

621.384.6+539.12

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ НОВЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ И ЗАДАЧИ
СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ *)***Д. И. Блохинцев, А. В. Ефремов, Р. М. Мурадян*

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	259
2. Действующие и планируемые ускорители	260
3. Важнейшие проблемы физики элементарных частиц	261
а) «Элементарная длина» (261). б) Необычные частицы (262). в) Сильные взаимодействия (263). г) Электромагнитные взаимодействия (264). д) Слабые взаимодействия (265).	
4. Будущие ускорители	266
Цитированная литература	268

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие ускорителей имеет свою собственную логику, вытекающую из предыстории и не всегда соответствующую потребностям физики. История развития ускорителей показывает, что их энергия возрастает примерно на порядок за 7 лет.

С началом эпохи накопительных колец и встречных пучков этот темп роста энергии может существенно возрасти. Типичная энергия циклических ускорителей протонов в ближайшее десятилетие может достичь тысячи гигаэлектрон-вольт.

Однако ясно, что проектирование и создание новых ускорителей должно быть теснейшим образом связано с задачами, выдвигаемыми сегодняшним развитием физики элементарных частиц, с достигнутым уровнем знаний. Необходимо также учитывать уже имеющиеся машины как в нашей стране, так и на Западе, планы их модернизации и возможности, открываемые использованием новых принципов ускорения заряженных частиц. Поэтому, прежде чем обсуждать физические проблемы, коротко остановимся на обзоре действующих и планируемых ускорителей и их модернизации. Что же касается физических проблем, то авторы отдают себе отчет в том, что их ожидания и советы могут во многом оказаться иллюзорными, ибо они в значительной мере относятся к terra incognita. Тем не менее мы надеемся, что этот обзор физических проблем все же может оказаться полезным при выборе типов будущих ускорителей.

*) В основе настоящей статьи лежит записка, составленная по поручению Отделения ядерной физики АН СССР группой физиков-теоретиков в составе Д. И. Блохинцева, С. С. Герштейна, Г. В. Ефимова, А. В. Ефремова, В. Г. Кадьшевского, А. А. Комара, В. А. Матвеева, В. А. Мещерякова, Р. М. Мурадяна, В. И. Огиевского и А. Т. Филиппова, доложенная на расширенном заседании Отделения.

2. ДЕЙСТВУЮЩИЕ И ПЛАНИРУЕМЫЕ УСКОРИТЕЛИ

Протонный ускоритель на 76 Гэв в Серпухове продолжает оставаться крупнейшим ускорителем в СССР^{1, 2}. По интенсивности и стабильности работы он оказался одним из лучших ускорителей в мире в своем классе машин. За три года работы он успел дать физикам много полезной информации, часть из которой (например, очень резкий выход сечения πN -рассеяния на постоянное значение) оказалась столь неожиданной, что до сих пор не получила удовлетворительного объяснения. Безусловно, эксперименты на этом ускорителе еще долгое время будут находиться в центре внимания, несмотря на то, что он уже уступил «пальму первенства» по энергиям ускорителю в Батавии³ на 300 Гэв. В дальнейшем намечается модернизация этого ускорителя с переходом на сверхпроводящие магниты, что позволит довести его энергию до величин порядка 1000 Гэв.

Реализация проекта накопления протонных пучков позволяет еще дальше продвинуться в область высоких энергий — до нескольких тысяч и даже десятков тысяч гигаэлектрон-вольт. Действующие уже сейчас встречные пучки ЦЕРН⁴ с 2×28 Гэв эквивалентны энергии 1700 Гэв в лабораторной системе (ЛС), а проектируемые в Батавии пучки с 2×100 Гэв эквивалентны 20 000 Гэв. В Брукхейвене⁵ же проектируется протонный ускоритель на 2×200 Гэв (80 000 Гэв в ЛС). Однако из-за весьма существенной потери интенсивности круг задач, которые можно решать на таких ускорителях, значительно сужается. Здесь, естественно, уже невозможно создание достаточно интенсивных вторичных пучков, а могут изучаться только разные аспекты протон-протонных соударений.

