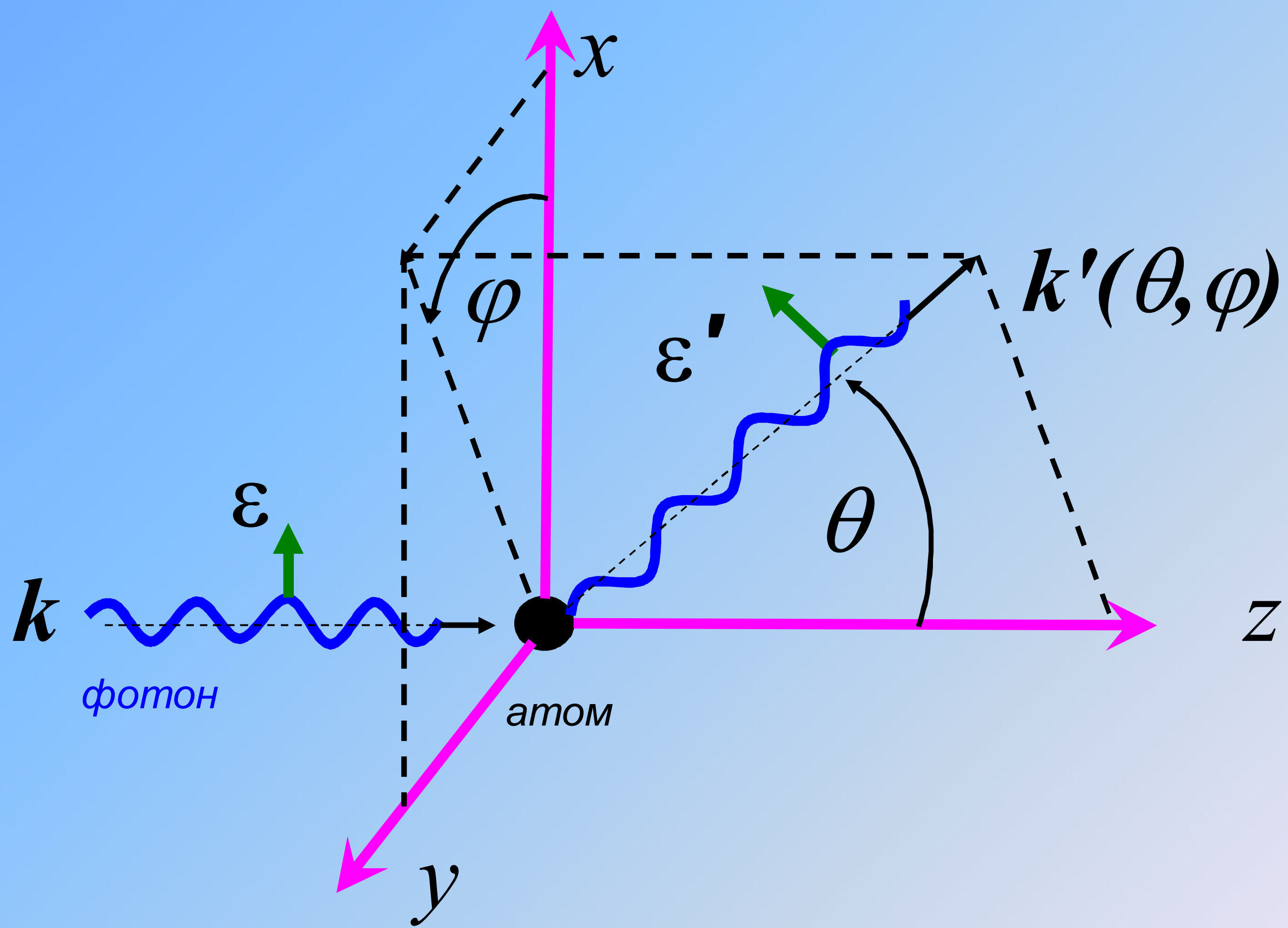
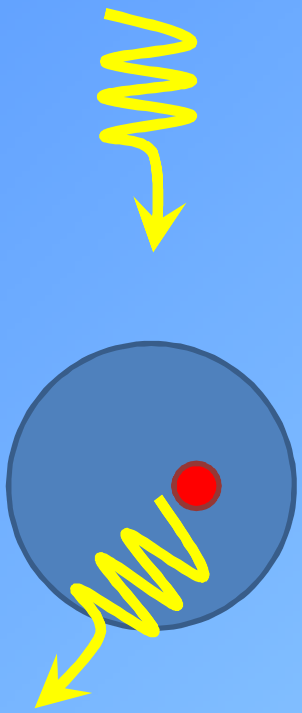
Рассеяние света



Геометрия рассеяния фотона на атоме

Классический подход



Дипольный момент e⁻ в атоме

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

Мощность излучения

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

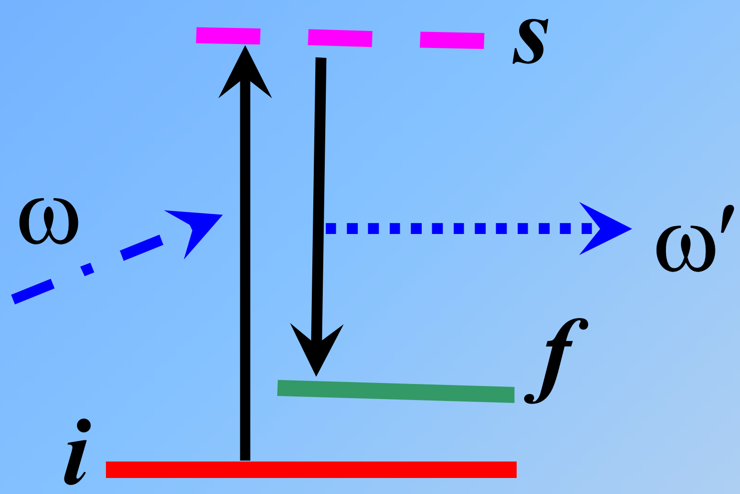
$$\sigma = \frac{W}{\left|\vec{S}\right|} = \frac{8\pi}{3}\frac{\omega^4}{c^4}\alpha^2$$

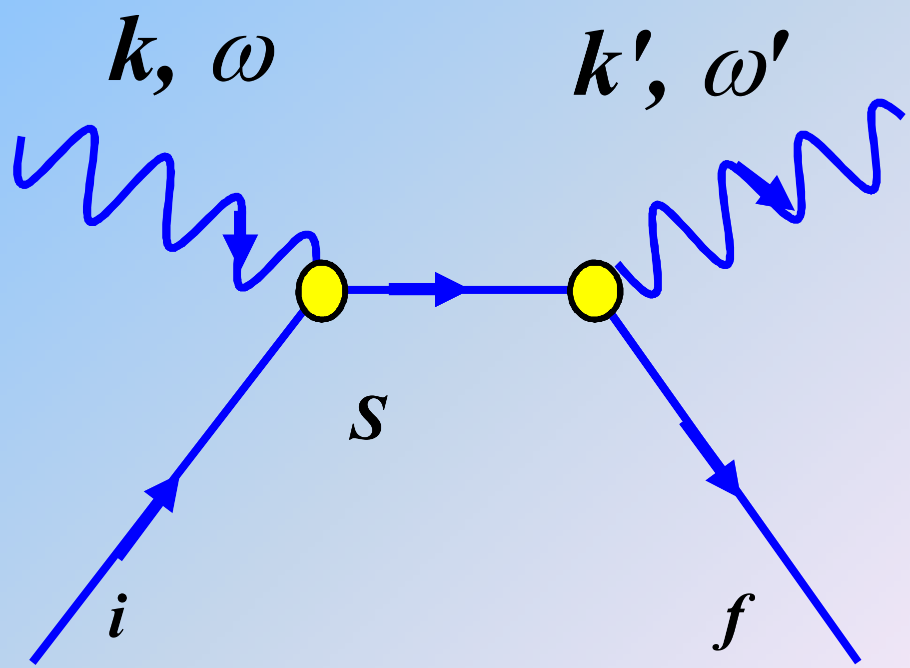
Для свободного e⁻ (*b* – кл. радиус): $\sigma = \frac{8\pi}{3} b^2$

