

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

53 (09)

**ЭЙНШТЕЙН И ФИЗИКА ВТОРОЙ ПОЛОВИНЫ XX ВЕКА \*)****Ч. Янг**

(Выступление на Втором семинаре Марселя Гроссмана, посвященном столетию со дня рождения Альберта Эйнштейна)

В начале нашего века произошли три революции в мировоззрении, коренным образом изменившие наше понимание физического мироздания: были созданы частная теория относительности (1905 г.), общая теория относительности (1915 г.) и квантовая механика (1925 г.). Первые две из них были совершены Эйнштейном, оказавшим воздействие на ход и третьей. Но сегодня я собираюсь говорить не о его фактическом участии в этих революционных преобразованиях в физике. Уже много написано об этом. Я хочу обсудить в общих чертах интуитивные представления Эйнштейна о структуре теоретической физики и их значение для развития физики второй половины нашего века. Обсуждение разделено на естественно связанные между собой четыре раздела.

**1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДИКТУЕТСЯ СИММЕТРИЕЙ**

Первым важным принципом симметрии в фундаментальной физике была лоренц-инвариантность, обнаруженная как *математическое* свойство уравнений Максвелла, которые в свою очередь были основаны на *экспериментально наблюдаемых законах* электромагнетизма. В этой цепочке обнаружение инвариантности, или симметрии, было вторичным. В своих «Автобиографических заметках» Эйнштейн подчеркивает заслуги Минковского в обращении этой цепочки. Начав с лоренц-инвариантности, Минковский потребовал, чтобы все полевые уравнения были ковариантны относительно этой симметрии (табл. I).

Таблица I

Опыт → Полевые уравнения → Симметрия (До Эйнштейна — Минковского)
Симметрия → Полевые уравнения (После Эйнштейна — Минковского)

Могущество физических следствий из принципов симметрии произвело глубокое впечатление и на самого Эйнштейна, и он начал работать над расширением лоренц-инвариантности. Это, в совокупности с принципом эквивалентности, привело к общей теории относительности. Мы можем

\*) Yang C. N. Einstein and the Physics of the Second Half of the Twentieth Century. — July 1979. — Перевод Н. Н. Николаева.

утверждать, что Эйнштейн ввел в обращение принцип: взаимодействия диктуются симметрией. Этот принцип сыграл в последние годы важную роль в зарождении различных теорий поля (табл. II).

Т а б л и ц а II

Инвариантность относительно преобразований координат	→ Частная теория относительности
Абелева калибровочная симметрия	→ Электромагнетизм
Неабелева калибровочная симметрия	→ Неабелевы калибровочные поля
Суперсимметрия	→ Теория с симметрией между бозонами и фермионами
Супергравитационная симметрия	→ Супергравитация

## 2. ТЕОРИЯ ПОЛЯ И УНИФИКАЦИЯ

В своих статьях и лекциях после 1920 г. Эйнштейн постоянно подчеркивал исключительную важность концепции поля как основной в фундаментальной физике. Например, в статье, опубликованной в 1936 г. в журнале Института Франклина, он писал:

«Теория электрического поля Фарадея и Максвелла, благодаря которой удалось выйти из этого затруднительного состояния, представляет, очевидно, наиболее глубокое превращение, которое основание физики претерпело со времени Ньютона»<sup>1</sup>.

Двумя теориями поля, известными в то время, были теория Максвелла и общая теория относительности Эйнштейна. Последние двадцать лет своей жизни Эйнштейн посвятил попыткам объединения этих двух теорий. Необходимость этого он объяснил в статье «Проблемы пространства, эфира и поля в физике», опубликованной в 1934 г.:

«...Существуют две независимые структуры пространства, именно метрически гравитационная и электромагнитная... Напрашивается убеждение, что оба вида поля должны отвечать единой структуре пространства»<sup>2</sup>.

