компонентом, что и определяет свойства гелия II (подробнее см. *Ландау теория сверхтекучести*).

ДВУХУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА — простейшая квантовомеханич. система, имеющая только два энергетич. уровня. Представление о Д. с. играет в совр. теории резонансного взаимодействия эл.-магн. излучения с веществом такую же роль, как и представление об осцилляторе в классич. теории излучения и поглощения эл.-магн. волн.

Во многих случаях Д. с. является хорошей моделью реальных квантовых объектов (атомов, молекул и т. д.). Такая модель адекватна при выполнении след. условий. 1) Спектр квантовой системы существенно неэквидистантен, и лишь для одной пары уровней a и b (частота перехода — ω_{ba}) выполняется условие резонанса с эл.-магн. излучением частоты ω (рис. 1), т. е.

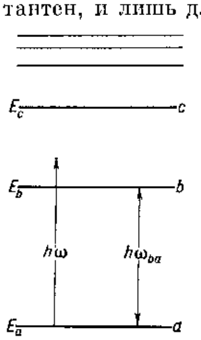

Рис. 1.

$$\omega-\omega_{ba}=\delta,\ |\delta|\ll\omega_{ba}. \qquad (1)$$

2) Переходами на др. уровни системы можно пренебречь.

Для мн. задач квантовой электроники, нелинейной оптики и лазерной спектроскопии достаточно корректным оказывается представление вещества в виде набора Д. с., распределённых с объёмной плотностью N и независимо друг от друга взаимодействующих с окружением (термостатом) и внеш. полями. Для описания временно́й эволюции таких Д. с. используется аппарат *матрицы плотности* $\hat\rho$, позволяющий корректно учесть как действие полей, так и релаксац. процессы, обусловленные взаимодействием Д. с. с термостатом. В простейшем случае, когда релаксация имеет марковский характер (см. *Марковские случайные процессы*) и не зависит от приложенного резонансного поля, ур-ние для матрицы плотности $\hat\rho$ Д. с., усреднённой по состояниям термостата, имеет вид:

$$\frac{d\rho_{ba}}{dt}+\left(i\omega_{ba}+\frac{1}{T_2}\right)\rho_{ba}=-\frac{i}{\hbar}V_{ba}(\rho_{aa}-\rho_{bb}) \qquad (2)$$

$$\frac{d(\rho_{aa}-\rho_{bb})}{dt}+\frac{1}{T_1}[(\rho_{aa}-\rho_{bb})-(\rho^0_{aa}-\rho^0_{bb})]=$$
$$=\frac{2i}{\hbar}(V_{ba}\rho_{ab}-\rho_{ba}V_{ab}).$$

Здесь использовано условие нормировки для матрицы плотности Д. с. $\rho_{aa}+\rho_{bb}=1$. Разность диагональных элементов $\rho_{aa}-\rho_{bb}$ определяет разность населённостей уровней a и b. Время T_1 характеризует скорость релаксации населённостей к их значениям ρ^0_{aa} и ρ^0_{bb} в отсутствие внеш. поля и определяется неупругими процессами, вызывающими переходы между уровнями (спонтанное испускание, неупругие столкновения). Недиагональные элементы $\rho_{ba}=\rho^*_{ab}$ зависят от фазовых соотношений между состояниями (соответствующими уровням a и b), и в их релаксацию (время T_2) кроме неупругих дают вклад упругие процессы, сбивающие фазы состояний. Если релаксация обусловлена только неупругими процессами (разреженные газы, низкие темп-ры), то $T_2=2T_1$. В плотных газах и конденсированных средах в оптич. диапазоне обычно $T_2\ll T_1$.

Коэффициенты V_{ba}, V_{ab} в (2) — матричные элементы гамильтониана взаимодействия $\hat V$ Д. с. с внеш. квазимонохроматич. полем $\boldsymbol{E}$; обычно в оптич. диапазоне используется электрич. дипольное приближение: $\hat V=-\boldsymbol{d}\cdot\boldsymbol{E}$ ($\boldsymbol{d}$ — электрич. дипольный момент). Тогда

$$V_{ba}=V^*_{ab}=-d_{ba}[A(t)e^{-i\omega t}+A^*(t)e^{i\omega t}], \qquad (3)$$

где d_{ba} — проекция матричного элемента дипольного момента на направление поляризации электрич. поля, $A(t)$ — медленно меняющаяся амплитуда поля.

