

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



Б-705

P2 - 7077

Д.И.Блохинцев

1580/2-74

ЗАДАЧИ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ
И БУДУЩИЕ УСКОРИТЕЛИ

1973

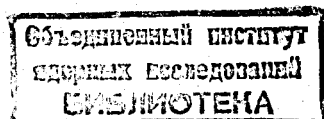
ЛАБОРАТОРИЯ
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

P2 - 7077

Д.И.Блохинцев

**ЗАДАЧИ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ
ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ
И БУДУЩИЕ УСКОРИТЕЛИ**

Представлено на Совещание ведущих ученых
стран-участниц ОИЯИ по перспективам
развития физики элементарных частиц и
атомного ядра. Май, 1973 г.



§ I. Введение

В этом сообщении рассматриваются некоторые проблемы физики элементарных частиц, которые представляются мне важнейшими.

Можно надеяться, что такой обзор поможет пролить свет на требования, которые следует предъявить к будущим ускорителям. Моя задача намного облегчается тем, что некоторое время тому назад группа теоретиков в основном из нашего института, потрудились над этими вопросами^{х)}. Понятно, что вопрос этот сложный и подобная записка могла быть только основой для дальнейших обсуждений.

Рассмотрение постоянного вопроса с точки зрения чисто теоретических позиций все же очень важно поскольку развитие ускорителей имеет собственную логику, отчасти предъявленную тем, что уже имеется: естественно, что каждый ускоритель может быть усовершенствован и развит. В этом отношении ускоритель напоминает растение, из которого органически вырастают новые ветви. Но этот рост не всегда может отвечать интересам теории.

С другой стороны и теоретики могут легко поставить такие проблемы, которые нельзя реализовать ни на каком реалистическом ускорителе.

х) Группа состояла из Д.И. Блохинцева, С.С. Герштейна, Г.В. Ефимова, А.В. Ефремова, В.Г. Кадышевского, А.А. Комара, В.А. Матвеева, В.А. Мещерякова, Р.М. Мурадяна, В.И. Огневского и А.Т. Филиппова. См. публикацию Д.И. Блохинцев, А.В. Ефремов, Р.М. Мурадян. Уфн, 109, 259 (1973).

В последние годы мы сделали большой шаг в развитии ускорителей у нас в стране и за границей. Позвольте напомнить основные данные, свидетельствующие об этом развитии:

Ускоритель протонов в Серпухове 76 Гэв ,

Встречные пучки протонов в ЦЕРН'е 2 x 28 Гэв ,

Ускоритель протонов в Батавии 400 Гэв ,

Мезонная фабрика (Лос Аламос) 800 Мэв. (высокая интенсивность).

Ясно, что в дальнейшем будет тенденция существенно перешагнуть достигнутые пределы.

В Батавии предложено дальнейшее продвижение к энергии 10^3 Гэв. В Брукхевене проектируется система встречных пучков 2 x 200 Гэв. В ЦЕРН'е намечен ускоритель на 300 Гэв. Интересный проект выдвинут в Стенфорде, где предполагается встречный пучок протонов 70 Гэв с пучком электронов 14 Гэв (60 Гэв в системе ЦМ). В Серпухове обсуждается ускоритель с энергией до нескольких единиц 10^3 Гэв. В Красной Пахре намечено сооружение мезонной фабрики для нейтринных исследований.

Таковы тенденции; однако в этом докладе я не предполагаю обсуждать насколько реальны эти проекты.

§ 2. Несколько общих замечаний

В дальнейшем я сосредоточусь на физических проблемах. В этой связи уместно напомнить замечание Е. Вигнера об этажах науки. Самый верхний этаж — этаж принципов (основные симметрии мира, принцип относительности и т.п.), которые являются основой всей нашей науки. Затем идёт этаж законов (например, законы теории Максвелла, законы гидродинамики и т.п.). Самый нижний этаж — описан явлениями и моделями этих явлений (например, оптическая

модель нуклона).

Наиболее глубокие проблемы относятся к верхнему этажу. В то же время принципы являются наиболее стойкими, наиболее консервативными. Они являются основой всех наших представлений и, естественно, меняются медленно.

Кажется очень важным посмотреть какие могут быть "перевалы", говоря языком альпинистов, с высоты которых можно увидеть новые страны — Мир новых явлений и новых принципов. История даёт нам немало примеров. Атомная физика и спектроскопия атомов были в первой четверти этого столетия огромным полем, которое разрабатывалось физиками, да и сейчас оно неисчерпано. Но вот Резерфорд обратил внимание на α -частицы и на основе их изучения открыл принципиально новую науку — науку об атомном ядре. Обратившись к изучению рассеяния α -частиц он шагнул от энергий порядка десятков э.в. к энергиям порядка миллиона э.в.