Диаграммы рассеяния

Второй порядок теории возмущений

s – виртуальное состояние

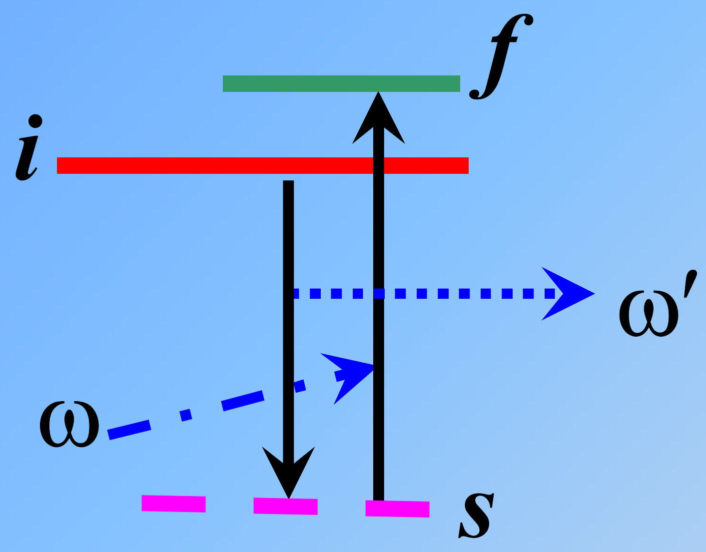


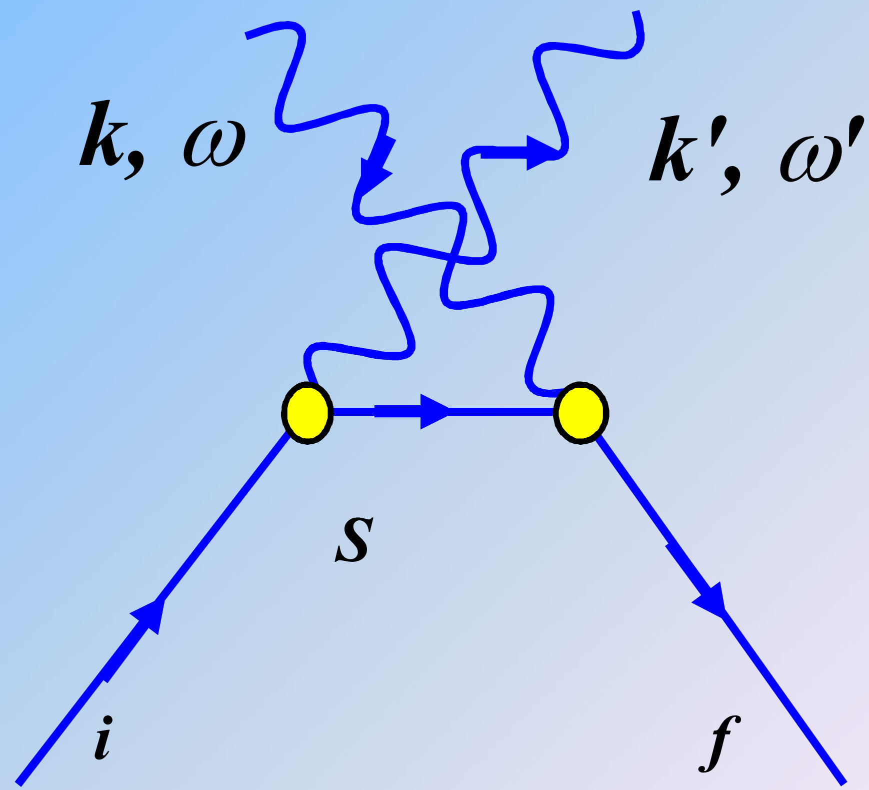


Диаграммы рассеяния

Второй порядок теории возмущений

s – виртуальное состояние





Вероятность процесса рассеяния

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

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

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

Матричные элементы (дипольное приближение)

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

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

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

$$N_\omega \downarrow N_\omega - 1 \qquad |A_\omega|^2 = \frac{2\pi\hbar c^2}{\omega} \frac{N_\omega}{V}$$

$$|A_{\omega'}|^2 = \frac{2\pi\hbar c^2}{\omega' V} \qquad N_{\omega'} = 0 \downarrow N_{\omega'} = 1$$

Дифференциальное сечение рассеяния фотона атомом

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

поток фотонов

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

Формула Крамерса-Гейзенберга

Тензор рассеяния света

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

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

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

Типы рассеяния

- Упругое (релеевское) рассеяние

$$\omega = \omega'$$

- Неупругое (рамановское) рассеяние

$\omega < \omega'$ – антистоксова компонента

$\omega > \omega'$ – стоксова компонента

Сечение релеевского рассеяния

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

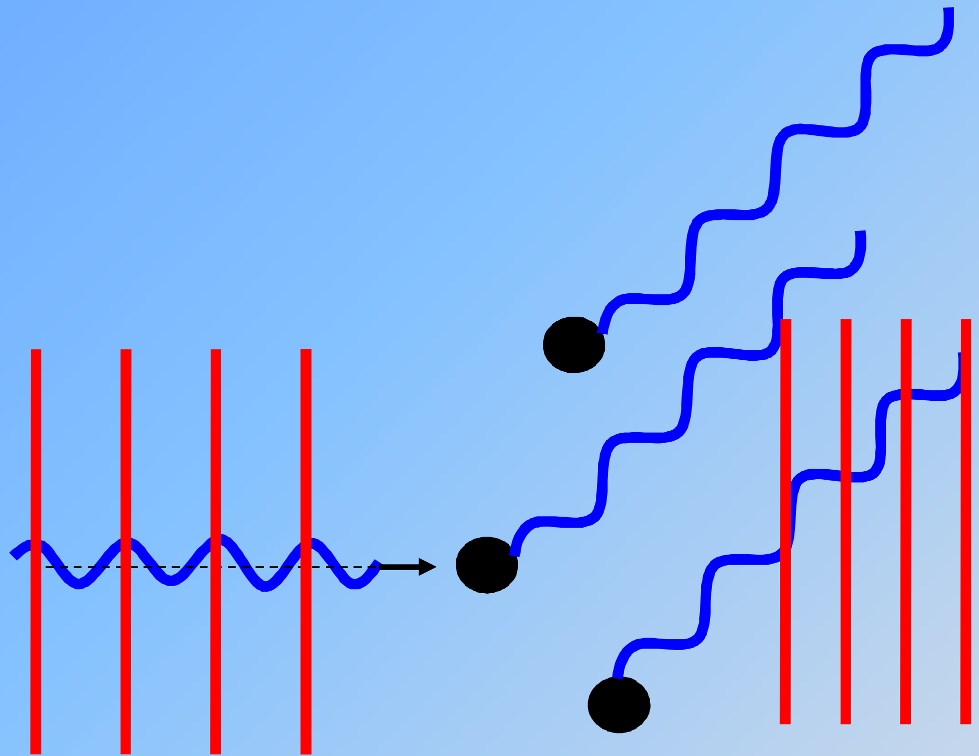
$$\overline{\left(\vec{e}^{\,*}_{\omega'}\vec{e}_{\omega}\right)^2} = \overline{\left(e^{*}_{\omega'}\right)_{\alpha}\left(e_{\omega}\right)_{\alpha}\left(e^{*}_{\omega'}\right)_{\beta}\left(e_{\omega}\right)_{\beta}} =$$

$$= \tfrac{1}{3}\delta_{\alpha\beta}\left(e_{\omega}\right)_{\alpha}\left(e_{\omega}\right)_{\beta} = \tfrac{1}{3}$$

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

Связь поляризуемости и релеевского рассеяния

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



Рассеянный свет когерентен падающему

$\Downarrow$

Теорема Эвальда-Озеена

$\Downarrow$

Рассеяние происходит при наличии флуктуаций

Резонансная флуоресценция

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

$$\Downarrow$$

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

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

Полное сечение резонансной флуоресценции

Суммируем по конечным состояниям

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

Усредняем по исходным состояниям

$$\overline{\left| \vec{d}_{si}\, \vec{e}_{\omega} \right|^2} = \tfrac{1}{3} \left| d_{si} \right|^2$$

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

Сечение резонансной флуоресценции через вероятности переходов

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

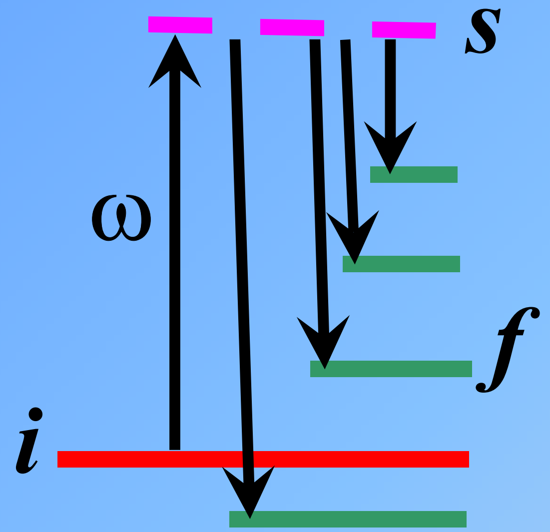
$$\sigma_{fi} = \frac{\pi\omega\omega'^3 c^2}{2\omega_{si}^3\omega_{fs}^3}\frac{W_{fs}W_{si}}{(\omega-\omega_{si})^2+(\gamma_s^2/4)}$$

$$\omega \approx \omega_{si}$$

$$\omega' \approx \omega_{fs}$$

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

Полное сечение неупругого резонансного рассеяния



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

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

Полное сечение упругого резонансного рассеяния

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

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

Точный резонанс

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

s – первое возбужденное состояние

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

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

Нерезонансное упругое рассеяние

$$\hbar\omega >> \Delta E_{перв.возб.\to 1}$$

$$\left|d_{s1}\right|^2 \approx e^2 a^2 \qquad \hbar\omega \approx \frac{e^2}{a}$$

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

Правило сумм сил осцилляторов

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

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

Томсоновское рассеяние

Нерезонансное упругое рассеяние

$$\hbar\omega << \Delta E_{перв.возб.\to 1}$$

$$\left|d_{s1}\right|^2 \approx e^2 a^2 \qquad \hbar\omega_{s1} \approx \frac{e^2}{a}$$

