

Ричард Фейнман и революция квантовой электродинамики: как диаграммы изменили современную физику



Дата публикации: 17.05.2026

Имя Richard Feynman неразрывно связано с преобразованием квантовой электродинамики во второй половине XX века. Его работы изменили сам язык теоретической физики и создали вычислительный аппарат, без которого невозможно представить современную физику элементарных частиц. Наиболее известным вкладом Фейнмана стали диаграммы, однако их появление было лишь частью гораздо более масштабной перестройки квантовой теории поля, включавшей интегралы по траекториям, новый взгляд на propagator и методы перенормировки.

К началу 1940-х годов квантовая электродинамика уже обладала впечатляющей предсказательной силой, однако теория страдала от фундаментальной проблемы бесконечностей. При вычислении поправок к массе и заряду электрона интегралы расходились, давая бесконечные значения. Это означало, что формально теория переставала быть физически осмысленной. Особенно остро проблема проявлялась в расчетах процессов взаимодействия

электронов и фотонов на малых расстояниях, где квантовые флуктуации электромагнитного поля приводили к ультрафиолетовым расходимостям.

Перелом произошел после экспериментов Уиллиса Лэмба в 1947 году. Было обнаружено, что уровни $2S_{1/2}$ и $2P_{1/2}$ атома водорода, которые согласно уравнению Дирака должны совпадать, имеют различие примерно 1057 МГц. Так называемый сдвиг Лэмба невозможно было объяснить в рамках старой версии квантовой электродинамики. Практически одновременно измерения аномального магнитного момента электрона показали отклонение гиромагнитного отношения g от значения 2, предсказанного релятивистской квантовой механикой. Эти эксперименты стали прямым указанием на необходимость новой теории.

Фейнман подошел к проблеме иначе, чем большинство его современников. Вместо работы с операторным формализмом он разработал метод интегралов по траекториям. Основная идея состояла в том, что частица движется не по одной классической траектории, а по всем возможным путям одновременно. Амплитуда вероятности вычисляется как сумма вкладов от всех траекторий с фазовым множителем вида $\exp(iS/\hbar)$, где S — действие системы.

Этот подход оказался чрезвычайно мощным, поскольку позволял напрямую связывать квантовую механику с принципом наименьшего действия. В классическом пределе, когда действие значительно превышает постоянную Планка, интерференция разрушает вклад большинства траекторий, и остается только путь, близкий к классическому решению. В квантовом режиме начинают играть роль бесчисленные флуктуации поля.

Из этого формализма постепенно выросла система диаграмм Фейнмана. Каждая диаграмма представляла собой графическое изображение взаимодействия частиц. Линии соответствовали *propagator* — функции распространения частицы между двумя точками пространства-времени, а вершины обозначали взаимодействия. Для квантовой электродинамики базовая вершина содержит электрон, позитрон и фотон с коэффициентом связи e , где e связано с постоянной тонкой структуры $\alpha \approx 1/137.035999084$.

Диаграммы оказались не просто наглядной иллюстрацией, а полноценным вычислительным языком. Каждой линии и вершине сопоставлялось точное математическое выражение. В импульсном представлении *propagator* электрона имеет вид $(\not{p} + m)/(p^2 - m^2 + i\epsilon)$, а *propagator* фотона в калибровке Фейнмана записывается как $-g_{\mu\nu}/(k^2 + i\epsilon)$. Интегрирование по внутренним импульсам петель позволяло учитывать виртуальные частицы и радиационные поправки.

Именно петлевые диаграммы приводили к расходимостям. Фейнман совместно с Джулианом Швингером и Синъитиро Томонагой разработал схему перенормировки, позволившую отделить наблюдаемые физические параметры от бесконечных вкладов квантовых флуктуаций. Формально масса и заряд электрона заменялись перенормированными величинами, измеряемыми в эксперименте.

Одним из первых триумфов новой квантовой электродинамики стал расчет аномального магнитного момента электрона. В первом порядке по α Фейнман получил поправку $\alpha/(2\pi)$, что соответствует примерно 0.0011614. Современные эксперименты измеряют магнитный момент электрона с точностью лучше 10^{-12} , и теория совпадает с наблюдениями практически идеально. Это считается одной из самых точных проверок физической теории в истории науки.

Диаграммы Фейнмана быстро распространились далеко за пределы квантовой электродинамики. После создания квантовой хромодинамики в 1970-х годах аналогичные методы начали использоваться для описания взаимодействий кварков и глюонов. Однако в отличие от фотонов, глюоны сами несут цветовой заряд и взаимодействуют друг с другом. Это привело к возникновению сложных нелинейных диаграмм и явлению асимптотической свободы, за открытие которого была присуждена Нобелевская премия 2004 года.

В физике высоких энергий диаграммы Фейнмана стали основой анализа столкновений частиц на ускорителях. На Большом адронном коллайдере тысячи процессов рассчитываются именно через амплитуды рассеяния, представленные диаграммами. Например, рождение бозона Хиггса через глюон-глюонное слияние происходит посредством петлевой диаграммы с виртуальным t-кварком. Без аппарата Фейнмана подобные вычисления были бы практически невозможны.

Влияние идей Фейнмана распространилось и на квантовую гравитацию. Попытки квантовать гравитационное поле приводят к введению propagator гравитона — гипотетической безмассовой частицы со спином 2. Однако стандартная теория гравитации оказывается неперенормируемой: число бесконечных поправок растет с каждым новым порядком теории возмущений. Тем не менее диаграммная техника стала фундаментом для развития суперсимметрии, супергравитации и теории струн.

Особенно важным оказалось использование интегралов по траекториям в статистической физике и физике конденсированного состояния. Квантовые жидкости, сверхпроводимость, эффект Холла и фазовые переходы сегодня описываются именно через функциональные интегралы. Метод Фейнмана позволил связывать квантовые флуктуации с коллективным поведением

огромного числа частиц.

В сверхпроводниках теория Бардина — Купера — Шриффера использует аналогичные диаграммные методы для описания взаимодействия электронов через фононы. В современной теории топологических материалов и квантовых спиновых жидкостей диаграммы Фейнмана продолжают оставаться универсальным вычислительным инструментом.

Еще одной областью влияния стали вычисления амплитуд рассеяния в суперсимметричных теориях. В XXI веке выяснилось, что многие сложные диаграммы можно свести к более компактным геометрическим структурам, таким как *amplituhedron*. Однако даже эти современные методы исторически восходят к идеям Фейнмана о представлении квантовых процессов через суммы по траекториям и графические правила.

Работы Фейнмана радикально изменили представление физиков о квантовом вакууме. Вакуум перестал рассматриваться как пустота и превратился в динамическую среду, заполненную виртуальными частицами и непрерывными квантовыми флуктуациями. Именно взаимодействие электрона с этими флуктуациями приводит к перенормировке массы, сдвигу Лэмба и аномальному магнитному моменту.

Сегодня диаграммы Фейнмана используются практически во всех разделах современной теоретической физики: квантовой теории поля, астрофизике, космологии, физике плазмы, статистической механике и теории критических явлений. Они стали не просто удобным способом записи вычислений, а универсальным языком описания микромира. Именно поэтому вклад Фейнмана рассматривается не как отдельное открытие, а как фундаментальная перестройка всей математической структуры современной физики.