Часто приходит в голову: не слишком ли много ставится экспериментов, которые при более радикальном развитии ускорителей и соответствующем развитии теории могли бы оказаться излишними.

Взяв на себя проблему обсуждения перспективных проблем, нельзя не отдавать себе отчёта в том, что предсказания такого рода могут оказаться весьма иллюзорными. Это — линейное программирование и пять лет могут оказаться уже большим сроком. Нам могут ждать непредвиденности.

Мы привыкли к определённой концепции, характерной для физики, но есть другие науки — астрофизика, биология, которые вынуждены учитывать эволюцию изучаемых объектов. Мы физики не привыкли к такому взгляду на вещи. Но ведь не исключено, что тот

вакуум, из которого мы извлекаем частицы, является результатом эволюции Вселенной на ранней стадии её развития. Я привожу это как пример возможных неожиданностей, касающихся наших основных концепций.

Не заходя так далеко, мы сосредоточили анализ будущего на данных нашего времени и на двух направлениях: на физике малых расстояний между частицами или, соответственно, на больших передачах импульса и на поиске новых частиц.

§ 3. Физика малых расстояний

В этом кругу явлений мы можем поставить вопрос о существовании некой "элементарной длины" α (если пользоваться принятой термодинамикой). Сейчас было бы необоснованным вкладывать в неё вполне определённый физический смысл.

Если говорить о спекуляции, которая нам известна из теории, то видно, что такая длина может иметь совершенно различный физический смысл. Так, например, в нелинейной теории поля есть некоторый масштаб поля φ .

Если учесть существование элементарного заряда e , то возникает и масштаб длины $\alpha = \sqrt{\varphi_0}/e$.

Элементарная длина α может иметь геометрическое значение. В теории Снайдера квантованного пространства величина \hbar/α определяет кривизну импульсного пространства. Наконец, не исключено, что вообще нельзя точно определять координаты частиц. Тогда возникает представление о стохастическом пространстве и длина

α определяет масштаб неопределённости в координатах частиц $\Delta x \approx \alpha$. Быть может наиболее общее можно сказать,

что элементарная длина α есть мера той области пространства-времени, в которой нарушается принятая в современной физике причинность.

Все это пока область теоретических поисков. Важнее то, что имеются два кандидата на звание элементарной длины, которые могут быть построены из универсальных констант, чисто феноменологически, без ссылки на какую-либо теоретическую концепцию. Одна из этих длин есть длина, связанная с гравитацией

$$\alpha = \Lambda_g = \sqrt{\frac{8\pi \hbar^2}{c^3}} = 0,82 \cdot 10^{-32} \text{ см.} \quad (1)$$

(здесь \hbar - постоянная тяготения). Вторая связана с теорией слабого взаимодействия Ферми и равна:

$$\alpha = \Lambda_F = \left(G_F / m_p^2 \right)^{1/2} = 0,66 \cdot 10^{-16} \text{ см.} \quad (2)$$

(здесь G_F - константа Ферми, m_p - масса нуклона).

Если эти универсальные длины имеют физическое значение, то естественно ожидать перелома в ходе физических явлений в области, когда энергия частиц W , умноженная на длину становится больше 1:

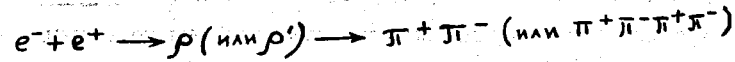
$$W\alpha > 1 \quad (3)$$

а) Гравитация

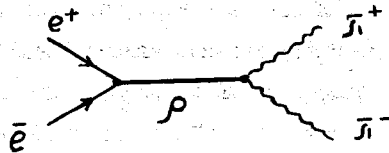
Обратимся к первой возможности - к гравитации. Можно высказать не мало серьёзных аргументов в пользу того взгляда, что гравитация может иметь определяющее значение для понимания спектра масс элементарных частиц. Сейчас многие теоретики работают над этой проблемой.

IV. Поиск новых частиц

Если начать с наименее фундаментальных проблем, то прежде всего следовало бы указать на важность изучения спектра векторных мезонов. Каков их спектр? Какова их роль в связи электромагнитного и сильного взаимодействия. Уже сейчас известны процессы типа



и т.п. На языке диаграммы Фейнмана это гласит:



Далее следует указать проблему промежуточного бозона ("W- бозон"). Вопрос о существовании этого бозона имеет принципиальное значение для понимания динамики слабого взаимодействия. В случае существования такого бозона, возможно, что слабое взаимодействие и не будет расти до своего унитарного предела. В этой связи важен вопрос о его массе. По современным данным такого бозона с массой $m_W < 5 \text{ ГэВ}$ не обнаружено. Если его масса составит сотни ГэВ, то его влияние на слабое взаимодействие не будет существенно.