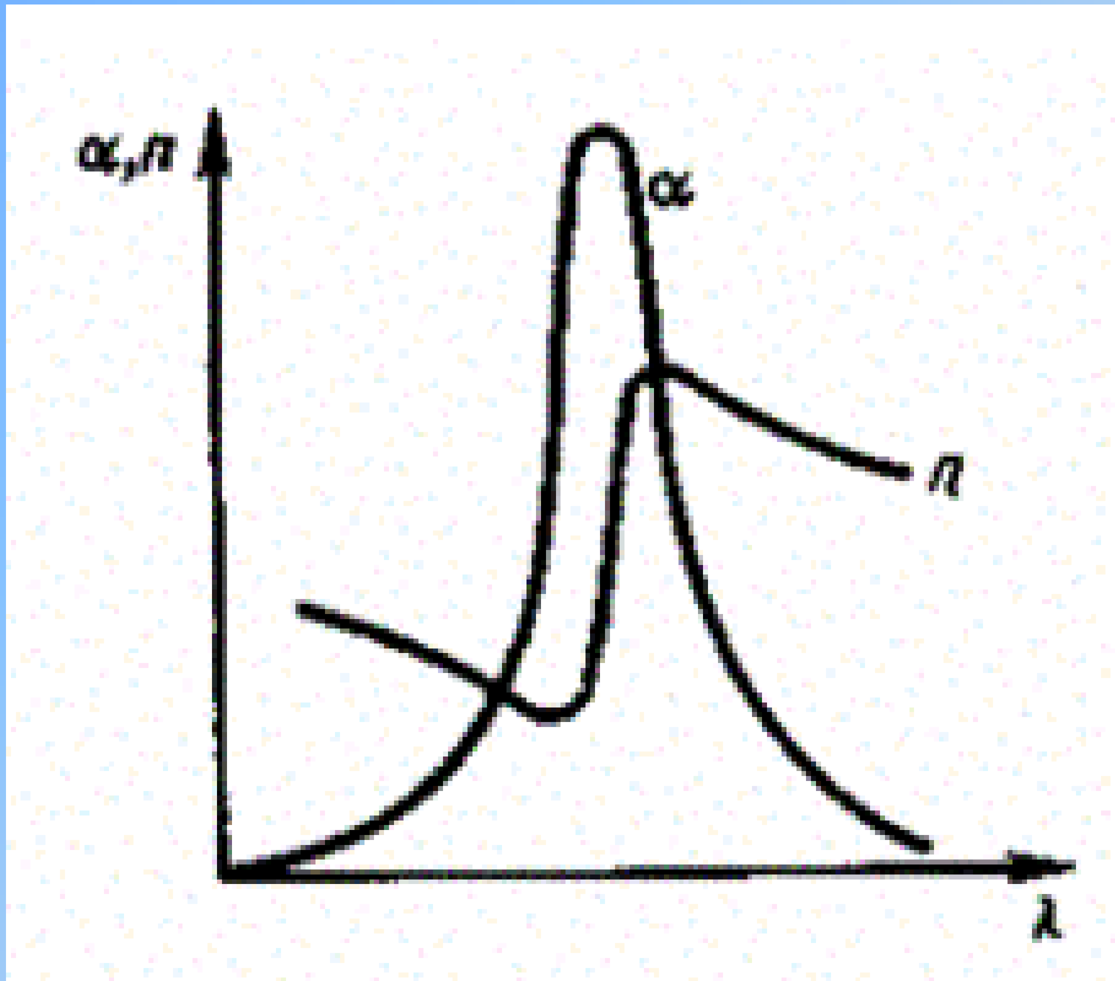
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \approx \frac{\omega^4}{\hbar^2 c^4}\frac{e^4 a^4}{\omega_{si}^2} \approx \alpha^4 a^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{si}}\right)^4 \approx Z^2 r_e^2 \left(\frac{\omega}{\omega_{si}}\right)^4$$

Атом водорода

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

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

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



Вынужденное комбинационное рассеяние

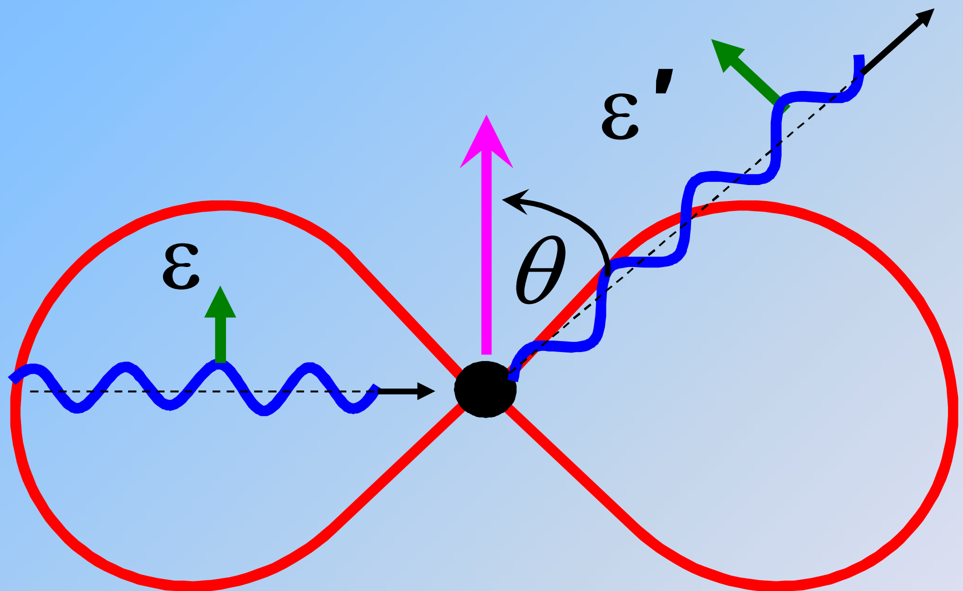
Было:

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

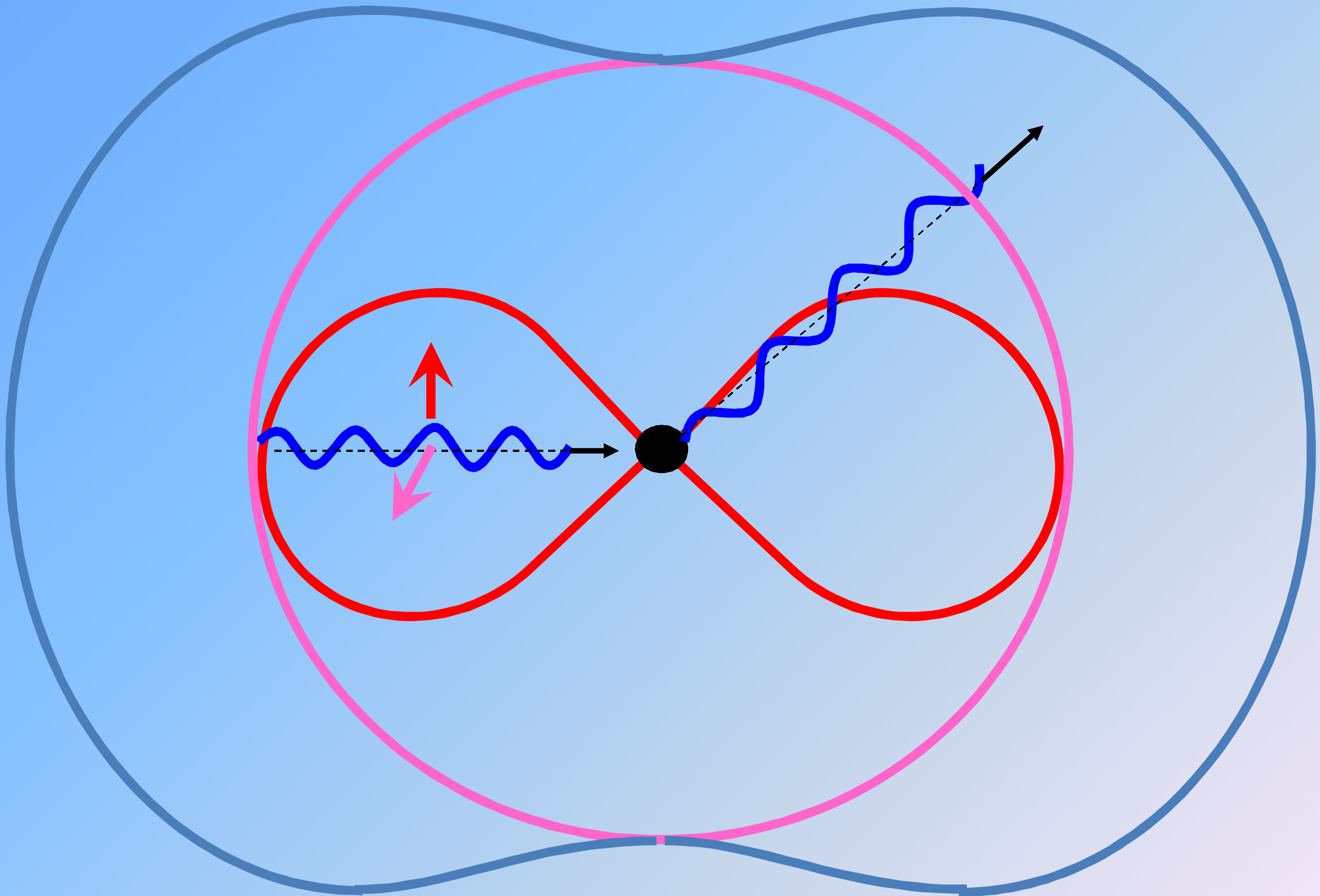
$$W_{fi}^{вкр}=W_{fi}^{спонт}N_{\omega'}\propto J_{1}J_{2}$$

Индикатрисса рассеяния (поляризованный свет)

