

Основоположники современной науки

Л. Б. ОКУНЬ

ПОНЯТИЕ МАССЫ ОТ ГАЛИЛЕЯ ДО ХИГГСА*

Введение

Великий Галилей начал построение новой науки с борьбы против предрассудков и с привнесения в нее основных элементов: наблюдения, эксперимента, математики и, наконец, — что немаловажно — здравого смысла.

Все эти элементы можно найти и в работах его предшественников, но я не буду сейчас делать этого. Книги о Галилее начинаются обычно с критики Аристотеля, чего-то недопонимавшего, по мнению авторов. Я хочу нарушить эту традицию. Кроме того, я не буду и хвалить Лукреция Кара, чьи идеи довольно часто были близки идеям Галилея.

Что я хотел бы сделать прежде всего — это определить, о чем же я буду рассказывать: прояснить, что мы имеем ввиду, когда произносим слово «масса», прояснить, какова связь между массой и энергией, между массой и тяжестью. Мне представляется, что дойти от Галилея до Хиггса всего за пятьдесят минут, можно, лишь предварительно уточнив обозначения, терминологию и словоупотребление.

В буклете об Эриче, который каждый из нас получил здесь от гостеприимных организаторов, можно прочесть такие слова: «Эриче представляет собой уникальный синтез мифа и истории... фантазии и реальности». То же самое можно сказать и о теме моего выступления. Главная его мысль состоит в том, что существует лишь одна масса. В отличие от того, что утверждает надпись на плакате нашей школы, на котором написано « $m_i = m_g$ », Я настаиваю, что нет ни m_i , ни m_g , нет никакой другой «индексированной» массы, есть только одна единственная масса m .

Масса частицы

В специальной теории относительности масса определяется как лоренц-инвариантная величина квадрата 4-вектора энергии-импульса, даваемая соотношением

$$m^2 = E^2 - p^2.$$

(Скорость света мы полагаем равной единице.) 3-скорость тела определяется его импульсом и энергией:

$$v = p/E.$$

Если $m = 0$, то частицы называют безмассовыми, и для них $|p| = E$, а следовательно $v \equiv |v| = 1$.

Если $m \neq 0$, то для покоящейся частицы мы получаем

$$v = 0, \quad p = 0, \quad m = E_0,$$

где E_0 — энергия покоя. Используя наше исходное выражение, нетрудно полу-

* Настоящая публикация представляет собой перевод лекции, прочитанной на открытии школы в г. Эриче (Сицилия) в июле 1991 г.

читать выражения для энергии E и импульса p массивной частицы через ее скорость v :

$$E = m\gamma,$$

$$p = mv\gamma,$$

где

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2}.$$

Необходимо подчеркнуть, что разность между энергией E и энергией покоя E_0 — кинетическая энергия частицы T :

$$T = E - E_0.$$

Когда $v \ll 1$, из соотношения

$$(E - m)(E + m) = p^2$$

немедленно следует, что

$$T = E - m \approx p^2/2m$$

и

$$p \approx mv.$$

Кроме того, имеется соотношение между силой и производной по времени от импульса:

$$F = \frac{dp}{dt}$$

справедливое при любых значениях v .

Если $v \ll 1$,

$$\frac{dp}{dt} = m \frac{dv}{dt} = ma.$$

Следовательно, в нерелятивистском случае мы получаем

$$F = ma,$$

и масса, таким образом, оказывается мерой инерции: чем меньше масса тела, тем быстрее его разгоняет данная сила.

