

## Теория поля со времени Максвелла\*

R. Э. Пайерлс

Я не уверен в том, что труд Максвелла по электромагнетизму является крупнейшим его вкладом в науку, потому что он сделал много вкладов, но этот труд является, конечно, тем, который мы прежде всего связываем с его именем. Если вы разбудите физика среди ночи и скажете «Максвелл», он, наверно, отзовется: «электромагнитное поле».

Мне хотелось бы начать с того пути, на котором Максвелл осознал и ввел понятие поля. Я не буду пытаться обрисовать историческое развитие, имевшее место в прошедшие сто лет, но я попытаюсь взглянуть на некоторые понятия с нашей сегодняшней точки зрения, хотя, конечно, это в известной степени повлечет за собой обсуждение этого развития, которое имело место.

Максвелл начал с основанного главным образом на интуиции ощущения того, что действие на расстоянии является неудовлетворительным в физике. Нельзя, например, поверить, что, когда магнит притягивает кусочек железа, то от него передается непосредственное действие без чего-либо промежуточного. Он сам указывал в своей первой статье по этому вопросу, как представление Фарадея о линиях сил поддерживало в нем это интуитивное чувство. Далее он отмечал что всякий, кто, подобно обучающемуся физике студенту, наблюдал картину линий сил, сделанную

видимой при помощи железных опилок, убеждался в том, что нечто должно происходить в промежуточном пространстве; однако он также указывал и на то, что поведение железных опилок можно легко объяснить на основании старого взгляда — действия на расстоянии, и здесь, конечно, не было противоречия. Я процитирую то место, где он пишет по этому поводу:

«Мы не удовлетворены объяснением, основанным на гипотезе притягательных и отталкивающих сил, направленных к магнитным полюсам, хотя бы мы и были удовлетворены тем, что это явление находится в строгом согласии с такой гипотезой, и мы не можем отделаться от мысли, что в каждой точке, где мы находим эти линии сил, должно существовать какое-то физическое состояние действия, обладающее достаточной энергией, чтобы вызвать такое явление»<sup>1</sup>.

Это утверждение, я думаю, и сегодня имеет такую же силу, как тогда, когда Максвелл его написал.

Исходя из такого желания, он, далее, попытался ввести описание явления, в котором магнитный полюс или электрический заряд, или электрический ток возмущает только непосредственную окрестность среды, и это действие затем передается от точки к точке — в значительной степени подобно тому (это он цитирует в качестве иллюстрации), как передается действие, когда мы тянем проволоку зонка. Натяжение проволоки распространяется от точки к точке до тех пор, пока после малого промежутка времени оно достигает другого конца. Мы должны помнить, что во времена Максвелла было очень трудно представлять такую ситуацию чисто абстрактно. Тот взгляд, что в физике все может, в конечном счете, быть объяснено механически, получил существенную поддержку благодаря развитию статистической механики, в которой теплота оказывалась по существу механической. Естественно, поэтому, что Максвелл пытался объяснить распространение действия от точки к точке в механической среде.

Во второй из его знаменитых статей, опубликованной в 1864 г. и озаглавленной «Динамическая теория электромагнитного поля»<sup>2</sup>, где, насколько я знаю, термин «элек-

\* Из книги «Clerk Maxwell and modern Science». L., 1963, стр. 26—42.

<sup>1</sup> The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. Cambridge, 1890, т. I, стр. 452.

<sup>2</sup> Там же, стр. 563.

тромагнитное поле» появляется впервые, Максвелл вновь делает интересные общие замечания. Он поступал очень хорошо, сопровождая свои статьи замечаниями, которые должны были объяснить цель статьи, и, я думаю, многие из нас значительно выиграли бы, следуя его примеру. Он рассматривает тип гипотез, образующих базу тех уравнений, которые он излагает, причем эти уравнения являются по существу уравнениями в той форме, в которой мы их знаем как «максвелловские уравнения».

Он замечает:

«Я попытался ранее описать специфический тип движения и специфический вид деформации, которые были бы так распределены, чтобы объяснить эти явления. В настоящей статье я избегаю подобных гипотез и, применяя такие термины, как «электрическое количество движения» и «электрическая упругость» в отношении известных явлений индукции токов и поляризации диэлектриков, я хочу просто направить внимание читателя на механические явления, которые помогут ему в понимании электрических явлений. Все подобные фразы в настоящей статье должны пониматься как иллюстративные, а не объясняющие».