В последние издания «Сущности относительности» Эйнштейн включил Приложение, в котором он предложил единую теорию с несимметричным тензором  $g_{\mu\nu}$ . Антисимметричную часть  $g_{\mu\nu}$  следовало отождествить с тензором электромагнитного поля  $F_{\mu\nu}$ . Эта попытка не была особо успешной, и в течение некоторого времени у ряда физиков было мнение, что идея объединения была всего лишь навязчивой идеей, овладевшей Эйнштейном на старости лет. Да, это была навязчивая идея, но с глубоким проникновением в суть фундаментальной структуры теоретической физики. И, хочу я добавить, именно эта идея является стержнем современной физики.

Как бы то ни было, упор Эйнштейна на объединении не был тщетным. Он побудил многих выдающихся математиков, включая Леви-Чивиту, Картана и Вейля, к более тщательному анализу возможности расширения математической структуры пространства-времени.

Вейль попытался включить электромагнетизм в гравитацию. Его идеи привели к тому, что называется сейчас «калибровочной теорией» (краткое описание истории калибровочных теорий см. в статье<sup>3</sup>). Это событие датируется 1918 и 1919 гг. Поскольку должная трактовка координатной инвариантности привела к теории гравитации, Вейль полагал, что и с электромагнетизмом может быть связана новая форма геометрической инвариантности. Он предложил масштабную инвариантность.

Пусть  $x^\mu$  и  $x^\mu + dx^\mu$  — две близкие точки пространства-времени и  $f$  — физическая величина, равная  $f$  в точке  $x^\mu$  и  $f + (\partial f / \partial x^\mu) dx^\mu$  в точке

$x^\mu + dx^\mu$ . Вейль ввел в рассмотрение перенормировку  $f$  скалярным, зависящим от координат и времени множителем, указанным в третьем столбце соотношений (1):

Координата	$x^\mu$	$x^\mu + dx^\mu$
$f$	$f$	$f + (\partial f / \partial x^\mu) dx^\mu$
Масштаб	1	$1 + S_\mu dx^\mu$
Перенормированное $f$	$f$	$f + (\partial_\mu + S_\mu) f dx^\mu$

(1)

Обратим особое внимание на масштабный множитель

$$1 + S_\mu dx^\mu. \quad (2)$$

Вейль сделал два наблюдения. Во-первых,  $S_\mu$  имеет то же число компонент, что и электромагнитный потенциал  $A_\mu$ . Во-вторых, при последующем анализе Вейль показал, что при требовании инвариантности теории относительно изменений масштаба входит только ротор  $S_\mu$ , но не само  $S_\mu$ . Поэтому он отождествил  $S_\mu$  с  $A_\mu$ . Эта идея не привела, однако, к успеху. Она обсуждалась наряду с другими авторами и Эйнштейном, показавшим, что теория Вейля не может описывать электромагнетизм, и Вейль оставил ее.

Наступил 1925 г. и, совершенно независимо от всех этих усилий, была создана квантовая механика.

Мы знаем, что в классической механике при наличии электромагнетизма во все уравнения входит не просто импульс частицы  $p_\mu$ , а всегда комбинация<sup>1</sup>

$$\pi_\mu = p_\mu - \frac{ie}{c} A_\mu.$$

В квантовой механике это следует заменить на

$$-i\hbar \left( \partial_\mu - \frac{ie}{\hbar c} A_\mu \right). \quad (3)$$

Это было указано Фоком в 1927 г.<sup>4</sup> Сразу же после этого Лондон<sup>5</sup> сравнил (3) с оператором инкремента  $(\partial_\mu + S_\mu)$  в выражении (1) и заключил, что  $S_\mu$  следует отождествить не с  $A_\mu$ , а с  $-ieA_\mu / \hbar c$ . Единственным важным изменением было добавление мнимой единицы  $i$ . Но это привело к далеко идущему следствию: выражение (2) становится равным

$$1 - \frac{ie}{\hbar c} A_\mu dx^\mu = \exp \left( - \frac{ie}{\hbar c} A_\mu dx^\mu \right), \quad (4)$$

а это уже не масштабный, а фазовый множитель. Таким образом, правильной квантовомеханической характеристикой электромагнетизма оказывается локальная фазовая инвариантность.