В общем случае, когда скорость может быть, вообще говоря, порядка единицы, выражение для силы, получающееся дифференцированием выражения $p = mv\gamma$, оказывается более сложным:

$$F = \frac{dp}{dt} = m\gamma[a + v(va)\gamma^2],$$

или, с учетом соотношения $m\gamma = E$,

$$a = [F - (Fv)v]/E.$$

Вы видите, что в общем случае вектор a направлен не так, как F , и ни m , ни E не играют роли меры инерции. Конечно, можно определить и скорость, и ускорение ковариантным образом в четырехмерном пространстве, используя вместо времени t собственное время τ ($\tau = t/\gamma$):

$$u^i = \frac{dx^i}{d\tau}, \quad \dot{u}^i = \frac{du^i}{d\tau}.$$

Тогда 4-вектор энергии-импульса p^i окажется пропорциональным скорости:

$$p^i = mu^i,$$

а 4-вектор силы f^i — пропорциональным ускорению:

$$f^i = \frac{dp^i}{d\tau} = m\dot{u}^i.$$

Однако обычно часы не летают вместе с частицами, а покоятся на столе в лаборатории. Следовательно, мы должны выразить u^i , \dot{u}^i и f^i через v , a и F , т. е. через непосредственно измеряемые величины:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= v\gamma, & u^0 &= \gamma; \\ \dot{\mathbf{u}} &= \gamma^2[\mathbf{a} + v(\mathbf{v}a)\gamma^2], & \dot{u}^0 &= (va)\gamma^4; \\ \mathbf{f} &= \gamma F, & f^0 &= m(va)\gamma^4, \end{aligned}$$

что снова возвращает нас к тем уравнениям, с которых мы начали.

Во многих книгах вы можете прочитать про релятивистскую массу $m = E/c^2$, возрастающую с ростом скорости, про массу покоя $m_0 = E_0/c^2$. Многие авторы пользуются термином «энергия-масса». Подобная терминология чрезвычайно распространена и чрезвычайно ошибочна. Ее породила традиция пользоваться для релятивистских частиц нерелятивистским соотношением $p = mv$ вместо $p = m\gamma v$. Пожалуйста, не используйте этот архаичный жаргон. Давайте пользоваться современным языком, более адекватным и точным.

Теперь рассмотрим гравитационное взаимодействие частиц. Ключевая идея общей теории относительности — классической теории гравитации — состоит в постулировании универсальности (независимости от массы) ускорения свободного падения, факта, доказанного с возрастающей точностью экспериментами Галилея, Ньютона и Этвеша. Для нерелятивистской частицы напряженность гравитационного поля пропорциональна ее массе. Но для релятивистской частицы напряженность пропорциональна тензору энергии-импульса T^{ik} . Этот тензор симметричен, а следовательно, содержит десять независимых компонент. Гравитационные свойства частицы описываются в таком случае не одной величиной — массой, а десятью — компонентами тензора энергии-импульса T^{ik} .

Я не буду вдаваться в подробности, касающиеся общего принципа относительности; вместо этого я рассмотрю один простой пример поведения релятивистской частицы в слабом гравитационном поле. В этом случае тензор энергии-импульса можно выразить в виде

$$T^{ik} = mu^i u^k \frac{d\tau}{dt} = \frac{p^i p^k}{E},$$

где, как и раньше,

$$p^i = mu^i, \quad u^i = \frac{dx^i}{d\tau},$$

τ — собственное время частицы, $d\tau/dt = \gamma$. Я опустил здесь фактор $\delta(\mathbf{r} - \mathbf{R})$, несущественный для нас.

При $v = 0$ единственная неисчезающая компонента тензора энергии-импульса — это $T^{00} = m$, где m — та же самая масса, о которой мы говорили выше. T^{00} остается доминирующим членом и при $v \ll 1$. В нерелятивистском пределе гравитационное взаимодействие между двумя телами с массами M и m описывается ньютоновским потенциалом

$$V = -G_N \frac{Mm}{r},$$

где G_N — ньютоновская гравитационная постоянная,

$$G_N \approx 6,7 \cdot 10^{-39} \text{ГэВ}^{-2}$$

(мы полагаем $h = c = 1$).

