

Сомнительная роль пространственно-временного континуума в микроскопической физике¹

Дж. Ф. Чью

Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge

Далее следует перевод статьи: G. F. Chew, "The dubious role of the space-time continuum in microscopic physics," Science Progress, October 1963, Volume LI, No. 204, pp. 529-539.

Один из главных уроков, которые преподносит нам развитие физики, состоит в том, что в структуре всякой физической теории следует избегать понятий, не поддающихся экспериментальной проверке. Данное требование не всегда выполнялось для успешных на тот или иной период теорий, и тем не менее с устранением из теории ненаблюдаемых аспектов неоднократно был связан существенный научный прогресс. Так, физикам XIX столетия было весьма трудно отказаться от представления о всепроникающем эфире; однако до тех пор, пока данное понятие не было элиминировано в силу своей ненаблюдаемости, оставалось невозможным развитие принципа относительности. И хотя даже сегодня мы не можем категорически утверждать, что довольно изощренная в теоретическом плане концепция эфира с необходимостью ошибочна, современные физики глубоко убеждены в том, что теория, содержащая эфир лишь на уровне декларации, гораздо менее удовлетворительна в сравнении с теорией, где на подобные понятия наложен запрет. Мой тезис в данной лекции будет состоять в предположении, что пространство и время в современной микроскопической физике играют примерно ту же роль, что и понятие эфира в макроскопической физике конца XIX века. Возможно, нам никогда не удастся продемонстрировать *несуществование* пространственно-временного континуума, однако все большее число физиков приходит к мысли, что дальнейшее существенное продвижение в теории предполагает отказ от ненаблюдаемого континуума. Мы должны пытаться строить теорию в терминах лишь измеримых величин.

Почему пространственно-временной континуум а priori ненаблюдаем? Точнее говоря, почему невозможно определить положение некоторого объекта с произвольной точностью? Те, кто знаком с принципом неопределенности Гейзенберга, правильно отметят здесь его ключевую роль, однако этого еще недостаточно для исчерпывающего ответа. Дело в том, что в нерелятивистском случае принцип неопределенности утверждает

¹ Перевод с английского С. В. Болохова и А. В. Пилипенко.

лишь невозможность *одновременного* измерения положения и импульса с произвольной точностью. При этом остается принципиальная возможность точного определения координаты, если импульс вовсе не подвергается измерению. Если говорить более конкретно, то измерение координаты путем рассеяния кванта света (фотона) на исследуемом объекте ограничено по своей точности дифракционными эффектами, зависящими от длины волны фотона λ , однако последняя в принципе может быть сделана сколь угодно малой. Уменьшение длины волны означает рост импульса фотона согласно соотношению Де Бройля $p = \hbar/\lambda$, где \hbar – постоянная Планка, что ведет к увеличению импульса отдачи объекта в ходе измерительной процедуры. Но если нас не интересует импульс объекта ни до, ни после эксперимента, то возможность неограниченно точного измерения положения вынуждает нас заключить, что нерелятивистская квантовая механика не запрещает явное экспериментальное изучение пространственно-временного континуума.

Однако именно релятивистская эквивалентность массы и энергии накладывает абсолютные ограничения на наши измерительные возможности по определению пространственного положения частиц. Когда фотон (или любая другая частица, играющая роль зонда) имеет энергию большую, чем энергия покоя зондируемого объекта, в ходе столкновения начинают рождаться новые частицы, что ведет к изменению физической ситуации в целом. Мы теряем даже возможность идентифицировать первоначальный объект, положение которого мы измеряли. Поскольку трудности начинаются с энергией зондирующей частицы порядка mc^2 (т.е. импульса порядка mc), критическая длина волны оказывается равной \hbar/mc , где m есть масса легкой частицы, могущей родиться в ходе столкновения. Если считать m массой электрона, критический масштаб получится порядка 10^{-11} см. Однако во многих экспериментах по столкновению частиц сравнительно легче рождаются пи-мезоны, нежели электроны. Взяв в качестве критерия массу пиона, приходим к величине порядка 10^{-13} см как пределу наших возможностей по измерению пространственных координат.

