонов с малым фазовым объемом. С этими охлажденными пучками антипротонов ЦЕРН сделает первую попытку получить встречные протон-антипротонные пучки с подходящей светимостью ($10^{30} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$). Проектируемая максимальная расстройка $\Delta v = 0,005 *$, возникающая от взаимодействия пучков, равна

*) Параметр v — это число бетатронных колебаний частиц на оборот. (Прим. перев.)

максимальной расстройке, ожидаемой для несгруппированных протон-протонных встречных пучков. Не ясно, что такую величину расстройки можно получить при соударениях сгруппированных протонных пучков. Основная физическая задача проекта накопителя антипротонов — обнаружение Z^0 -бозона (нейтрального переносчика слабых сил), масса которого, как ожидается, должна лежать в районе 100 ГэВ. Однако если даже Z^0 -бозон и существует, то совсем не очевидно, что его можно найти в предлагаемых экспериментах, поскольку современные модели предполагают, что скорость образования Z^0 -бозона с распадом в наиболее легко наблюдаемые конечные состояния (e^+e^- или $\mu^+\mu^-$) будет составлять от 0,1 до 1 события в день. При наиболее низкой ожидаемой скорости образования Z^0 -бозона он может затеряться на уровне фона.

Третьей машиной в списке сооружаемых стоит ИЗАБЕЛЛА — установка со сверхпроводящими магнитами для получения встречных протон-протонных пучков. Как ожидается, она должна иметь светимость между 10^{32} и 10^{33} см $^{-2}$ с $^{-1}$. На эти оценки светимости не влияют те неопределенности, какие существуют для соударения сгруппированных пр-пучков.

Третья группа машин в табл. I — это те ускорители, которые в настоящее время проектируются. Поскольку ни один из них еще официально не одобрен, указанные в таблице сроки завершения являются только предположениями. Проект ЛЭП разрабатывается в ЦЕРНе. Ускоритель УНК с неподвижной мишенью на энергию 3 ТэВ проектируется в Серпухове с использованием сверхпроводящих магнитов, имеющих поле 40 кГс. Планируется также возможное добавление различных вариантов со встречными пучками. Третья проектируемая сейчас машина ТЕВАТРОН — это проект встречных протон-антипротонных пучков со светимостью 10^{30} — 10^{31} см $^{-2}$ с $^{-1}$, разрабатываемый во ФНАЛ. В нем будут использованы кольцо удвоителя энергии ФНАЛ для удержания пучков высокой энергии, а также накопительное кольцо с большой апертурой (скорее всего, с использованием стохастического охлаждения).

В остальной части моего выступления я проведу обсуждение физических проблем, которые связаны с выбором параметров ускорителей, а также некоторых особенностей проектирования следующего поколения электронных и протонных ускорителей.

2. ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ

а) Энергия *)

При энергиях в СЦМ порядка 100 ГэВ и выше мы вступаем в область, где слабое взаимодействие начинает конкурировать с электромагнитным, а затем и превосходить его. Именно эту область энергий мы хотим исследовать при помощи нового поколения электрон-позитронных машин.

Слабое взаимодействие, как мы понимаем его сегодня, дает лишь один не зависящий от моделей энергетический порог, соответствующий энергии в СЦМ 120—150 ГэВ и связанный с образованием Z^0 -бозона. Мы не обладаем достаточной информацией, чтобы определить следующий порог слабых взаимодействий (образование заряженных векторных мезонов), но было бы желательно так спроектировать новый ускоритель, чтобы его энергию можно было поднять до 200 ГэВ и перекрыть те области энергии, где по современным понятиям должны образовываться заряженные бозоны.

*) Содержание этого раздела полностью совпадает с содержанием раздела 2 предыдущего доклада Б. Рихтера, перевод которого публикуется в этом же номере журнала. Поэтому ниже приведено лишь краткое изложение материала. (Прим. ред.)

