

Классический подход

Дипольный момент

$$\vec{d} = -e\vec{r} = -\alpha\vec{E}_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

Мощность излучения

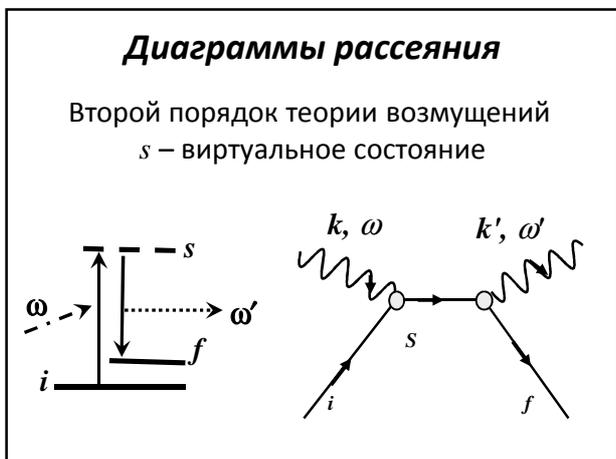
$$W = \frac{2}{3c^3} |\ddot{\vec{d}}|^2 = \frac{2e^2}{3c^3} |\ddot{\vec{r}}|^2 = \frac{\omega^4}{3c^3} |\alpha\vec{E}_0|^2$$

$$\sigma = \frac{W}{|S|} = \frac{8\pi}{3} \frac{\omega^4}{c^4} \alpha^2$$

Вероятность процесса рассеяния

$$dW_{fi} = \frac{2\pi}{\hbar} |V_{fi}|^2 \frac{V\omega'^2 d\Omega}{(2\pi c)^3 \hbar}$$

$$V_{fi} = \sum_s \left(\frac{V'_{fs} V_{si}}{E_i + \hbar\omega - E_s} + \frac{V_{fs} V'_{si}}{E_i + \hbar\omega - (E_s + \hbar\omega + \hbar\omega')} \right)$$

$$\hbar\omega_{si} = E_s - E_i$$


Матричные элементы (дипольное приближение)

$$V_{si} = \langle s | (\vec{d} \cdot \vec{e}_\omega) \frac{i\omega}{c} A_\omega e^{i\vec{k}\vec{r}} | i \rangle = (\vec{d}_{si} \cdot \vec{e}_\omega) \frac{i\omega}{c} A_\omega$$

$$V'_{fs} = \langle f | (\vec{d} \cdot \vec{e}_{\omega'}) \frac{i\omega'}{c} A_{\omega'} e^{i\vec{k}'\vec{r}} | s \rangle = (\vec{d}_{fs} \cdot \vec{e}_{\omega'}) \frac{i\omega'}{c} A_{\omega'}$$

$$e^{i\vec{k}\vec{r}} \approx 1, \text{ так как } \vec{k}\vec{r} \approx \alpha \ll 1$$

$$\begin{matrix} N_\omega \\ \downarrow \\ N_\omega - 1 \end{matrix} |A_\omega|^2 = \frac{2\pi\hbar c^2}{\omega} \frac{N_\omega}{V} \quad \left| \quad \begin{matrix} N_{\omega'} = 0 \\ \downarrow \\ N_{\omega'} = 1 \end{matrix} |A_{\omega'}|^2 = \frac{2\pi\hbar c^2}{\omega' V}$$

Дифференциальное сечение
рассеяния фотона атомом

$$dW_{fi} = \frac{N_{\omega}}{V} c d\sigma_{fi}$$

← поток фотонов

$$\frac{d\sigma_{fi}}{d\Omega} = \frac{\omega\omega'^3}{\hbar^2 c^4} \left| \sum_s \left[\frac{(\vec{d}_{fs} \vec{e}_{\omega'}^*)(\vec{d}_{si} \vec{e}_{\omega})}{(\omega - \omega_{si})} - \frac{(\vec{d}_{fs} \vec{e}_{\omega}) (\vec{d}_{si} \vec{e}_{\omega'}^*)}{(\omega' + \omega_{si})} \right] \right|^2$$