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



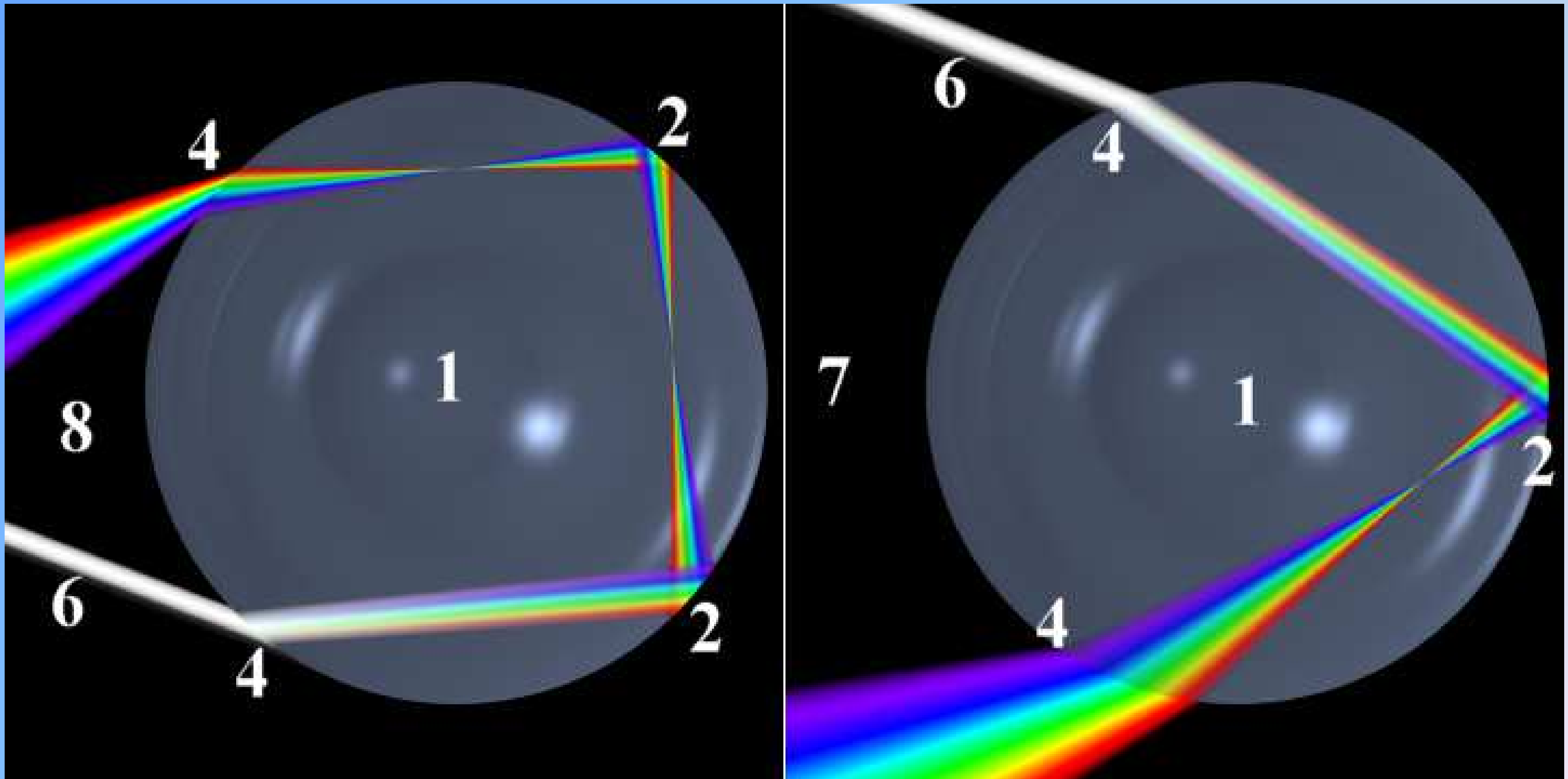
Индикатрисса рассеяния (неполяризованный свет)