б) Электрон-позитронные накопительные
кольца*)

Основное уравнение, влияющее на проектирование e^+e^- -машин, может быть сведено к виду

$$P_B \text{ (МВт)} \rho \text{ (км)} = 136 \mathcal{L} \delta^3, \quad (1)$$

где P_B — высокочастотная мощность, требуемая для компенсации потерь на синхротронное излучение обоими пучками, ρ — радиус кривизны ускорителя, \mathcal{L} — светимость, а δ — энергия в единицах 100 ГэВ. Задачи физических исследований на ускорителе задают значение \mathcal{L} и δ . Проектирование машины в общем виде определяется параметрами P_B и ρ , а их произведение ограничено уравнением (1).

Значения вкладываемой в пучок мощности и радиуса кривизны могут быть получены в процессе минимизации стоимости. Эта минимизация приводит к тому, что радиус и стоимость машины оказываются пропорциональными *квадрату* энергии ускорителя. Если использовать стоимость установок ПЕП и ПЕТРА, то длина окружности e^+e^- -машины дается следующим соотношением:

$$2\pi R \approx 40 \left[\frac{E \text{ (ГэВ)}}{100} \right]^2 \text{ (км)}. \quad (2)$$

Новая техника, например, сверхпроводящие высокочастотные системы или методика импульсного ускорения, может только изменить постоянную величину в уравнении (2). Наиболее оптимистичные оценки дешевизны высокочастотной сверхпроводимости, как я слышал, уменьшают величину «40» в уравнении (2) до «30».

Минимум на графике зависимости стоимости от радиуса машины (см. рис. 5 предыдущего доклада) совсем плоский, и это обстоятельство позволяет нам построить ускоритель, который может оказаться способным отвечать на вопросы, еще не заданные, но могущие стать горящими проблемами дня через десять лет, когда ускоритель заработает в первый раз. Стратегия заключается в том, чтобы выбрать энергию чуть выше наименьшего энергетического порога, который может быть сейчас определен, и построить ускоритель с радиусом больше оптимального для этой энергии радиуса. Добавочные затраты для такого неоптимального радиуса малы, а энергию такой машины можно увеличить, если физика подтверждает эту необходимость, используя обычную технику, и увеличить даже еще больше, если использовать новую ускорительную технику.

Это как раз та стратегия, которую использует группа ЦЕРН при проектировании ЛЭП. Машина ЛЭП имеет длину окружности 30 км, по сравнению с чем машина СПС кажется карликовой. Она, вероятно, будет спроектирована для первоначального запуска с достаточным количеством обычной высокочастотной техники, чтобы достичь энергии 120 ГэВ в СЦМ. В Европе выполняется энергичная программа разработки сверхпроводящих высокочастотных систем, и если эта программа осуществится, энергия ускорителя ЛЭП может быть, по-видимому, увеличена до 200—250 ГэВ в СЦМ.

в) Линейные ускорители со встречными пучками

Сооружение накопительного кольца ЛЭП будет стоить, вероятно, около миллиарда швейцарских франков. Поскольку законы подобия для e^+e^- -накопителей свидетельствуют об увеличении стоимости пропорцио-

*) Затронутые в этом разделе вопросы достаточно подробно обсуждаются в разделах 3—5 предыдущего доклада Б. Рихтера. Мы помещаем здесь сокращенный перевод раздела. (Прим. ред.)

нально квадрату энергии, может показаться, что мы близки к максимальной практической с финансовой точки зрения энергии встречных e^+e^- -пучков. Однако может существовать альтернатива для e^+e^- -соударений при очень больших энергиях — системы линейных встречных пучков. Сталкивающиеся линейные пучки для получения больших энергий в СЦМ время от времени обсуждались в литературе (см., например, статью У. Амальди: Phys. Lett. Ser. B., 1976, v. 61, p. 313). Совсем недавно М. Тигнер из Корнелла, А. Н.Скринский из Новосибирска и я обнаружили, что каждый из нас независимо обдумывал такие системы и ограничения на их характеристики.