Чрезвычайно важно понять, что не существует соответствующего предела измеримости импульса или, что эквивалентно, скорости. Позволив частице без столкновений путешествовать на достаточно большие расстояния, мы можем вычислить ее скорость с произвольной точностью посредством *макроскопических* пространственно-временных измерений в начале и конце проходимого ею пути. Массу же одной частицы, отнесенную к массе другой, можно определить с помощью закона сохранения полного импульса путем измерения углов разлета в ходе взаимного столкновения. (Лишь отношения масс являются существенными.) И вновь для достижения произвольной точности (по крайней мере, в бесконечной

Вселенной) требуются лишь макроскопические пространственные измерения. Таким образом, существует экспериментальная возможность изучения континуума импульсов (и энергий) даже несмотря на отсутствие таковой в случае пространства-времени.

Эти соображения известны уже в течение примерно трети столетия, начиная с первого столкновения квантовой механики с теорией относительности. Почему же тогда эти тридцать лет были истрачены физиками-теоретиками в попытках построить микроскопические теории, содержащие в качестве центрального понятия пространственно-временной континуум? Ответ в значительной степени тот же, что и в случае эфира: существование пространственно-временного континуума, во-первых, «очевидно», а во-вторых, на нем были основаны все предыдущие физические теории. При этом склонны забывать тот факт, что все эти теории не имели дела с явлениями на расстояниях порядка 10^{-13} см.

Три следующих фактора сыграли существенную роль в поддержании незыблемого статуса пространства-времени в микроскопической физике. Первым из них стало успешное предсказание ряда свойств электрона; такого рода предсказания возникли как результат попыток квантования уравнений Максвелла для электромагнитного поля. Уравнения поля – а фактически, и само понятие поля – зависят от пространственно-временного континуума, а верные экспериментальные предсказания, явившиеся следствием усилий по квантованию теории Максвелла, укрепили и статус полей в целом. Стала общепринятой точка зрения, согласно которой единственный путь избежать действия на расстоянии – и, таким образом, не нарушить принцип причинности – это сформулировать фундаментальные физические законы в терминах полей. Тот факт, что последовательные квантово-полевые уравнения, включающие в себя взаимодействие, так и не были получены, был затенен успехами теории возмущений и ее экспериментальными предсказаниями в отношении свойств электрона. Явная сходимости ряда теории возмущений есть следствие малости безразмерного параметра, постоянной тонкой структуры $e^2/\hbar c = 1/137$, причем, как известно, значимый вклад дают лишь первые члены разложения. Так называемая квантовая электродинамика, как стало ясно сегодня, не есть теория поля в том же смысле, что и квантованные уравнения Максвелла, а представляет собой релятивистский квантовый «рецепт» (совместимый в подходящем пределе с классической, т.е. неквантованной теорией поля) для предсказания большинства наблюдаемых атомных явлений, а также некоторых ядерных, в терминах постоянной тонкой структуры и масс частиц. Важно понимать, что этот рецепт может быть дан (и часто дается) в форме, где не фигурируют ни поля, ни пространство-время. В описании должны возникать лишь измеримые величины, такие как импульсы частиц. Тем не менее указанный рецепт исторически

был открыт в ходе попыток проквантовать полевые уравнения, и данное обстоятельство, даже несмотря на неудачность этих попыток, упрочнило статус пространственно-временного континуума в микроскопической физике.

Трудности в получении совместных полевых уравнений со взаимодействием напрямую связаны с ненаблюдаемостью лежащего в их основе пространственно-временного континуума. Взаимодействие в теории поля обычно реализуется перемножением различных полей, взятых в одной и той же точке пространства-времени. Таким образом избегают действия на расстоянии, однако попытка локализовать взаимодействие в бесконечно малой области неизбежно ведет (в силу соображений, рассмотренных выше) к рождению в данной области бесконечного числа частиц с неограниченным спектром энергий. В математическом плане локальное произведение квантовых полей никогда не было строго определено; физическое же происхождение данной проблемы обусловлено в точности теми же обстоятельствами, которые делают принципиально непроверяемым существование пространственно-временного континуума.

Возвращаясь к обсуждению обстоятельств *в поддержку* полевой теории, я должен упомянуть о достигнутом на сегодняшний день понимании касательно существования античастиц, связи между спином и характером симметрии при обмене частицами, а также ряда других, экспериментально наблюдаемых, специальных симметрий. Данное понимание исторически было основано на изучении свойств отдельных, невзаимодействующих полей и не требовало явного построения реалистичной теории поля – конструкции, которой по вышеназванным причинам так никогда и не удавалось достичь. Позже я объясню, что все вышеперечисленные вещи, как недавно было показано, можно понять и без обращения к понятию поля или пространства-времени; и лишь справедливости ради стоит сказать, что впервые на данную область пролила свет именно полевая теория.