В современной физике есть только одна масса, которая при малых скоростях описывает как инерционные, так и гравитационные свойства тела ($m_i \equiv m_g = m$). Но при высоких скоростях масса не определяет ни того, ни другого. Таким образом, понятия инертной и гравитационной массы оказываются избыточными для медленных частиц и неуместными или даже ошибочными для быстрых.

Понятие массы в XVI—XVII веках

Теперь, дав краткий обзор современной «массовой терминологии», я должен заявить, что в полном соответствии с современной наукой Галилео Галилей никогда не писал равенства $m_i = m_g$. У нас нет никакого $m_i = m_g$ сейчас, и не было $m_i = m_g$ четыреста лет назад (это было только в промежутке).

Нынешние галилеевские торжества соотносятся по времени с 1589—1592 гг., когда Галилей был молодым профессором в Пизе. До этого, в 1586 г., он написал «La bilancetta» («Маленькие весы» — рукопись, в которой рассматривается рычаг с подвешенными грузами, помещаемыми в различные жидкости). Благодаря этой работе он получил место профессора в Пизе с очень скромным жалованьем.

В 1590 г. он подготовил несколько рукописей о механическом движении, под общим названием «De motu antiquiora». Насколько я понимаю, слово «antiquiora» подразумевало «старые» работы самого Галилея (тогда ему было всего 26 лет), а не «старинные» работы античных ученых.

Правила «напечатай или умри» в те времена еще не было, и многие рукописи так и оставались неопубликованными. Фрагменты из «De motu» вошли позднее в различные книги Галилея: в «Le mesuricche», написанную в 1593 г. и опубликованную во Франции в 1634 г., а в Италии в 1649-м, т. е. через семь лет после смерти Галилея), «Dialogo» (1632) и в «Discorsi» (1638).

В сочинениях Галилея нет ни определения, ни обсуждения понятия массы. Как вы понимаете, все труды я не изучал (впервые они были полностью опубликованы в двадцати томах столетие назад). Но некоторые читал. Кроме того, я доверяю историкам науки, заявляющим, что термин «масса» был неизвестен Галилею и его современникам. Не было ни m_i , ни m_g — не было вообще никакой массы. Вместо слова «масса» использовалось слово «вес».

Историки также утверждают, что опыт с тяжелыми телами, сбрасываемыми с Пизанской башни, был всего лишь мысленным экспериментом (реально такой эксперимент был поставлен гораздо позже на соборе Св. Павла и описан Ньютоном в его «Principia»). Но опыты с шариками, скатывающимися по наклонной плоскости, Галилей действительно проводил. Это были весьма остроумные эксперименты, где прохождение определенных путей отмечалось звонком колокольчика.

Каков был основной результат этих опытов? Основной результат состоял в том, что Галилей доказал независимость g — ускорения свободного падения — от веса шарика, его размера и материала, из которого он изготовлен. Для движения в воздухе это было справедливо лишь приближенно, но Галилей постулировал это утверждение как точный закон при движении в вакууме. На современном языке это означает, что нет никакой «пятой силы», зависящей от состава тела (т. е. от числа барионов или лептонов или от протон-нейтронного отношения).

Понятие массы ввел только Ньютон. Он определял массу как количество вещества. (Последствия такого определения чувствуются и по сей день. В некоторых популярных книжках вы можете прочитать о превращении материи в энергию, как, например, при электрон-позитронной аннигиляции. На самом же деле

энергия сохраняется, а превращения испытывают частицы: электроны и позитроны превращаются в фотоны.)

Согласно Ньютону, масса тела пропорциональна его объему и плотности. Это определение потом много раз приводилось различными учеными и философами как пример порочного круга: ведь здесь не говорится, что такое плотность. Некоторые из них предлагали иные определения массы. Другие утверждали, что отождествление количества вещества и массы неявно предполагает признание Ньютоном атомистической теории строения материи. Чтобы не вступать в эти дискуссии, давайте примем только, что это определение неявно предполагает признание законов сохранения и аддитивности массы.

