

III. Мысли из прошлого

Макроскопическая природа пространства-времени¹

Е. Дж. Циммерман

Department of Physics, University of Nebraska, Lincoln, Nebraska

Далее следует перевод заключительного раздела статьи: E. J. Zimmerman, "The Macroscopic Nature of Space-Time," American Journal of Physics, February 1962, Volume 30, Issue 2, pp. 97–105.

IV. Макроскопическая интерпретация пространства-времени

Эти результаты, как мне представляется, довольно недвусмысленно намекают на интерпретацию пространства-времени, которая еще не была адекватно исследована. Последняя просто отказывается от любой попытки описать микроскопические частицы как объекты, существующие в пространстве-времени. Вместо этого, она пытается понять каким образом из внепространственных и вневременных свойств микроскопических частиц само пространство-время могло бы быть получено как результат взаимодействий между этими частицами. Эта интерпретация могла бы быть названа макроскопической интерпретацией пространства-времени, поскольку она утверждает, что понятия пространства и времени могут иметь смысл лишь когда подразумевается существенно макроскопическая система. Я бы хотел обсудить эту точку зрения далее, но, прежде всего, позвольте мне сформулировать ее настолько сжато, насколько это возможно:

«Пространство и время не являются понятиями, которые могут быть осмысленно применены к одиночным микроскопическим системам. Такие системы должны описываться абстрактными понятиями (заряд, спин, масса, странность, квантовые числа), которые не имеют отношения к пространству и времени. Эти микроскопические системы взаимодействуют способами, которые также должны описываться абстрактно,

¹Перевод с английского А. В. Соловьева.

т. е. без ссылок на пространство и время. Когда огромное число таких микроскопических систем взаимодействует, простейший и самый фундаментальный результат состоит в создании пространственно-временного каркаса, который придает законность классическим представлениям о пространстве и времени, но лишь на макроскопическом уровне.»

Эта интерпретация не является полностью новой. Ее элементы появляются в работах Эддингтона² и Вигнера³. Хойл⁴ предложил ее в нескольких кратких примечаниях, а ван Данциг⁵ изложил ее в довольно похожих выражениях. Указанная интерпретация резко контрастирует с попытками, такими как у Дарлинга⁶, ввести в пространство-время минимальный объем и с попытками, такими как у Марча⁷, ввести в квантовую теорию элементарную длину. Эти и подобные им попытки стремятся наложить четкие ограничения на определенные физические величины (такие как длину), тогда как макроскопическая интерпретация вполне совместима с существованием неограниченного предела малости. Можно придать физический смысл очень малым расстояниям, например, если макроскопический прибор достаточно велик и должным образом смонтирован. Но тогда, как будет подробно обсуждаться ниже, сопряженный импульс становится в высокой степени неопределенным и это, несомненно, такой же сбой в применимости классических пространственно-временных понятий, каким было бы существование минимальной длины.

Ясно, что понятия подобного рода, предложенные для пространства-времени, не являются ни новыми для физики ни маловажными. Наиболее знакомы термодинамические понятия: температура, давление, энтропия и многие другие. На микроскопическом уровне эти понятия неуместны либо бессмысленны; ни одна микроскопическая система не обладает каким бы то ни было свойством, которое может быть должным образом описано как «температура» или «давление», так же как она

²A. S. Eddington, *Relativity Theory of Protons and Electrons* (Cambridge University Press, 1936); *Fundamental Theory* (Cambridge University Press, New York, 1946).

³E. Wigner, "Relativistic invariance of quantum-mechanical equations," in *Jubilee of Relativity Proceedings* (Birkhäuser Verlag, Basel, 1956); *Helv. Phys. Acta*, Suppl. IV.

⁴Примечания к цитированной статье Вигнера, стр. 224.

⁵D. van Dantzig, "On the relation between geometry and physics and the concept of space-time," in *Jubilee of Relativity Proceedings* (Birkhäuser Verlag, Basel, 1956), p. 48.