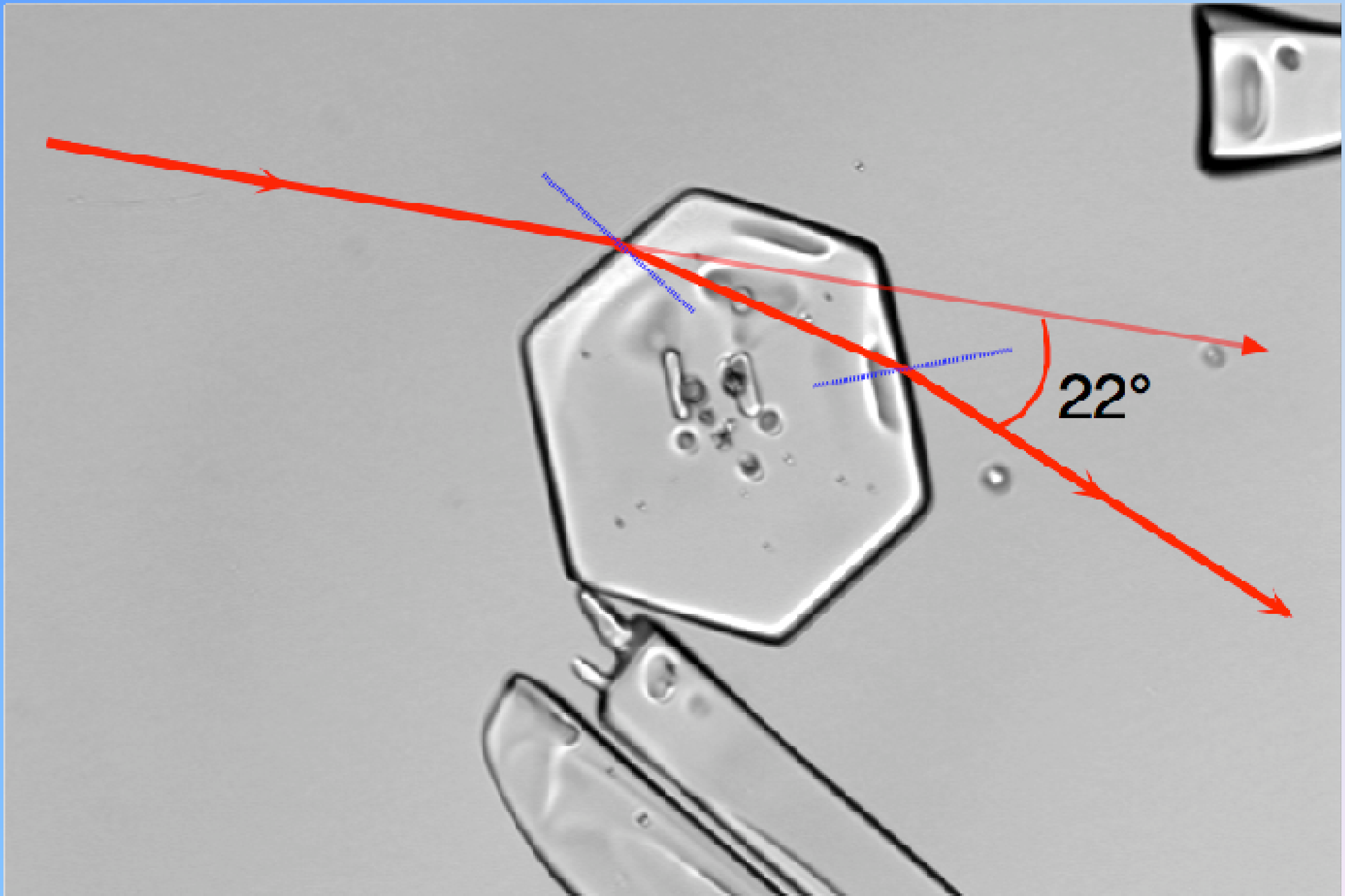
Примеры рассеяния

Сравнение фотографий, полученных с помощью поляризационного фильтра и без

Радуга

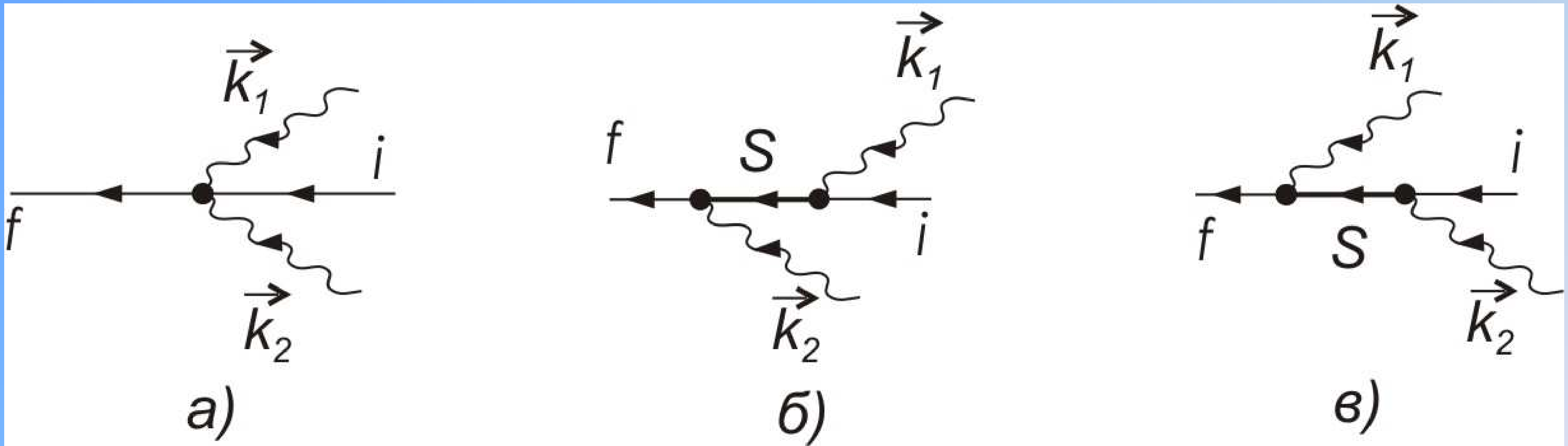

4
2
1
8
6
2
4
6
4
7
1
2
4

Гало


22°

Инверсионный след

Двухфотонное поглощение



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

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

$$\vec{J}_1 = \vec{k}\,\hbar n_\omega c^2$$

– поток мощности через единицу поверхности

$$\frac{kc}{\omega} = n + i\chi$$

– дисперсионное соотношение

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

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

Вероятность двухфотонного поглощения

Учет конечной ширины уровней

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

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

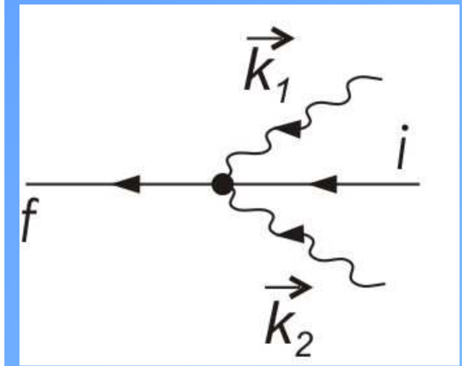
Вероятность двухфотонного излучения

$$\left|d_{fi}\right|^2 \approx e^2 a^2 \qquad \hbar\omega_{fi} \approx \frac{e^2}{a}$$

$$W_{fi} \approx \frac{1}{\hbar}\frac{\left(Ad\,\omega/c\right)^4}{\left(\hbar\omega\right)^2}\delta(\Delta E)Vd^3k_1Vd^3k_2$$

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

Вероятность двухфотонного излучения



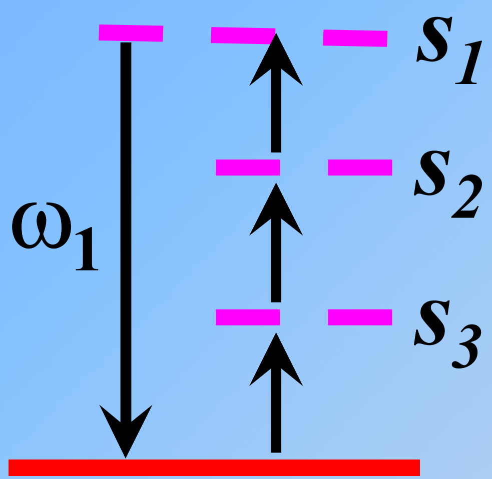
$$\hat{V} = \frac{e^2}{2mc^2}\hat{\vec{A}}^2$$

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

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

$$W_{fi} \approx \omega\alpha^6\left|\left\langle e^{ikr}\right\rangle_{fi}\right|^2 \approx \omega\alpha^{10}$$

Генерация третьей гармоники

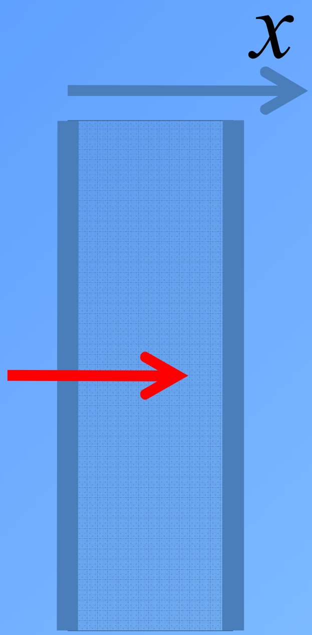


$$V_{fi} = \sum \frac{V_{fs_1} V_{s_1 s_2} V_{s_2 s_3} V_{s_3 i}}{(E_i - E_{s_1})(E_i - E_{s_2})(E_i - E_{s_3})}$$

Учет когерентности

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

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



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

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

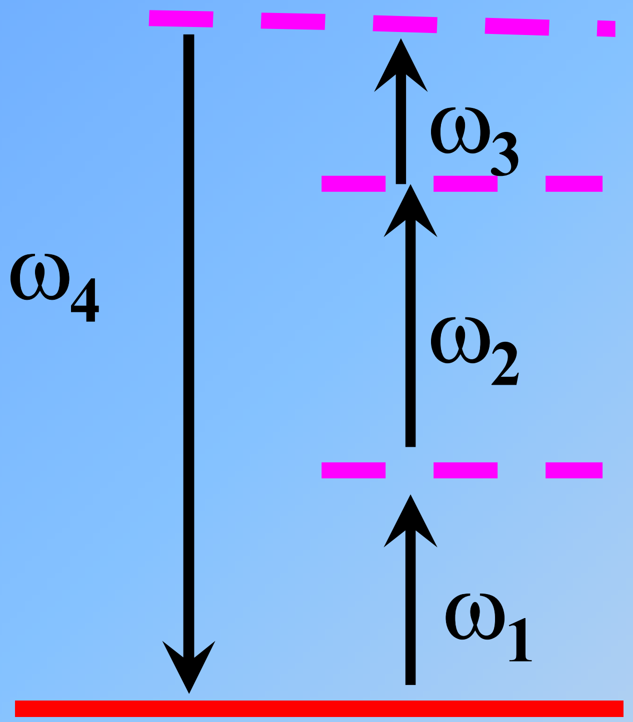
$$\boxed{\begin{array}{l}\Delta k = 0,\ \Delta\omega = 0 \ => \\ 3k_1 = k_3,\ \ 3\omega_1 = \omega_3\end{array}}$$

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

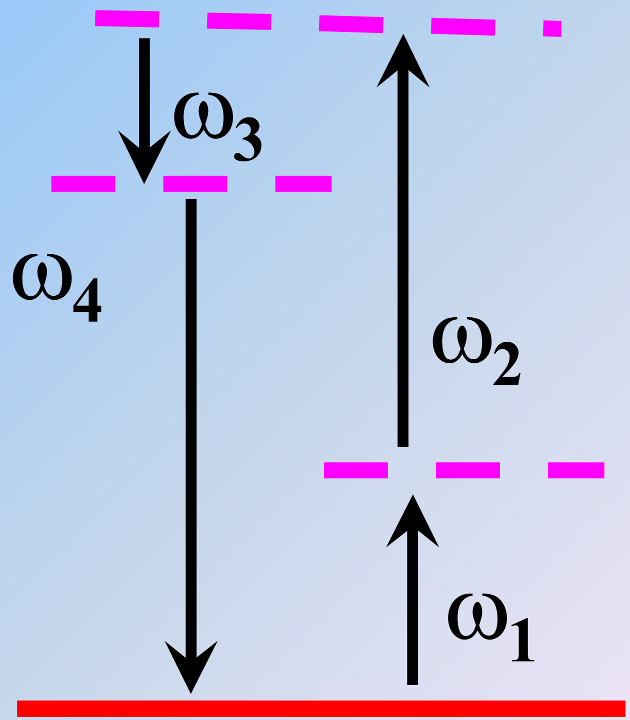
$$\boxed{J_3 = \frac{(2\pi)^3}{c^8\hbar^6}\left(\frac{N}{V}\right)^2 \left|\widetilde{V}_3\right| \frac{\omega_1^3\omega_3^3 \sin^2\left(\frac{1}{2}\Delta kL\right)}{k_3 k_1^3 (\Delta k)^2} J_1^3}$$