Рассмотрим случай двух однородных зарядовых цилиндров радиусом r_b и длиной l_b , которые выстреливаются навстречу друг другу с частотой f Гц. Светимость для такой ситуации дается выражением

$$\mathcal{L} = \frac{n^2 f}{\pi r_b^2}, \quad (3)$$

где для простоты я предположил, что числа частиц в двух пучках равны. При e^+e^- -соударениях частицы каждого пучка отклоняются к оси другого пучка под воздействием мощных электромагнитных сил, как показано на рис. 1. Относительное изменение радиуса частицы одного пучка при прохождении через второй пучок дается выражением

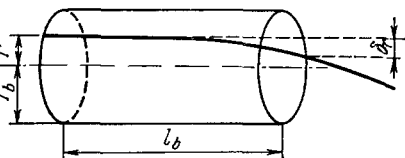


Рис. 1. Геометрия области соударения линейных встречных пучков.

$$\Delta = \frac{\delta r}{r} \approx \frac{r_e l_b n}{2 r_b^2 \gamma}, \quad (4)$$

где r_e — классический радиус электрона, а γ — энергия частиц в единицах энергии покоя mc^2 .

В единицах параметра Δ светимость равна

$$\mathcal{L} = \frac{2 \Delta \gamma n f}{\pi r_e l_b}. \quad (5)$$

Поскольку пучки используются только один раз, можно позволить величине Δ быть очень большой. Нелегко определить максимально допустимое значение Δ и, по-видимому, потребуется моделирование на ЭВМ, чтобы его найти, но для данного анализа я просто приму $\Delta_{\max} = 1$. В этом предельном случае светимость равна

$$\mathcal{L}_{\max} \approx 10^{31} P_B \text{ (МВт) } [\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}], \quad (6)$$

где теперь я предположил, что пучки имеют гауссово распределение с $\sigma_l = 1/2$ см.

Определенная уравнением (6) светимость не зависит от энергии и зависит только от вкладываемой в пучок мощности! Это означает, что стоимость машины с заданной светимостью пропорциональна *первой* степени энергии (требуемая для ускорения пучка длина линейного ускорителя растет линейно с энергией), в то время как стоимость накопительного кольца для встречных пучков растет пропорционально *квадрату* энергии, в чем мы убедились ранее. При некоторой энергии системы линейных встречных пучков *должны* стать дешевле накопительных колец.

Второй предел для систем линейных встречных пучков обязан испусканию синхротронного излучения в процессе соударения. Относительная потеря энергии частицей на краю пучка при прохождении через второй

пучок дается выражением

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{синхр}} = \frac{E^3}{\rho_B} \theta_B, \quad (7)$$

где θ_B и ρ_B — соответственно угол поворота и радиус кривизны частицы, отклоненной при прохождении через второй пучок ($\theta_B \approx r_b/l_b$; $\rho_B \approx \approx l_b^2/r_b$). Потери на синхротронное излучение приводят к разбросу энергии при соударении, и этот разброс энергий ограничен теми физическими экспериментами, которые собираются проводить. При $\Delta = 1$ разброс энергии, вызванный синхротронным излучением, равен

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{\text{синхр}} = \frac{E \text{ (ГэВ)} \mathcal{L} (10^{32})}{4f \text{ (Гц)}}. \quad (8)$$

Таким образом, задаваемый максимальный разброс энергии устанавливает нижний предел на частоту повторения работы машины.

У нас пока еще нет позитронного источника для использования в этой системе линейных встречных пучков. При достаточно высокой энергии мы фактически можем регенерировать требуемое число позитронов из электронного пучка после того, как произойдет соударение пучков. Все используемые сейчас позитронные источники (ДЭЗИ, Фраскати, Орсе, СЛАК) имеют с точностью до 20% одну и ту же эффективность образования позитронов, и эта эффективность зависит лишь от энергии частиц, падающих на мишень, где образуются позитроны:

$$\frac{n_+}{n_-} = 10^{-2} E_i \text{ (ГэВ)}. \quad (9)$$

При энергии пучка 100 ГэВ позитроны можно регенерировать в каждом импульсе после начального соударения, используя возмущенный электронный пучок (очевидно, что можно использовать и пучки с энергией 50 ГэВ,

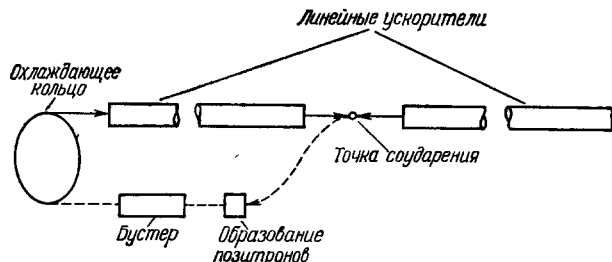


Рис. 2. Схема системы линейных встречных пучков.