Ньютон дает определение массы в «Principia» (1687), своем главном сочинении. Галилей упоминается в этой книге десять раз и всегда с огромным уважением. Впервые Ньютон обращается к Галилею, когда заходит речь о действии на расстоянии (именно с этого вопроса начались его расхождения с Декартом). Но основные его отсылки к Галилею появляются в связи с вопросом о параболичности траектории движения тела в гравитационном поле. Как нетрудно увидеть из текста книги, идея параболы очень вдохновила Ньютона.

Глядя на Галилея с дистанции в четыре века, мы должны признать, что одно из величайших его открытий — это принцип относительности. Его формулировку мы находим в «Dialogo» при описании мысленного эксперимента с движущимися предметами внутри каюты корабля: падают капли воды, в аквариуме плавают рыбки и т. д. Галилей утверждал, что, наблюдая за движением тел внутри каюты с закрытыми иллюминаторами, невозможно установить, покоится корабль или движется равномерно и прямолинейно.

Эта картина в действительности допускает довольно широкую трактовку, подразумевающую не только галилеевскую или «нерелятивистскую» относительность, но и самую настоящую «релятивистскую» относительность. Достаточно допустить, что в каюте есть свет и скорость его конечна.

Скорость света впервые была измерена Рёмером в 1676 г. при наблюдении спутников Юпитера, открытых Галилеем. Как только вы станете рассматривать свет, распространяющийся в каюте с конечной скоростью, вы с неизбежностью придете к относительности в том самом смысле, который вкладывал в это слово Эйнштейн.

Два знаменитых мысленных эксперимента оказались подобны двум семенам. Пизанская башня стала семенем, из которого вырос общий принцип относительности, а каюта корабля — семенем, которое дало частный принцип. «Dialogo» и «Discorsi» стали колыбелью всей современной физики вообще и понятия массы — в частности.

Понятие массы в XVIII и XIX веках

Чтобы проследить дальнейшее развитие понятия массы, я отмечу лишь три ключевых момента.

Первый — это открытие Лавуазье закона сохранения и аддитивности массы в химических реакциях (1789).

Второй — открытие сохранения энергии при превращениях механической энергии в тепловую и обратно (Р. Майер, 1842; и Г. Гельмгольц, 1847).

Третий — вывод Максвеллом уравнений электромагнитного поля, открывших прямой путь к специальной относительности

Эти три открытия лежат за пределами механики и на первый взгляд имеют мало общего с проблемой массы. Однако я думаю, что они гораздо важнее для понимания этой проблемы (вспомним: масса равна энергии покоя), чем бесконечные философские интерпретации определения массы. А им было уделено немало внимания в различных трактатах, написанных за последние два века; в них, в частности, обсуждалось, можно ли определять массу как отношение F к

a , или ее следует рассматривать как чисто математический символ в механических уравнениях и т. д. Но давайте вернемся от истории физики к физике.

Масса системы свободных частиц

Рассмотрим систему из n свободных частиц. Как энергия, так и импульс — это сохраняющиеся и аддитивные величины. Следовательно, полные энергия и импульс будут

$$E = \sum_{i=1}^n E_i, \quad p = \sum_{i=1}^n p_i.$$

Слово «аддитивность» чрезвычайно важно, когда вы говорите о разнице между энергией и массой. Я специально подчеркиваю это обстоятельство, потому что некоторые часто забывают, что это слово всегда нужно держать в памяти.

Масса системы частиц выражается через p и E так же, как и для одной свободной частицы

$$m^2 = E^2 - p^2.$$

Например, если мы рассматриваем массу системы двух фотонов, то

$$m^2 = (E_1 + E_2)^2 - (p_1 + p_2)^2 = 2(E_1 E_2 - p_1 p_2) = 2E_1 E_2 (1 - \cos \theta).$$

Вы видите, что когда фотоны движутся в одном направлении, то $\theta = 0$, $m = 0$. Если фотоны летят навстречу друг другу, то $\theta = \pi$, $m = 2\sqrt{E_1 E_2}$. В системе центра масс $p = 0$, и фотоны имеют равные энергии: $E_1 = E_2 = E_0/2$, так что здесь $m = E_0$, т. е. масса системы равна ее энергии покоя. Заметьте, что E_0 — энергия покоя системы и что энергия покоя фотона равна нулю.