К этой же группе, но с несколько более широким кругом задач относятся встречные протон-антипротонные пучки с 2×23 Гэв, создание которых планируется в Новосибирске⁶.

Другим важным направлением работ на ускорителях является увеличение интенсивности их пучков. Так, в ближайшее время предполагается получить пучки π -мезонов, сравнимые по интенсивности с тем, что дают мезонные фабрики. Такие интенсивности позволят производить наблюдения и измерения с гораздо более высокой точностью и тем самым глубже проникнуть в детали явлений.

В ускорении электронов намечаемый рост энергии более скромн. Крупнейшим электронным ускорителем (если не считать вторичного γ -пучка в Серпухове с энергией $E_\gamma = 35$ Гэв) остается двухмильный линейный ускоритель в Стэнфорде, США (20 Гэв), который еще долго будет сохранять свое лидирующее положение. Более того, оно упрочится за счет технического усовершенствования машины (замены клистронов), которое в ближайшее время поднимает энергию электронов до 35 Гэв. В Новосибирске работает пучок с энергией 2×700 Мэв и в ближайшее время, по-видимому, будут получены встречные электрон-позитронные пучки по 3,5 Гэв⁷. Аналогичные ускорители, но с гораздо меньшей энергией действуют в настоящее время в Орсе (Франция): $2 \times 0,5$ Гэв, и во Фраскати (Италия): $2 \times 1,2$ Гэв⁷.

Киевская и Амстердамская конференции по физике высоких энергий подчеркнули большое значение экспериментов на встречных электронных пучках.

Сейчас, кроме упомянутых действующих ускорителей, уже начали работать накопительные кольца в США (Стэнфорд) с энергией $2 \times 2,5$ Гэв и хорошей светимостью (10^{31} — 10^{32}). Строится также комплекс встречных пучков ee , $e\bar{e}$ и $\bar{e}\bar{e}$ в ФРГ: 2×3 Гэв, с очень высокой светимостью (10^{32}). В Стэнфорде же обсуждается идея столкновения пучков от линейного

ускорителя (без накопителя) с энергией 2×20 Гэв. Кроме того, имеется проект создания комплекса ee -, ee - и ep -пучков с энергией 15 Гэв для электронов и позитронов и 72 Гэв протонов (проект PEP в Калифорнии, США).

Такова в самых общих чертах ситуация с ускорителями в настоящее время.

3. ВАЖНЕЙШИЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В этом разделе рассматриваются наиболее общие и в то же время фундаментальные проблемы физики элементарных частиц.

Естественно, что мы исходим из современных представлений, и поэтому наши суждения должны пониматься *cum grano salis*. Ясно, что никак нельзя исключить возможность того, что природа преподнесет нам какой-либо сюрприз, выходящий за рамки фантазии теоретиков. Более того, про себя мы хотели бы считать это очень вероятным. С указанными оговорками мы отмечаем два направления поиска, следуя которым, можно ожидать фундаментальных открытий, — это изучение явлений, разыгрывающихся на малых расстояниях, и поиск новых необычных частиц.

а) «Э л е м е н т а р н а я д л и н а». Под этим понятием мы разумеем некоторую фундаментальную длину a , которая может характеризовать масштаб *нелокальности* или какой-либо другой масштаб, имеющий, быть может, *геометрическое значение* (например, кривизна импульсного пространства, дискретность пространства-времени вместо континуума и т. п.)⁹. Весьма естественным кандидатом на роль элементарной длины является «длина, связанная со слабым взаимодействием»: $a_W = 6 \cdot 10^{-17}$ см, соответствующая энергии в системе центра масс (СЦМ) $W = 300$ Гэв. Весьма интересным является вопрос о возможности наблюдения «элементарной длины» в крайне точных измерениях при низких энергиях, например с помощью эффекта Мёсбауэра. Однако анализ показывает, что весьма общие варианты «нелокальности» совместимы с малой шириной спектральных линий $\Delta\omega/\omega \approx 10^{-16}$, наблюдаемых с помощью этого эффекта. Для наблюдения нелокальных эффектов оказывается важным отношение частоты ω к частоте $\omega_a = c/a$, определяющей нелокальность. Из опытов при высоких энергиях следует, что $a < 10^{-15}$ см, а $\omega_a > 10^{25}$. Поэтому эффект Мёсбауэра оказывается нечувствительным.