Тем не менее он продолжает:

«Однако, говоря об энергии поля, я хочу, чтобы меня понимали буквально. Вся энергия есть то же, что и механическая энергия, независимо от того, существует ли она в форме движения или в форме упругости или в какой-либо другой форме. Энергия электромагнитных явлений есть механическая энергия».

Таким образом, в этом пункте Максвелл все еще не мог совершенно отделаться от того взгляда, что для объяснения необходимо все свести к механике. Если мы возьмем его утверждение, что вся энергия эквивалентна механической энергии, то, я думаю, мы согласимся с этим даже сегодня, но, конечно, в этом утверждении есть привкус того, что несколько устарело.

Для меня все еще остается тайной способ, которым Максвелл получил свои уравнения и убедился в их пригодности. Я сделаю определенные предположения относительно ответа на этот вопрос, однако, я не имею никаких доказательств того, что я прав. Для того чтобы обсудить этот вопрос, я напомню вам эти хорошо известные уравнения, но не в тех обозначениях, в которых Максвелл запи-

сал их в своей знаменитой статье, а в тех, в которых они пишутся в настоящее время. В гауссовых единицах эти уравнения имеют вид

$$\operatorname{div} D = 4\pi\rho, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} B = 0, \quad (2)$$

$$\operatorname{curl} E + \frac{1}{c} \dot{B} = 0, \quad (3)$$

и (для момента)

$$\operatorname{curl} H = \frac{4\pi}{c} j. \quad (4)$$

Эта неполная форма уравнений суммирует то, что было тогда известно. Уравнение (1) утверждает, что можно использовать линии сил для описания электрического поля и что эти линии сил всегда начинаются и кончаются на положительном и отрицательном зарядах, как это показано Фарадеем. Затем, рассматривая электрическое поле, мы видим, что уравнение (3) утверждает, что в статическом поле существует электрический потенциал, так что до тех пор, пока мы рассматриваем только статические поля, энергия движущейся частицы сохраняется. Добавочный член в уравнении (3) представляет закон индукции. Как вы знаете, эти дифференциальные уравнения, как можно показать, полностью эквивалентны интегральной форме некоторых законов, а именно закону Кулона и закону индукции Фарадея, в том виде, в котором они были известны тогда.

В уравнении (2) мы имеем утверждение о том, что существуют также линии сил для магнитного поля, но они нигде не начинаются и нигде не кончаются, так как не существует свободных магнитных полюсов. Наконец уравнение (4) объясняет, по крайней мере для статического случая, что вблизи тока создается магнитное поле, т. е. это уравнение эквивалентно закону Био и Савара.

Если кто-нибудь охватит все те сведения об электромагнитных полях, которые были во времена Максвелла, и если он примет тот взгляд, что действие на расстоянии не является основой этих явлений и что должны быть местные законы, выраженные в дифференциальных уравнениях, а не в интегралах, то, я думаю, он придет к уравнениям, которые я написал. Мы в настоящее время учим студентов тому, что эти уравнения сами по себе противоречивы, если

считать, что они сохраняют силу даже при тех обстоятельствах, когда заряды и токи изменяются во времени. Беря дивергенцию от уравнения (4) и воспользовавшись тождеством  $\operatorname{div} \operatorname{curl} H = 0$ , (5), мы получаем из правой части условие, что  $\operatorname{div} j$  должно быть равно нулю. Однако это вообще не имеет места; вместо этого, как мы знаем, дивергенция плотности тока должна удовлетворять уравнению непрерывности

$$\operatorname{div} j + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

выражающему сохранение заряда. Легко видеть, что мы можем исправить это противоречие, добавляя дополнительный член  $-\frac{1}{c} \dot{D}$  в (4) и получая таким образом правильное уравнение

$$\operatorname{curl} H - \frac{1}{c} \dot{D} = \frac{4\pi}{c} j. \quad (7)$$

Тогда из (1) и (7) имеем

$$4\pi \dot{\rho} = \operatorname{div} \dot{D} = -4\pi \operatorname{div} j, \quad (8)$$

что согласуется с (6).

Нет необходимости рассматривать этот аргумент как доказательство, потому что это, вероятно, единственный способ устранить противоречия в уравнениях. Нет сомнения, что можно было бы изменить уравнения другими способами, чтобы сделать их непротиворечивыми; фактически, если бы мы во что бы то ни стало захотели сохранить закон действия на расстоянии, то мы сказали бы: «когда ток меняется, вывод уравнений без дополнительного члена не действителен,— в этом случае нужно изменить уравнение (4)». Таким образом, мы не считаем это строгим доказательством, а просто аргументом, который превращает максвелловскую форму уравнений в более приемлемую для начинающего. Конечно, мы знаем также и другие доказательства, имеющие дело с релятивистской инвариантностью, в силу которых эти уравнения должны принимать эту специфическую форму, но мы не будем рассматривать этого здесь.