Масса равна энергии покоя, а энергия сохраняется; совершенно очевидно, что и масса тоже сохраняется. Это означает, что масса любой изолированной системы до какой бы то ни было реакции и после нее не изменяется. Но аддитивности масс нет. Это демонстрируется на примере с двумя фотонами: каждый фотон в отдельности не имеет массы, а масса системы двух фотонов может быть равна нулю, но может быть и очень большой — это зависит от энергии фотонов и от угла между их импульсами.

Вы видите, что так часто декларируемая «эквивалентность» энергии и массы здесь не выполняется! Я осознаю, что мое заявление противоречит некоторым высказываниям многих великих физиков. Но это не мое изобретение. То, что я говорю, известно любому теоретику, профессионально занимающемуся теорией частиц. Что же касается великих, то я уверен: они далеко не всегда утруждали себя расстановкой точек над всеми i и перечеркиванием всех t , особенно когда писали не для физиков.

Когда есть масса, есть и энергия. Это утверждение справедливо. Но его нельзя обратить. Можно иметь энергию и не иметь массы. Пример — фотон.

Для энергии: сохранение — да! аддитивность — да!

Для массы: сохранение — да! аддитивность — нет!

Энергия — это времениподобная компонента 4-вектора в четырехмерном пространстве-времени. Масса — это скаляр в четырехмерном пространстве-времени. Так следует выражаться на нашем профессиональном языке.

Взаимодействия и энергия связи

Давайте теперь рассмотрим системы взаимодействующих частиц. В природе существует два дальнедействующих статических потенциала: ньютоновский и кулоновский. В квантовой теории поля любое взаимодействие, включая и два упомянутых, представляется как обмен виртуальными частицами. Но последнее утверждение не следует принимать слишком буквально: существует важное различие меж-

ду этими двумя потенциалами и всеми остальными. Если переходить к пределу $c \rightarrow \infty$, то только эти два взаимодействия остаются, а все остальные (магнитные силы, потенциал Юкавы, обмен W -бозонами и глюонами) вымирают.

Природа разворачивает перед нами широкий спектр связанных систем: ядра, атомы, молекулы, галактики... Каждая такая система имеет свой дефект масс, равный разнице между суммой масс ее составных частей и массой системы как целого. Для ядра составные части — это нуклоны. Для галактики — звезды и межзвездное вещество. Приняв скорость света c равной единице, мы получим дефект масс равным энергии связи. Энергия связи определяется как энергия, необходимая, чтобы развести составные части тела (покоящегося).

Я могу предложить рассмотреть как крайний пример дефекта масс — замкнутую вселенную, у которой гравитационное притяжение галактик компенсирует сумму их масс (энергий покоя) и кинетических энергий. В таком случае масса вселенной равна нулю. Для наблюдаемых скоростей хаббловского расширения критическое значение средней плотности вселенной, при котором она становится замкнутой, будет

$$\rho_c = 3H^2/8\pi G_N \approx 10^{29} \text{ г/см}^3.$$

где G_N — ньютоновская гравитационная постоянная, а H — постоянная Хаббла: $H \approx 100 \text{ км/с} \cdot \text{Мпс}$.

Наблюдаемое значение плотности светящейся материи порядка $10^{-2} \rho_c$. Однако есть веские причины ожидать, что истинное значение ρ намного больше. Это следует из наблюдаемого движения звезд на периферии галактик. Они движутся слишком быстро, указывая, что массы галактик много больше, чем массы их видимых частей. То же самое справедливо и в отношении скоплений галактик. Согласно инфляционному космологическому сценарию, $\rho \approx \rho_c$, а вселенная плоская.