Среди более общих вопросов, относящихся к спектру элементарных частиц можно указать на вопрос о существовании верхней границы масс элементарных частиц (существует ли "максимум" или нет?) В частности, если время жизни частиц станет малым (что возможно с ростом слабого взаимодействия) таким, что ширина Γ станет сравнимой с массой частицы M , то частица перестает су-

ществовать как физически реальный объект. Вопрос о существовании предельной массы M элементарных частиц имеет принципиальное значение. Если такой предел существует, то локальная теория поля должна иметь границу применимости, возникающую в силу ограничения точности определения координат величиной

$$\Delta x \approx \frac{\hbar}{Mc}.$$

Последний вопрос, на котором я хотел бы остановиться — это экзотические частицы. К числу их могут быть отнесены кварки (или "партоны"). Эти частицы были предметом поиска во многих лабораториях. Пока можно утверждать, что свободных кварков с массой $< 5 \div 7 \text{ ГэВ}$ не найдено. Я всегда считал, что искать кварки в вакууме это тоже, что искать фононы (кванты звука) в пустоте. Это утверждение больше опирается на интуицию и не является доказанным. Поэтому можно продолжать искать кварки, кому это нравится.

Также из теоретических соображений Дираком предсказывался магнитный монополяр (также пока необнаруженный, сечение меньше $< 10^{-40} \div 10^{-42} \text{ см}^2$) и весьма вероятно, не существующий в природе. Ю. Швингер предположил возможность существования "дионов" — частиц с дробным магнитным зарядом, с помощью которых надеялся объяснить сильные взаимодействия.

Обе возможности — монополяр Дирака и дионы Швингера представляются мне весьма сомнительными.

Скорее их следует рассматривать как иллюстрацию возможностей теории.

Для экспериментаторов это намёк на возможность неожиданностей и новостей в мире элементарных частиц.

Если гравитация действительно окажется существенной, то масштабы, которые придётся изучать настолько малы, что необходимые для этой цели ускорители выходят за рамки каких-либо разумных предположений.

б) Слабое взаимодействие. Вторая длина $\alpha = \Lambda_F$ может быть весьма вероятным кандидатом. Изучение соответствующих масштабов требует ускорителей, которые кажутся реальными уже в недалёкой перспективе.

Ещё в 1957 году я предложил критерий силы взаимодействия, основанный на сопоставлении плотности кинетической энергии ϵ с плотностью энергии взаимодействия w , во время столкновения частиц.

Согласно этому критерию взаимодействие сильное, если

$$|w| \gg \epsilon \quad (4)$$

В противоположном случае оно — слабое. Рассмотрение взаимодействий этой точки зрения приводит к выводу, что взаимодействие посредством мезонных полей (константа взаимодействия $g^2/\hbar c$) при всех энергиях взаимодействующих частиц остаётся сильным, в смысле критерия (4).

Электромагнитное взаимодействие (константа $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$) оказывается в том же смысле всегда слабым. И, наконец, слабое взаимодействие (константа взаимодействия Ферми G_F) — оказывается слабым при энергии частиц в центре масс $W \ll W_F = 300$ Гэв, но при W сравнимом с W_F , слабое взаимодействие становится сильным. В частности, оно начинает превосходить взаимодействие электромагнитное.

Если эти теоретические выводы подтвердятся то, это будет

иметь фундаментальное значение для такой проблемы как проблема массы мю-мезона и электрона. До сих пор эти частицы странным образом показывают себя совершенно одинаковыми, при различии их масс в 200 раз!

в) Универсальное взаимодействие. Мы сейчас различаем слабые (константа $G_F \sim 10^{-5}$), электромагнитные (константа $\alpha = 1/137$) и сильные (константа $g^2/\hbar c \sim 10^{-12}$).

Если с ростом энергии эти взаимодействия окажутся сравнимыми, то большинство современных законов сохранения как то сохранение изоспина, гиперзаряда и др. нарушились бы, полностью изменились бы правила отбора.

Могли бы возникнуть слабые звезды, т.е. при столкновении частиц рождались бы лептоны, но не за счёт распада сильно взаимодействующих частиц, а непосредственно.