Связь поляризуемости и
релеевского рассеяния

$$f = i \Rightarrow C_{\alpha\beta} = \frac{1}{\hbar} \sum_s \left[\frac{(d_{is})_{\alpha} (d_{si})_{\beta}}{(\omega - \omega_{si})} - \frac{(d_{si})_{\alpha} (d_{is})_{\beta}}{(\omega + \omega_{si})} \right]$$



Тензор рассеяния света

$$C_{\alpha\beta} = \frac{1}{\hbar} \sum_s \left[\frac{(d_{fs})_{\alpha} (d_{si})_{\beta}}{(\omega - \omega_{si})} - \frac{(d_{si})_{\alpha} (d_{fs})_{\beta}}{(\omega' + \omega_{si})} \right]$$

$$\frac{d\sigma_{fi}}{d\Omega} = \frac{\omega\omega'^3}{c^4} \left| C_{\alpha\beta} (e_{\omega'}^*)_{\alpha} (e_{\omega})_{\beta} \right|^2$$

$$C_{\alpha\beta} \propto \delta_{\alpha\beta} \Rightarrow \frac{d\sigma_{fi}}{d\Omega} \propto \omega\omega'^3 \left| \vec{e}_{\omega'}^* \cdot \vec{e}_{\omega} \right|^2$$

Сечение релеевского рассеяния

$$C_{\alpha\beta} = C \delta_{\alpha\beta}$$

$$\overline{(\vec{e}_{\omega'}^* \cdot \vec{e}_{\omega})^2} = \overline{(e_{\omega'}^*)_{\alpha} (e_{\omega})_{\alpha} (e_{\omega'}^*)_{\beta} (e_{\omega})_{\beta}} = \frac{1}{3} \delta_{\alpha\beta} (e_{\omega})_{\alpha} (e_{\omega})_{\beta} = \frac{1}{3}$$

$$\sigma_{fi} = 2 \cdot 4\pi \cdot \frac{\omega^4}{c^4} \frac{1}{3} C^2 = \frac{8\pi}{3} \frac{\omega^4}{c^4} C^2$$

Типы рассеяния

- Упругое (релеевское) рассеяние
 $\omega = \omega'$
- Неупругое (рамановское) рассеяние
 $\omega < \omega'$ – антистоксова компонента
 $\omega > \omega'$ – стоксова компонента

Резонансная флуоресценция

$$(\omega \rightarrow \omega_{si}) \Rightarrow \sigma \rightarrow \infty$$

$$\Downarrow$$

$$E_s \rightarrow E_s - \frac{i\hbar}{2} \gamma_s$$

$$\frac{d\sigma_{fi}}{d\Omega} = \frac{\omega\omega'^3}{\hbar^2 c^4} \frac{\left| (\vec{d}_{fs} \vec{e}_{\omega'}^*)(\vec{d}_{si} \vec{e}_{\omega}) \right|^2}{(\omega - \omega_{si})^2 + (\gamma_s^2 / 4)}$$

Полное сечение резонансной флуоресценции

Суммируем по конечным состояниям $\sum_{\vec{e}_{\omega'}} \int \left| \vec{d}_{fs} e_{\omega'} \right|^2 d\Omega = \frac{8\pi}{3} |d_{fs}|^2$

Усредняем по исходным $\overline{\left| \vec{d}_{si} e_{\omega} \right|^2} = \frac{1}{3} |d_{si}|^2$

$$\sigma_{fi} = \frac{8\pi\omega\omega'^3}{9\hbar^2 c^4} \frac{|d_{fs}|^2 |d_{si}|^2}{(\omega - \omega_{si})^2 + (\gamma_s^2 / 4)}$$

Полное сечение упругого резонансного рассеяния

$$i = f = 1 \quad \omega = \omega'$$

$$\sigma = \frac{\pi c^2}{2 \omega^2} \frac{W_{1s}^2}{(\omega - \omega_{s1})^2 + (\gamma_s^2 / 4)}$$

