

модействия). Однако ИК-расходимости отсутствуют в сечении *инклюзивных процессов*, в к-ром произведено суммирование вероятностей переходов в состояния с произвольным числом «мягких» фотонов (экспериментально такие состояния нельзя отличить от исходного из-за конечной разрешающей способности регистрирующих приборов).

Предсказательная сила КЭД может быть проиллюстрирована на примере вычисления радиац. поправок к аномальному магнитному моменту электрона. Общее выражение для магн. момента записывается в виде

$$\mu = \mu_B (1 + a), \quad a = a_1 \frac{\alpha}{\pi} + a_2 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + a_3 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + \dots, \quad (2)$$

где  $\mu_B$  — магнетон Бора, а члены, пропорциональные степеням  $\alpha$ , обязаны своим происхождением радиац. поправкам и в сумме образуют аномальный магн. момент  $\mu_B a$ . Первая поправка  $a = 1/2$ , соответствующая одной однопетлевой диаграмме, была вычислена Ю. Швингером в 1948. Для вычисления след. вклада необходим учёт пяти двухпетлевых диаграмм (изображённых на рис. к ст. *Вершинная часть*). Результат, имеющий аналитич. вид и приближённо равный

$$a_2 = 0,328\,479, \quad (3)$$

был получен в кон. 50-х гг.

Для определения  $a_3$  следует вычислить вклады, отвечающие сорока различным трёхпетлевым диаграммам. Аналитич. расчёт практически невозможно выполнить вручную, поскольку параметрич. интегралы оказываются 7-кратными. Вследствие этого прибегают к приближённым числ. расчётам на ЭВМ. Первый результат, полученный в 1971, содержал значит. погрешность:  $a_3 = 1,49$  (25), связанную с ошибками числ. счёта. В течение последующего десятилетия благодаря использованию ЭВМ для проведения аналитич. вычислений удалось аналитически рассчитать до конца 30 из 40 трёхпетлевых диаграмм, что привело к существ. повышению точности. Результат на 1983:

$$a_3 = 1,1765(13). \quad (4)$$

При достигнутом уровне точности становится важной погрешность эксперим. значения  $\alpha$ . Совр. значение

$$\alpha_{\text{экс}}^{-1} = 137,035\,981(12) \quad (5)$$

позволяет провести вычисление аномального магн. момента электрона с относит. точностью  $10^{-10}$ . Соответствующее значение

$$a_{\text{теор}} = 1,159\,652\,306(111) \cdot 10^{-3}$$

находится в согласии с эксперим. значением

$$a_{\text{экс}} = 1,159\,652\,188(4) \cdot 10^{-3},$$

определённым, как видно, с точностью  $10^{-12}$ . Достигнутый здесь уровень соответствия ( $\sim 10^{-10}$ ) между расчётным и эксперим. значениями является рекордным в физике.

Следует отметить, что совр. точность сравнения теории с экспериментом лимитируется погрешностью в значении  $\alpha$  в (5), определённом с помощью *Джозефсона эффекта*. На этом уровне точности оказываются несущественными теоретич. квантовополевые поправки за счёт эффектов, выходящих за рамки КЭД, а также радиац. поправки порядка  $\alpha^4$  в ф-ле (2). Последние отвечают 891 четырёхпетлевой диаграмме, и их вклад в  $a$  составляет, по проведённым оценкам, величину порядка  $10^{-11}$ .

Для др. эффектов КЭД — *аннигиляции* пары электрон-позитрон, *дельбрюкковского рассеяния* фотонов эл. магн. полем ядра и др. — также характерно отличное согласие теории с экспериментом. Однако по сравнению с аномальным магн. моментом в них уровень соответствия не столь высок либо из-за меньшей точности эксперимента, либо вследствие того, что оказы-

вается более существенным учёт эффектов, выходящих за рамки чистой КЭД.

Так, напр., эксперим. значение величины сверхтонкого расщепления (см. *Сверхтонкая структура*) уровня  $1S_{1/2}$  в атоме водорода известно ныне с рекордной точностью, достигающей 13 порядков, тогда как теоретич. расчёты дают здесь лишь 7 знаков, причём уже с учётом конечных размеров протона. Величина лэмбовского сдвига в атоме водорода известна из опыта с точностью  $10^{-7}$ , а согласующееся с ней теоретич. значение имеет погрешность на уровне  $10^{-6}$ , причём эффекты, выходящие за рамки КЭД, дают вклад порядка  $10^{-6}$ .

Вообще опытные данные по всем без исключения эффектам КЭД находятся в прекрасном согласии с теоретич. значениями в тех случаях, когда в этих эффектах др. виды взаимодействий оказываются несущественными либо поддаются учёту. Этот факт имеет принципиальное значение как для КЭД, так и для КТП в целом. Он свидетельствует о том, что осн. положения совр. локальной (калибровочной) КТП, а также динамики основа КЭД, соответствующая локально калибровочному лагранжиану взаимодействия, оказываются справедливыми во всей области, доступной совр. эксперименту.

*Лит.:* Ахиезер А. И., Берестецкий В. Б., Квантовая электродинамика, 4 изд., М., 1981; Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В., Введение в теорию квантовых полей, 4 изд., М., 1984; Фейнман Р., Квантовая электродинамика, пер. с англ., М., 1964; Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П., Квантовая электродинамика, 2 изд., М., 1980; Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В., Квантовые поля, 2 изд., М., 1990, гл. 5, 7, 8. Д. В. Ширков.

**КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА** — область физики, охватывающая исследования методов усиления, генерации и преобразования частоты эл.-магн. колебаний и волн (в широком диапазоне длин волн, включающем радио- и оптич. диапазоны), основанных на вынужденном излучении или нелинейном взаимодействии излучения с веществом. Осн. роль в К.э. играют вынужденное испускание и положит. *обратная связь*. В обычных условиях вещество способно лишь поглощать или спонтанно (самопроизвольно и хаотически) испускать фотоны в соответствии с *Больцмана распределением* частиц вещества по уровням энергии. Вынужденное испускание при этом не существенно. Оно начинает играть роль лишь при отклонении ансамбля микрочастиц от распределения Больцмана. Такое отклонение может быть достигнуто воздействием эл.-магн. поля, электронным ударом, неравновесным охлаждением, инжекцией носителей заряда через потенцич. барьер в полупроводниках и т. п. В результате таких воздействий (накачки) поглощение эл.-магн. волн веществом уменьшается и при выравнивании населённости на энергетич. уровнях, подвергающихся действию накачки, интенсивности поглощения и вынужденного испускания сравниваются и взаимно гасятся. При этом эл.-магн. волна, частота к-рой резонансна по отношению к частоте перехода между этими энергетич. уровнями, распространяется в веществе без поглощения. Такое состояние наз. *насыщением* перехода.

При дальнейшем увеличении мощности (энергии) накачки населённость накачиваемых энергетич. уровней инвертируется, т. е. на верх. энергетич. уровне оказывается больше частиц, чем на нижнем (*инверсия населённости*). В этом случае вынужденное испускание оказывается более интенсивным, чем резонансное поглощение. Вещество, в к-ром получают инверсию населённости, наз. *активным* (активная среда). В результате вынужденного испускания возникают фотоны, точно совпадающие по частоте, фазе, направлению и поляризации с фотонами вынуждающего поля. Поэтому волна усиливается по мере распространения в активной среде. Так возникает в К.э. усиление эл.-магн. волн за счёт энергии, подводимой