Однако в статьях Максвелла не имеется никаких доказательств того, что именно таков был путь, который привел его к этим результатам или что такие аргументы играли какую-нибудь роль в его рассуждениях. Максвелл пришел к добавочному члену, пользуясь такой картиной, которую мы сегодня не приемлем. Сегодня мы знаем, что если наложить электрическое поле на конденсатор, в котором промежуточная среда имеет очень большую диэлектрическую постоянную, то большая часть электрической индукции  $D$  фактически будет затрачена на разделение зарядов в диэлектрике от одной стороны к другой. Вполне естественно ожидать, что движение этих зарядов будет сопровождаться током — током смещения. Но мы не станем постулировать какое-либо движение такого рода зарядов в вакууме. Однако Максвелл, действительно называвший  $D$  электрическим смещением, имел в виду именно такую картину. Он считал, что весь ток смещения представляет движение какого-то заряда в среде, в эфире, который переносит поле. Эта картина являлась частью механической модели, помогавшей ему построить понятие о том, каковы должны быть правильные уравнения.

Максвелл нигде не рассматривает вопроса, являются ли все дифференциальные уравнения, которые он окончательно написал, совместными друг с другом. Однако я ни минуты не сомневаюсь, что он был убежден в совместности этих уравнений. И действительно, он написал много решений этих уравнений, и если бы его механическая картина ввела его в заблуждение так, что он выписал бы уравнение (7) с другим членом (так что уравнения не были бы совместными), я уверен, что он не был бы удовлетворен и продолжал бы работу, пока не нашел бы надлежащим образом действующую схему. Таким образом, хотя я и не могу доказать этого, я вполне убежден, что та аргументация, которую мы обычно применяем сегодня, составляла фактически, явно или не явно, часть его рассуждений.

Но коль скоро вы написали уравнения в этой форме, мгновенное действие на расстоянии безвозвратно исчезло. Теперь неверно, что существует непосредственное действие на расстоянии, так как действие всегда зависит от того, что происходит в среде. Мне не нужно рассказывать вам о том, как на основании этого аргумента Максвелл пришел к убеждению, что возмущения поля распространя-

ются со скоростью света — точнее со скоростью, которая обнаруживается в уравнениях как отношение между электростатической и электромагнитной единицами и которая в экспериментах оказывалась настолько близкой к измеренной скорости света, насколько можно было этого желать.

Можно задать вопрос, что же случилось с попыткой построить механические модели, будь то упругая среда или жидкость? (обе эти модели Максвелл пытался построить в разное время, и эти усилия были поддержаны другими учеными, включая Дж. Дж. Томсона). Я думаю, что, обращаясь назад, мы можем констатировать две вещи.

Во-первых, идея в действительности оказалась не конструктивной в том смысле, что из нее ничего не следовало такого, чего нельзя было бы получить другими путями (если не засчитывать в пользу этой идеи того способа, которым пользовался Максвелл, применяя эти модели для получения своих результатов; но это скорее аргументы общего порядка, а не специфические).

Во-вторых, и это гораздо более важно, мы совершенно потеряли желание строить подобные модели, так как мы уже не придерживаемся веры XIX столетия в то, что механика, и в частности механика непрерывной среды, более фундаментальна, чем, например, электромагнетизм. Конечно, мы теперь знаем, что знакомые нам дифференциальные уравнения упругости и гидродинамики не являются такими законами априори, которые мы могли бы постулировать, если бы никогда не видели упругих сред или жидкости. Скорее они являются законами, выводимыми в конечном счете из свойств атомов и молекул, составляющих эти вещества, и из сил, действующих между ними. Далее, мы теперь также знаем, как понимать строение и свойства атомов, выраженные через составляющие их части, ядра и электроны, удерживаемые главным образом электрическими и в некоторой степени магнитными силами. Следовательно, если бы мы преуспели в сведении электромагнитной теории к гидродинамическим или упругим моделям, то мы бы полностью завершили круг! Мы бы объяснили электричество через механику непрерывной среды; мы бы объяснили непрерывную среду через атомы; и мы бы объяснили атомы через электричество и магнетизм. В конце концов мы бы ничего и ни через что не объяснили!