Третье обстоятельство в пользу теории поля заключалось в неспособности физиков-теоретиков в течение многих лет представить «фундаментальные» законы взаимодействий на каком-либо ином языке, кроме пространственно-временного. Новые теории почти всегда основаны на аналогии со старыми, а мы никогда раньше не располагали теорией, в которой фундаментальные динамические законы формулировались бы исключительно в терминах импульсов. Но прежде чем покинуть старую хоззяйку, столь долго бывшую нашим преданным спутником, необходимо хотя бы мельком взглянуть на привлекательную замену². И лишь в половину последнего десятилетия эта замена, можно сказать, мелькнула перед нами ножкой за углом.

² Я обязан этой аналогией проф. Гелл-Манну.

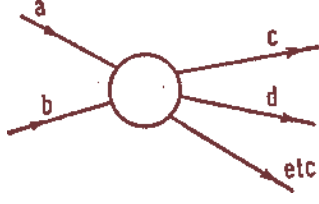
Прежде чем описать прелести новой «хозяйки», позвольте мне коснуться чрезвычайно тонкого вопроса о том, что, собственно, составляет теорию вообще. Единственное определение, имеющее для меня смысл, состоит в следующем: теория есть *любой* набор правил, позволяющих приблизительно предсказать результат *произвольного* эксперимента. Конечно, некоторые теории оказываются лучше остальных, и степень превосходства возрастает с увеличением числа различных экспериментов, в отношении которых теория дает предсказания, а также с увеличением точности самих предсказаний, и уменьшается с ростом числа свободных параметров. Квантовая электродинамика в этом смысле ранжируется очень высоко; она содержит лишь постоянную тонкой структуры вкупе с массами частиц и покрывает огромное количество экспериментальных ситуаций. И все же она не описывает абсолютно все ситуации и имеет ограниченную точность даже в рамках своей области применимости. В атомной физике эксперименты обычно не в состоянии приблизиться к пределу точности квантовой электродинамики, но этот предел тем не менее существует, как это было для всех предшествующих и, скорее всего, для всех последующих теорий.

Таким образом, к разочарованию математиков, абсолютная истина никогда не была выполнимым требованием для физической теории; а что можно сказать насчет красоты последней? Я бы предположил, что когда число свободных параметров теории очень мало и область экспериментальных предсказаний весьма широка, то красота возникает сама собой. Для любой теории обычно можно найти множество различных математических формулировок, одни из которых эстетически привлекательнее других, но если теория имеет достаточно высокую степень превосходства согласно моему критерию, то в прошлом по крайней мере одна из её формулировок оказывалась приятной нашему чувству красоты. Подчас, однако, наиболее красивая формулировка оставалась неоткрытой в течение некоторого времени, после того как теория продемонстрировала свои возможности. В таком случае критерий красоты хоть и не стоит игнорировать, но следует применять с осторожностью. Способность к экспериментальным предсказаниям по-прежнему есть единственно надежная мера физической теории.

Теория поля, даже не достигая красивой стадии замкнутого набора математически совместных уравнений, позволила сделать *немало* успешных предсказаний. Трудность в том, что ее предсказательная сила, по видимому, сегодня превышена, по крайней мере, для случая так называемых «сильно взаимодействующих частиц». Эти частицы, подобно нейтрону и протону, взаимодействуют посредством мощных короткодействующих сил. Все открытые к настоящему времени частицы, за исключением фотона, электрона, мюона и нейтрино, относятся к данному типу, однако

теория поля оказалась не в состоянии описать их свойства – и, тем более, их происхождение. Методика разложения в степенной ряд, применимая для электрона (и мюона), становится бесполезной в отсутствие малого безразмерного параметра типа постоянной тонкой структуры. Гейзенберг не оставляет надежды обнаружить подходящий набор полевых уравнений, однако я убежден, что корень затруднений лежит непосредственно в пространственно-временном континууме. Используя в качестве математических объектов полевые величины, являющиеся локальными функциями принципиально ненаблюдаемых переменных, мы тем самым порождаем полностью вымышленные трудности.

