

Так в начале 30-х гг. в физику приходит целый ряд новых идей, определивших развитие теоретической физики последующего пятидесятилетия. Эти идеи (во всяком случае существенная их часть) лежат в основе современной теории микромира.

### Рождение и уничтожение частиц

Теория Дирака позволяла описать все электромагнитные квантовые процессы. Она предсказала существование позитрона и правильно описала его физические свойства. На ее основе можно было изучать и переходы электронов в атоме, и процессы взаимодействия электронов и позитронов. Теория предсказала поведение электронов и позитронов в полном согласии с опытом. Подчеркнем, что теория и переходов электронов с одного уровня на другой в атоме, и перехода с  $E < -mc^2$  на уровень с  $E > mc^2$  была одной и той же. Гипотеза о *море Дирака* обеспечивала единство такого описания, фактически основанного на представлении о вечном неуничтожимом электроне. Но предсказание процессов аннигиляции электронов и позитронов, процессов рождения пар закладывали новую концепцию: взаимодействие, сводившееся по первоначальному смыслу к изменению траектории, обрело смысл рождения и гибели частиц. Можно было перевести язык теории Дирака на новый язык этой концепции. Этот язык реализован в квантовой теории поля, основанной на представлении о возможности рождения и уничтожения частиц.

Квантовая теория поля по-новому осмыслила представление о *море Дирака*. Допустив возможность рождения и уничтожения частиц, можно отказаться от резервуара электронов с отрицательной энергией. Состояние электрона с отрицательной энергией есть состояние позитрона с положительной энергией. Мир квантовой теории поля — не набитое до отказа неуничтожимыми электронами «море» состояний с отрицательной энергией. В ее основе лежит вакуум, способный рождать и поглощать электроны и позитроны. На старом языке (в теории моря Дирака) речь шла о процессах выбивания электронов из «моря». Получались электрон и «дырка»,

На новом языке речь идет о процессах рождения из вакуума пары электрон — позитрон.

В теории Дирака говорилось о заполнении незанятого состояния с отрицательной энергией электроном с положительной энергией. Заполняя состояние «дырки» в «море», электрон должен испускать  $\gamma$ -кванты.

На новом языке речь идет об аннигиляции электрона и позитрона в  $\gamma$ -кванты.

Картина квантовой теории поля основана на представлении о рождении и уничтожении электронов и позитронов. В этой картине нет нужды следить за тем, как неуничтожимый и несотворимый электрон прячется в море состояний с отрицательной энергией, как он выбивается из этого состояния, оставляя дырку в море, и становится свободным электроном с положительной энергией, как, повстречав незанятое состояние в море, он переходит в это состояние, испуская  $\gamma$ -кванты. Во всех этих парадоксальных картинах нет более надобности, коль скоро мы отказываемся от вечной и неуничтожимой элементарной частицы.

Зпасывая по-новому (на языке рождения и уничтожения) уравнения для электронов и позитронов, мы приходим к новой картине фона, на которой происходят процессы рождения и уничтожения. Этот фон — вакуум.

В основе теории Дирака лежало полностью заполненное электронами море состояний с отрицательной энергией.

В основе квантовой теории поля — состояние вакуума, в котором частицы вообще отсутствуют.

В теории Дирака электрон и позитрон были равноправны: позитрон является «дыркой» в море Дирака. Реальная частица теории Дирака — электрон, позитрон — частица «эффективная»: она — эффект отсутствия электрона. Поэтому и основное состояние теории Дирака — ненаблюдаемое море электронов с бесконечным отрицательным зарядом. Зарядовая симметрия — симметрия частиц и античастиц — появлялась в этой теории эффективно — за вычетом ненаблюдаемых эффектов «моря».

Квантовая теория поля зарядово симметрична. Электрон и позитрон в этой теории — частицы равно-

правные. И физический вакуум теории электрически нейтрален.

Такое построение теории более адекватно Природе. Ведь законы электромагнетизма зарядово симметричны, и возможна такая трактовка теории Дирака, когда позитроны являются частицами, а электроны — «дырками». Окружающая нас Вселенная зарядово асимметрична, в ней существенно меньше позитронов — но это асимметрия реализации начального состояния, о чем мы еще поговорим.

Язык квантовой теории поля — это язык превращений частиц. В соответствии с этим понятия «ток» и «заряд» должны быть переформулированы. Для «вечного» электрона заряд — это свойство, которое ему внутренне присуще. Заряд «вечен», потому что «вечен» электрон, как и другие заряженные частицы (протон!) — такой была старая точка зрения.

Новая точка зрения иная. Согласно квантовой теории поля, могут происходить квантовые превращения: одни частицы могут уничтожаться, другие — рождаться, и заряд связывается не с отдельными частицами, а со всей совокупностью частиц. То, что на языке неуничтожимых частиц было бы внутренним свойством этих частиц, на языке квантовой теории поля есть свойство превращений частиц.

Мы принимаем новый язык потому, что рассматриваем его как эквивалентный старому, сохраняющий все его правильные количественные результаты расчетов квантовых переходов. Только теперь вместо старого «переход электрона (предсуществующего) из состояния с отрицательной энергией в состояние с положительной энергией» мы говорим «рождение пары электрон—позитрон».

Но, когда мы уже выучили новый язык и говорим: «может родиться пара  $e^+e^-$ », нам кажется вполне естественным и мы не удивляемся тому, что может родиться пара  $e^-\bar{\nu}$  или  $e^+\nu$  (здесь  $\bar{\nu}$  — антинейтрино). Только очевидно, что в этом случае родить ее должен «заряженный фотон»  $W^- \rightarrow e^-\bar{\nu}$  или  $W^+ \rightarrow e^+\nu$ . А источником такого заряженного фотона, например  $W^-$ , должно быть превращение электрона в нейтрино или нейтрона в протон. Так новый язык позволяет естественным образом обобщить описание электромагнитного взаимодействия на случай других превращений элементарных частиц.

На новом языке процессы взаимодействия частиц становятся процессами рождения и уничтожения квантов поля взаимодействия. Любой процесс взаимодействия двух частиц оказывается процессом обмена таким квантом между этими частицами. В этом смысле процессы электромагнитного взаимодействия сводятся к процессам обмена электромагнитными квантами.

Здесь важно подчеркнуть различие между реальными фотонами и электромагнитными квантами, рождаемыми в процессе электромагнитного взаимодействия. Реальный фотон — квант электромагнитной волны — обладает только поперечной поляризацией (см. Математическое дополнение, с. 230). Электромагнитные кванты, рождаемые и поглощаемые заряженными частицами в процессе электромагнитного взаимодействия, могут иметь и продольную поляризацию, а могут вообще описываться временной компонентой 4-вектора (т. е. не обладать поляризацией в пространстве). Дело в том, что обменные кванты — это не реальные, а *виртуальные* частицы, для которых связь между энергией и импульсом, а также поляризационные свойства отличаются от реальных частиц. Поэтому, например, кулоновское взаимодействие можно описывать на новом языке как обмен виртуальными электромагнитными квантами, но не фотонами. Эти виртуальные кванты — двоюродные братья фотонов. Более подробно о виртуальных частицах можно прочитать в книгах Л. Б. Окуня « $\alpha\beta\gamma \dots Z$ » или А. Б. Мигдала «Поиски истины».