Разумеется, такое развитие составляло часть нашего признания, что в физике мы можем описывать, но не можем объяснить, потому что объяснение всегда означает сведение законов к чему-то знакомому. В повседневной жизни это означает сведение законов к вещам, известным нам из повседневного опыта. Но если мы хотим проникнуть за пределы этого практического опыта, то где те фундаментальные черты, на которых мы могли бы основать наши объяснения? Таким образом мы привыкаем к мысли (и дело здесь в значительной степени в приобретении привычки), что электромагнитное поле является существенной частью физики, которую нельзя свести к чему-либо другому. Утверждение, что существует электрическое или магнитное поле с определенной интенсивностью в определенном направлении в каждой точке пространства стало для нас таким же приемлемым, как и утверждение, что существует в какой-то точке частица, движущаяся с определенной скоростью и подверженная действию определенной силы. Другими словами, природа оказалась богаче, чем можно было этому поверить, — в том смысле, что в природе существует гораздо больше понятий, включая и понятия электромагнитного поля, которые не могут быть сведены к каким-нибудь другим основным понятиям. Иной вопрос — какие отношения существуют между различными величинами; и это тот вопрос, к которому я возвращаюсь.

Хорошо, что после усвоения идей Максвелла физики привыкли к восприятию, в качестве основного физического факта утверждения, что существует некоторое поле определенного рода в определенной точке пространства, так как уже давно нельзя было ограничиваться электромагнитным полем. Много других полей появилось в физике и, конечно, мы не желаем и не ожидаем объяснения их через модели разного типа.

Исторически следующим появившимся полем было гравитационное поле. Гравитационные силы не были новыми, но мысль о том, что они также должны управляться местными дифференциальными уравнениями, предписывающими то, как одна часть гравитационного поля действует на прилегающую часть, являлась новостью в нашем столетии; разработкой этой идеи мы, в частности, обязаны трудам Эйнштейна. Такой принцип влечет за собой в качестве следствия то, что гравитационные действия, подоб-

но электромагнитным действиям, распространяются с конечной скоростью и не могут распространяться со скоростью, превышающей скорость света. Теория относительности учит нас, что никакой сигнал не может этого сделать, а отсюда немедленно следует признание, что быстрое возмущение гравитационного поля порождает распространение волн таким же самым образом, как быстрое распространение возмущения электромагнитного поля также распространяется в виде волн.

Утверждение, которое я только что сделал, вызвало продолжительные споры между специалистами, споры о том, существуют ли гравитационные волны или нет, но я думаю (хотя я и не являюсь специалистом), что теперь все они согласились с очевидным ответом. Не требуется никакой тонкой аргументации, по крайней мере для ответа в том смысле, что были бы гравитационные волны, которые мы могли бы изучать, если бы мы могли придумать достаточно мощное приспособление для того, чтобы производить быстрые возмущения, которые были бы измеримы на расстоянии.

Очевидно теория гравитационного поля, как и теория электромагнитного поля, выражается через величины, которые определены в определенных точках пространства и для которых было бы невозможно создать механические модели. На этом, однако, история не кончается; появляются новые поля, и в наше время они, кажется, размножаются в изобилии. Первое из них — это волновое поле, связанное с движением частицы. В принципе такое поле существует для каждой частицы, но на практике оно наиболее резко выражено для легких частиц — таких как электрон. С электроном нужно связывать величину, волновую функцию, которая опять-таки определена в каждой точке пространства, если только мы имеем достаточно сведений о состоянии электрона. Бросая взгляд на все это, мы понимаем, что встретились с новыми теоретическими затруднениями, и мы должны быть довольны что развитие, начатое трудом Максвелла, устранило некоторые теоретические затруднения с нашего пути.

Существует большая разница между полем волны, описывающей частицу, и электромагнитным полем, описывающим радиацию. Так, электромагнитное поле — это нечто измеримое в принципе, а во многих случаях — измеримое и на практике с большой степенью точности. В случае ра-

диоволны, приходящей от передатчика, можно не только спрашивать, о том, какова интенсивность волны, какова ее частота и поляризация, но можно также утверждать, и проверить это экспериментально, что в определенной точке в некоторый определенный момент направление электрического вектора вполне определено, а поле имеет определенную интенсивность. Этого нельзя сделать с волновым полем, изображающим электрон, по причинам, о которых я буду говорить ниже. Таким образом, появляются новые величины, которые можно назвать полями и которые возникают с развитием квантовой механики; они важны, так как для того чтобы делать некоторые предсказания о поведении электрона или какой-нибудь другой частицы, нам нужно изучать их свойства. Так, например, квадрат волновой функции говорит нам о вероятности нахождения частицы в определенной точке пространства, если мы будем искать ее там. Но я хочу подчеркнуть, что такие волновые поля не во всех отношениях подобны электромагнитному полю. Худшее ждет нас впереди, так как те изменения, которые должны быть сделаны в физической теории при применении ее к малым объектам или малым размерам, влияют также на само электромагнитное поле. Следует рассматривать величины электромагнитного поля как физические переменные, подчиняющиеся законам квантовой теории так же, как и любая другая физическая переменная. На самом деле, квантовая теория с самого начала, от гипотезы Планка о том, что энергия представляет собой пучок излучения, основана на том, что световые кванты являются неделимыми и что каждое количество энергии связано с частотой излучения, и это показывает, что простая картина непрерывного изменения интенсивности поля, как это выражается в максвелловых уравнениях, не полна. Она должна быть заменена квантовой теорией электромагнитного поля.