Говоря о массе вселенной, невозможно обойти вниманием и проблему плотности энергии вакуума, так называемого космологического члена. Судя по всему, она исчезающе мала. Но релятивистская квантовая теория требует, чтобы энергия вакуума была чрезвычайно велика из-за вакуумных квантовых флуктуаций. Это одна из величайших загадок современной физики.

Удержание кварков и глюонов в адронах

Одним из самых ярких достижений физики было создание квантовой хромодинамики. Оказалось, что квантовая теория поля может описывать поведение и таких частиц, которые не имеют массы в обычном смысле этого слова, энергии покоя свободных частиц. Но кварки и глюоны никогда не покоятся и никогда не бывают свободны. Они мечутся внутри адронов в пожизненном заключении. Следовательно, их массы не могут быть определены в обычном смысле. Хотя массы кварков и глюонов не могут быть определены на больших расстояниях, их можно определить на малых, когда они обретают асимптотическую свободу внутри своих тюремных камер. На малых расстояниях (или при больших значениях переданного импульса q) роль сильных взаимодействий становится все менее и менее важной, и поэтому мы можем увидеть кварки почти голыми внутри их глюонных шуб. Что же касается массы шубы, она зависит от константы связи $\alpha_s \sim 1/\ln(\Lambda_{QCD}/q)$, а следовательно и радиуса удержания $r_{conf} \sim 1/\Lambda_{QCD}$.

Лагранжиан квантовой хромодинамики известен, но вычисление масс адронов — очень сложная задача. Я упомяну два способа ее решения: хромодинамические правила сумм и компьютерные расчеты на решетках.

Правила сумм основаны на дисперсионных отношениях и свойстве асимптотической свободы. Дисперсионные отношения при таком подходе служат мостиком между областью асимптотической свободы и областью удержания. (Напомним, что дисперсионные отношения выводятся из двух общих принципов: анали-

тичности и унитарности S -матрицы.) С помощью правил сумм были вычислены массы ряда частиц в нижней части спектра адронов.

Пространственно-временные решетки позволяют вычислять значения массы в пределе сильных взаимодействий, и потому это направление очень многообещающее.

Шкала масс элементарных частиц

Представления об элементарности частиц меняются со временем. Сейчас элементарными мы считаем калибровочные бозоны, кварки и лептоны.

Самый «старый» из калибровочных бозонов — фотон — экспериментально безмассов. Что я имею в виду? Обычно мы считаем его безмассовой частицей, но на самом деле мы знаем только, что масса его очень мала. Верхние пределы для значения его массы (в действительности, это нижние пределы для значения комптоновской длины волны) дается астрономическими наблюдениями магнитного поля Юпитера и магнитного поля галактики. Эти пределы весьма внушительны, но мы не имеем никаких убедительных теоретических оснований, никаких теоретических принципов, заставляющих считать фотон безмассовым.

Некоторые считают таким основанием калибровочную инвариантность. Но калибровочная инвариантность для абелевых симметрий вовсе не священна. Для электромагнитного поля она подразумевает лишь, что фотон не имеет массы. А это тавтология. Собственный аномальный магнитный момент электрона калибровочно инвариантен, но его наличие разрушило бы перенормируемость квантовой электродинамики вместе со всей теорией. Крошечная масса фотона нарушила бы калибровочную инвариантность, но теория осталась бы перенормируемой, и поразительное соответствие квантовой электродинамики эксперименту осталось бы нетронутым. Для абелевых полей калибровочная инвариантность не является ни необходимой, ни достаточной.

В отличие от фотонов, глюоны (а также гравитоны) имеют теоретические обоснования своей безмассовости: наличие у них массы разрушило бы теорию. Даже незначительный массовый член в лагранжиане квантовой хромодинамики сделает теорию неперенормируемой из-за ультрафиолетовых расходимостей.