Другие четырёхфотонные процессы

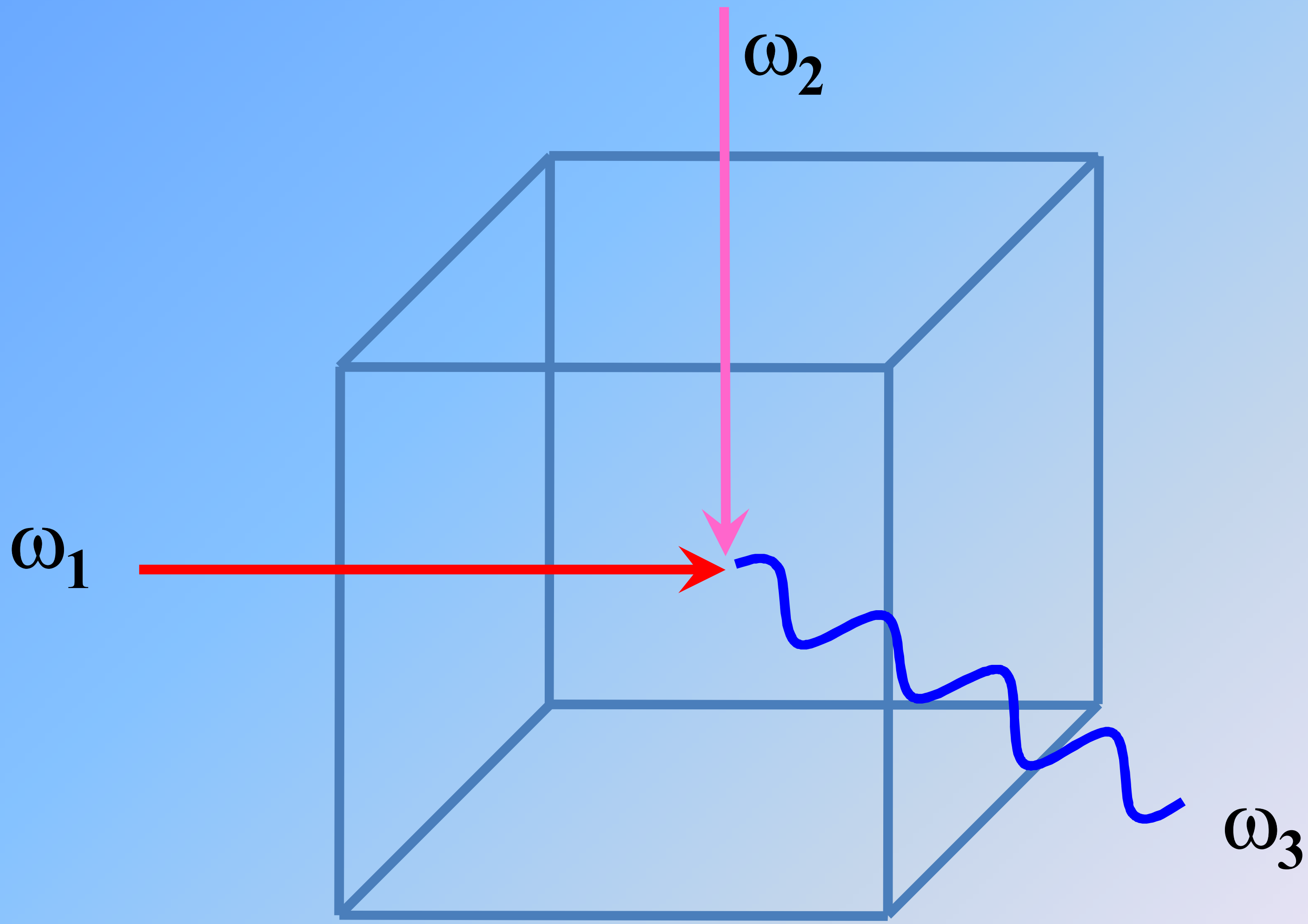
Трёхфотонное преобразование



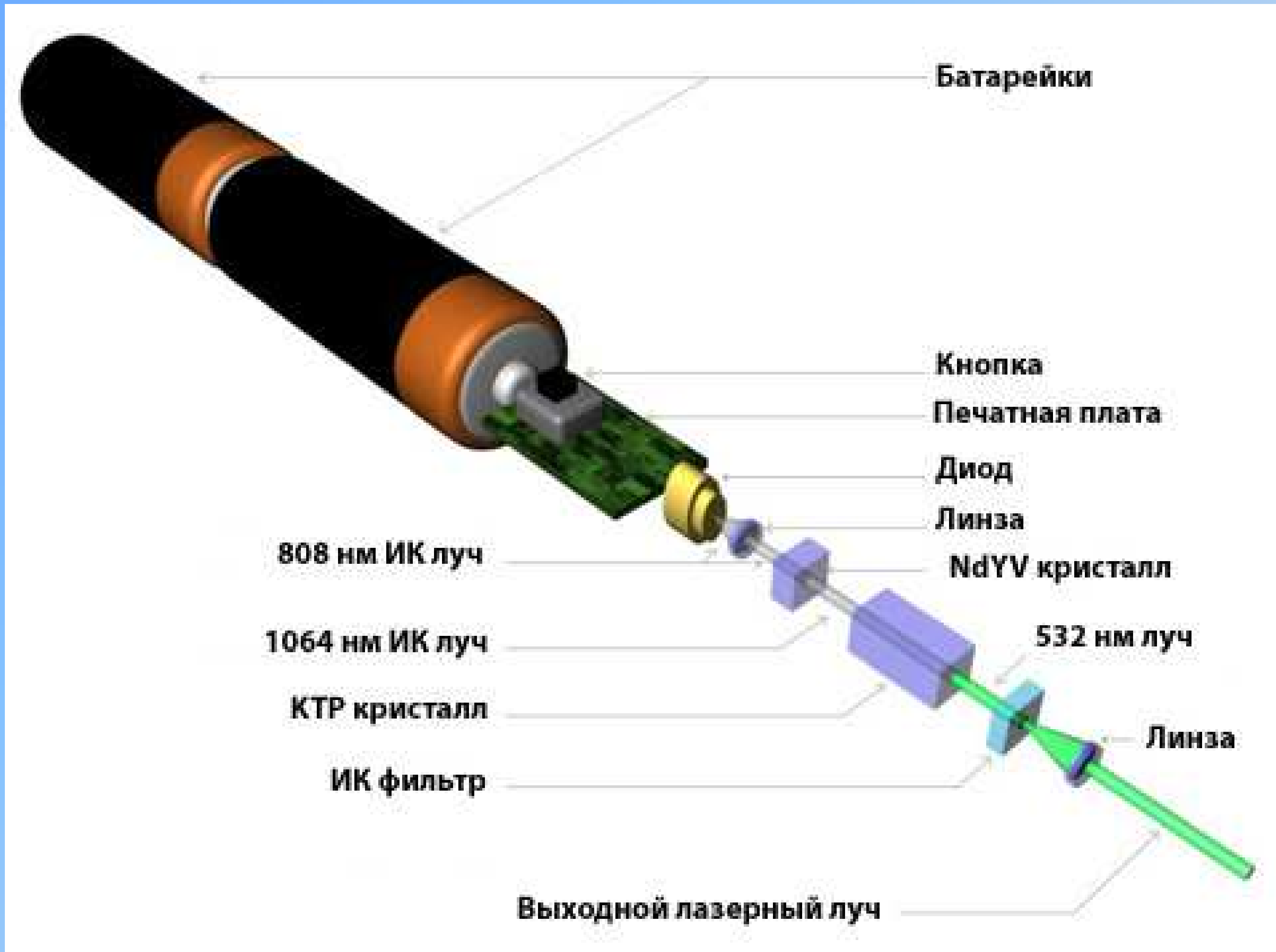
Комбинационный резонанс



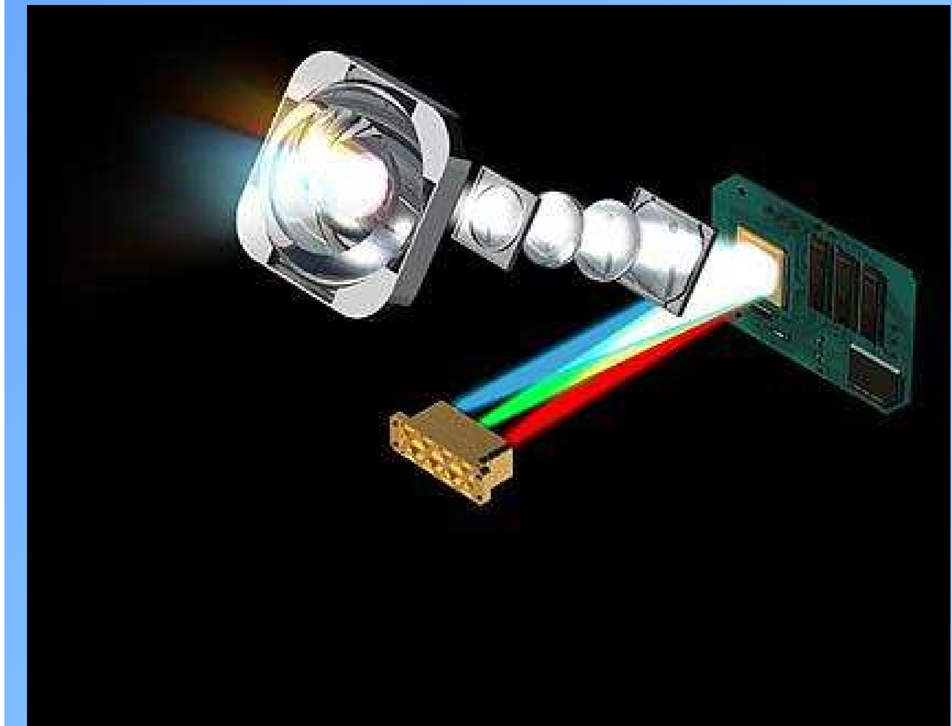
Трёхмерное изображение

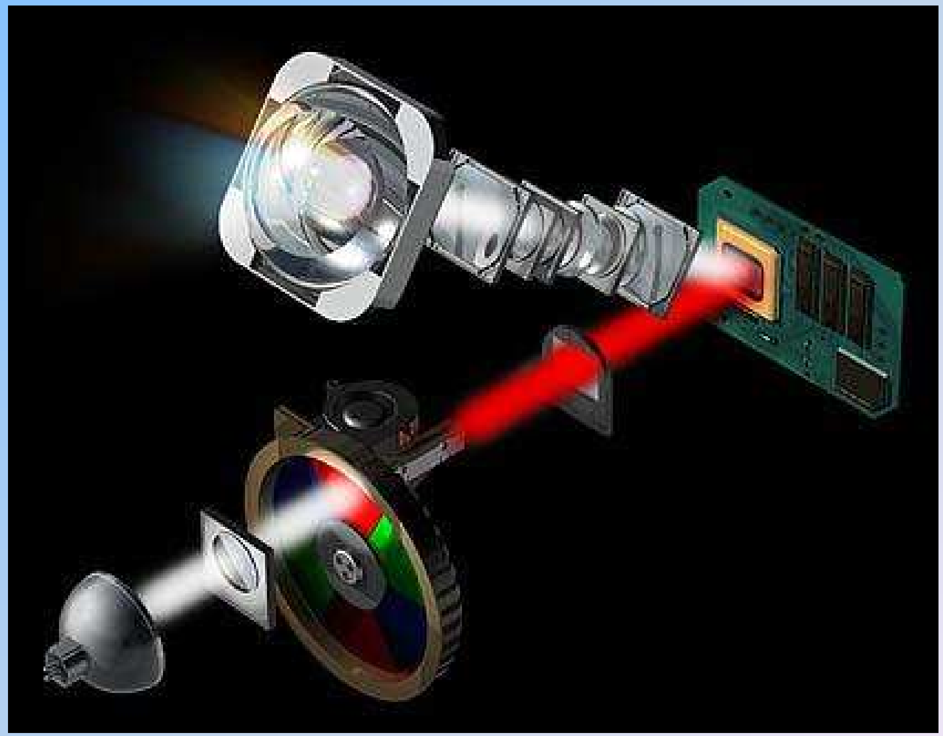


Коротковолновые лазеры

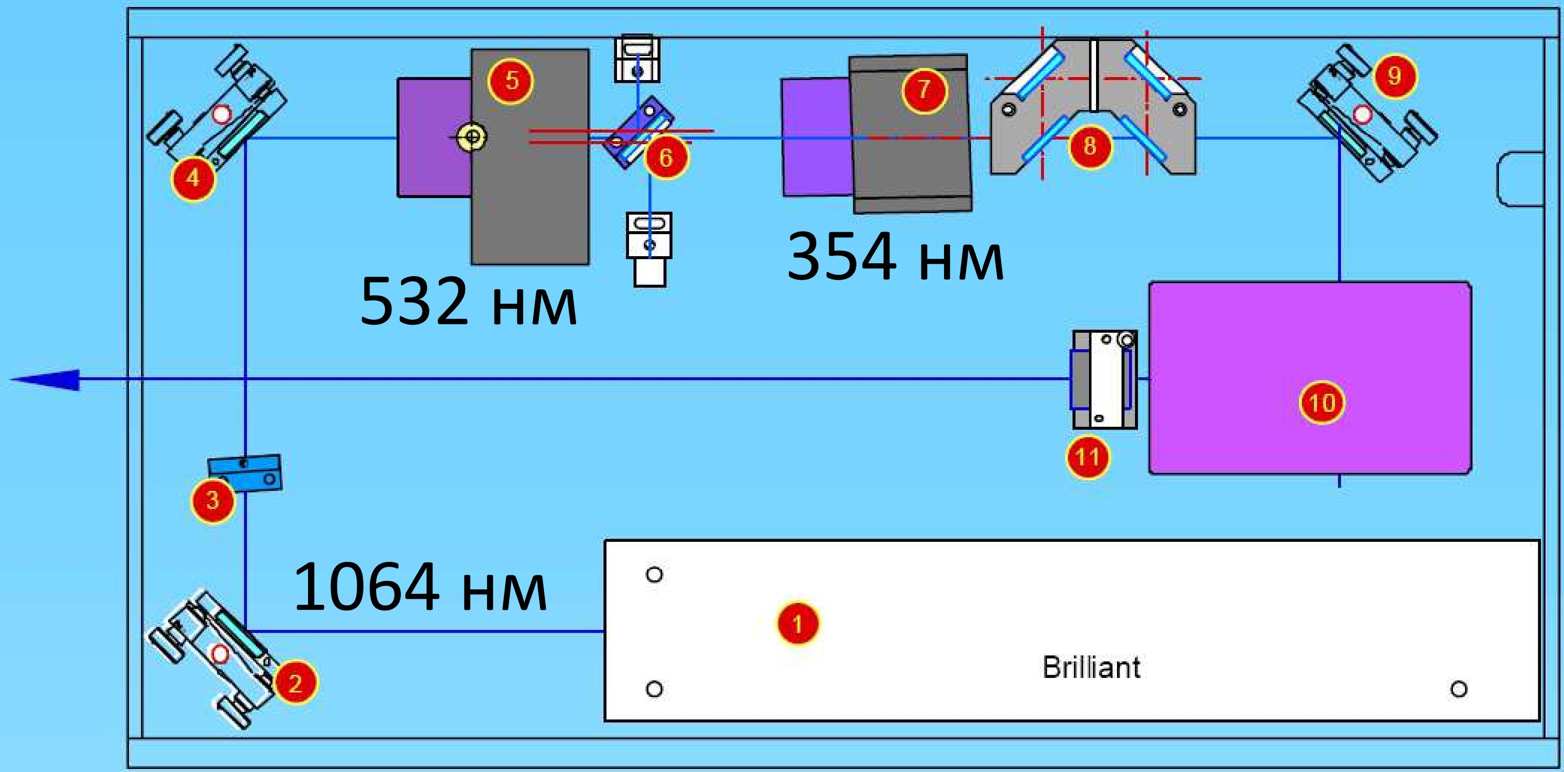


Коротковолновые лазеры





Перестраиваемые лазеры



VIBRANT LD 355 II. Schematic Lavout

1	Pump Laser, Brilliant (B)	7	Third Harmonic Generator (THG)