⁶B. T. Darling, *Phys. Rev.* **80**, 460 (1950).

⁷A. March, *Quantum Mechanics of Particles and Wave Fields* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1951), Chap. 10.

не имеет ни одного свойства, которое является хотя бы аналогичным макроскопическим величинам. Однако когда такие системы объединяются в одну большую систему, макроскопические (термодинамические) свойства возникают как крайне важные статистические свойства. Термодинамика — не единственная дисциплина, где существенны подобные понятия. Д. ван Данциг указывает, что механическое понятие кривизны поверхности (как и острия или края) или даже понятие границы поверхности представляет собой макроскопическое понятие, которое неуместно либо бессмысленно для микроскопической системы⁸. В теории электричества понятия сопротивления и электродвижущей силы являются свойствами, не применимыми к микроскопическим системам, но возникающими из совсем иных характеристик микросистем, когда большое их число взаимодействует. Вряд ли можно отрицать, что эти макроскопические понятия фундаментальны для физической науки. Не кажется невозможным чтобы понятие пространства-времени могло принадлежать тому же общему классу понятий.

В самом деле, подобный взгляд на природу времени предлагался на совсем иных основаниях. Философы и склонные к философии ученые предположили, что даже классическое «время» физики имеет существенно термодинамический характер. В классической механике время является обратимым или «двусторонним». Но фактически переживаемое время не такое, оно — «одностороннее». В лаборатории нет способа проверить уравнения, которые получаются в результате подстановки в физические законы $(-t)$ вместо (t) , поскольку нет известного способа обратить «поток времени». Однако термодинамика преподносит иные «односторонние» концепции, такие как непрерывное возрастание энтропии из ее второго начала. Предположение, таким образом, состоит в том, что энтропия определяет направление физического времени и задает «стрелу времени», как это выразил Эддингтон. Главная критика заключается в том, что возрастание энтропии является статистическим, тогда как почему-то считается известным, что поток времени таковым не является. В отношении макроскопической интерпретации, конечно, эта критика теряет силу.

Не следует переоценивать этот момент, поскольку точная связь между временем и вторым началом термодинамики не ясна. Однако недооценивать его тоже не следует. Однонаправленный характер физически

⁸D. van Dantzig, "On the relation between geometry and physics and the concept of space-time," in *Jubilee of Relativity Proceedings* (Birkhäuser Verlag, Basel, 1956), p. 49.

переживаемого времени остается до некоторой степени головоломкой. По меньшей мере необходимо проявлять осторожность, наделяя время всеми свойствами математической непрерывности когда оно теряет свойство обратимости, а ведь и то и другое вытекает из математической формулировки физических законов.

«Абстрактные понятия», которые описывают микроскопические системы, существуют и некоторые из них хорошо известны. Действительно, они возникают для точного определения тех свойств элементарных частиц, которые вызывают наибольший интерес в современной физике. Некоторые такие свойства: заряд, спин, странность, (квантованная) масса, изотопический спин и другие квантовые числа. Они не имеют отношения к каким бы то ни было пространственно-временным свойствам, а определяют структуру элементарных частиц внепространственным, вневременным образом. Пространственно-временное поведение элементарных частиц не является сегодня наиболее интересным; эксперименты с такими частицами ставятся, главным образом, в надежде получить информацию, касающуюся следующих вопросов. Почему масса покоя квантована? Как может быть понят спектр масс вместе с надлежащими спинами, зарядами и другими свойствами частиц? Почему элементарные частицы имеют только два значения электрического заряда: нуль и одна электронная единица? Каковы именно отношения между абстрактными свойствами, которые определяют то, что мы подразумеваем под элементарной частицей?