Вначале сам Вейль назвал свою идею «Masstab Invarianz», а впоследствии сменил название на «Eich-Invarianz». В начале 20-х годов это было переведено на английский язык как калибровочная инвариантность (gauge invariance). Будь в этом нужда, сегодня следовало бы, очевидно, сменить название на «фазовая инвариантность», а калибровочные поля следовало бы называть фазовыми полями.

Как только калибровочная инвариантность понята как фазовая инвариантность, становится ясным, что ключевой является идея неустраняемого фазового множителя. Подстановка вместо обычной фазы элемента группы Ли ведет к неабелевым калибровочным теориям, рассмотренным впервые в 1954 г.

В 1967 г. Вайнберг и Салам независимо предложили модель единой теории электромагнитного и слабого взаимодействий. Модель основана на двух ключевых концепциях — *неабелевых калибровочных полях и нарушенной симметрии*. За последние шесть лет эта модель получила поразительное экспериментальное подтверждение. Этот успех в свою очередь породил многочисленные попытки великого синтеза сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий. Я боюсь, что мы все еще далеки от успешного великого синтеза и отодвинулись даже еще дальше от божественной гармонии — объединения этих взаимодействий с общей теорией относительности. Но мало сомнений в том, что убеждение Эйнштейна в важности объединения, которое он стойко защищал от любой гласной и негласной критики, было глубоким проникновением в суть вещей.

### 3. ГЕОМЕТРИЗАЦИЯ ФИЗИКИ

Другой непреходящей темой в подходе Эйнштейна к основаниям теоретической физики была его приверженность геометрическим построениям. Это неудивительно, поскольку именно ему принадлежит глубокая идея, что тяготение и механику следует описывать в терминах римановой геометрии. То, что он воспринимал геометрически и электромагнетизм, было очевидно из приведенной выше цитаты из его статьи 1934 г. В ней он называет электромагнетизм «структурой» пространства. Придерживаясь тезиса о приверженности Эйнштейна геометрическим концепциям, можно даже прийти к мнению, что он любил волновую механику потому, что она более геометрическая, и не любил матричную механику, так как она более алгебраическая.

Эйнштейн пытался найти геометрическую структуру, порождающую электромагнетизм. Он понимал, что лоренц-инвариантности недостаточно, чтобы прийти к уравнениям Максвелла:

«Максвелловы уравнения приводят к «группе Лоренца», но из группы Лоренца еще не следуют уравнения Максвелла». («Об обобщенной теории относительности»<sup>6</sup>.)

Например, скалярные поля явно проще электромагнитного поля Максвелла и совместны с лоренц-инвариантностью, но не могут служить основой электромагнетизма.

Эйнштейн глубоко осознавал необходимость в геометрических структурах, приводящих к нелинейным уравнениям: «Истинные законы не могут быть линейными и не могут быть получены из линейных законов»<sup>7</sup>.

Оказалось, что структурой, которую искал Эйнштейн, является калибровочное поле. Как мы сейчас обсудим, это геометрический объект; простейшим абелевым калибровочным полем является электромагнитное поле Максвелла, а неабелево калибровочное поле с необходимостью нелинейное.

Мы уже ссылались на раннюю историю калибровочных полей. То, что калибровочные поля глубоко связаны с геометрической концепцией *связностей на расслоениях*, осознано физиками только в последнее время.

Для иллюстрации геометрической природы калибровочных полей запишем законы электромагнетизма Гаусса и Фарадея в следующем хорошо известном виде:

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x^\lambda} + \frac{\partial F_{\nu\lambda}}{\partial x^\mu} + \frac{\partial F_{\lambda\mu}}{\partial x^\nu} = 0.$$

где  $F_{\mu\nu}$  — тензор электромагнитного поля. Это уравнение оказывается тесно связанным с теоремой, что граница области сама не имеет границы, что, разумеется, есть утверждение геометрическое. Другая иллюстрация геометрической природы калибровочных полей — та важная роль, кото-

рую глобальные рассмотрения калибровочных полей сыграли в нижеследующих случаях:

Монополь Дирака	1931 г.
Эффект Ааронова — Бома	1960 г.
Монополь т.Офта — Полякова	1974 г.
Инстантоны	1975 г.