Сечение резонансной флуоресценции через вероятности переходов

Вероятность перехода $W_{ks} = \frac{4 \omega_{ks}^3 |d_{ks}|^2}{3 \hbar^2 c^4}$

$$\sigma_{fi} = \frac{\pi\omega\omega'^3 c^2}{2\omega_{si}^3 \omega_{fs}^3} \frac{W_{fs} W_{si}}{(\omega - \omega_{si})^2 + (\gamma_s^2 / 4)} \quad \begin{matrix} \omega \approx \omega_{si} \\ \omega' \approx \omega_{fs} \end{matrix}$$

$$\sigma_{fi} \approx \frac{\pi c^2}{2 \omega_{si}^2} \frac{W_{fs} W_{si}}{(\omega - \omega_{si})^2 + (\gamma_s^2 / 4)}$$

Точный резонанс

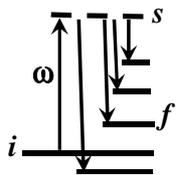
$$\omega = \omega' = \omega_{1s} \Rightarrow \sigma = \frac{\lambda^2}{2\pi} \frac{W_{1s}^2}{\gamma_s^2}$$

s – первое возбужденное состояние

$$W_{1s} = \gamma_s$$

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{2\pi}$$

Полное сечение неупругого резонансного рассеяния



$$\gamma_s = \sum_{f < s} W_{fs}$$

$$\sigma_i = \sum_{f < s} \sigma_{fi} = \frac{\pi c^2}{2 \omega^2} \frac{W_{si} \gamma_s}{(\omega - \omega_{si})^2 + (\gamma_s^2 / 4)}$$

Нерезонансное упругое рассеяние

$$\hbar\omega \gg \Delta E_{\text{перв. возб.} \rightarrow 1}$$

$$|d_{s1}|^2 \approx e^2 a^2 \quad \hbar\omega \approx \frac{e^2}{a}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \approx \frac{\omega^4}{\hbar^2 c^4} \frac{e^4 a^4}{\omega^2} \approx \alpha^4 a^2 \approx Z^2 r_e^2$$

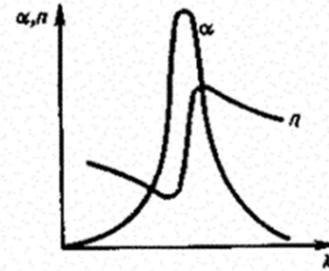
Правило сумм сил
осцилляторов

$$\sum_f \frac{2m\omega}{3\hbar} |d_{fi}|^2 = Z$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Z^2 r_e^2 (\vec{e}_\omega \vec{e}_{\omega'})$$

Томсоновское рассеяние

Зависимость коэффициента поглощения и
зависимость показателя преломления от длины
волны света в области полосы поглощения



Нерезонансное упругое рассеяние

$$\hbar\omega \ll \Delta E_{\text{перв.возб.} \rightarrow 1}$$

$$|d_{s1}|^2 \approx e^2 a^2 \quad \hbar\omega_{s1} \approx \frac{e^2}{a}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \approx \frac{\omega^4}{\hbar^2 c^4} \frac{e^4 a^4}{\omega_{si}^2} \approx \alpha^4 a^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{si}}\right)^4 \approx Z^2 r_e^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{si}}\right)^4$$

Вынужденное комбинационное
рассеяние

Было:

$$|A_\omega|^2 = \frac{2\pi\hbar c^2}{\omega} \frac{N_\omega}{V} \quad |A_{\omega'}|^2 = \frac{2\pi\hbar c^2}{\omega' V}$$

$$W_{fi}^{\text{вкр}} = W_{fi}^{\text{спонт}} N_{\omega'} \propto J_1 J_2$$

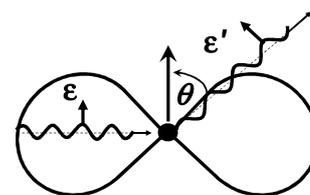
Атом водорода

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{81}{64} r_e^2 \left(\frac{\omega}{\omega_R}\right)^4 (\vec{e}_\omega \vec{e}_{\omega'})$$