Теперь позвольте мне перейти к вопросу о том, как микроскопическая теория может основываться непосредственно на понятии импульса, игнорируя пространственно-временной континуум. В настоящее время наблюдается рост попыток построить такую теорию, причем менее опытные физики имеют некоторое преимущество в работе с новым понятийным каркасом. (Обратная корреляция между продуктивностью и опытом в подобной ситуации весьма примечательна.) Уже много различных исследователей внесли важный вклад в эту область, зачастую пересекаясь друг с другом, так что мне следует быть корректнее по поводу происхождения тех идей, которые я упомяну. Позвольте мне начать со старого, но базового понятия, а именно с амплитуды рассеяния или S-матричного элемента.



Единственно возможный эксперимент, позволяющий нам изучать процессы в микроскопической вселенной, заключается в столкновении групп частиц и наблюдении различных продуктов распада. Для квантово-механического описания такого процесса,

пример которого показан на рисунке, вводится комплексное число $S_{ab...cd...}$, квадрат модуля которого дает вероятность реакции. Это число называется амплитудой рассеяния, или, более общо, элементом матрицы рассеяния – поскольку полный набор таких амплитуд образует бесконечную квадратную матрицу. Можно показать, что S-матрица унитарна и ее элементы преобразуются в соответствии с релятивистскими требованиями при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. Знать S-матрицу означает обладать максимально полной информацией о микромире; теория, позволяющая вычислить S-матрицу, является полной, поскольку дает возможность предсказать результат любого эксперимента. Важность S-матрицы была осознана (в особенности Гейзенбергом) вскоре после развития квантовой механики, однако долгое время казалось, что концепция S-матрицы слишком замысловата, чтобы служить проводником к фундаментальным законам микромира. Это было особенно верно в тот период, когда все внимание было приковано к понятию «элементарных» частиц. Пока было сильно ощущение, что вся материя может быть

составлена из комбинаций нескольких фундаментальных объектов, было мало причин для формулирования базовых теорий в терминах амплитуд рассеяния. Стремились строить теории, кладя в основу свойства отдельных частиц, а не специфику их взаимодействий. К настоящему моменту, однако, обнаружено столь много равноправных сильнодействующих частиц, что понятие «элементарности» несколько потеряло в репутации. Теперь считается, что каждая сильнодействующая частица может состоять из всех остальных; ни одна из них не более фундаментальна, чем любая другая. Объяснение того, какие же частицы существуют, лежит в структуре взаимодействий: другими словами, та же самая сила, что порождает эффекты рассеяния, может привести и к связанному состоянию, а последнее есть не что иное, как частица. С этой точки зрения S -матрица представляется вполне подходящей структурой для отыскания ключа к макроскопической вселенной. Более того, ключ, по всей вероятности, уже найден.

Ключ лежит в *аналитичности* S -матричного элемента как функции импульсов входящих и выходящих частиц. Мнение физиков об аналитичности амплитуд рассеяния двоякое. Одни находят очевидным, почти тривиальным, что локальная зависимость от энергии или угла представима в форме разложения в ряд. Другим данное обстоятельство представляется весьма загадочным. Лично я испытываю некоторые колебания между этими двумя позициями, но, независимо от этих точек зрения, совокупные экспериментальные данные за тридцать лет ядерных исследований всецело подтверждают справедливость свойства аналитичности.

Принятие аналитичности в качестве базового принципа порождает невероятное число следствий. Стапп показал, как я уже упоминал, что все общие симметрии, прежде выведенные в рамках теории поля, можно получить из свойства аналитичности. Более того, предсказательная рецептура квантовой электродинамики также может быть выведена. Фактически, *вся* предсказательная мощь предписаний, мотивированных теорией поля, может быть воспроизведена в рамках аналитической S -матрицы без упоминания пространства-времени или полей. Данное обстоятельство, на которое впервые обратил внимание Гелл-Манн в 1956 г., было впоследствии проверено длинной серией исследований с участием таких видных имен, как Голдбергер, Лоу, Мандельштам, Нишиджима, Ландау, Каткоски, Фруассар, Стапп, Полкингтон и Гансон. И эти достижения – только начало.