Возможно, ответы могут быть получены в теории, сформулированной на языке пространства-времени. Например, Гейзенберг с сотрудниками постулируют единое физическое поле, определенное для сколь угодно малых значений (x, y, z, t) и удовлетворяющее нелинейному волновому уравнению, чьи допустимые решения могли бы задать энергии, которые можно было бы связать со спектром масс⁹. Бом и другие авторы пытаются распространить пространственно-временное описание с точечными частицами и причинностью в субъядерную область, модифицируя законы сил так, что они гарантируют поведение согласно квантовой теории на атомном уровне¹⁰. Эти или подобные им попытки могут тем не менее иметь успех.

⁹H. P. Duerr, W. Heisenberg, H. Mitter, S. Schlieder, K. K. Yamazaki, Z. Naturforsch. **14a**, 441 (1959).

¹⁰По поводу обширного резюме и библиографии этой работы см. H. Freistadt, Suppl. Nuovo Cimento **5**, 1 (1957).

С другой стороны, в равной степени возможно, что проблема структуры элементарных частиц может быть решена вполне абстрактно теорией, чьи основные элементы не имеют отношения к пространству-времени. Такое решение затрагивало бы только внепространственные, вневременные свойства микросистем и отношения между ними. Скорее всего, оно включило бы одно или более еще неизвестных понятий. Лишь будущее способно показать, какой подход будет более плодотворен.

Абстрактные характеристики частиц, хотя сами по себе и не являются геометрическими, тем не менее имеют некоторые любопытные связи с геометрическими свойствами. Заряд, например, может быть некоторым образом связан с пространством; современные теории указывают, что обращение заряда связано с отражением пространственных осей. Многие теоретики предполагают, что в каждой точке пространства-времени следует прикрепить абстрактный набор «пространственных» осей, не связанных в других отношениях с пространством-временем, но чьи абстрактные геометрические свойства, как считается, имеют некоторые из внутренних отношений обыкновенного пространства, такие как пространственное квантование в смысле спина или инвариантность относительно преобразования Лоренца¹¹. Подобное абстрактное пространство, связанное с «изотопическим спином», систематически используется в теории ядра. Самое последнее предложение Минарди — использовать в физической теории необычную суперпозицию двух наборов пространственно-временных осей для того, чтобы получить математические степени свободы необходимые при рассмотрении некоторых из абстрактных свойств элементарных частиц¹². Ни одна из существующих попыток связать эти свойства со свойствами физического пространства не является вполне успешной. Поэтому еще одно исследование данной связи с точки зрения макроскопической интерпретации могло бы быть полезным.

Макроскопическая интерпретация пространства-времени требует также существования взаимодействий между микроскопическими частицами, которые сами по себе не затрагивают пространство-время. По меньшей мере два общих вида таких взаимодействий обычно используются в существующей теории:

(1) Исключение из квантовых состояний. Квантовые состояния могут быть описаны наборами чисел, не имеющих непосредственного отноше-

¹¹Например, A. Pais, *Physica* **19**, 869 (1953).

¹²E. Minardi, *Nuclear Phys.* **12**, 35 (1959).

ния к пространству-времени. Микроскопические системы могут тогда взаимодействовать, позволяя лишь одной такой системе занимать состояние с любым заданным набором квантовых чисел. Такое взаимодействие имеет физические следствия. Принцип исключения Паули, фактически, ответственен за организацию периодической системы элементов и, во многом, за систематику таблицы нуклидов.

(2) Обмен «метками» в уравнениях. Частицы должны быть проименованы для того, чтобы иметь возможность их обсуждать, но уравнения должны давать одни и те же результаты при любой разметке. Это требование также эквивалентно взаимодействию, которое имеет физические следствия. В настоящее время частицы размечаются посредством координат, но нет причин почему это должно быть обязательно так. Обменные взаимодействия этого сорта являются чисто воображаемыми обмeнами, которые определенно не требуют использования пространственно-временных понятий.