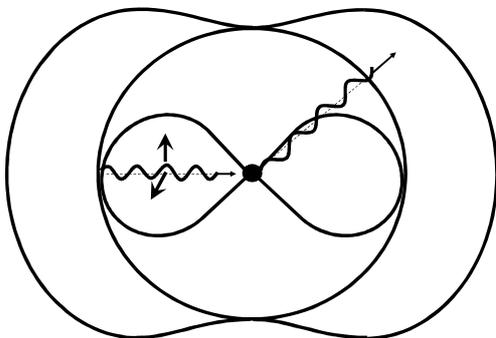
$$\hbar\omega_R = \frac{me^4}{2\hbar^2}$$

Индикатрисса рассеяния
(поляризованный свет)

$$C_{\alpha\beta} \propto \delta_{\alpha\beta} \Rightarrow \frac{d\sigma_{fi}}{d\Omega} \propto |\vec{e}_{\omega'}^* \vec{e}_\omega|^2 \propto \sin^2 \theta$$



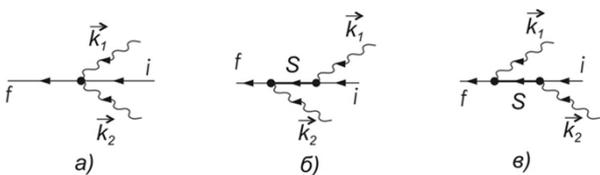
Индикатрисса рассеяния
(неполяризованный свет)



$$|\tilde{V}_{fi}|^2 = \left| \sum_s \left[\frac{(\vec{d}_{fs} \cdot \vec{e}_2)(\vec{d}_{si} \cdot \vec{e}_1)}{(\omega_{si} - \omega_1)} + \frac{(\vec{d}_{fs} \cdot \vec{e}_1)(\vec{d}_{si} \cdot \vec{e}_2)}{(\omega_{si} - \omega_2)} \right] \right|^2$$

$$|V_{fi}|^2 = \left(\frac{2\pi}{\hbar c} \right)^2 \frac{\omega_1 \omega_2}{k_1 c k_2 c} J_1 J_2 |\tilde{V}_{fi}|^2$$

Двухфотонное поглощение



$$V_{fi} = \sum_s \left(\frac{V_{fs} V_{si}}{E_s - E_i - \hbar\omega_1} + \frac{V'_{fs} V'_{si}}{E_s - E_i - \hbar\omega_2} \right)$$

Вероятность двухфотонного
поглощения

Учет конечной ширины уровней

$$\delta(E_f - E_i - \hbar\omega_1 - \hbar\omega_2) \rightarrow \frac{1}{2\pi\hbar} \frac{\gamma_{fi}/2}{(\omega_{fi} - \omega_1 - \omega_2)^2 + (\gamma_{fi}/2)^2}$$

$$W_{fi} = \frac{(2\pi)^2}{\hbar^4 c^4} \frac{\omega_1 \omega_2}{k_1 k_2} J_1 J_2 |\tilde{V}_{fi}|^2 \frac{\gamma_{fi}/2}{(\omega_{fi} - \omega_1 - \omega_2)^2 + (\gamma_{fi}/2)^2}$$

$$|V_{si}|^2 = \left(\vec{d} \cdot \vec{e}_1 \right)^2 \frac{2\pi}{c} \hbar \omega_1 n_\omega c = \left(\vec{d}_{si} \cdot \vec{e}_1 \right)^2 \frac{2\pi}{c} J_1 \frac{\omega_1}{kc}$$

$$\vec{J}_1 = \vec{k} \hbar n_\omega c^2 \quad - \text{поток мощности через единицу поверхности}$$

$$\frac{kc}{\omega} = n + i\chi \quad - \text{дисперсионное соотношение}$$

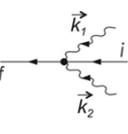
Вероятность двухфотонного
излучения

$$|d_{fi}|^2 \approx e^2 a^2 \quad \hbar\omega_{fi} \approx \frac{e^2}{a}$$

$$W_{fi} \approx \frac{1}{\hbar} \frac{(Ad\omega/c)^4}{(\hbar\omega)^2} \delta(\Delta E) V d^3 k_1 V d^3 k_2$$

$$W_{fi} \approx \frac{V^2}{\hbar^2 \omega^2 \hbar} \left(\frac{\hbar^2 c^4}{\omega^2 V^2} \frac{e^4 a^4}{c^4} \frac{e^8}{a^4} \right) \frac{\omega^3}{c^3} \frac{\omega^2}{\hbar c^3} \approx \omega \alpha^6$$