Можно ожидать, что существование элементарной длины приведет к радикальным изменениям в ходе явлений по сравнению с установленными. Прежде всего в этом случае существенно изменилась бы постановка вопроса об асимптотическом поведении сечений. Действительно, согласно имеющимся данным, длина a удовлетворяет условию $am \ll 1$, где m — масса любой из известных частиц или резонансов. В случае существования длины a область $W \gg m$ можно было бы разделить на подобласти $Wa \gg 1$ и $Wa \ll 1$. Естественно ожидать, что поведение сечений в них будет совершенно различным. При каких энергиях может появиться подобный перелом в сечениях — сказать трудно, но, по-видимому, его не следует ожидать до энергий порядка сотни гигаэлектрон-вольт в СЦМ.

Если слабое взаимодействие не будет подавлено существованием промежуточного бозона, то длина $a_W = 6 \cdot 10^{-17}$ см может иметь радикальное значение. В этом случае при $W > 300$ Гэв можно ожидать превалирования слабых взаимодействий над электромагнитными и даже сильными. Это обстоятельство может сыграть решающую роль в построении теории элементарных частиц.

В настоящее время четко различимы три типа взаимодействий (сильные, слабые и электромагнитные), которые представляются никак не связанными между собой. Если при росте энергий окажется, что все эти три типа сравниваются по силе, то мы окажемся перед лицом некоего универсального сильного взаимодействия, в котором большинство обычных законов сохранения (изоспина, гиперзаряда, пространственной и зарядовой четности) нарушено. Обычные правила отбора сильных электромагнитных и слабых процессов окажутся лишь низкоэнергетическим приближением, и возникнет реальная возможность изучения характерных особенностей такого «супервзаимодействия». Революционный характер изменения физической картины, связанный с подобным развитием событий, вряд ли нуждался бы в пояснении.

Одним из возможных проявлений этого взаимодействия могли бы быть слабые звезды — непосредственное (а не в результате распада адронов) рождение лептонов, в том числе и нейтрино. В этой связи встречные протонные пучки с энергией порядка сотен гигаэлектрон-вольт, а также пучки типа pp и ep могут представлять не меньший интерес, чем пучки ee и $\mu\mu$. Возможности же достижения этого критического для слабых взаимодействий предела на ускорителях с неподвижными мишенями лежит за пределами нашего воображения ($E \gtrsim 5 \cdot 10^4$ Гэв).

б) Необычные частицы. К такого же рода «лотерейным» задачам, как поиск «элементарной длины», с крупной ставкой, но и крупным выигрышем, принадлежит и поиск «необычных» частиц: кварков и дионов Швингера¹⁰, промежуточных бозонов, монополя Дирака и тяжелых лептонов.

Кварки — это частицы с дробными электрическим и гиперзарядом — являются, по современным представлениям о симметрии адронов, теми «кирпичиками», из которых строятся адроны. Однако все попытки обнаружить такие частицы как в космических лучах и на ускорителях, так и в электростатических опытах по поиску дробных зарядов оканчивались полной неудачей. Кажется весьма вероятным, что кварки сами по себе не являются элементарными частицами, а представляют собой возбуждения, удачные для описания состояний адронов.