Третьим взаимодействием требуемого вида мог бы быть обмен между микроскопическими системами некоторой физической величиной, такой как заряд, спин или энергия. Такой обмен легко может быть описан без использования «пространства», поскольку эти свойства не (непосредственно) геометрические. Однако трудно вообразить, что такой обмен не происходит в некоторое определенное «время». Эта трудность может возникнуть, так как мы упорствуем в экстраполяции нашего макроскопического чувства времени на микроскопический уровень; поскольку макроскопические объекты существуют во времени, мы ощущаем, что микроскопические объекты должны существовать таким же образом. Квантовая механика дает мало поддержки этому ощущению; уравнения, описывающие систему с избыточной энергией (возбужденное состояние), не содержат ничего соответствующего «времени испускания» для этой энергии. Микроскопическое описание показывает лишь непрерывную возможность для испускания энергии и только когда произведено наблюдение, время испускания приобретает смысл. Но это просто другой способ констатировать, что только когда происходит макроскопическое взаимодействие, время испускания приобретает смысл. Таким образом, квантовая механика в некотором смысле поддерживает представление о том, что обмены физическими величинами между микросистемами не происходят в определенные моменты времени. Как бы то ни было, два вышеупомянутых примера показывают, что взаимодействия внепространственной, вневременной природы, несомненно, можно себе

представить.

Кроме того, если пространство-время интерпретируется в макроскопическом смысле, то важность окружающего вещества явно допускается во всех физических задачах, в которых используются переменные (x, y, z, t) , так как эти переменные представляют сглаженный эффект макроскопического материала, присутствующего и важного для рассматриваемой физической задачи. Согласно многим авторам принципы квантовой механики требуют, чтобы «вселенная» учитывалась в каждой задаче и это, несомненно, совместимо с математическим формализмом. Хотя не совсем приемлемо цитировать Эддингтона по поводу квантовой механики, он выразил данное положение настолько хорошо, что я, как бы то ни было, сделаю это:

«Окружающая среда никогда не должна оставаться без рассмотрения. Было бы бесполезно разрабатывать формулы для поведения атома в условиях, которые подразумевают, что остальное вещество вселенной аннигилировало. В теории относительности мы не признаем понятие атома как вещи полностью в себе. Мы можем рассматривать атом без физической вселенной, в которую он помещен, не более, чем рассматривать гору без планеты, на которой она стоит.»¹³

Мы вполне хорошо сознаем, что уравнения квантовой механики небесполезны. Макроскопическая интерпретация наводит на мысль, что квантовая механика (также как классическая физика) настолько успешна потому, что, в использовании пространственно-временной системы отсчета, теория «незаметно» задействует вселенную таким образом, чтобы представить ее наиболее существенные свойства.

Рассмотрим с этой точки зрения волновое уравнение для свободной частицы, например, уравнение Шредингера. Такое уравнение, как иногда говорится, описывает полностью изолированную частицу массы m . Но, конечно, это не так. Эмпирически, оно описывает, скорее, частицу в действительной физической вселенной при условиях, в которых она редко взаимодействует с любой другой отдельной микроскопической частицей. Это не то же самое, что сказать будто она изолирована, ибо она находится в одном «ящике» с громадным числом других частиц, похожих и непохожих. Если вселенная должна быть частью вся-

¹³A. S. Eddington, *Fundamental Theory* (Cambridge University Press, New York, 1946), p. 13.

кой задачи, то некоторые параметры или переменные в уравнении Шредингера должны иметь отношение к (среднему) влиянию этих других частиц. Вполне последовательно рассматривать (x, y, z, t) как эти переменные, « m » — как параметр, отсылающий к самой микроскопической системе и волновую функцию — как выражение взаимодействия между микроскопической системой и макроскопической системой, содержащей остальные частицы вселенной.