2	Steering Mirror	8	Wavelength separation Mirrors
3	Waveplate	9	Steering Mirror
4	Steering Mirror	10	OPO model LD 355 II
5	Second Harmonic Generator (SHG)	11	Polarizer
6	Rejecting Mirror		

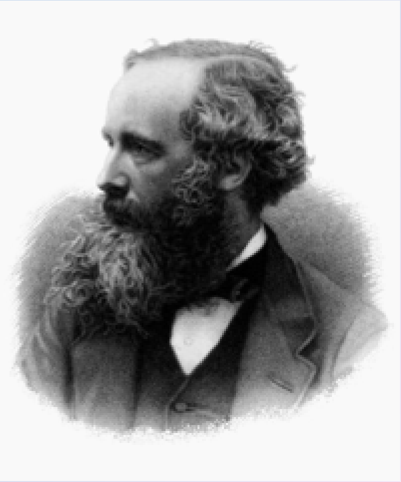
Движение атомов в резонансных световых полях

- 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

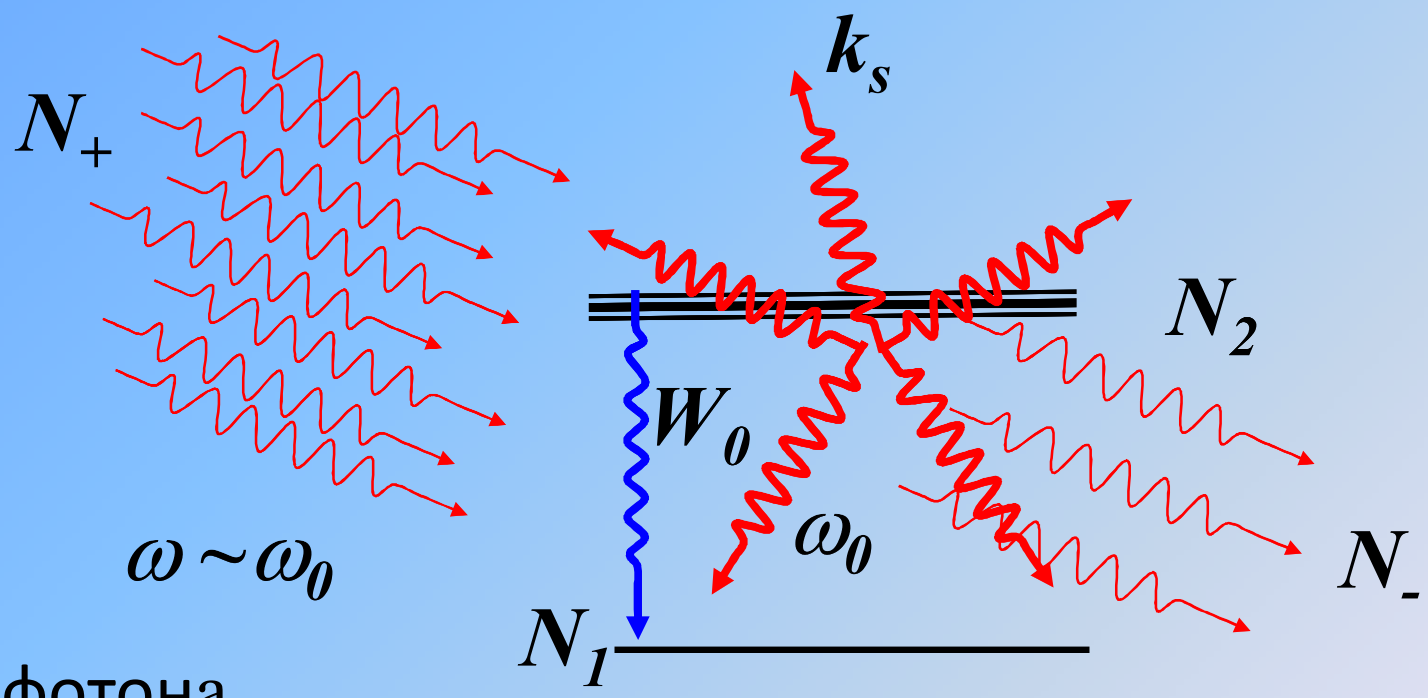
- 1909 г. – **Альберт Эйнштейн**

  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.