Дионы — это, по существу, те же кварки, но обладающие (вдобавок) и дробным магнитным зарядом. Они составляют основу магнитной теории материи Швингера, существенной частью которой является сверхсильное дальнедействующее магнитное взаимодействие, характеризуемое безразмерной константой $g = 36 \times 137 \approx 5000$. Именно оно, согласно идее Швингера, связывает дионы в адрон. Теоретические соображения в пользу существования частиц, обладающих магнитным зарядом, были приведены еще Дираком в начале 30-х годов (так называемые «монополи Дирака»), причем электрический и магнитный заряд у них автоматически оказывались связанными соотношением $eg = n$, где n — целое число.

Пока нет никаких убедительных соображений о величине массы этих гипотетических частиц, кроме, быть может, массы промежуточного бозона, которая по приблизительным оценкам Т. Д. Ли составляет 37,3 Гэв и требует, следовательно, встречных пучков с $W > 40$ Гэв.

Таковы, на наш взгляд, два основных направления, следуя которым, можно ожидать революционизирующих открытий.

Далее мы рассмотрим более специальные проблемы в физике сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий. Эти проблемы теснее связаны с современным состоянием физики элементарных частиц, и без их решения трудно представить ее дальнейшее развитие.

в) С и л ь н ы е в з а и м о д е й с т в и я. Здесь основными задачами следует считать раскрытие механизма взаимодействия адронов и их спектра масс^{8, 11}. Пока мы, по-видимому, познакомились лишь с низшей частью этого спектра, и было бы важно понять, сколь далеко он простирается в сторону больших масс. Современные экспериментальные данные и теоретические идеи (дуальность) позволяют ожидать, что по мере продвижения мы будем наблюдать все больше относительно стабильных состояний с большими массами и спинами. Детальное знание достаточно широкой части спектра представляется необходимым для построения полной картины сильных взаимодействий.

Имеющиеся сейчас экспериментальные данные и теоретические исследования по рассеянию адронов указывают на то, что классификация реакций по передаваемым квантовым числам правильно отражает основные черты взаимодействия адронов и различие в поведении сечений: $\sigma \sim E^{2\alpha-2}$. По этому признаку выделяются следующие классы:

1) Передача вакуумных квантовых чисел, $\alpha_p \approx 1$. Она характерна для упругих и квазиупругих процессов, сечения которых приблизительно постоянны.

2) Передача квантовых чисел векторных мезонов (ρ , ω , A_2 , K^*), $\alpha_v \approx 0,6 \div -0,3$, которая характерна для процессов перезарядки, фоторождения и др. Их сечения падают.

3) Передача барионных квантовых чисел $\alpha_B \approx 0 \div -1$ (мезон-барионные рассеяния назад и др.).

4) Передача квантовых чисел псевдоскалярных мезонов (π , k , η), $\alpha_m \approx 0 \div -0,3$ (фоторождение поляризованным параллельно плоскости реакции γ -квантом и др.).

5) Передача так называемых «экзотических» квантовых чисел $\alpha_{ex} < -1$ (двойного заряда или барионного числа, двойного изоспина и др.).

Исследование деталей этих передач, однако, затрудняется тем, что обычно мы имеем дело со смесью (например, в упругом рассеянии в дифракционной области передаются не только вакуумные числа, но и мезонные и даже экзотические). Отсюда ясно, сколь сложна и неоднозначна задача подбора параметров и деталей механизма передачи. К тому же она усложняется трудностью поляризационных измерений, которые могли бы дать сведения не только о модулях амплитуд, но и об их фазах.

Такая структура сильных взаимодействий заставляет думать, что к раскрытию деталей передачи следует подходить с верхнего энергетического конца, где «выживает» лишь передача вакуумных чисел. Но где же начинается этот «конец»?

При достаточно высоких энергиях адрон благодаря лоренцову сокращению выглядит как бесконечно тонкий диск с конечным эффективным поперечным размером. Исходя из аналогии с динамикой плоского взрыва, можно предположить, что при крайне высоких энергиях взаимодействие должно характеризоваться определенными масштабными соотношениями¹². Это приводит к интересным экспериментальным предсказаниям, в частности, — к постоянству сечения, характерному для передачи вакуумных чисел, и постоянному наклону дифракционного конуса.