В своей простейшей форме квантовая электродинамика, которая по существу применяет к электромагнетизму основную гипотезу Планка, в количественной форме применивая формализм квантовой механики, была написана в конце 20-х и начале 30-х годов. Я думаю, что первым, кто рассматривал вещи таким образом, был Дирак<sup>1</sup>, но он избежал некоторых осложнений, ставших очевидными позже.

<sup>1</sup> P. A. M. Dirac. «Proc. Roy. Soc.», A., 114, 243 и 710 (1927).

Первой попыткой изложения полной квантовой теории электромагнитного поля была статья Гейзенберга и Паули<sup>1</sup>. Эта работа выяснила многие вопросы, которые возникли тогда, но она внесла также определенные трудности, и хотя эти трудности значительно глубже понимаются в настоящее время, я не уверен, что мы можем претендовать на то, что мы их полностью преодолели.

Важной особенностью теории того типа, который был разработан Гейзенбергом и Паули, является то, что принцип неопределенности квантовой механики применяется к электромагнитным полям так же, как он применяется и в других случаях. Это означает, что как произведение  $\delta E \delta H$  неопределенностей в определении момента частицы и ее координат положения должно превосходить некоторую величину порядка постоянной Планка  $\hbar$ , так же и здесь существует предел точности, с которой можно измерять электромагнитное поле. Однако мы здесь должны быть несколько более точными, так как получается, что если мы намереваемся измерить электромагнитное поле в математически определенной точке пространства, то произведение  $\delta E \delta H$  неопределенностей электрического и магнитного полей становится бесконечно большим. Нельзя измерить их с какой-либо точностью! Безусловно, ни один разумный экспериментатор не станет пытаться измерять непрерывную величину в точке. Лучшее, на что можно надеяться,— это измерить среднее по малой области, а затем, делая все большие и большие приближения, уменьшать размеры этой области. Если поступать так (опуская ради простоты подробности того, как определять среднее или форму области), то для области с линейными размерами  $L$  соотношение неопределенности для электромагнитного поля, оказывается, принимает вид

$$\delta E \delta H > \frac{ch}{L^4}. \quad (9)$$

Следовательно, мы обнаруживаем, что по мере того, как эта область становится все меньше и меньше, ошибки при совместном рассматривании  $E$  и  $H$  становятся все больше и больше, подразумевая, что должны наблюдаться существенные флуктуации поля.

<sup>1</sup> W. Heisenberg, W. Pauli. «Zts. f. Phys.», 56, 1 (1929); 59, 168 (1929).

Это и не удивительно, потому что квантовая теория рассматривает каждый возможный тип колебаний электромагнитного поля, как осциллятор, а мы знаем, что квантово-механический осциллятор обладает нулевой энергией даже когда он находится в самом низшем состоянии. В нашем случае это означает, что если даже световые кванты или «фотоны» отсутствуют, все же остаются колебания поля. Далее, это применимо к каждому типу колебаний всякой возможной длины волны и всякого направления. Если теперь усреднить по определенной области, то типы колебаний очень коротких волн тоже усредняются; но чем меньше область, по которой проводится усреднение, тем большее число типов вносят свою долю, и поэтому ошибки увеличиваются. Таким образом, электромагнитное поле приобретает большую реальность. Хотя такое явление мы не можем объяснить механически, но оно имеет большую реальность, чем можно вообразить с классической точки зрения, и чем точнее мы будем стараться рассматривать явление, тем большие флуктуации будем в нем открывать.