если в образовании новой партии позитронов участвуют как первичные электроны, так и первичные позитроны).

Используемый в настоящее время стандартный позитронный источник дает пучки с большим эмиттансом *) (нормированный эмиттанс позитронного источника СЛАК равен $\varepsilon_n = \pi x x' \gamma = 0,3\pi$ см, что почти в 100 раз выше нормированного эмиттанса электронного источника СЛАК). Позитроны можно охлаждать радиационным затуханием в накопительном кольце. Для электронного накопительного кольца с числом бетатронных колебаний на оборот ν и энергией E в приближении гладкого ведущего поля

$$\varepsilon_n = 0,4\pi E^3 \text{ (ГэВ)} \frac{1}{\nu^3} \text{ (см)}. \quad (10)$$

*) То есть с большим фазовым объемом. (Прим. перев.)

После затухания пучок с энергией 0,5 ГэВ в накопителе с $v \approx 2$ имеет тот же эмиттанс, что и электронный пучок СЛАК.

Полная система линейных встречных пучков схематически изображена на рис. 2. В нее входят два основных линейных ускорителя, мишень для получения позитронов, охлаждающее кольцо и бустер, где позитроны получают энергию, необходимую для инъекции в охлаждающее кольцо. Некоторые параметры возможной системы линейных встречных пучков с разбросом энергии в 1% (связанным с соударением пучков) и пучками круглой формы радиусом σ_r , имеющими гауссово распределение плотности, таковы:

| | |
|--------------------------|--|
| Энергия E | 350×350 ГэВ |
| Частота f | 2500 Гц |
| Число частиц n | 10^{11} |
| Радиус пучка σ_r | $1,5 \cdot 10^{-6}$ м |
| Светимость \mathcal{L} | 10^{32} см ⁻² с ⁻¹ |

Системы линейных встречных пучков находятся еще на ранней стадии развития. Многое предстоит сделать в отношении оптимизации системы, изучения ограничений на интенсивность сталкивающихся пучков, изучения возможности работы с несколькими точками взаимодействия, а также исследования стабильности больших линейных ускорителей и расплывания фазового объема в них. Линейный закон подобия с энергией делает такие системы чрезвычайно обещающими, и мы в СЛАКе ведем различные исследования по этой теме.

3. ПРОТОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ

а) Ф и з и к а

Энергия в СЦМ, доступная в ускорителях с неподвижной мишенью, пропорциональна квадратному корню из энергии пучка, падающего на мишень. Энергия в СЦМ, интенсивность машины и набор имеющихся вторичных пучков определяют, на какие физические вопросы, обсужденные ранее проф. Бьёркеном, может быть обращен такой ускоритель. 20 ТэВ — это примерно та максимальная энергия, о которой я могу сейчас думать. Я привожу далее таблицу энергий в СЦМ для протонного пучка с энергией 20 ТэВ, падающего на неподвижную мишень, для нейтринного пучка с энергией 40 ТэВ, который можно получить от таких протонов, а также для ряда других сооружаемых или проектируемых машин:

| Ускоритель | Энергия в СЦМ, ГэВ |
|-------------------------|--------------------|
| 20 ТэВ, p | 190 |
| 40 ТэВ, ν | 135 |
| ЛЭП | 150—200 |
| ИЗАБЕЛЛА | 700 |
| Накопитель антипротонов | |
| ЦЕРН | 600 |
| ТЕВАТРОН ФНАЛ | 2000 |

Этот перечень означает для меня, что ускорители с неподвижной мишенью даже при энергии 20 ТэВ не могут конкурировать в поисках ответов на многие вопросы, определенные ранее. Например, они не кон-

