

В. МАРТИНСЕН

(Франкфурт-на-Майне, ФРГ)

## ФЛУКТУАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В КЛАССИЧЕСКИХ И НЕКЛАССИЧЕСКИХ СВЕТОВЫХ ПОЛЯХ

История квантовой оптики, которая к настоящему времени охватывает период почти в сто лет, ретроспективно делится на четыре этапа. На первом этапе, лежащем еще на рубеже столетий, был обнаружен целый ряд квантовооптических явлений (например, законы излучения, фотоэлектрический эффект и др.), которые в рамках классической оптики оказались необъяснимыми. Второй этап характеризуется введением постоянной  $h$  в закон излучения Планка (1900 г.) и появлением гипотезы квантов Эйнштейна (1905 г.). Характерным для полуклассической квантовой оптики является тот факт, что энергия поля излучения квантуется, в то время как само электромагнитное поле рассматривается как классическая величина.

Квантовая оптика в своей теперешней форме основана в 1927 г. Дираком, который реализовал идею квантования электромагнитного поля. В это время интерес физиков был связан с исследованиями атомного и молекулярного строения вещества и применением квантовой оптики в спектроскопии; самому же описанию поля излучения уделялось мало внимания. Положение изменилось лишь на последнем этапе развития, который начался в 1957 г. работами Брауна и Твисса по интерферометрии интенсивности. В связи с возникновением лазеров и дальнейшим развитием электронной измерительной техники появились небывалые возможности для формирования и применения различных оптических полей. Нелинейная оптика, лазерная спектроскопия, оптическая связь и обработка данных — важнейшие вытекающие отсюда дисциплины.

В стремлении к количественному описанию и физическому представлению оптических полей особенно важная роль принадлежит исследованиям флуктуационных явлений. В полуклассической квантовой оптике рассматривались, прежде всего, два предельных случая: с одной стороны, монохроматические волны с хорошо определенной амплитудой, частотой, направлением распространения, поляризацией и начальной фазой, с другой стороны, хаотическое поле, в котором большинство или все из перечисленных параметров могут характеризоваться лишь распределением вероятности. Первое поле полностью когерентно в первом порядке, второе — некогерентно. Хорошим приближением в случае первой модели представляется поле радиопередатчика во время паузы; примером для второго случая служит излучение газоразрядной спектральной лампы или излучение черного тела.

Если определить временное распределение фотонов в поле монохроматической волны, оно будет соответствовать распределению Пуассона. Это распределение характеризуется тем, что вероятность найти фотон в монохроматической волне, имеющей постоянную амплитуду, одинакова в каждый момент. Напротив, в хаотическом поле распределение фотонов подчиняется закону Бозе — Эйнштейна. Это может быть объяснено двумя различными способами: либо исходя из собственных колебаний полового резонатора в термическом равновесии при температуре  $T$ , когда применение распределения Максвелла — Больцмана для квантованных энергетических состояний собственных колебаний прямо ведет к распределению фотонов по Бозе — Эйнштейну; либо исходя из упомянутой прежде монохроматической линии, которая уширяется, благодаря эффекту конечного времени жизни, ударному уширению или эффекту Доплера. Из-за интерференции волн, испускаемых отдельными атомами, возникают колебания интенсивности, плотность вероятности которых подчиняется

закону Рэлея. Чтобы учесть квантованность энергии, нужно сложить рэлеевское распределение с распределением Пуассона. В итоге также получится распределение Бозе — Эйнштейна.

В то время как полуклассическая квантовая оптика имеет в виду только эти два предельных случая и их совокупность в любых пропорциях, последовательная квантовая оптика знает множество других полей, принципиально отличающихся от вышеназванных. Дополнительные флуктуационные явления обусловлены тем, что не все параметры электромагнитной волны могут одновременно иметь точные значения. В ансамбле однородных полей часть параметров будет неконтролируемо флуктуировать вследствие соотношения неопределенностей.

Интересным примером является множество состояний  $|n\rangle$  поля собственных сопряженных колебаний полого резонатора. Это множество можно представить как ансамбль одинаковых полых резонаторов, внутри которых возбуждается собственное колебание ровно с  $n$  фотонами.

В полуклассической квантовой оптике электромагнитное собственное колебание с определенной амплитудой и фазой соответствует состоянию с минимально возможными флуктуациями. Распределение фотонов в таком состоянии является пуассоновским, т. е. средний квадрат колебания числа фотонов равен среднему числу фотонов  $\bar{n}$ . При собственных колебаниях, содержащих ровно  $n$  фотонов, средний квадрат флуктуаций числа фотонов должен быть не меньше, чем в собственном колебании с определенной амплитудой и фазой. В классической оптике подобному состоянию нет аналога, поэтому оно оценивается как неклассическое.