Но принцип неопределенности (9) для электромагнитного поля относится, как и в механике частицы, к произведению двух величин, т. е. чем более точно измеряется электрическое поле, тем менее точно мы можем знать магнитное поле, и наоборот. Однако, согласно формализму квантовой механики, каждое поле в отдельности может быть измерено сколь угодно точно. Это сложный вопрос и такой, относительно которого сначала были некоторые разногласия. Ландау и я пытались доказать<sup>1</sup>, что, хотя это и результат принципа неопределенности, но фактически невозможно на практике при помощи какого бы то ни было прибора измерить одно из полей само по себе сверх определенного предела точности. Испускаемое излучение интерферирует с полем пробных тел, которые должны применяться для наблюдения первоначальных полей.

Нильс Бор не согласился с такой точкой зрения и в ряде статей, написанных совместно с Розенфельдом<sup>2</sup>, доказал, что наши заявления неправильны. Они доказали, что в принципе можно изобрести такие приборы, которые будут измерять одну компоненту поля, усредненную по ко-

<sup>1</sup> L. Landau and R. Peierls. «Zts. f. Phys.», 69, 56 (1931).

<sup>2</sup> N. Bohr and L. Rosenfeld. «Kgl. Danske Videnskab. Selskab., Mat. fys. Medd.», 12, 8 (1933).

печному объему или конечному времени (чтобы из них выбрать — несущественно) с любой степенью точности. Тем не менее любопытно отметить, что, когда мы рассматриваем детали тех ограничений, которые необходимо наложить на измерительный прибор, то результирующие операции выглядят совершенно неподобающими на какие-либо измерения, которые экспериментатор стал бы проектировать. Одна из трудностей состоит в том, что для того, чтобы удерживать на низком уровне испускание излучения, которое, конечно, будет стремиться искажить измеряемое поле, пробные тела должны быть сделаны весьма тяжелыми. Это означает, что их движение и ускорение в поле будет только весьма малым, и поэтому смещение их должно быть измерено весьма точно. Кроме того, эти пробные тела должны полностью заполнять пространство в измеряемом поле, хотя они сами не должны создавать поля или, по крайней мере, заметного поля, потому что можно устроить так, чтобы было два таких испытательных тела и чтобы они перекрывались и заполняли то же самое пространство в то же самое время. Например, можно представить себе эти тела как налагающиеся решетки, несущие противоположные заряды, так что только небольшое относительное движение в противоположных направлениях в результате действия измеряемого поля приведет к разделению зарядов. Это вызовет только малое поле, которое можно удержать в пределах границ.

Таким образом, если мы хотим быть точными в измерении поля, то мы должны измерять его своеобразными способами. Имеем ли мы право заявлять, что мы измеряем поле, которое имелось бы в отсутствии этих пробных тел, довольно трудно судить. Нормально, когда мы измеряем что-нибудь, мы оставляем систему в неприкосновенности и быстро приносим измерительный прибор. Здесь мы не можем этого сделать, потому что поля электромагнитного излучения не остаются неизменными очень долго. Они распространяются со скоростью света, и поэтому, так как измеряющая аппаратура не может за ними ухватиться она должна сохранить свое положение.

Аргументы Бора и Розенфельда основаны на фундаментальных законах квантовой теории электромагнитного поля вне зависимости от того, какого сорта малыми испытательными телами или частицами физик располагает на самом деле. Самые тяжелые отдельные частицы, которые

мы знаем в природе, имеют конечную массу, поэтому мы не можем получить систему испытательных тел, которая была бы сколь угодно тяжелой, как это необходимо для таких воображаемых экспериментов. Разумеется, мы можем построить большой предмет из атомов так, что он будет сколь угодно тяжелым, но он будет также протяженным в пространстве и иметь внутренние степени свободы. Тогда различные атомы смогут совершать колебания относительно друг друга и создавать нарушающие радиационные эффекты, вызывающие дальнейшие осложнения.

На самом деле, мы можем идти очень далеко при измерении электрических полей, применяя электроны, потому, что электроны, как оказывается, не сильно подвержены действию всяких других агентов. Еще лучшей частицей является  $\mu$ -мезон, который в двести раз тяжелее электрона, и поэтому является лучшей пробной частицей. Насколько мы знаем,  $\mu$ -мезон также не подвержен заметному действию чего либо другого, кроме электрических сил. Правда, он сам по себе живет только две микросекунды, но это достаточно долго для подобных экспериментов!

Если нам нужно что-нибудь потяжелее, то мы должны обратиться к таким частицам, как протоны, которые очень сильно подвержены иным типам взаимодействий, например взаимодействию с другими нуклонами. Конечно, если протон достаточно сильно возмущен, то он может испускать мезоны и всякого рода другие новые частицы, известные теперь в физике. Следовательно, я думаю, что для такого рода измерений, которые мы обсуждаем, протоны были бы совершенно бесполезными. Очевидно, на практике существуют пределы, до которых можно распространить понятие поля, даже усредненного по малой области. Это не противоречит работе Бора и Розенфельда, которые утверждают вполне определенно, что они просто исследуют то, что возможно в рамках квантовой электродинамики, не ограничиваясь возможностью существования (или чего-либо другого) различных частиц и других объектов.