Калибровочные поля внутренне связаны и с общей теорией относительности, основанной на геометрических концепциях. Детали этой связи, однако, довольно сложны и исследуются до сих пор.

#### 4. «О МЕТОДЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ»

В своей спенсеровской лекции, прочитанной в 1934 г., название которой я позаимствовал в качестве заглавия этого раздела, Эйнштейн дает анализ развития оснований теоретической физики. Ниже приводятся наиболее примечательные цитаты из его лекции:

«...Аксиоматическая основа теоретической физики не может быть извлечена из опыта, а должна быть свободно изобретена...

Опыт может подсказать нам соответствующие математические понятия, но они ни в коем случае не могут быть выведены из него.

Но настоящее творческое начало присуще именно математике. Поэтому я считаю в известной мере оправданной веру древних в то, что чистое мышление в состоянии постигнуть реальность»<sup>8</sup>.

Говорил ли Эйнштейн, что фундаментальная теоретическая физика есть часть математики? Подразумевал ли он, что фундаментальная теоретическая физика должна придерживаться традиций и стиля математики?

Ответ на эти вопросы отрицателен. Эйнштейн был физиком, а не математиком. Более того, он и сам причислял себя к физикам, а не к математикам. Очень четкое объяснение причин он привел в своих «Автобиографических записках»:

«Дело было, очевидно, в том, что моя интуиция в области математики была недостаточно сильна, чтобы уверенно отличить основное и важное от остальной учености, без которой еще можно обойтись. Кроме того, и интерес к исследованию природы, несомненно, был сильнее; мне, как студенту, не было еще ясно, что доступ к более глубоким принципиальным проблемам в физике требует тончайших математических методов. Это стало мне выясняться лишь постепенно, после многих лет самостоятельной научной работы. Конечно, и физика была разделена на специальные области, и каждая из них могла поглотить короткую трудовую жизнь, так и не удовлетворив жажды более глубокого познания. Огромное количество недостаточно увязанных эмпирических фактов действовало и здесь подавляюще. Но здесь я скоро научился выискивать то, что может повести в глубину, и отбрасывать все остальное, все то, что перегружает ум и отвлекает от существенного»<sup>9</sup>.

Но он осознавал, как из своего опыта, так и опыта великих революций в физике в начале этого века, что хотя в основе физики всегда лежали и лежат сейчас экспериментальные закономерности, математическая красота и простота играют все возрастающую роль в формулировке концепций фундаментальной физики. Он так сравнивал «приземленные к эксперименту» теории с более математическими:

«С другой стороны, следует согласиться, что «близость» основных понятий и фундаментальных гипотез теории к опыту является важным ее преимуществом и большее доверие к такой теории, конечно, оправдано. Здесь меньше опасность уйти совсем в сторону, в частности, потому, что

требуется гораздо меньше времени и сил, чтобы опровергнуть такую теорию на опыте. Но снова и снова, по мере углубления наших познаний, мы должны отказываться от этого преимущества в нашем стремлении к логической простоте и единству основ физической теории»<sup>10</sup>.

Чтобы предотвратить недопонимание со стороны своих коллег, он обращается к ним:

«Теоретику все больше приходится руководствоваться при поисках теорий чисто математическими, формальными соображениями... И теоретика, занимающегося этим,

не следует с упреком называть фантастом. Нет, лучше одобрить его фантазии, поскольку другого пути к цели для него вообще не существует»<sup>11</sup>.

Соотношение между фундаментальной теоретической физикой и математикой — предмет захватывающий. Я позволю себе рассказать по этому поводу одну историю.