Предсказательная сила полевых теорий для случая сильных взаимодействий оказалась незначительной (по причинам, объясненным выше), тогда как аналитическая S -матрица уже привела к количественному пониманию ряда ситуаций с участием сильнодействующих частиц с учетом знания того, какие частицы реально существуют. Знать, какие частицы существуют, означает знать чрезвычайно много (к этому пункту я

еще вернусь). Стоит осознать тот факт, что после трех десятилетий проблема низкоэнергетических ядерных сил, сформулированная в первоначальных терминах, была решена посредством формализма аналитической S -матрицы. Задача эта весьма сложная, и некоторые её аспекты требуют дальнейшего исследования, но уже успешно объяснено столь многое, что не приходится сомневаться в конечном результате. То же самое можно сказать и о низко-энергетическом взаимодействии между пионом и нуклоном, и нет никаких указаний на то, что данный случай (за исключением большей вычислительной сложности) принципиально отличается от случая иных сильно-взаимодействующих частиц. Сейчас интенсивно обсуждаются методы описания в области высоко-энергетических взаимодействий, и имеются благоприятные признаки того, что вскоре удастся развить соответствующие вычислительные процедуры. Если мы чем-то и удручены здесь, так это лишь сложностью исследуемых ядерных реакций и ограниченностью человеческих сил, но уж никак не нехваткой содержательности в концепции аналитической S -матрицы.

Упомянутое осложнение вынуждает меня отметить еще одно различие между математикой и физикой. Физические измерения всегда содержат ошибки, а теоретические предсказания – долю неопределенности, поскольку любая реальная физическая ситуация с неизбежностью слишком запутанна, чтобы теоретические оценки оказались абсолютно точны. Как следствие, любая теория может быть опровергнута, но в то же время никогда нельзя сказать, что она абсолютно подтверждена экспериментально. Сопоставление теории с экспериментом всегда включает и будет включать аппроксимацию и ограничение рамками простейших ситуаций, и теория признается успешной не тогда, когда она прошла все мыслимые тесты (чего не бывает никогда), а лишь тогда, когда она выдержала «впечатляющее» количество проверок и ни одной не провалила. Именно в этом ключе неспециалист должен воспринимать дискуссии, бушующие сегодня вокруг статуса S -матричной теории. Вы найдете в них общие параллели с моими негативными замечаниями в адрес теории поля, однако не слишком удивляйтесь, если три из четырех встреченных вами физиков-теоретиков выразят скепсис по поводу предсказательной силы теории S -матрицы. Одно из двух: либо они не осведомлены об обширном многообразии экспериментальных тестов, уже успешно пройденных теорией, либо их не впечатлили эти тесты по причине недостаточной «чистоты». В такой ситуации ничего не поделать – разве что подобрать для каждого конкретного физика эксперимент или целую их серию, удовлетворяющую *его* персональным стандартам. Нет нужды говорить, что мои удовлетворены уже достаточно давно.

Для *меня* уже нет вопросов в том, что при заданном наборе частиц аналитическая S -матрица дает возможность описать в деталях характер их

дальнейшего поведения; важный пункт сейчас состоит в том, может ли она *также* сообщить, почему наблюдаемые частицы, в первую очередь, существуют. Я убежден, что теория S-матрицы в весьма высокой степени готова ответить на этот вопрос, по крайней мере для случая сильновзаимодействующих частиц, и мои соображения следующие: прежде всего (как уже заявлялось), я принимаю допущение, что каждая сильновзаимодействующая частица есть динамическая композиция других частиц; все они являются равноправными с точки зрения S-матрицы. Тогда происхождение *определенных* частиц, таких как дейтрон и нестабильный объект, называемый (3,3)-резонансом, посредством аналитической S-матрицы уже оказывается связанным с существованием некоторых других частиц (так, в приведенных примерах первичную роль играют пион и нуклон). Причина, по которой такого рода соотношения легче устанавливаются для одних частиц, чем для других, вовсе не фундаментальна; это вопрос специфики вычислительных методов, развитых к настоящему времени. Постоянно появляются новые методы и устанавливаются все больше связей между разными частицами; и не видно ничего такого, что бы принципиально ограничивало нашу способность объяснять существование любой частицы при наличии информации об определенных других частицах. В такой замкнутой и чрезвычайно нелинейной ситуации я нахожу затруднительным предполагать существование более чем одного самосогласованного набора частиц. Фактически, даже существование одного такого набора кажется удивительным тому, кто ознакомился в деталях с требованиями самосогласованности. Степень чуда несколько уменьшится, если предположить, что не только частицы, но и группы симметрий, обуславливающие сильные взаимодействия, выбираются из требования самосогласованности в структуре аналитической S-матрицы. Таким образом, не так уж и непостижим тот факт, что для сильных взаимодействий *единственно* необходимый элемент теории – аналитичность³.