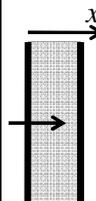
Вероятность двухфотонного излучения



$$\hat{V} = \frac{e^2}{2mc^2} \hat{A}^2$$

$$W_{fi} \approx \frac{1}{\hbar} |A_{fi}^2 e^2 / m^2 c^2|^2 \delta(\Delta E) V d^3 k_1 V d^3 k_2$$

$$W_{fi} \approx \frac{1}{\hbar} \left(\frac{\hbar^2 c^4}{\omega^2 V^2} \frac{e^4}{m^2 c^4} \left| \langle e^{i\vec{k}\vec{r}} \rangle_{fi} \right|^2 \right) V^2 \frac{\omega^3}{c^3} \frac{\omega^2}{\hbar c^3}$$

$$W_{fi} \approx \omega \alpha^6 \left| \langle e^{i\vec{k}\vec{r}} \rangle_{fi} \right|^2 \approx \omega \alpha^{10}$$


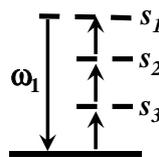
$$\left| \sum_r e^{i\Delta\vec{k}\vec{r}} \right|^2 \rightarrow \left(\frac{N}{V} \right)^2 \left| \int d^3 r \int e^{i\Delta\vec{k}(\vec{r}-\vec{r}')} d^3 r' \right|^2 =$$

$$= 4 \left(\frac{N}{V} \right)^2 \delta(\Delta k_z) \delta(\Delta k_y) \frac{V \sin^2(\Delta k_x L)}{L (\Delta k_x)^2}$$

$$\frac{dJ_3}{dx} = W_3 \frac{\hbar \omega_3}{V}$$

$$J_3 = \frac{(2\pi)^3}{c^8 \hbar^6} \left(\frac{N}{V} \right)^2 \left| \tilde{V}_3 \right| \frac{\omega_1^3 \omega_3 \sin^2(\frac{1}{2} \Delta k L)}{k_3 k_1^3 (\Delta k)^2} J_1^3$$

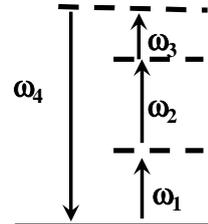
Генерация третьей гармоники



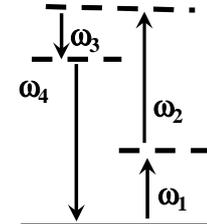
$$V_{fi} = \sum \frac{V_{fs_1} V_{s_1 s_2} V_{s_2 s_3} V_{s_3 i}}{(E_i - E_{s_1})(E_i - E_{s_2})(E_i - E_{s_3})}$$

Другие четырёхфотонные процессы

Трёхфотонное преобразование



Комбинационный резонанс



Учет когерентности

$$V_{\alpha\beta} \propto e^{i\vec{k}\vec{r}}$$

$$\left| \sum_r e^{i\Delta\vec{k}\vec{r}} \right| = \sum_{r,r'} e^{i(\vec{k}_3 - 3\vec{k}_1)(\vec{r} - \vec{r}')}$$

Движение атомов в резонансных световых полях

- 1619 г. – **Иоганн Кеплер**  отклонение хвоста кометы солнечным светом
- 1873 г. – **Джеймс Клерк Максвелл**  показал, что плотность потока импульса волны (давление) равна плотности энергии $E^2/4\pi$

Движение атомов в резонансных световых полях

- 1899 г. – **Петр Николаевич Лебедев** измерил давление света 
- 1909 г. – **Альберт Эйнштейн** впервые указал на микроскопическое воздействие излучения на атомы 
- 1968 г. – **Сергей Глебович Раутиан** впервые исследовал микроскопические уравнения матрицы плотности, учитывающие изменение импульса и внутреннее состояние атома при поглощении и испускании фотона. 