Вследствие соотношения неопределенностей для числа фотонов и фазы получается, что строгое число фотонов влечет за собой неточную фазу. Для ансамбля резонаторов, в которых возбуждается определенное собственное колебание с хорошо определенным числом фотонов, начальная фаза собственных колебаний оказывается неопределенной. Ее значение распределено равномерно между 0 и  $2\pi$ . Поэтому значение математического ожидания напряженности электрического поля в этом состоянии множества  $|n\rangle$  равно нулю. С макроскопической стороны множество состояний в резонаторе представляет собой электромагнитное колебание с исчезающей напряженностью поля. Значение же математического ожидания для квадрата напряженности поля пропорционально  $(n + 1/2)$ , т. е. пропорционально классической интенсивности. Отсюда следует, что средний квадрат флуктуаций напряженности поля возрастает пропорционально числу фотонов  $(n + 1/2)$ . Дисперсия напряженности поля для состояния, где число фотонов строго определено, демонстрирует известное сходство с дисперсией числа фотонов для состояния с определенной напряженностью поля.

Кармихалл и Уоллз так же, как и Кимбле и Мандель, в 1976 г. предложили использовать для экспериментальной проверки неклассического оптического поля с подпуассоновским распределением фотонов резонансную флуоресценцию одиночных двухуровневых атомов в соответствующим образом настроенном пучке лазерного излучения. Так как каждый единичный атом после флуоресцентной эмиссии должен быть снова приведен в возбужденное состояние прежде, чем он сможет эмиттировать фотоны, то между двумя следующими друг за другом испусканиями квантов одного и того же атома существует некоторый промежуток времени, который приводит к снижению среднего квадрата колебаний числа фотонов в флуоресцентном свете. Средний квадрат будет меньше пуассоновского значения при когерентном возбуждении.

Кимбле, Дагенайс и Мандель используют в своем эксперименте излучение атома натрия, который возбуждается в пучке лазера на красителе. Определим распределение интервалов времени между двумя следующими друг за другом фотонами во флуоресцентном свете. Найденное распределение показывает, что при коротких временных интервалах наблюдается ожидаемое уменьшение флуктуаций числа фотонов; возможность совмещения фотонов во флуоресцентном свете подавляется ме-

ханизмом резонансной флуоресценции в единичном атоме. Конечно, прямому сокращению пуассоновских флуктуаций во флуоресцентном свете мешает пуассоновское распределение атомов в луче лазера.

Другое высказанное в 1967 г. Ченом предложение по экспериментальной проверке неклассического поля с подпуассоновскими флуктуациями основывается на фильтрации пучка лазерного света оптически нелинейной средой. В нелинейной поглощающей среде поглощение тем больше, чем больше интенсивность падающего пучка света. Если пучок с флуктуирующей интенсивностью попадает в поглощающую среду, то она особенно сильно будет поглощать в момент, когда велика интенсивность. Нелинейная поглощающая среда способствует, таким образом, сглаживанию колебаний интенсивности и числа фотонов.

Способ имеет следующее ограничение: коэффициент полезного действия нелинейного оптического элемента при малой интенсивности света очень низкий. С другой стороны, при больших интенсивностях различие между классическими методами и неклассическими полями очень слабо. При больших интенсивностях имеются ограничения аппаратного характера, так как ширина полосы пропускания детектора и вычислительной электроники допускает лишь ограниченные скорости счета. По предложению Ритце и Бандилла эту трудность можно частично уменьшить за счет расщепления в интерферометре исследуемого пучка высокой интенсивности на два, из которых только один проходит через нелинейную среду. Другой пучок за нелинейной средой снова соединяется с первым пучком и служит лишь для того, чтобы ослабить интенсивность первого пучка перед детектором.

Вагнер и Куронски провели моделирующий эксперимент, чтобы изучить на модели влияние нелинейного взаимодействия на явления флуктуаций в различных полях. В качестве нелинейного элемента использовался удвоитель частоты. Распределение фотонов моделировалось с помощью соответствующего распределения интенсивности. При освещении удвоителя частоты хаотическим светом на его выходе наблюдалось уменьшение флуктуаций в основной (нижней) волне, в верхней — наоборот, усиление. Если при этом удвоитель частоты осветить пучком, распределение интенсивности которого соответствует пуассоновскому распределению фотонов, тогда за удвоителем как в нижней (основной), так и в верхней волне наблюдается уменьшение ширины распределения. Эти эксперименты позволяют выяснить, что сглаживание распределения фотонов путем нелинейного взаимодействия принципиально возможно также и в области подпуассоновских флуктуаций. Если бы действительно удалось создать такие поля, то мы имели бы простую и интересную макроскопическую квантовую систему для простого объяснения колебательных явлений.

*Поступила в редакцию 8 августа 1982 г.*

УДК 778.38

**В. ЛАУТЕБОРН**  
(Геттинген, ФРГ)

### **ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗ ГОЛОГРАММ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Введение.** Начиная с 1976 г. в III Физическом институте Геттингена проводятся исследования, направленные на изучение пузырьков воздуха в воде с помощью высокоскоростной голографии и цифровой обработки трехмерных изображений, восстанавливаемых с голограммы.