Если рассматривают плоско-волновые решения, которые имеют бесконечное протяжение (в той степени, в которой термин «протяжение» применим), это кажется очень просто. Это остается точно так же просто, однако, когда рассматриваются другие решения. Другие решения могут мыслиться либо как суперпозиция плоских волн — к каждой из которых применим вышеупомянутый аргумент, — либо как результат наложения границ или барьеров, через которые частица может проходить лишь с трудом. Такие границы — например, острая кромка щели — представляют перераспределение некоторого материала вселенной относительно среднего распределения, предполагаемого в интерпретации плоско-волновых решений. Решения, поэтому, разные, не из-за того, что микроскопическая система (характеризуемая в каждом случае посредством « m ») как-то изменилась, а из-за того, что изменилось ее окружение и волновые решения описывают отношение между частицей и ее окружением.

Макроскопическая интерпретация упрощает трактовку соотношений неопределенности Гейзенберга. Эти соотношения более не относятся строго к одиночной микросистеме. Взамен они устанавливают ограничения на то, как точно некоторый макроскопический прибор может задать пространственно-временную систему для микроскопической частицы. Как ясно подчеркнуто Бором, *расположения экспериментальной аппаратуры для измерения положения и импульса являются взаимно исключаящими*¹⁴. Значит можно твердо утверждать, что макроскопический прибор определяет пространство-время, имеющее силу на макроскопическом уровне, но что не все так определенные пространственно-временные системы эквивалентны когда мы пытаемся экстраполировать их в микроскопическую область. Все такие экстраполяции неизбежно терпят крах, так как пространство-время имеет смысл только на ма-

¹⁴N. Bohr, "Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics," in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, edited by P. A. Schilpp (Tudor Publishing Company, New York, 1949).

микроскопическом уровне. Однако они могут терпеть крах различными способами. Одни проваливаются при определении координат в малом; другие — при определении динамических переменных, сопряженных координатам; вообще, все они должны терпеть неудачу при определении как первых, так и вторых точнее меры, требуемой соотношениями неопределенности. Эти соотношения, таким образом, не говорят ничего непосредственно о микроскопических частицах, но, взамен, устанавливают нижние границы применимости понятий пространства и времени.

Хорошо известно, что квантовая механика может делать предсказания только для статистических ансамблей систем. Такие предсказания — всегда на языке классических пространства и времени, т. е. они поддаются проверке лабораторными экспериментами, подразумевающими макроскопический прибор. Как только статистическая природа самого пространства-времени признана, более нет необходимости для рассмотрения микросистемы как почему-то проявляющей индетерминированное поведение или для рассмотрения микроскопических событий как непричинных. Микроскопическим системам нет нужды подчиняться «законам случая» вследствие того, что статистический характер может, в равной степени, проникнуть через макроскопическую природу пространства и времени.

Это, конечно, не вполне удовлетворительно. Описание в пространстве-времени отброшено, но для него не может быть предложено замены. Тем не менее, макроскопическая интерпретация предлагает иную философски точную точку зрения, равно как и специфические задачи, которых нет в общепринятой интерпретации. В частности, можно попытаться сформулировать свойства микросистем на таком абстрактном языке, чтобы свойства пространства-времени в целом могли быть выведены из свойств громадного скопления таких микросистем. Можно было бы двигаться одним из, по меньшей мере, двух различных путей: (1) попытаться вывести из абстрактных свойств статистически определенную величину, которая обладает свойствами релятивистского инвариантного интервала ds^2 или (2) попытаться вывести из абстрактных свойств уравнение, имеющее характер волнового уравнения, в котором некоторые статистически определенные члены могут быть отождествлены с пространственно-временными переменными (x, y, z, t) . Вигнер¹⁵ дал простой пример пер-

¹⁵E. Wigner, “Relativistic invariance of quantum-mechanical equations,” in *Jubilee of Relativity Proceedings* (Birkhäuser Verlag, Basel, 1956); *Helv. Phys. Acta*, Suppl. IV, p. 220.

вого рода, а я сам приложил усилия в направлении второго подхода (без заслуживающего внимания успеха). Тем не менее, если бы такие процедуры могли быть доведены до конца, нас ожидали бы самые интересные физически и философски результаты.