курентноспособны по отношению к ЛЭП при поиске новых кварков и лептонов или для изучения мод распада Z^0 -бозона. Они не могут конкурировать с ЛЭП, ИЗАБЕЛЛА, проектом накопителя антипротонов ЦЕРНа или с проектом ТЕВАТРОН ФНАЛ при поисках новых переносчиков нейтральных токов с большой массой. Они не могут также конкурировать с накопителем антипротонов, ускорителем ИЗАБЕЛЛА или с ТЕВАТРОНОм при поиске новых эффектов с большим сечением в протон-протонных столкновениях, например, таких явлений, на которые намекают некоторые последние данные, полученные при изучении космических лучей *).

С другой стороны, такие большие протонные ускорители могут оказаться интересными при изучении взаимодействий мезонов с нуклонами (протонные установки со встречными пучками не имеют пучков вторичных частиц), для экспериментов с передачей большого поперечного импульса, где большая эффективная светимость ускорителей с неподвижной мишенью ($\mathcal{L} = 10^{38} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$) должна бы позволить провести измерения до гораздо больших значений p_T , чем на установках со встречными пучками, а также для изучения реакций нейтрино с протонами. Основной интерес к большим протонным ускорителям, вероятно, связан с различными схемами встречных пучков, где требуется иметь большой протонный ускоритель в качестве инжектора.

б) У с к о р и т е л и

Делая очень мало предположений о свойствах больших протонных ускорителей, я могу дать описание одного из них. Я принимаю максимальное значение магнитного поля 100 кГс (таких полей пока нет, но над ними работают), средний ток выведенного пучка 10^{13} протонов/с и частоту повторения $0,02 \text{ с}^{-1}$. Примерные параметры ускорителя приведены ниже, где максимальная энергия выражена в ТэВ:

| | |
|--|-----------------|
| Длина окружности, км | 3E |
| Мощность системы охлаждения, МВт | 4E |
| Высокочастотная мощность, МВт на оборот | 2E ² |
| Полная высокочастотная мощность, МВт | (5—10) E |
| Максимальная энергия, запасенная в магнитном поле, МДж | 1000E |
| Максимальная энергия, запасенная в пучке, МДж | 75E |
| Стоимость, млн. долларов | 250E |

Цифры для машины на энергию 20 ТэВ очень велики. Длина окружности в два раза превышает размеры проекта ЛЭП. Около 100 МВт мощности идет на систему охлаждения, главным образом — на компенсацию гистерезисных потерь в сверхпроводниках. Высокочастотная ускоряющая система требует свыше 800 МВ на оборот, причем в случае обычной высокочастотной системы будет рассеиваться от 100 до 200 МВт в среднем (очевидно, что сверхпроводящие высокочастотные системы пригодны как в этом случае, так и в случае e^+e^- -накопительных колец). Максимальная энергия, запасенная в магнитном поле в пике цикла ускорения, достигает 20 ГДж, и это создает своего рода проблему для защиты от разрыва цепи питания. Запасенная в пучке энергия в пике ускорения составляет около 1,5 ГДж,

*) Речь идет о так называемых событиях «Центавр», где наблюдалось рождение большого (около сотни) числа заряженных частиц при отсутствии вторичных нейтральных частиц. (Прим. перев.)

что, возможно, приведет к ряду тяжелых проблем с мишенью. Ускоритель на энергию 20 ТэВ будет стоить, грубо говоря, около 5 млрд. долларов, а это делает маловероятным, чтобы такой ускоритель был построен иным способом, чем на основе международного сотрудничества.