В 1975 г., под впечатлением факта, что калибровочные поля являются связ-

ностями на расслоениях, я поехал в Эль-Черрито под Беркли, домой к профессору Ш. Ш. Черну. (Я слушал его лекции в начале 40-х годов, когда он был молодым профессором, а я — студентом-дипломником в Национальном Юго-западном объединенном университете в Куньмине, в Китае. Это было задолго до того, как расслоения приобрели свое значение в дифференциальной геометрии, и до того, как Черн вошел в историю своими работами по обобщенной теореме Гаусса — Бонне и классами Черна.) Нам было о чем поговорить: о друзьях, родственниках, Китае. Когда наша беседа перешла на расслоения, я рассказал ему, как, наконец, научился у Джима Симонса красоте теории расслоений и глубине теоремы Черна — Вейля. Я сказал, что был поражен тем, что калибровочные поля являются в точности связностями на расслоениях, которые были выдуманы математиками вне всякой связи с физическим миром. Я добавил: «Это приводит в трепет и изумление, поскольку вы, математики, выдумали эти понятия из ничего». Он тут же возразил: «Нет, нет! Эти понятия вовсе не выдуманы. Они все существуют на самом деле».

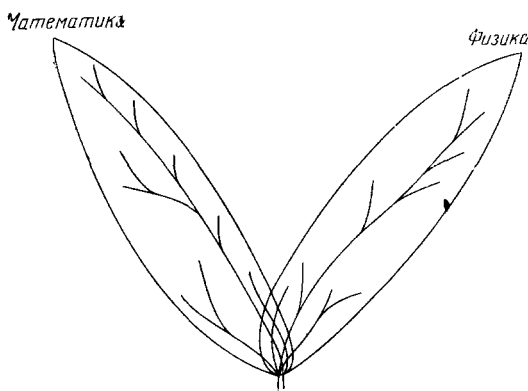
Но как бы глубока ни была связь между математикой и физикой, было бы неправильным думать, что эти две дисциплины перекрываются столь сильно. Они имеют свои различные и цели, и вкусы. Их шкалы ценностей и традиции совершенно различны. На уровне фундаментальных концепций они поразительным образом разделяют некоторые из последних, но даже в этом месте жизненные начала каждой из дисциплин текут по своим сосудам (см. рисунок).

Институт теоретической физики  
штата Нью-Йорк, Стоун-Брук

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Einstein A. — J. Franklin Institute, 1936, v. 221, p. 313. — (Перевод: Эйнштейн А. Собрание научных трудов (далее — СНТ) / Под редакцией И. Е. Тамма и др. — М.: Наука, 1967. — Т. 4, с. 212 \*). Далее переводы цитат из работ Эйнштейна приводятся по этому собранию трудов.)

\* ) Ссылки на переводы трудов А. Эйнштейна добавлены переводчиком.



2. E i n s t e i n A.— Forum Philosophicum, 1930, v. 1, p. 173.
3. Y a n g C. N.— Ann. New York Acad. Sci., 1977, v. 294, p. 86.
4. F o c k V. A.— Zs. Phys., 1927, Bd. 39, S. 226.
5. L o n d o n F.— Ibid., 1927, Bd. 42, S. 375.
6. E i n s t e i n A.— Sci. American, 1950, v. 182, p. 13.— (Перевод: СHT, т. 2, с. 723.)
7. E i n s t e i n A. Autobiographisches (Autobiographical Notes).— In: Albert Einstein — Philosoph-Scientis / Ed. P. A. Schilpp.— Evanston, Ill, 1945 — P. 1. (Перевод: СHT, т. 4, с. 297.)
8. E i n s t e i n A. On the Method of Theoretical Physics.— Oxford Clarendon Press, 1933.— (Перевод: СHT, т. 4, с. 184.)
9. E i n s t e i n A.— См. <sup>7</sup> — (Перевод: СHT, т. 4, с. 264.)
10. E i n s t e i n A.— См. <sup>6</sup> — (Перевод: СHT, т. 2, с. 726.)
11. E i n s t e i n A.— См. <sup>2</sup> — (Перевод: СHT, т. 2, с. 279—280.)