Пример резонансного взаимодействия

Атом **Na**

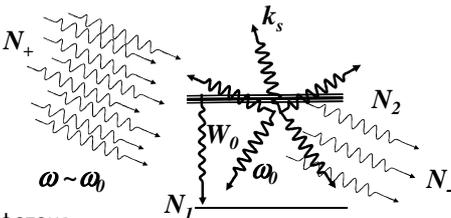
$\lambda = 5890 \text{ \AA}$ (линия желтого дублета)

$$|1\rangle = 3S \quad |2\rangle = 3P$$

$$\Delta v = \frac{\Delta p}{M} \sim \frac{\hbar k}{M} \sim 3 \frac{cm}{c}$$

$$v_{тепл(300^\circ K)} \sim 5 \cdot 10^4 \frac{cm}{c}$$

Давление света



ω – частота фотона
 ω_0 – резонансная частота перехода атома
 $N_0 = N_1 + N_2$ – полное число атомов
 N_1, N_2 – число атомов в состояниях 1 и 2
 N_+, N_- – число поглощенных и индуцированных фотонов за время Δt

Определение средней силы на атом

$$\vec{F} = \frac{\Delta \langle \vec{p} \rangle}{\Delta t}$$

$$\Delta \langle \vec{p} \rangle = \hbar \vec{k} (\langle N_+ \rangle - \langle N_- \rangle) + \langle \sum_s \hbar \vec{k}_s \rangle$$

↑ поглощение
↑ вынужденное излучение
↑ спонтанное излучение

Обмен импульсом между атомом и фотоном

$$\hbar \vec{k} = \pm M \vec{v}$$

Обмен энергией между атомом и фотоном

$$\hbar \omega = \frac{1}{2} M \vec{v}^2 \pm \hbar \omega_0$$

(+ поглощение, – испускание)

Спонтанное излучение пространственно хаотично

$$\langle \sum_s \hbar \vec{k}_s \rangle = 0$$

Средняя сила, действующая на атом

$$\vec{F} = \frac{\Delta \langle \vec{p} \rangle}{\Delta t} = \frac{\hbar \vec{k} (\langle N_+ \rangle - \langle N_- \rangle)}{\Delta t} = \frac{\hbar \vec{k} \langle N_i \rangle}{\Delta t}$$

Сечение поглощения фотона

$$\sigma_{21} = \frac{\pi^2 c^2}{\omega^2} W_0 \frac{1}{2\pi (\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2} \gamma$$

В центре линии

$$\sigma_{21}^0 = \frac{2\pi c^2}{\omega^2} \frac{W_0}{\gamma}$$

$$\frac{d\langle N_+ \rangle}{dt} = \sigma_{12} n_\phi c N_1 \quad \frac{d\langle N_- \rangle}{dt} = \sigma_{12} n_\phi c N_2$$

$$\frac{d(\langle N_+ \rangle - \langle N_- \rangle)}{dt} = -W_B (N_2 - N_1) = W_0 N_2$$

$$\vec{F} = \hbar \vec{k} \frac{W_0 W_B}{W_0 + 2W_B} = \hbar \vec{k} W_0 \frac{W_B/W_0}{1 + 2(W_B/W_0)}$$

Вероятность поглощения и
вынужденного излучения

$$W_B = \sigma_{21} n_\phi c = \frac{2\pi c^3}{\omega^2} \frac{W_0}{\gamma} \frac{J}{\hbar \omega}$$

n_ϕ – плотность падающих фотонов
статвеса $g = 1$

Учет теплового движения

$$W_B = \sigma_{21} n_\phi c$$

$$\sigma_{21} = \frac{2\pi c^2}{\omega^2 \gamma} W_0 \cdot \frac{1}{2\pi (\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2} (\gamma/2)^2$$

$$\sigma_{21} = \sigma_{21}^0 \frac{(\gamma/2)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2}$$

Определение заселенности уровней

$$\begin{cases} W_B (N_2 - N_1) + W_0 N_2 = 0 \\ N_1 + N_2 = N_0 \end{cases}$$

откуда

$$N_1 = \frac{W_B + W_0}{W_0 + 2W_B} N_0 \quad N_2 = \frac{W_B}{W_0 + 2W_B} N_0$$