Параметры возможного набора установок со встречными пучками, которые могут быть связаны с большим протонным ускорителем, приведены в табл. II. Эти цифры были составлены С. Ченом, Э. Курантом, Э. Кейлом, Н. Кингом, П. Мак-Интайром, Т. Нишикавой и М. Виварджентом

Таблица II

Свойства некоторых установок со встречными пучками, которые могут быть связаны с протонными ускорителями на энергию 20 ТэВ

| Параметр | p-p | p-p, сгруппированный пучок | p-p, непрерывный пучок | e-p |
|---|---------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------|
| Максимальная энергия частиц E , ТэВ | 20×20 | 20×20 | 20×20 | $0,14 \times 20$ |
| Пиковое магнитное поле B , кГс | 100 | 100 | 100 | $0,7 \times 100$ |
| n (число частиц в каждом пучке) | 10^{12} | $6 \cdot 10^{14}$ | $6 \cdot 10^{14}$ | $4 \cdot 10^{13}$ |
| Число сгустков | 4 | 2400 | непрерывный | 160 |
| Максимальная расстройка Δv | 0,005 | 0,005 | 0,005 | $0,06 \times 0,005$ |
| Свободное пространство для экспериментов, м | ± 120 | ± 120 | ± 170 | ± 20 |
| Светимость \mathcal{L} , см ⁻² с ⁻¹ | $2,5 \cdot 10^{30}$ | $1,5 \cdot 10^{33}$ | $5 \cdot 10^{32}$ | $1 \cdot 10^{32}$ |

во время заседания международного комитета по будущим ускорителям (ФНАЛ, октябрь 1978 г.), посвященного проблеме ограничения возможностей ускорителей. Протон-антипротонная светимость ограничена допущением, что полная скорость образования антипротонов в сутки будет такой же, как в проекте накопителя антипротонов ЦЕРНа. Специальный ускоритель с большой частотой повторения типа дерновского ПС или брукхейвенского АГС мог бы значительно увеличить выход антипротонов и позволить иметь большую светимость. Светимость ограничена также длиной промежутков, отведенной для экспериментов. В первом приближении светимость обратно пропорциональна длине промежутков, и лично я охотно променял бы уменьшение длины экспериментальной зоны в четыре раза на увеличение светимости в четыре раза.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Похоже, что на пути сооружения ускорителей с очень высокой энергией нет технических барьеров. Для снижения стоимости почти наверняка потребуются новая техника, например, сверхпроводящие высокочастотные системы для линейных ускорителей со встречными пучками и для ускорения в циклических машинах, а также сверхпроводящие магниты с большими полями. Будут необходимы крупные теоретические усилия, чтобы лучше понять нелинейные взаимодействия пучков с ведущими полями, ускоряющими системами и вакуумными камерами, поскольку эти нелинейные эффекты в очень крупных машинах, вероятно, окажутся более пагубными, чем в наших современных ускорителях.

Основной нашей проблемой станут финансы. До последнего времени мы кое-как изворачивались и учились на каждом поколении ускорителей, как сделать следующее с более низкой стоимостью установки в пересчете

на погонный метр магнитов, на единицу энергии пучка, на единицу энергии в СЦМ и т. д. ЛЭП будет стоить меньше, чем СПС. ИЗАБЕЛЛА будет стоить меньше, чем ФНАЛ. И хотя эта тенденция, без сомнения, сохранится, скачок ускорительных параметров такого масштаба, какой наступит после машин типа ЛЭП, почти наверняка приведет к установкам более дорогим, чем любая построенная до этого.

Я не могу поверить мрачным заявлениям, которые иногда приходится слышать, что сооружаемые сейчас ускорители будут последними, которые следовало бы построить. У поддерживающих нас правительств есть много мотивов (инерция, забота об уменьшении безработицы, международные отношения, платежный баланс и т. п.), но один из этих мотивов такой же, как и у нас, — это интеллектуальная любознательность и желание узнать, как устроен мир. Мы недостаточно хорошо организуем информацию об аспекте «мыслительных приключений» нашей деятельности, и нам следует, конечно, делать это лучше. Однако наша сфера деятельности сохранится столь долго, сколько эксперименты, теории и ускорители физики элементарных частиц будут оставаться главными для ответов на коренные вопросы относительно рождения нашей Вселенной, предельной структуры материи, связи между силами природы и их унификации. Следующие ускорители могут быть построены силами одной нации, региона, нескольких регионов или всего мира, но они будут построены. Думаю, что вы и я примем участие как в их сооружении, так и в их использовании.