Массы W - и Z -бозонов по существу задают нам фермиевскую шкалу, шкалу, которая определяет массы всех известных нам элементарных частиц. Другой параметр, существенный для задания этой шкалы, — это $\sqrt{\alpha_W}$, где α_W — постоянная слабого взаимодействия ($\alpha_W \sim 1/30$). В итоге фермиевский масштаб располагается в области сотен ГэВ.

Среди элементарных частиц топ-кварк, по-видимому, имеет наиболее естественное значение массы — порядка фермиевского масштаба. Более точно, исходя из значений радиационных поправок и переходов $K^0 - \bar{K}^0$ и $B^0 - \bar{B}^0$, можно ожидать, что значение m_t находится где-то между 100 и 200 ГэВ. Естественность этого значения оказывается причиной, по которой топ-кварк до сих пор не обнаружен.

Массы легких кварков по отношению к фермиевскому масштабу сильно подавлены:

$$m_b \sim m_c \sim \alpha m_t,$$

$$m_s \sim \alpha^{3/2} m_t,$$

$$m_d \sim m_u \sim \alpha^2 m_t.$$

У нас нет теоретического объяснения этих факторов подавления.

Заряженные лептоны легче своих партнеров-кварков (соседей по кварковым дублетам):

$$m_\tau < m_b, \quad m_\mu < m_s, \quad m_e < m_d.$$

Нейтральные лептоны — нейтрино — наиболее загадочные частицы: мы знаем только верхние пределы для их масс:

$$m_{\nu_e} < 17 \text{ эВ, при уровне достоверности } 95\%,$$

$$m_{\nu_\mu} < 0,27 \text{ МэВ, при уровне достоверности } 90\%,$$

$$m_{\nu_\tau} < 35 \text{ МэВ, при уровне достоверности } 95\%.$$

На протяжении многих лет бытовало мнение, что нейтрино должны быть безмассовыми из-за γ_5 -симметрии. Это мнение нашло отражение и в стандартной модели, которая допускает существование только левых безмассовых нейтрино и правых антинейтрино. Но сейчас мы знаем, что все дискретные симметрии в природе нарушены: С, Р, СР, Т. (Только калибровочные симметрии ненарушаемы.) За что же привилегии для дискретной γ_5 -симметрии? А с приходом в физику гранд- и суперобъединений никто уже не боится очень больших и очень малых чисел. Поэтому теперь входит в моду считать, что нейтрино имеют массы, хотя и очень маленькие. К сожалению, я не имею возможности останавливаться на этом интересном вопросе подробно, но должен заметить, что есть основания считать, что к обычным (дираковским) массам у нейтрино добавляются майорановские.

Говоря о нарушении дискретных симметрий, нельзя не упомянуть о сохранении СРТ-инвариантности. Равенство масс частиц и античастиц было проверено для K^0 и \bar{K}^0 с поразительной точностью: $\Delta m/m \sim 10^{-18}$. Для других частиц точность в миллиарды раз ниже, и планируются специальные эксперименты для ее повышения, особенно для уточнения отношения масс протона и антипротона. Но я лично не думаю, что какое-нибудь отличие масс будет обнаружено.

Скаляры и природа массы

Природа массы — самый важный из нерешенных вопросов современной физики частиц. Хочется верить, что он может быть решен (хотя бы отчасти) в экспериментах на будущих коллайдерах, таких, как SLC и LHC.

Теоретически природа и происхождение массы связаны с ожидаемым существованием скалярных бозонов, наиболее популярные среди которых — хиггсовские. Таким образом, мы наконец пришли от Галилея к Хиггсу.

Профессор Хиггс*, безусловно, расскажет о проблемах скалярных полей в своей лекции на закрытии школы. И потому я могу считать свою задачу выполненной и ограничиться в заключение только несколькими замечаниями.