На менее теоретическом уровне мы можем теперь отметить другой пункт по поводу сравнения, которое я раньше сделал между электромагнитным полем и волновым полем материи. Эта аналогия была исключительно полезна при разработке квантовой механики. Но она имеет свои ограничения, и она не так полна, как это часто принимают. Для электромагнитного поля существует классиче-

ский предел, внутри которого все измеримо и нет нужды беспокоиться относительно принципа неопределенности, как, например, это имеет место в случае радиоволн. Для того чтобы увидеть, какую форму этот предел принимает, мы можем написать амплитуду какой-нибудь волны — или волновой функции  $\psi$ , или электрического вектора  $E$ , скажем, в виде

$$E = a \cos(kx - \omega t - \gamma). \quad (10)$$

Затем, рассматривая такую волну, мы можем спросить, насколько точно мы может надеяться измерить фазу  $\gamma$ , т. е. измерить, где находятся узлы и гребни волн в данный момент? Мы получаем такой результат, что если  $N$  — число фотонов, переносимых волной, пропорциональное  $a^2$ , то неопределенности  $\delta N$  и  $\delta\gamma$  в  $N$  и  $\gamma$  связаны соотношением

$$\delta N \delta\gamma \geq 2\pi. \quad (11)$$

Значит, если мы вообще интересуемся фазой, мы должны знать ее с точностью большей, чем  $2\pi$ . Другими словами, мы должны иметь  $\delta\gamma \ll 2\pi$ , так что  $SN \gg 1$ . Это означает, что когда мы можем приписать волне классическое значение, мы должны иметь в значительной степени неопределенность относительно числа частиц, содержащихся в волне. Для света это всегда правильно, так как в основных процессах, при помощи которых свет взаимодействует с материей или с измеряющим прибором, фотоны всегда испускаются или поглощаются по одному. Поэтому если в окрестности имеется измеряющий прибор, число фотонов должно по необходимости быть неопределенным. Однако в случае электронов дело обстоит не так, потому что электроны несут заряд. Если бы присутствовали только электроны, то их число всегда было бы известно из полного заряда, который сохраняется. Мы можем создавать пару положительного и отрицательного электронов вместе, но тогда то, что мы измеряем, будет не фазой или волновой функцией одного из них, а фазой произведения двух волновых функций электрона и позитрона, а это — нечто совсем иное.

Следовательно, если частицы не могут быть поглощены или произведены сами по себе, у нас нет никакой надежды когда-либо приписать единственное значение фазе. С другой стороны, для того чтобы получить классическую ситуа-

цию, нам нужно, чтобы неопределенность в фазе  $\gamma$  была мала сравнительно с  $2\pi$  и в то же время, чтобы неопределенность в числе  $N$  была малой сравнительно со значением самого этого числа  $N$ . Другими словами, нам нужно удовлетворить обоим условиям

$$\delta\gamma \ll 2\pi, \quad \delta N/N \ll 1. \quad (2)$$

Из этих условий ясно следует, что  $N$  должно быть велико по сравнению с единицей, так что должно быть в наличии множество частиц или фотонов. Точнее, соответствующее число фотонов — это не все фотоны лаборатории, а только те, которые находятся во вполне определенном типе движения, например в специфической радиоволне, испускаемой передатчиком. В случае радиоволн затруднений не встречается; число фотонов всегда очень велико, поскольку энергия каждого из них на радиочастотах исключительно низка. С электронами, однако, этому условию нельзя удовлетворить, потому что электроны подчиняются принципу исключения, который требует, чтобы в каждом из возможных типов движения находилась только одна частица. Следовательно, нельзя иметь произвольно большое число частиц, переносимых волной материи, и нельзя получить классического описания таких волн.

Конечно, не следует считать простой случайностью то, что мы рассматриваем электромагнитное поле и фотоны, как волны, в то время, как электроны и другие тела мы считаем частицами. Существует область, в которой электромагнитное поле имеет идеально точное классическое значение и может быть представлено классическими уравнениями, символы которых соответствуют вполне определенным числам, которые могут быть записаны. Этого нельзя сделать с полем материи. Нельзя также получить описание в виде частиц для фотонов в области, где было бы справедливо классическое описание, так как там существует трудность в локализации фотонов. В то время, как можно спрашивать, где находится частица (фактически волновая функция и была придумана для того, чтобы позволить нам предсказывать возможные результаты экспериментов, запроектированных для локализации частицы), нельзя спрашивать, где находится фотон, кроме как в рамках геометрической оптики. Если ограничить все электромагнитное поле малой областью, то можно предположить,

что правильно считать, что фотоны находятся где-то там, но нельзя более точно локализовать их, как это можно сделать в эксперименте с электронами. Это является следствием того факта, что фотоны имеют нулевую массу покоя и распространяются со скоростью света.