Первые предварительные результаты ЦЕРН на встречных pp -пучках с $E_{\text{дс}} \approx 1000$ Гэв показывают, что сечение при этих энергиях, по-видимому, уже вышло на свое асимптотическое значение ≈ 38 мбн (либо медленно логарифмически приближается к нему). Наклон же дифракционного конуса либо остается постоянным, либо имеет тенденцию к выходу на постоянное значение. Вместе с довольно плавным ходом других сечений в области 30—70 Гэв это дает основание думать, что область порядка тысячи гигаэлектрон-вольт является уже асимптотической. В ближайшие

годы батавийский ускоритель позволит приблизиться к этим энергиям, что даст возможность проверить это ожидание и уточнить механизм передачи вакуумных квантовых чисел.

Однако для окончательного решения этого вопроса потребуются, по всей вероятности, эксперименты при энергиях несколько тысяч гигаэлектрон-вольт в ЛС. Здесь наиболее интересной была бы проверка существующей пока разности сечений (точнее, необычно слабого убывания) π^+p - и π^-p -рассеяния, обнаруженной в Серпухове. Если это явление сохранится и при батавийских энергиях и если его не удастся объяснить необычной электромагнитной поправкой, то оно может привести к пересмотру наших представлений о сильных взаимодействиях.

Для выяснения законов передачи мезонных квантовых чисел наиболее подходящими объектами являются неупругие реакции перезарядки πN и NN , фоторождения, рождения резонансов в области 20—1000 Гэв. Сечения, связанные с этими передачами, здесь еще достаточно велики, а передачи остальных чисел уже заметно подавлены. Однако раскрытие деталей механизма передачи требует достаточно тонких разносторонних измерений не только сечений и угловых распределений, но и поляризаций. Хорошим уроком может служить пример с πN -перезарядкой, угловые распределения в которой описывались многими моделями, а измеренная недавно поляризация явилась камнем преткновения для многих из них. Другим примером служит угловое распределение в фоторождении π - и K -мезонов в области весьма малых передач импульса и πN -рассеяние назад, которые помогут решить вопрос об элементарности мезонов и нуклонов.

Такие комплексные измерения требуют интенсивности вторичных пучков, насыщенности эксперимента электроникой и автоматикой, широкого применения вычислительных машин. Других способов провести различие среди множества теоретических моделей механизма передачи у нас нет.

Альтернативой существования «элементарной длины» может оказаться так называемая автомодельность или «масштабная инвариантность», которая означает отсутствие каких-либо параметров с размерностью длины (или массы) в описании взаимодействия на малых расстояниях. Экспериментальным указанием на возможность этого явления служит поведение сечения глубоконеупругого ep -рассеяния¹³. В пользу этой гипотезы имеются также аргументы, связанные с проблемой квантования полей в искривленном пространстве-времени. Более четкие сведения могли бы быть, видимо, получены из зависимости от E дифференциальных сечений рассеяния при больших энергиях и передачах импульса ($s \sim t \gg M^2$).

г) Электромагнитные взаимодействия. В настоящее время можно считать центральным, во-первых, поиск отклонения от квантовой электродинамики и проблему различия μ -мезона и электрона и, во-вторых, выяснение вопроса о том, насколько универсальной является закономерность, обнаруженная в неупругом рассеянии электронов на протонах и получившая название автомодельности или масштабной инвариантности^{12, 14}.

Что касается первой проблемы, то наиболее эффективным было бы прецизионное измерение сверхтонкого расщепления уровней в мюонии — системе, где сильные взаимодействия отсутствуют. Подобные измерения на водороде выполняются сейчас с точностью до 12-го знака, из которых только 6 можно объяснить электромагнетизмом. Для остальных же оказывается существенным сильное взаимодействие, которое известно с меньшей точностью.

