

ИЗ НАСЛЕДИЯ ПРОШЛОГО

ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА*

П.Г. Бергман

Краткое содержание. Начав с изложения эйнштейновского понимания достоинств и недостатков общей теории относительности, мы переходим к рассмотрению того, какой, по мнению Эйнштейна, должна быть завершенная единая теория. В настоящей работе кратко описываются и обсуждаются четыре теории, которые можно рассматривать как «единые», а именно теории Вейля и Калуцы, разработанные полстолетия назад, и теории с кручением и суперсимметрией, привлекающие внимание в настоящее время. Мы приходим к выводу, что на любую будущую теорию должны оказывать влияние достижения физики элементарных частиц, что этой теории придется объяснить принципиальные противоречия между классической и квантовой теориями поля и что она в конечном счете может привести к изменению современной модели пространства-времени как четырехмерного многообразия.

Когда более сорока лет тому назад я встретился с Эйнштейном, он уже потратил много лет на создание единой теории поля, которая могла бы отвечать всем его требованиям. Эйнштейн никоим образом не отрицал больших достижений общей теории относительности, но, будучи ее создателем, хорошо осознавал как ее достоинства, так и недостатки, и пытался создать физическую теорию, которая бы впитала в себя все достоинства общей теории относительности и в то же время была шире ее.

Что же ценного имеется в общей теории относительности? Успешное объяснение смещения перигелия Меркурия, предсказания отклонения лучей света Солнцем и красного смещения спектральных линий, испускаемых из областей большого гравитационного потенциала? С точки зрения Эйнштейна, это были сравнительно небольшие достижения, несомненно удовлетво-

* Перепечатка введения и заключения статьи П. Бергмана «Единая теория поля: вчера, сегодня, завтра» из сборника «Проблемы физики: классика и современность» (М.: Мир, 1982), изданного в связи со 100-летием со дня рождения А. Эйнштейна.

ряющие нас, но едва ли равнозначные огромным умственным усилиям, затраченным на создание этой теории. Однако помимо этого в теории содержалось универсальное утверждение о равенстве гравитационной и инертной масс, откуда следовало, что все тела, большие и малые, испытывают одинаковые ускорения в окружающем гравитационном поле. Этот факт, известный еще Галилею и Ньютоном, был строго введен в основы теории лишь в общей теории относительности.

Это равенство, известное как принцип эквивалентности, приводит к отказу от инерциальных систем отсчета, используемых как в ньютоновской физике, так и в специальной теории относительности, и замене их чисто локальной свободно падающей системой отсчета. Кроме того, это равенство приводит к равноправию в глобальном смысле всех систем отсчета пространства-времени, которых формально бесконечно много, и к совершенно универсальным четырехмерным системам координат. Общая теория относительности и только она одна из всех современных жизнеспособных физических теорий обходится без инерциальных систем отсчета, которые операционально не могут быть определены в присутствии гравитационного поля. Это одно из основных достижений общей теории относительности.

Из всех классических полевых теорий только в общей теории относительности движение пробных частиц определяется уравнениями поля; при этом отпадает необходимость в отдельно постулируемых уравнениях движения. Чтобы показать, насколько важно это обстоятельство, я рассмотрю ситуацию в электродинамике. В теории Максвелла–Лоренца мы имеем, с одной стороны, электромагнитное поле, подчиняющееся уравнениям Максвелла, а с другой стороны – заряженные частицы, движение которых определяется силами Кулона–Лоренца. Они в свою очередь зависят от полей в точке нахождения частиц, но эти поля являются бесконечными! Необходимо разложить поле на две части, а именно на собственное поле частицы (являющееся бесконечным) и на остающееся конечное поле. Последнее поле, которое существует даже в отсутствии частицы, рассматривается как внешнее, или падающее, поле. Частица изменяет состояние своего движения в основном под влиянием этого поля. К сожалению, разложение полного поля на собственное и падающее является в лучшем случае неоднозначной процедурой, поскольку существует несколько различных правил определения собственного поля. В теории, в которой уравнения поля нелинейны, как, например, в общей теории относительности, вообще нет корректного метода определения падающего поля.

Когда я приехал в Принстон в Институт высших исследований, общая теория относительности была в основном завершена, и Эйнштейн, Инфельд и Хоффман преуспели в разработке систематического метода, позволяющего определить движение массивной частицы, если полное поле, окружающее частицу, известно даже не в точке нахождения частицы, где оно бесконечно, а лишь в ее окрестности. Годом позже В. Фок получил аналогичный резуль-

тат несколько отличающимся способом; в последующие годы оба этих метода были согласованы друг с другом и усовершенствованы.