Существование элементарных скалярных бозонов — хиггсов — только одна из нескольких возможностей. Другая возможность — это существование составных скалярных полей, например, составного скаляра tt . Эти возможности интенсивно обсуждаются на протяжении последних двух лет. Есть еще модель техницвета, в которой масса возникает в результате удержания, подобного тому, что имеет место в квантовой хромодинамике. Эта модель предсказывает существование техниадронов с массами порядка 1 ТэВ и сравнительно легких псевдоголдстоновских бозонов (технианалогов пионов). К сожалению, мы до сих пор не имеем непротиворечивой теории техницвета.

Если скалярные поля элементарны, должны существовать суперсимметричные частицы. Эти суперчастицы компенсируют квадратичную расходимость, связанную с элементарными скалярными полями. Иначе фермиевский масштаб взлетел бы до

* Питер Хиггс — английский физик-теоретик предложивший теоретическую модель возникновения масс у частиц за счет возникновения ненулевого вакуумного среднего у нейтрального скалярного поля. Квантами этого поля являются нейтральные скалярные бозоны, называемые обычно хиггсовскими бозонами или хиггсами.

планковского. Хиггсов скаляр в минимальной стандартной модели не должен быть слишком тяжелым, во всяком случае не тяжелее 1 ТэВ. Иначе в теории возникнут сильные несоответствия на уровне логарифмических расходимостей.

Если никаких скалярных полей нет вообще, то должно быть сильное *WW*-взаимодействие с энергиями порядка 1—2 ТэВ.

Самые легкие скалярные частицы (элементарные или нет) и суперчастицы (если они существуют) должны быть открыты на будущих суперколлайдерах. Но подробное исследование «Скалярландии» и «Суперландии» — задача для гораздо более мощных ускорителей.

Мне хотелось бы провести здесь сравнение с изучением обычных адронов. Для изучения возникновения и распада пионов было достаточно нескольких сотен МэВ. Для получения странных частиц и антипротона потребовались энергии выше 1 ГэВ. Для удовлетворения этой потребности в 50-е гг. были построены «Космотрон» и «Бэватрон». Но уже сегодня ясно, что «Кваркландия» простирается гораздо дальше — в область энергий порядка ТэВ.

Аналогично можно ожидать, что «Скалярландии» и «Суперландии» тянутся до ПэВ-ных областей*. Сейчас невозможно обсуждать создание ускорителя на десятки ПэВ, но было бы хорошо, по крайней мере, дотянуть до одного ПэВ.

Детальное изучение этой области энергий позволит строить экстраполяции в области планковских энергий, т. е. наиболее фундаментальных свойств материи. Как вы знаете, планковский масштаб определяется тремя фундаментальными константами: c , \hbar и G_N . Сейчас мы верим, что именно в области планковских энергий происходит сферобъединение всех взаимодействий, включая гравитационное. Ключ к пониманию макроскопических процессов лежит на атомном и ядерном уровнях. Ключ к пониманию атомных и ядерных процессов лежит в области энергий порядка ТэВ и ПэВ.

График трех бегущих калибровочных констант взаимодействия, опубликованный недавно в «Курьере ЦЕРН», представляет собой грубый пример той экстраполяции, о которой я говорю. Этот график лишний раз подтверждает наблюдение, сделанное десятилетие назад: существование суперчастиц значительно улучшает сходимость трех типов взаимодействий в обычном великом объединении. Подобная экстраполяция из области энергий ПэВ в планковскую может вполне оказаться реальной.

Заключение

Галилео Галилей первым обратил внимание на ускорение. «Ускорение» — это ключевое слово при оценке его фундаментального вклада в физику. Тела в его опытах разгоняла гравитация. В наших опытах тела разгоняются электромагнитным полем. И нам приходится добиваться максимально высоких энергий, чтобы подойти к загадке массы и пониманию наиболее глубоких свойств материи, включая гравитацию.

Перевод с английского Д. А. Бююка

* 1 Пэв = 10^{15} эВ.