Перейдем в лабораторную систему
отсчета

Эффект Допплера $\omega' = \omega + \vec{k} \vec{v}$

Частота расстройки $\Omega = \omega' - \omega_0$

Параметр насыщения

$$G = \sigma_{21}^0 n_\phi c / W_0$$

Средняя сила воздействия со стороны фотонов на движущийся атом

$$\vec{F} = \hbar \vec{k} W_0 \left\{ \frac{G}{2G + [(\Omega - \vec{k}\vec{v})/(\gamma/2)]^2 + 1} \right\}$$

при $\Omega - \vec{k}\vec{v} = 0$ и $G \gg 1$

$$\vec{F} = \hbar \vec{k} W_0 / 2$$

Эффективность воздействия фотона на атом

Энергия излучения

$$Q = \alpha J \tau_f = \gamma \hbar \omega G \tau_f \sim \gamma \hbar \omega G^{3/2} \frac{\hbar}{E_a}$$

$$\frac{\gamma \hbar}{E_a} \sim \frac{e^2 \omega^2}{mc^3} \hbar \left/ \frac{\hbar^2 k^2}{M} \right. = \frac{e^2}{\hbar c} \frac{M}{m} = \alpha \frac{M}{m}$$

Интервал резонансных скоростей атомов

$$(|\Omega| - \gamma_s) / k \leq v_z \leq (|\Omega| + \gamma_s) / k$$

$$\gamma_s = \frac{\gamma}{2} \sqrt{1 + 2G}$$

$$v_z \sim \frac{\gamma}{2k} \sqrt{1 + 2G}$$

$$G = \left(\frac{v_z}{c} \frac{mc^2}{\hbar \omega} \frac{1}{2\alpha} \right)^2 - 1$$

$$v_z \sim 10^4 \frac{cm}{c} \Rightarrow G \sim 10^2$$

$$Q \approx 10^4 \left(\frac{M}{m} \right) \hbar \omega \sim 10^7 \hbar \omega$$

Определение характерного времени резонансного взаимодействия

$v_r = \hbar k / M$ – скорость отдачи атома

$E_a = (\hbar k)^2 / 2M$ – энергия отдачи атома

$$\Delta v_z \sim \frac{\gamma_s}{k} (1 + 2G)^{1/2}$$

$$\Delta v_z \sim \frac{\vec{F}}{M} \tau_f \sim \gamma v_r \frac{G}{1 + 2G} \tau_f$$

$$\tau_f \sim \frac{(1 + 2G)^{3/2}}{G} \frac{\hbar}{E_a} \sim \sqrt{G} \frac{\hbar}{E_a}$$

Деформация функции распределения

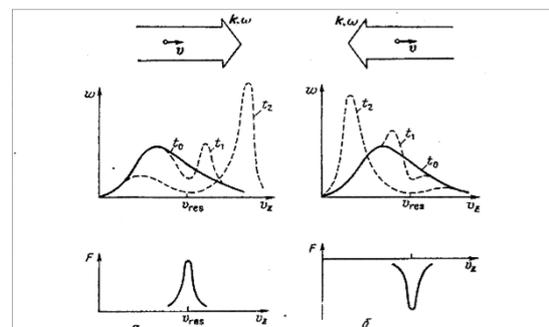
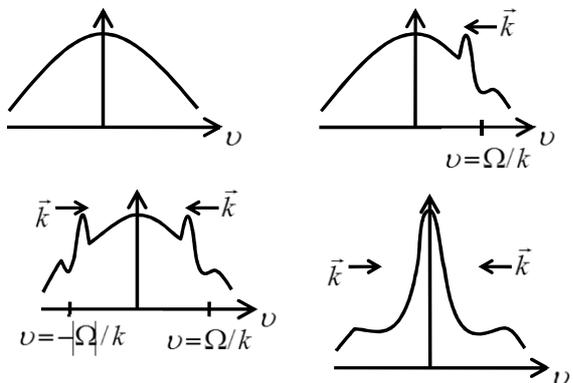