Все это и составляет основные достижения общей теории относительности. В чем же, с точки зрения Эйнштейна, заключались ее недостатки? Прежде всего, в общей теории относительности гравитация играет особую роль, отличающуюся от той роли, которую играют все другие поля, встречающиеся в природе. В рамках этой теории можно представить физические ситуации, когда имеются лишь гравитационные поля, а другие поля отсутствуют. Обратное невозможно: поскольку все физические поля переносят энергию и давление, а следовательно, и массу, теория просто не допускает существования только негравитационных полей. Таким образом, имеется фундаментальная асимметрия, которая, по мнению Эйнштейна, несовместима с единым рассмотрением физической Вселенной.

С более формальной точки зрения такая асимметрия характеризуется тем, что совокупность всех полей, встречающихся в природе, расщепляется инвариантным способом, а как представление основной группы инвариантности (группы диффеоморфизмов) поля являются приводимыми.

Одна из замечательных особенностей природы состоит в том, что элементарные частицы встречаются в различных видах – электроны, протоны, позитроны и т. д. – и что внутри каждого вида отдельные частицы обладают одинаковыми свойствами: массой, зарядом и т. д. Совершенная теория природы должна объяснить существование таких видов и предсказать свойства элементарных частиц, исходя из нескольких основных принципов, и эти принципы, в свою очередь, должны являться частью всеобъемлющего описания природы. Такую задачу общая теория относительности решить не может.

Отмеченный выше недостаток общей теории относительности тесно связан с другим ее недостатком. В этой теории частицы рассматриваются как сингулярности, то есть как области, в которых полевые переменные становятся бесконечными или обнаруживают сингулярное поведение другого типа. Появления сингулярностей нельзя избежать даже в случае пустого пространства; действительно, несколько последних работ Р. Пенроуза и С. Хокинга показывают, что во многих случаях возникновение сингулярностей с математической точки зрения неизбежно. В классической теории поля сингулярность представляет собой область пространства-времени, в которой полевые уравнения, описывающие законы природы, становятся неприменимыми. Другими словами, наличие сингулярностей свидетельствует о недостатках теории, претендующей на полное описание природы. Они указывают на внутреннюю противоречивость теории и необходимость ее дальнейшего усовершенствования.

Создание единых теорий поля представляет попытку сохранения общих идей классической теории поля и в то же время преодоления отмеченных недостатков общей теории относительности.

Прежде чем приступить к обсуждению единых теорий поля, я должен обрисовать, хотя и не очень точно, отношение Эйнштейна к квантовой теории. Хорошо известно, что на заре квантовой физики Эйнштейн играл ведущую роль в ее создании. Работа Макса Планка 1900 г. убедила его в том, что энергия электромагнитного излучения распространяется в виде неделимых порций, величина которых пропорциональна частоте излучения. На основе этой идеи Эйнштейн разработал теорию фотоэффекта. За этим последовал целый ряд пионерских работ, представляющих значительный вклад Эйнштейна в классическую квантовую теорию.

Однако после того как квантовая теория приняла свой современный вид, Эйнштейн не принял ее. Его скептицизм основывался на серьезных философских опасениях. В современной квантовой теории физические законы не применяются к отдельным физическим объектам, а только к их статистическим ансамблям. Математический аппарат квантовой теории исключает одновременное количественное описание всех физических переменных, откуда делается строгий вывод о невозможности одновременного определения их посредством наблюдений. В этом и состоит смысл знаменитых соотношений неопределенности. Располагая максимальной доступной информацией, квантовая теория не предсказывает последующее поведение физической системы, а скорее определяет вероятность наблюдения того или иного конкретного события. Статистический характер как описания, так и предсказаний является фундаментальным свойством квантовой теории. Именно это Эйнштейн считал неприемлемым.

Позицию Эйнштейна следует понимать, исходя из его убеждения, что физическая Вселенная существует независимо от наблюдателя. Хотя в молодости Эйнштейн находился под сильным влиянием философии Эрнста Маха, к тому времени, когда я приехал работать с ним, ему нравилось называть себя «реалистом», однако, по моему мнению, он скорее был материалистом. Эйнштейн сравнивал ученого со студентом, пытающимся увидеть и познать окружающую его физическую Вселенную, которая существует независимо от него. Именно по этой причине Эйнштейн считал, что описание физической системы при помощи квантовомеханического вектора состояний (в гильбертовом пространстве) является несовершенным.