Таким образом, теория S-матрицы действительно пребывает сегодня в беспрецедентной, но вполне приятной ситуации, заключая в простом принципе едва ли не большую мощь, чем теоретики до сих пор имели в своем распоряжении, при этом не имея ни малейшего намека на какие-либо принципиальные недостатки. Почему же тогда не наблюдается панического бегства прочь от теории поля в распростертые объятья аналитической S-матрицы? Я уже обсуждал ряд причин такой нерешительности консервативно мыслящих теоретиков; позвольте мне завершить этот крат-

³ Фотон и лептоны имеют особые и примечательные характеристики, которые выделяют их из общего ряда; в данном случае труднее поверить, что всё дело сводится к одной лишь аналитичности. Возможная причина специфического статуса фотона упоминается в конце данной статьи.

кий обзор S-матричной теории попыткой прояснить еще одну, чрезвычайно тонкую, но психологически существенную причину.

Все динамические теории в прошлом были даны в форме уравнений движения, и многие физики просто не могут поверить, что возможно иметь динамику без уравнений. Похоже, что в S-матричной теории фундаментальное уравнение отсутствует. Можно просто сказать: S-матрица есть Лоренц-инвариантная аналитическая функция энергий и импульсов, чья структура полюсов согласована с требованием унитарности. Точка! В силу ряда причин пока еще рано говорить, что данное утверждение нашло точное математическое отражение, и сегодня много высокоталантливых специалистов прилагают крайне важные усилия в достижении необходимого уровня строгости; но перспектив получить на этом пути обычное уравнение движения нет. Уравнения, которые мы действительно имеем и на которых основаны все предсказания теории, суть формулы Коши (иногда называемые в данном контексте дисперсионными соотношениями), описывающие аналитическую функцию в терминах ее полюсов и точек ветвления, а также аналитически продолженное условие унитарности, определяющее расположение и природу данных точек ветвления и полюсов. Невозможно, однако, записать сразу *все* эти уравнения, поскольку их бесконечное число вследствие бесконечной размерности S-матрицы; любой же конечный их набор влечет неполноту описания. Единственно возможное полное описание – именно то, которое указано мною выше, и оно, на мой взгляд, обладает несомненной красотой, хотя и невыразимо в форме каких-либо уравнений движения. Вследствие этого множество выдающихся физиков-теоретиков находят невозможным принять S-матричную теорию всерьез.

В заключение позвольте мне вернуться к вопросу пространства-времени. Никто не предлагает лишить пространство-время базового статуса в *макроскопической* физике; дело обстоит как раз наоборот, поскольку процедура измерения импульсов, задающих S-матрицу, существенно зависит от макроскопических пространственно-временных измерений. Означает ли это, что невозможна непрерывная связь между микро- и макроскопическими мирами? Данная ситуация ничуть не страшнее той, что всегда имела место в квантовой механике, где общепринятое объяснение соотношения между классическим наблюдателем и квантовыми законами вызывает у многих сильный дискомфорт. На самом деле, теория S-матрицы в конечном счете может привести нас к лучшему пониманию связи между микро- и макромиром. Как подчеркивал Стапп, она избавляет нас от большей части аппарата квантовой механики (операторов, правил коммутации, векторов состояния), сохраняя лишь принцип суперпозиции. Таким образом, любопытной стороной предлагаемой теории является тот факт, что её, в отличие от квантовой теории поля, способна оценить даже

более широкая аудитория. Ведь идея аналитичности гораздо тривиальнее для понимания, чем свойства, приписываемые полевым операторам.

До сегодняшнего дня никто не предпринимал радикальных попыток выстроить цепочку связующих звеньев между макроскопическим понятием пространства-времени и S -матрицей. Однако одно поразительное обстоятельство не должно ускользнуть от нашего внимания: любые экспериментальные измерения макроскопических траекторий частиц требуют дальнедействующих электромагнитных взаимодействий. Иными словами, с точки зрения S -матричного подхода, само определение пространства-времени в целом требует существования электромагнитного кванта, фотона. Несомненно, поэтому фотон с его нулевой массой покоя выделяется из общего ряда.

Как видите, новая теория, идущая на смену старой хозяйке, полна загадок, но, соответственно, полна и надежд. Старая же продолжает отчаянно цепляться за свой статус, но время её позади. Физика двадцатого столетия уже подверглась двум захватывающим дух революциям – в теории относительности и квантовой механике. Мы стоим на пороге третьей.