Такого же рода трудности возникают, когда электроны или другие частицы отыскиваются в релятивистской области. Если проектируется эксперимент, имеющий целью попытку локализовать их более точно, то принцип неопределенности требует такого мощного действия сил на них, что не только их момент изменяется на величину, указываемую принципом неопределенности, но кроме того, создаются пары новых частиц, и к тому времени, когда эксперимент заканчивается, уже не ясно, что мы искали.

Эти осложнения с понятием поля, которые являются следствиями квантовой теории, уже достаточно плохо выглядят, но вдобавок к ним мы узнали, что существует много предсказаний, которые мы хотели бы сделать относительно электромагнитного поля, но которые приводят к бесконечным ответам. Одно из них я уже упоминал. Поскольку существует нулевое колебание для каждого типа колебаний электромагнитного поля, и поскольку существует бесконечное число таких типов (так как нет нижнего предела для возможной длины волны и, следовательно, нет верхнего предела для момента протона), средняя энергия этого флюктуирующего поля, вычисленная обычным путем, оказывается бесконечно большой. Это тесно связано с растущей интенсивностью флюктуаций по мере того, как рассматриваются все меньшие и меньшие области. Поэтому нам следует объяснить, о чем мы говорим, когда утверждаем, что то, что мы действительно наблюдаем как энергию, есть только энергия поля минус энергия, которая существовала бы там нормально в вакууме. Таким способом мы выключаем себя из бесконечной энергии вакуума. Пожалуй, это можно было бы сделать несколько более приемлемым благодаря тому факту, что в вакууме существуют бесконечности, одни из которых являются положительными, а другие отрицательными. При достаточном благородстве можно убедить себя, что эти бесконечности могут взаимно уничтожаться или, по крайней мере, в том, что ответ двусмыслен и необходимо принять разумную точку зрения, состоящую в таком описании, при котором вакууму не приписываются никакой энергии.

Эти бесконечности умножаются, когда рассматривается взаимодействие частиц с полями или друг с другом. Так, если мы описываем электрон как точечный заряд, тогда энергия поля, им создаваемая (даже энергия статического поля), бесконечно велика. Это было известно Лоренцу, который попытался ввести такую схему, в которой электрон был не математической точкой, а имел конечные размеры.

Сначала была надежда, что квантовая теория устранит это затруднение так же, как она практически устранила все затруднения до-квантовой физики. Однако в действительности это затруднение осталось. Энергия точечного заряда все еще бесконечна, даже если привлечь все квантовые законы. Мы научилисьправляться с этим потому, что не знаем энергии покоя электрона самого по себе. Мы не можем сказать, какая энергия покоя была бы у него, если бы был устранен весь заряд, так как мы никогда не видели электрона без заряда. То, что мы наблюдаем, есть полная масса или полная энергия покоя частицы со всеми связанными с ней полями. Поэтому все вычисления должны производиться так, будто только эта наблюдаемая величина входит в них. Развитие квантовой теории поля в послевоенные годы научило нас, что если мы будем следовать такой процедуре, то вещи будут выглядеть лучше. Конечно, это включает функцию, состоящую в том, что частица обладает бесконечной отрицательной механической энергией или массой — такой же функцией, как и бесконечная положительная энергия электромагнитного поля с частицей, находящейся в середине его. Если мы примем, что эти частицы взаимно уничтожаются, — не произвольно, как это может показаться, но в силу определенных процессов, которые были последовательно развиты, тогда все физически наблюдаемые результаты, могут быть выражены через другие наблюдаемые результаты, и все получается конечным.

Должны ли мы уплатить какую-то цену за эту в основном непоследовательную картину? означает ли это, что если мы проведем расчеты за пределы точности, практически достижимой в настоящее время, то мы встретимся с трудностями (как полагают многие) или же мы сумеем выразить все непосредственно только через физические величины, не прибегая к двум отдельным понятиям — энергии поля и механической энергии, которая тогда исчезнет из физики, как исчезли механические модели Максвелла за уравнениями, которые он написал, — судить еще рано.