Сюда же примыкает и одна из важнейших задач современной физики — различие масс электронов и μ -мезонов, которая может быть и не связана с электромагнитным взаимодействием. Если это так, то подобное взаимодействие должно давать вклад в сверхтонкое расщепление и аномальный магнитный момент μ -мезонов, которые известны сейчас с точностью до 7-го знака. Отсутствие отклонений от квантовой электродинамики заставляет переносить поиски различия в область высоких энергий, сопоставляя поведение μ -мезона и электрона в электромагнитных процессах при возрастающих энергиях. Здесь огромное значение могли бы иметь встречные электронные и μ -мезонные пучки возможно большей энергии и хорошей интенсивности.

Явление масштабной инвариантности было впервые обнаружено в процессе неупругого электрон-протонного рассеяния при большой энергии и передаче импульса q^2 и состоит в том, что безразмерные амплитуды этого процесса оказались функциями лишь одного параметра W^2/q^2 . Оно привело к гипотезе об автомодельном поведении процессов при больших энергиях. Из нее, в частности, следует, что полное сечение аннигиляции электронов и позитронов ведет себя как $1/W^2$. Эта гипотеза настоятельно требует экспериментальной проверки, и такая проверка частично будет проведена в Серпухове и Батавии в планируемых экспериментах по глубокому неупругому рассеянию электронов и μ -мезонов. Однако наилучшей, на наш взгляд, была бы проверка автомодельности в процессе глубоко-неупругого ee - или $e\bar{e}$ -рассеяния в области больших W и больших передач импульса. Наблюдения такого процесса станут доступны с увеличением энергии встречных пучков до нескольких десятков гигаэлектрон-вольт и дадут возможность выяснить механизм возникновения автомодельности.

д) Слабые взаимодействия. Центральной проблемой остается проблема их динамической природы. Являются ли они четырех-фермионными или осуществляются через промежуточный бозон? В связи с этим весьма важными оказываются, с одной стороны, эксперименты по поискам промежуточного бозона, о которых упоминалось выше, с другой — изучение поведения слабых процессов при энергиях порядка 300 Гэв в СЦМ. Специфика поведения сечений слабых процессов при таких энергиях может явиться ключом к пониманию динамической природы этих взаимодействий¹⁵. В частности, следует ожидать проявления при высоких энергиях характерных особенностей поведения сечений (например, для взаимодействия нейтрино с нуклонами), связанных с автомодельностью.

Не менее фундаментальными проблемами являются проверки законов сохранения электронного и мюонного лептонных чисел, а также нарушение C -, P - и T -четностей, в особенности механизм нарушения CP -четности, которая обнаружена пока только в распаде K^0 -мезонов. Сейчас набралось довольно большое число возможных механизмов и только прецизионные измерения и наблюдения редких распадов могут помочь произвести отбор среди них.

Для решения этих задач необходимы интенсивные пучки вторичных частиц, в первую очередь K -мезонов и гиперонов, которые могут быть получены на ныне действующих ускорителях (в частности, на серпуховском) при условии повышения интенсивности основного пучка.

Выше мы говорили главным образом только о наиболее принципиальных, с нашей точки зрения, явлениях, оставляя в стороне целый круг интересных вопросов, связанных, например, с изучением так называемой «ядерной структуры» света, которая начинает появляться при гигаэлектрон-вольтных энергиях, ряд интересных электродинамических эффектов

высших порядков, прецизионные измерения слабых распадов и др. Они также могут оказаться неожиданно интересными и заставят нас пересматривать и уточнять картину взаимодействия.

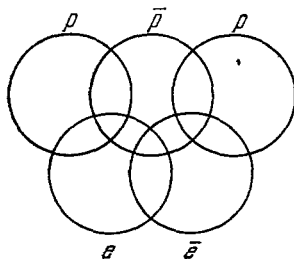
Хорошим примером является возникшая в последнее время проблема $K_L \rightarrow 2\mu$ -распада¹⁶, вероятность которого оказывается гораздо меньше, чем это следует из обычных представлений о слабых взаимодействиях и вероятности распада $K_L \rightarrow 2\gamma$. Она указывает на сюрпризы, ожидающие нас в области слабоэлектромагнитных процессов. Так, одно из возможных объяснений загадки $K_L \rightarrow 2\mu$ состоит в сильном нарушении CP -инвариантности в процессах $K_{LS} \rightarrow 2\mu$, 2γ и аномально большой вероятности $K_S \rightarrow 2\mu$, 2γ (на 3—4 порядка превышающей аналогичный распад K_L).

