Лекция №10.
Индуцированные переходы.

1. *Механизм индуцированных переходов.*

При наличии электромагнитного поля частоты $\nu \sim \dfrac{E_2 - E_1}{h}$, атом энергетические уровни которого на рисунке 9.1 может совершать переход из состояния 1 в состояние 2 поглощая при этом квант электромагнитного поля (фотон) энергии hν. Если атом в тот момент, когда он подвергается действию электромагнитного поля уже занимает состояние 2 , это воздействие может привести к его переходу вниз в состояние 1с испусканием фотона энергии hν.

Процесс индуцированного перехода от спонтанного описанного выше в лекции 9 отвечает то, что в первом случае скорости для переходов 2→1 и 1→2 равны, тогда как для спонтанного процесса скорость 1→2 (тоесть, перехода при котором энергия атома увеличивается) равна нулю. Другое принципиальное отличие также следует из основных принципов квантовой механики: скорость индуцированных процессов пропорциональна интенсивности электромагнитного поля, а спонтанных от поля не зависит. Связь между скоростью индуцированного перехода или интенсивностью индуцирующего поля имеет очень большое значение при исследовании взаимодействия атомных систем с электромагнитными полями.

2. *Аналитическая модель индуцированных переходов.*

Рассмотрим в начале взаимодействие в группе идентичных атомов с полем излучения, плотность энергии которого распределена равномерно по частотам вблизи частоты переходов. Пусть ρ(ν) – *спектральная плотность энергии*. Допустим, что скорости индуцированных переходов при переходах 2→1 и 1→2 пропорциональны ρ(ν), тоесть:

$$\left(W'_{21}\right)_{инд} = B_{21} \cdot \rho(\nu)$$
$$\left(W'_{12}\right)_{инд} = B_{12} \cdot \rho(\nu), \qquad (10.1)$$

где B_{12} и B_{21} – постоянные, которые будут определены нами позже. Общая скорость переходов 2→1 (направленых вниз) – это сумма скоростей индуцированных и спонтанных процессов:

$$W'_{21} = B_{21} \cdot \rho(\nu) + A_{21}. \qquad (10.2)$$

Скорость A_{21} спонтанного процесса обсуждалась в лекции 9. Общая скорость переходов 1→2 (направленых вверх)

$$W'_{12} = (W'_{12})_{инд} = B_{12} \cdot \rho(\nu). \qquad (10.3)$$

Теперь нашей задачей является вычисление значений B_{12} и B_{21}. Так как коэффициент B_{12} и B_{21} зависят от типа атомов, а не от поля излучения можно без потери общности рассмотреть случай, когда атомы находятся в тепловом равновесии с тепловым полем излучения абсолютно черного тела при температуре T. В этом случае плотность излучения:

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi \cdot n^3 \cdot h \cdot \nu^3}{C^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{KT}} - 1} \qquad (10.4)$$

Так как, при тепловом равновесии населенности уровней 2 и 1 не меняются со временем, число переходов $2 \rightarrow 1$ в данном временном интервале равно числу переходов $1 \rightarrow 2$ т.е.

$$N_2 \cdot W_{21}^{/} = N_1 \cdot W_{12}^{/}, \tag{10.5}$$

где N_1 и N_2 – плотности населенности уровней 1 и 2 соответственно.

Подставив (10.2) и (10.3) в (10.5) получим:

$$N_2 \cdot [B_{21} \cdot \rho(\nu) + A_{21}] = N_1 \cdot B_{12} \cdot \rho(\nu) \tag{10.6}$$

Выражение для $\rho(\nu)$ возьмем из выражения (10.4):

$$N_2 \cdot [B_{21} \cdot \frac{8\pi \cdot n^3 \cdot h \cdot \nu^3}{C^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{KT}} - 1} + A_{21}] = N_1 \cdot B_{12} \cdot \frac{8\pi \cdot n^3 \cdot h \cdot \nu^3}{C^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{KT}} - 1} \tag{10.7}$$

Так как атомы находятся в тепловом равновесии, то из уравнения Больцмана следует, что:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{\frac{h\nu}{KT}} \tag{10.8}$$

Сравнив отношения $\frac{N_2}{N_1}$ в (10.7) и (10.8), получим:

$$\frac{8\pi \cdot n^3 \cdot h \cdot \nu^3}{C^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{KT}} - 1} = \frac{A_{21}}{B_{12} \cdot e^{h\nu/(KT)} - B_{21}} \tag{10.9}$$

Полученное равенство (10.9) выполняется только при условии

$$B_{12} = B_{21} \tag{10.10}$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi \cdot n^3 \cdot h \cdot \nu^3}{C^3} \tag{10.11}$$

Последние два уравнения впервые были получены Эйнштейном. С учетом (10.11) скорость индуцируемого перехода (10.1) запишется в виде:

$$W_i^{/} = \frac{A_{21} C^3}{8\pi \cdot n^3 \cdot h \cdot \nu^3} \cdot \rho(\nu) = \frac{C^3}{8\pi \cdot n^3 \cdot h \cdot \nu^3 \cdot t_{cn}} \cdot \rho(\nu) \tag{10.12}$$

где из-за (10.10) различие между скоростями индуцированных переходов $2 \rightarrow 1$ и $1 \rightarrow 2$ отсутствует. Полученное уравнение (10.12) описывает скорость перехода атома вызванного полем с однородным (белым) спектром, спектральная плотность энергии, которой равна нулю.