Мы окажемся перед фактом существования единого супервзаимодействия, которое объединит все три взаимодействия в одну форму. Революционный характер такой ситуации не нуждается в пояснении. Энергия $W_F = 300$ Гэв, при которой слабое взаимодействие может стать сильным называют энергией унитарного предела.

Этот предел может быть достигнут на ускорителях со встречными пучками и, видимо, только на них.

Энергия 300 Гэв — это энергия в *CMS*. Соответствующая энергия для ускорителя с неподвижной мишенью, (*LS*) составит

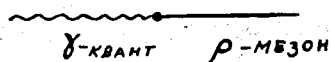
$$E = \frac{1}{2} W^2 - 1 = 45000 \text{ Гэв} \quad (5)$$

и не может обсуждаться серьёзно.

Отсюда следует прогноз о перспективности ускорителей со встречными пучками различного типа ($P+P$, $P+e^-$, e^-+e^- , e^-+e^+ и энергией $W \sim 300$ Гэв.

Но не следует забывать, что изучение вторичных частиц высокой энергии также представляет значительный интерес (пучки, гамма-квант, нейтрино, мезоны, гипероны и т.п.). Поэтому нельзя полностью отказываться в значении ускорителям с неподвижной мишенью ("лабораторным" ускорителям).

г) Электромагнитные взаимодействия. Помимо уже отмеченной выше фундаментальной проблемы отношения масс мю-мезона и электрона имеется важная проблема изучения векторных мезонов. Векторные мезоны, такие как ρ -мезон или может быть недавно открытый ρ' -мезон интересны тем, что они связывают электромагнитные взаимодействия с сильными, по диаграмме:



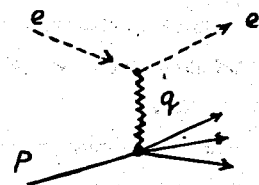
Таким образом, электромагнитные взаимодействия оказываются окруженными: с одной стороны к ним подтягиваются слабые взаимодействия, с другой стороны они соединились с сильными.

Идея о возможности построить "чистую" электродинамику, изолированную от других взаимодействий явно не проходит. Изучение связи электромагнитного взаимодействия с сильным является одной из интереснейших задач современной теории и современного эксперимента. Особый интерес представляет изучение недавно обнаруженной "масштабной инвариантности", которую подробнее обсудим в следующем разделе.

д) Сильные взаимодействия - изучение поведения сечений $\sigma_p, \rho\rho, K\rho, \rho\tilde{\rho}$ при высоких энергиях имеет принципиальное значение. По поводу предельных, асимптотических сечений сильных взаимодействий имеются теоретические предсказания,

основанные на важнейших принципах теории. В частности, важно знать: имеется ли универсальный общий предел для таких сечений? Каков спектр рождающихся вторичных частиц? На основании этих сведений можно делать заключения о структуре адронов, которые, по всей видимости, являются довольно сложными системами.

Изучения рассеяния на крайне малые углы, позволяет судить о соблюдении принципа причинности (путем проверки дисперсионных соотношений). В реакциях типа $e+p \rightarrow e'+p + \text{любые вторичные частицы}$, протекающих согласно диаграммам:



обнаружена масштабная инвариантность, т.е. зависимость сечения реакции σ только от отношения S/q^2 , где q - передаваемый импульс, а S - квадрат полной энергии:

$$\sigma \approx \frac{1}{S} f\left(\frac{S}{q^2}\right) \quad (6)$$

Зависимость (6), как было недавно показано, не противоречит принципам локальной теории, но как вытекает из этих исследований, указанный процесс связан с поведением амплитуд вблизи светового конуса. Поэтому изучение этих процессов имеет также принципиальное значение для теории.

Есть много и других, более частных вопросов, относящихся к сильному взаимодействию, на которых я не буду сейчас останавливаться.

Резюме. Если подвести итог, то вероятным перевалом, с высоты которого откроются совсем новые перспективы, следует считать унитарный предел слабого взаимодействия, т.е.

$W_F = 300$ Гэв. Для достижения этого предела необходимы ускорители встречных пучков с энергией $W_1 + W_2 \simeq W_F$. Эти пучки могут быть различной природы pp , e^+e^- , и т.п.

Уместно также подчеркнуть, что неразумно делить физику на физику высоких энергий и физику низких энергий. Более разумно деление на физику элементарных частиц, физику атомного ядра, физику атома и т.п. Поэтому следует помнить, что из области умеренных или даже низких энергий может поступить важная информация об элементарных частицах.

В этой связи ускорители высокой интенсивности ("мезонные фабрики") и даже реакторы могут оказаться весьма полезными устройствами.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 апреля 1973 г.