4. БУДУЩИЕ УСКОРИТЕЛИ

На основании приведенного выше обзора ускорителей и основных проблем физики элементарных частиц ясно, что сейчас вряд ли имеет смысл планировать создание протонных ускорителей с энергией менее тысячи гигаэлектрон-вольт. Наиболее перспективными с точки зрения максимального охвата интересных задач, ожидаемых результатов и конкурентоспособности представляли бы следующие направления развития:

а) Модернизация уже существующих машин с резким повышением интенсивности первичного, а следовательно, и вторичных пучков либо с ускорением поляризованных частиц и одновременным полным обеспечением экспериментов средствами регистрации и обработки информации с предельным насыщением их новейшей электронной техникой и полной автоматизацией. Такого рода мероприятия будут играть решающую роль в дальнейшем развитии экспериментальных исследований, так как требования современности выдвигают на первый план не столько отдельные достижения, сколько общий высокий научно-технический уровень.

б) Создание протонных ускорителей (на основе сверхпроводящих магнитов) с энергией протонов $E > 1000 \text{ ГэВ}$ ($W > 40 \text{ ГэВ}$), с последующей организацией встречных пучков с энергией в СЦМ $W \gg 300 \text{ ГэВ}$. В этом же направлении дальнего планирования желательно предусмотреть возможности встречных пучков $p\bar{p}$, а также (ep) и $(e\bar{p})$. Символически такой комплекс можно было бы изобразить в виде «олимпийского» комплекса пяти колец (которые, конечно, могут быть и совмещены):



Он позволил бы далеко продвинуться в изучении фундаментальных свойств частиц и обошелся бы гораздо дешевле, чем попарное строительство отдельных колец. В идеальном варианте в этом комплексе было бы желательно иметь и мюонное накопительное кольцо, однако технически эта проблема кажется пока далекой от решения. Так или иначе, авторы считают крайне важным при изучении адронных столкновений перешагнуть границу $W = 300 \text{ ГэВ}$.

в) Для создания вторичных пучков адронов и лептонов крайне высокой энергии кажется необходимым развитие исследований коллективных методов ускорения до сверхвысоких многотысячегигаэлектрон-вольтных энергий и, в первую очередь, метода Векслера — Саранцева¹⁷ как наиболее разработанного и перспективного.

г) Как уже отмечалось выше, создание встречных пучков $e\bar{e}$, $\mu\bar{\mu}$ и $p\bar{p}$ с энергией W , по возможности близкой к 300 Гэв, безусловно, остается фундаментальной задачей ближайшего десятилетия. Условия для изучения электромагнитного и слабого взаимодействий в столкновениях типа $e\bar{e}$ или $\mu\bar{\mu}$ представляются особенностями простыми *).

д) Большие затраты на современную физику высоких энергий, на наш взгляд, ни в коем случае не должны ориентироваться только на возможные фундаментальные открытия, могущие революционизировать всю науку.

Суть дела в том, что для современной физики элементарных частиц, как и для любой фундаментальной науки, хотя она и не имеет непосредственного выхода в сферу производства, достижение ее целей связано тем не менее с решением многих весьма сложных технических задач. Поэтому современный центр ядерных исследований является, по существу, не только ведущим научным, но и передовым техническим центром, способным решать сложнейшие технические задачи. Использование в народном хозяйстве технических достижений таких научных центров может иметь революционные последствия.