Критически относясь к квантовой теории, Эйнштейн полагал, что истинно удовлетворительная теория должна быть не квантовой, а классической в том смысле, что физические явления должны полностью описываться, если известны значения всех рассматриваемых физических переменных.

Перспективы на будущее. Поиски Эйнштейна в области единой теории поля не привели к общепризнанным результатам, несмотря на его гениальность и упорство. По нашему мнению, это связано с отсутствием новых экспериментальных данных, которые могли бы служить путеводной звездой. Ядерная физика при жизни Эйнштейна была в основном статистической. Имевшихся в то время экспериментальных данных было достаточно для

создания поразительно успешной теории атомного ядра; однако в то же время ввиду ограниченности эмпирических данных трудно было сделать какие-либо выводы о природе взаимодействия барионов. В настоящее время положение резко изменилось. Независимо от того, являются ли частицы «элементарными» или нет, являются ли кварки или глюоны предельными кирпичиками для всех известных адронов, в настоящее время имеется твердо установленный и согласованный набор принципов, которые нельзя не учитывать при построении любой теории, претендующей на фундаментальную. Как я отмечал, по моему мнению, еще рано говорить о том, что супергравитация является жизнеспособной теорией, однако она по крайней мере представляет собой серьезную попытку объединения понятий как классической теории поля, так и современной теории физики элементарных частиц. Это, по моему мнению, является серьезной заявкой на будущее. В настоящее время опубликован ряд работ, в которых предлагаются методы объединения супергравитации и теорий с кручением.

Возможно, в ближайшем будущем не удастся ликвидировать пропасть между классической и квантовой теориями. Однако мы не должны терять надежды и принимать точку зрения, которую в последние годы своей жизни отстаивал Эйнштейн и которая состояла в том, что квантовая теория должна в дальнейшем остаться неизменной, а классическая теория должна рассматриваться как макроскопическое приближение. Я надеюсь, что отмеченная проблема будет решена, однако не в рамках общепринятых классических или квантовых концепций, а с помощью новых идей, которые придут им на смену. Только будущее может дать ответ на этот вопрос.

В заключение уместно сказать несколько слов о многообразии как модели пространства-времени. В то время как в классической механике координаты частиц являются динамическими переменными (а следовательно, в квантовой механике q -числами), координаты в теории поля являются просто непрерывными индексами (а следовательно, c -числами) и неизменно служат основой для восприятия и описания динамики соответствующих полей. Не существует убедительных причин, которые позволяли бы или не позволяли бы использовать многообразие в этой роли. Мы не можем наблюдать мировую точку как таковую, а в лучшем случае наблюдаем события, происходящие в этой мировой точке; в принципе могут существовать причины, в силу которых мы не можем воспринимать события, происходящие в близлежащих мировых точках, как отдельные события. Но даже если экспериментальное разрешение близлежащих мировых точек ограничено, тем не менее многообразие может оставаться и остается удовлетворительным способом описания природы.

В случае, когда многообразие пространства-времени является расслоенным, расслоение представляет собой новое многообразие все еще конечной размерности, но уже не четырехмерное. Пространство-время остается базисным многообразием со всеми образующими его различными объектами, ес-

ли отображение расслоения на базисное многообразие инвариантно относительно группы симметрии. Несколько лет тому назад А. Комар и я пришли к выводу, что можно ввести группу симметрии для стандартной общей теории относительности, причем такая группа будет намного шире, чем группа диффеоморфизмов; она не переводит мировую точку в мировую точку (и слой в слой) и даже не является отображением расслоения самого на себя. Это описание может оказаться чисто формальным. С другой стороны, можно надеяться, что использование концепции многообразия четырехмерного пространства-времени в конце концов приведет к новым идеям. По всей вероятности, супергравитация позволит расширить группу симметрии, хотя мы не вполне уверены в этом.

В заключение мне хотелось бы выразить надежду, что в обозримом будущем удастся достигнуть прогресса в унификации нашего понимания физической Вселенной. При любом продвижении вперед по этому пути несомненно возникнут новые проблемы, которых мы еще не знаем, однако отчаиваться не следует. Природа приготовила нам бесконечное число загадок, но я уверен, что с ними вполне можно справиться. Эйнштейн был убежден: «Господь бог изощрен, но не злонамерен».