Матрица плотности $\hat\rho$ определяет отклик вещества (электрич. и магн. поляризацию, плотность тока и т. п.) на действующее излучение. Напр., электрич. поляризация для набора одинаковых Д. с. даётся выражением

$$P=N(d_{ab}\rho_{ba}+d_{ba}\rho_{ab}). \qquad (4)$$

Если имеется различие Д. с. по к.-л. параметру, то в (4) необходимо выполнить суммирование по вкладам в поляризацию частиц всех сортов.

Ур-ния (2) можно привести к виду, аналогичному *Блоха уравнениям* для частиц со спином $^1/_2$ в магн. поле (см. *Радиоспектроскопия*, *Ядерный магнитный резонанс*). Эволюция Д. с. при этом описывается ур-нием для т. н. вектора Блоха $\boldsymbol{R}=\boldsymbol{i}u+\boldsymbol{j}v+\boldsymbol{k}w$ в нек-ром модельном пространстве (векторная или гироскопич. модель Д. с.). «Поперечные» компоненты вектора Блоха u и v связаны с матрицей плотности Д. с. соотношением $\rho_{ba}=\frac{1}{2}(u+iv)e^{-i\omega t}$ и определяют соответственно показатель преломления и коэф. поглощения (усиления) резонансной среды. Время их затухания T_2 определяет однородную полуширину линии поглощения (усиления) $\gamma=\frac{1}{T_2}$ и по аналогии со спиновыми системами наз. временем поперечной релаксации. «Продольная» компонента вектора Блоха $w=\rho_{aa}-\rho_{bb}$, т. е. разность населённостей, затухает со временем продольной релаксации T_1.

В квазистационарном случае, когда характерное время изменения амплитуды поля $\tau\gg T_1$, T_2, решение для разности населённостей имеет вид:

$$w=\frac{w_0}{1+G\gamma^2/(\gamma^2+\delta^2)},$$

где $G=4|d_{ba}A|^2\hbar^{-2}T_1T_2$. Отсюда видно, что с увеличением амплитуды поля происходит выравнивание населённостей уровней, т. е. имеет место т. н. *насыщения эффект*. Величина G наз. параметром насыщения.

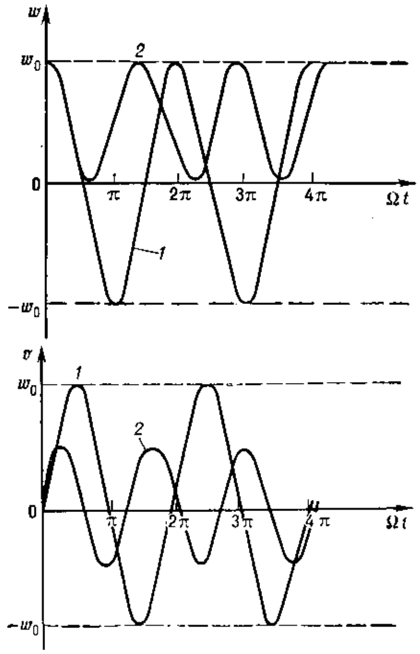

Рис. 2. Колебания разности населённостей w и «активной» составляющей вектора Блоха v (соответствующей коэффициенту поглощения) в поле прямоугольного импульса $\tau\ll T_1$, T_2. 1 — для $\delta=0$; 2 — для $\delta=\Omega=2d_{ba}A/\hbar$.

В поле коротких импульсов ($\tau\ll T_1, T_2$) прямоугольной формы

$$A(t)=\begin{cases}A=\text{const} & 0\leqslant t\leqslant\tau\\ 0 & t<0,\ t>\tau\end{cases}$$