Заметки по курсу «Квантовая оптика»

Автор заметок: Хоружий Кирилл

От: *17 февраля 2022 г.*

Содержание

Лекция №2. Вторичное квантование

Для одиночного фотона можно построить волновые функции[1], – это ЭМ поле, что является явным проявлением родства уравнения Шрёдингера и волнового уравнения оптики.

Вторичное квантование (П. Дирак, 1927) – введение нового объекта описания: осциллятора ЭМ поля или совокупность одинаковых фотоов в объеме когерентности. Ключевыми становятся числа заполнения.

Осциллятор. Пришли к новым операторам

$$\hat{a} = \frac{\omega\hat{x} + i\hat{p}}{\sqrt{i\hbar\omega}}, \qquad \hat{a}^\dagger = \frac{\omega\hat{x} - i\hat{p}}{\sqrt{2\hbar\omega}}.$$

Оператор поля:

$$\hat{E} = \sqrt{\frac{8\pi\hbar\omega}{V}}\frac{1}{2}\left(\hat{a}e^{-i\omega t + i\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}} + \hat{a}^\dagger e^{i\omega t - i\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}}\right),$$

числа фотонов и Гамильтониан:

$$\hat{n} = \hat{a}^\dagger\hat{a}^\dagger, \qquad \hat{H} = \frac{\hbar\omega}{2}\left(\hat{a}^\dagger\hat{a} + \hat{a}\hat{a}^\dagger\right) = \hbar\omega\left(\hat{a}^\dagger\hat{a} + \frac{1}{2}\right),$$

где V – объем когерентности и всё также верно, что $[\hat{a}, \hat{a}^\dagger] = 1$.

Добавка $\frac{1}{2}$ – непередаваемая часть гамильтониана, так что $\hat{n} = \hat{a}^\dagger\hat{a}$ более чем логично.

Как обычно живём в базисе $\hat{H}$: $|n\rangle$, которые допускают интерпретацию в виде n-фотонных состояниях ЭМ поля, Фоковских сотояний.

Свободная эволюция ЭМ поля:

$$i\hbar\partial_t |n\rangle = \hat{H}|n\rangle, \qquad \Rightarrow \qquad |n(t)\rangle = \exp\left(-\frac{it}{\hbar}\hat{H}\right)|n(0)\rangle = e^{-in\omega t}\left(e^{-i\omega t/2}|n(0)\rangle\right).$$

Лестничные операторы. Как и с осциллятором, приходим

$$\hat{a}|n\rangle = \sqrt{n}|n-1\rangle, \qquad \hat{a}^\dagger = \sqrt{n+1}|n+1\rangle,$$

то есть имеем оператор рождения и уничтожения фотона.

Наблюдаемые. Дисперсия $\hat{n}$ в $|n\rangle$ нулевая. Для поля

$$\langle E\rangle = 0, \qquad \langle\Delta E^2\rangle = \langle n|\left(\tfrac{\hat{a}e^{-i\omega t} + \hat{a}^\dagger e^{i\omega t}}{2}\right)^2|n\rangle - \langle E\rangle^2 = \frac{1}{4}\langle n|\hat{a}\hat{a}^\dagger + \hat{a}^\dagger\hat{a}|n\rangle = \frac{n}{2} + \frac{1}{4},$$

где для простоты опустили множитель $\varpi = \sqrt{\frac{8\pi\hbar\omega}{V}}$.

Плотности вероятности данных о поле может быть записано в виде

$$\chi(u) = \langle n|e^{iu\hat{E}}|n\rangle = \ldots = e^{-u^2/8}L_n\left(\tfrac{u^2}{4}\right),$$

$$p(E) = \frac{1}{2\pi}\int \chi(u)e^{-iuE}\,du = \ldots = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{e^{-2E^2}}{2^N n!}\left(H_n(\sqrt{2}E)\right)^2,$$

где L – полиномы Лагерра, H_n – полиномы Эрмита.

Получается, что нужны новые композиции n-фотонных состояний. Ими оказались когерентные состояния.

[1] А.И. Ахиезер, В. Б. Берестецкий, «Квантовая электродинамика» – обязательно прочитать (§1, §2)!