Рис. 5.1. Качественный характер деформации скоростного распределения $w(v_z)$ ансамбля атомов и зависимость силы светового давления F от проекции скорости v_z ($v_0 < v_1 < v_2$)

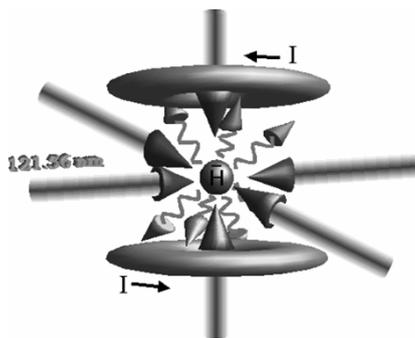
Лазерное охлаждение



Постановка задачи

- имеется смесь двух газов (двух атомных ансамблей)
- освещаем ее в направлении z плоской волной с частотой ω , близкой к частоте перехода ω_0 одной из компонент смеси
- m – верхний уровень атома
- n – нижний уровень
- $\rho(v_z)$ – функция распределения резонансных атомов по скоростям

Лазерное охлаждение



Резонансная скорость

$$v_{рез} = \Omega / k = \frac{\omega - \omega_0}{k_z}$$

Эффективный интервал скоростей

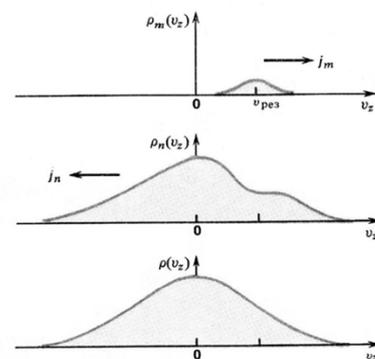
$$\Delta v \sim \Gamma / k$$

Светоиндуцированный дрейф (СИД)



Гельмуханов Ф.Х., Чаповский П.Л., Шалагин А.М.

Деформация функции распределения атомов по скоростям

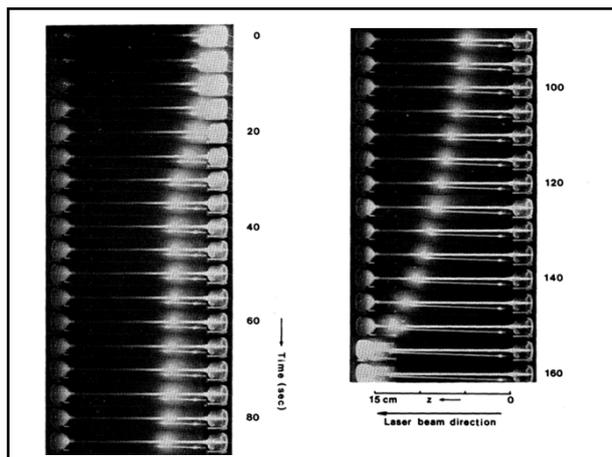


Потоки возбужденных и невозбужденных атомов

$$J_m = \int v_z \rho_m(v_z) dv_z$$

$$J_n = \int v_z \rho_n(v_z) dv_z$$

В отсутствие столкновений $J_m = J_n$



Сила сопротивления потоку

$$F_{\text{трени}}^m = -M v_{\text{столк}}^m J_m$$

$$F_{\text{трени}}^n = -M v_{\text{столк}}^n J_n$$

$$v_{\text{столк}}^n \neq v_{\text{столк}}^m$$

⇓

$$F = F_{\text{трени}}^m + F_{\text{трени}}^n$$

Светоиндуцированный дрейф

$$F = M \left[(v_{\text{столк}}^m - v_{\text{столк}}^n) J_m - v_{\text{столк}}^n J \right]$$

$$J = \frac{(v_{\text{столк}}^m - v_{\text{столк}}^n)}{v_{\text{столк}}^m} J_m$$

$$v_{\text{дрейфа}} = \frac{(v_{\text{столк}}^m - v_{\text{столк}}^n)}{v_{\text{столк}}^m} \frac{N_n}{N} v_n$$