Примером подобного использования «отходов» ядерной физики может служить освоение методов работы с жидким водородом и жидким гелием, внедрение в промышленность сверхпроводящих магнитов, разработка которых ведется сейчас почти во всех ядерных центрах мира. Кибернетические же системы обработки и сбора информации, без которых немислим современный эксперимент, могут найти широкое применение в управлении народным хозяйством и его планировании, а исследования с μ -мезонными атомами открывают многообещающие возможности в изучении кинетики химических реакций, что также может иметь большое прикладное значение. Не следует забывать также о тех успехах, которые сопровождают применение методов теоретической ядерной физики в других областях. Последние достижения физики твердого тела — прекрасный тому пример. На наш взгляд, необходимо шире использовать эту сторону деятельности ядерных центров.

То же самое можно сказать о медико-биологических исследованиях и их применениях. Речь идет о лечении раковых заболеваний пучками мезонов и многозарядных ионов, о ранней диагностике перерождения тканей и др. За последнее время работа в ядерных центрах Запада в этом исключительно важном направлении очень активизировалась. Во многих центрах созданы специальные группы, занимающиеся медико-биологическими проблемами. Возможности же наших центров используются пока недостаточно.

В этой связи представляется весьма важным строительство мезонных фабрик как источника пучков крайне высокой интенсивности и создание пучков релятивистских многозарядных ионов¹⁸.

Авторы надеются, что они достаточно полно отразили работу всей группы и выражают благодарность за замечания ее участникам.

Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна

*) Впрочем, как было замечено выше, при очень высоких энергиях все взаимодействия могут сравняться.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Y. M. A d o, A. A. Zhuravlev, V. I. Zaitsev, K. P. Myznikov, E. A. Myae, A. A. Naumov, O. N. Radin, Proc. of the 8th Intern. Conference on High Energy Accelerators, CERN, 1972.
 2. L. D. Soloviev, CERN Courier 11 (11), 315 (1971).
 3. R. R. Wilson, см.¹, p. 3.
 4. K. Johnsen, *ibid.*, p. 79.
 5. J. P. Blewett, *ibid.*, p. 501.
 6. A. N. Skrinsky, *ibid.*, p. 72.
 7. F. Amman, *ibid.*, p. 63.
 8. А. А. Логунов, Нгуен Ван Хьеу, О. А. Хрусталеv, сборник «Проблемы теоретической физики», посвященный Н. Н. Боголюбову в связи с его 60-летием, М., «Наука», 1969.
 9. В. Г. Кадышевский, сборник «Проблемы теоретической физики», посвященный памяти академика И. Е. Тамма, М., «Наука», 1972.
 10. J. Schwinger, Science 165, 757; 166, 690 (1969).
 11. A. N. Tavkhelidze, XV Intern. Conference on High Energy Physics (Kiev, 1970), Kiev, «Naukova Dumka», 1972.
 12. В. А. Матвеев, Р. М. Мурадян, А. Н. Тавхелидзе, Проблемы физики элементарных частиц и ядерной физики (ЭЧАЯ) 2 (1), 7 (1971); Lett. Nuovo Cimento 5, 907 (1972). E2-5962, Дубна, 1971.
 13. М. А. Марков, Нейтрино, М., «Наука», 1964; Препринт ОИЯИ E2-4370, Дубна, 1969; Н. Н. Боголюбов, В. С. Владимиров, А. Н. Тавхелидзе, ТМФ 12, 305 (1972).
 14. L. D. Soloviev, см.¹¹⁶, p. 513; R. M. Muradyan, *ibid.*, p. 658.
 15. Д. И. Блохинцев, УФН 62, 381 (1957); ЖЭТФ 35, 254 (1958); Nuovo Cimento 9, 925 (1958).
 16. А. Д. Долгов, В. И. Захаров, Л. Б. Окунь, Препринт ИТЭФ № 924, Москва, 1972.
 17. V. I. Veksler, Proc. of CERN Symposium on High Energy Accelerators, 1956, p. 80; V. P. Sarantsev, см.^{1a}, p. 391.
 18. А. М. Балдин, Препринт ОИЯИ P7-5808, Дубна, 1971.
-