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

Обмен импульсом между атомом и фотоном

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

Обмен энергией между атомом и фотоном

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

(+ поглощение, – испускание)

Пример резонансного взаимодействия

Атом **Na**

λ= 5890 Å (линия желтого дублета)

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

$$\Delta \upsilon = \frac{\Delta p}{M} \sim \frac{\hbar k}{M} \sim 3\,\frac{см}{с}$$

$$\upsilon_{тепл(300^\circ K)} \sim 5 \cdot 10^4\,\frac{см}{с}$$

Определение средней силы на атом

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

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

поглощение

вынужденное излучение

спонтанное излучение

Спонтанное излучение пространственно хаотично

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

Средняя сила, действующая на атом

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

Сечение поглощения фотона

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

В центре линии

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

Вероятность поглощения и вынужденного излучения

$$W_B = \sigma_{21} n_ф c$$

$n_ф$ – плотность падающих фотонов

пусть статвеса равны $g = 1$

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

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

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

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

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

Учет теплового движения

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

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

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

Перейдем в лабораторную систему отсчета

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

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

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

при $\Omega - \vec{k}\vec{\upsilon} = 0$ и $G >> 1$

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

Интервал резонансных скоростей атомов

$$\left(|\Omega| - \gamma_s\right)/k \le \upsilon_z \le \left(|\Omega| + \gamma_s\right)/k$$

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

Определение характерного времени резонансного взаимодействия

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

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

$$\Delta \upsilon_z \sim \frac{\gamma_s}{k} \sim \frac{\gamma}{k} \left(1 + 2G\right)^{1/2}$$

$$\Delta \upsilon_z \sim \frac{F}{M} \tau_f \sim \gamma \upsilon_r \frac{G}{1 + 2G} \tau_f$$

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

Эффективность воздействия фотона на атом

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

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

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

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

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

$$\upsilon_z \sim 10^4\,\frac{см}{c} \;\Rightarrow\; G \sim 10^2$$

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

Деформация функции распределения

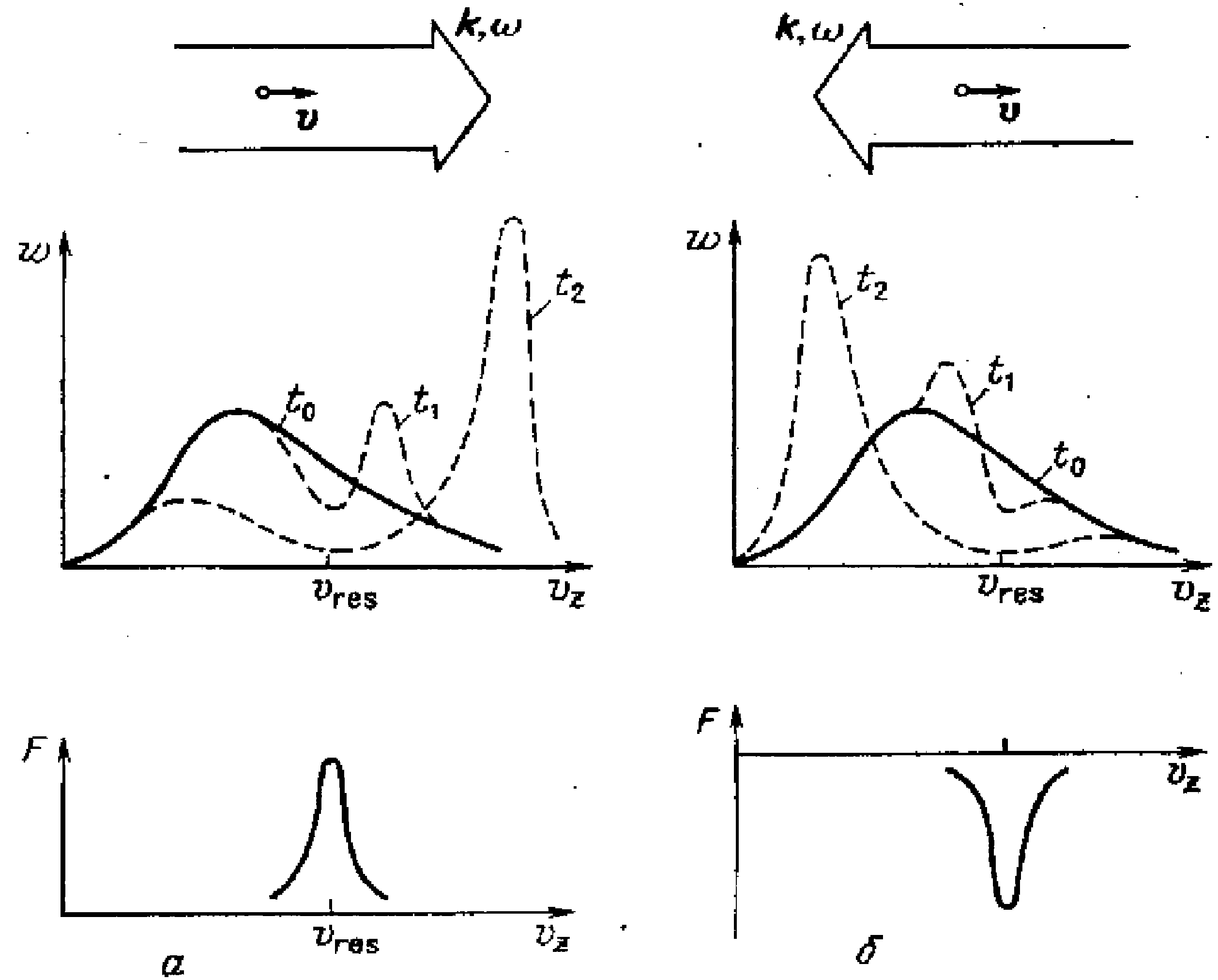
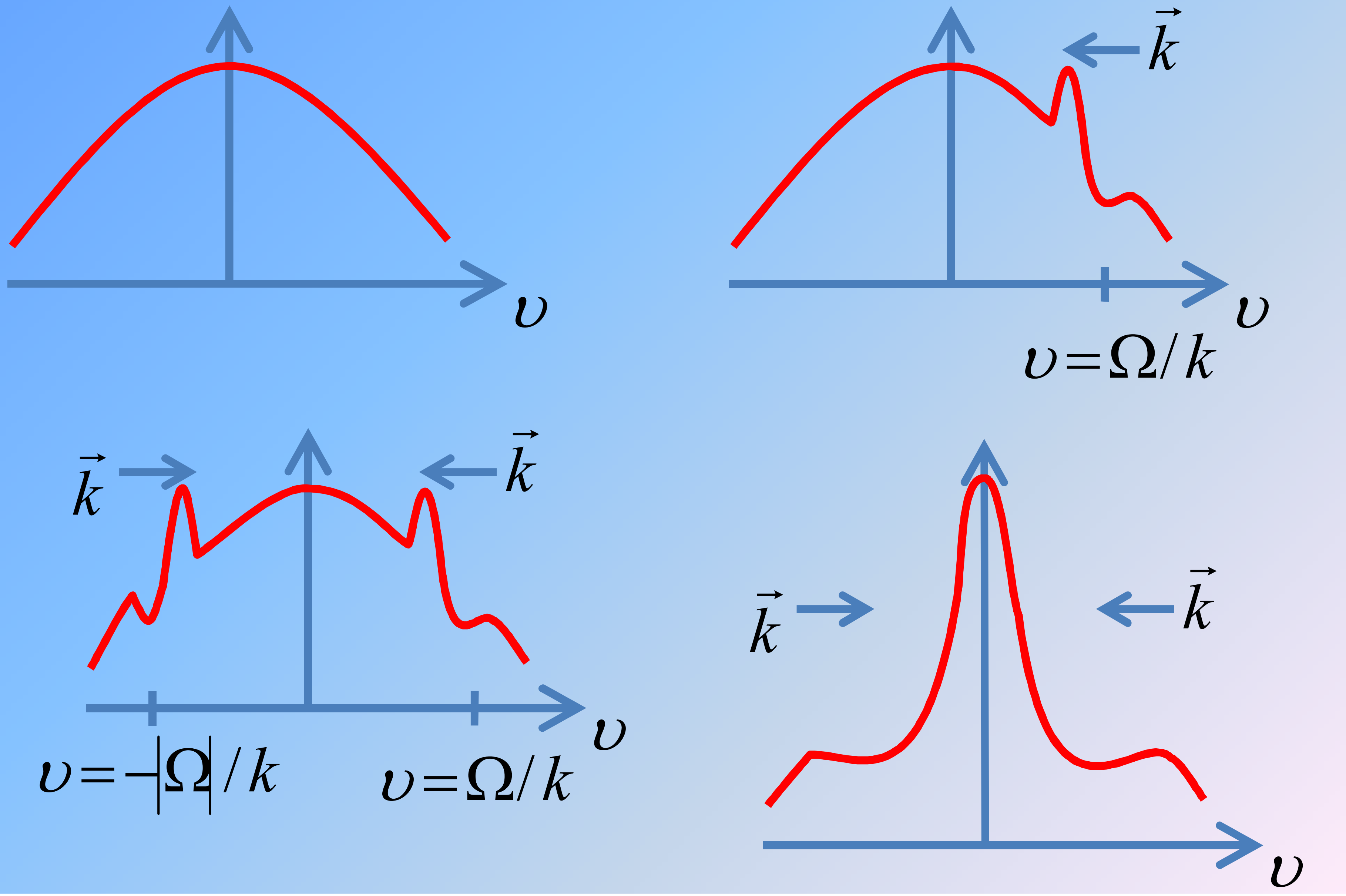
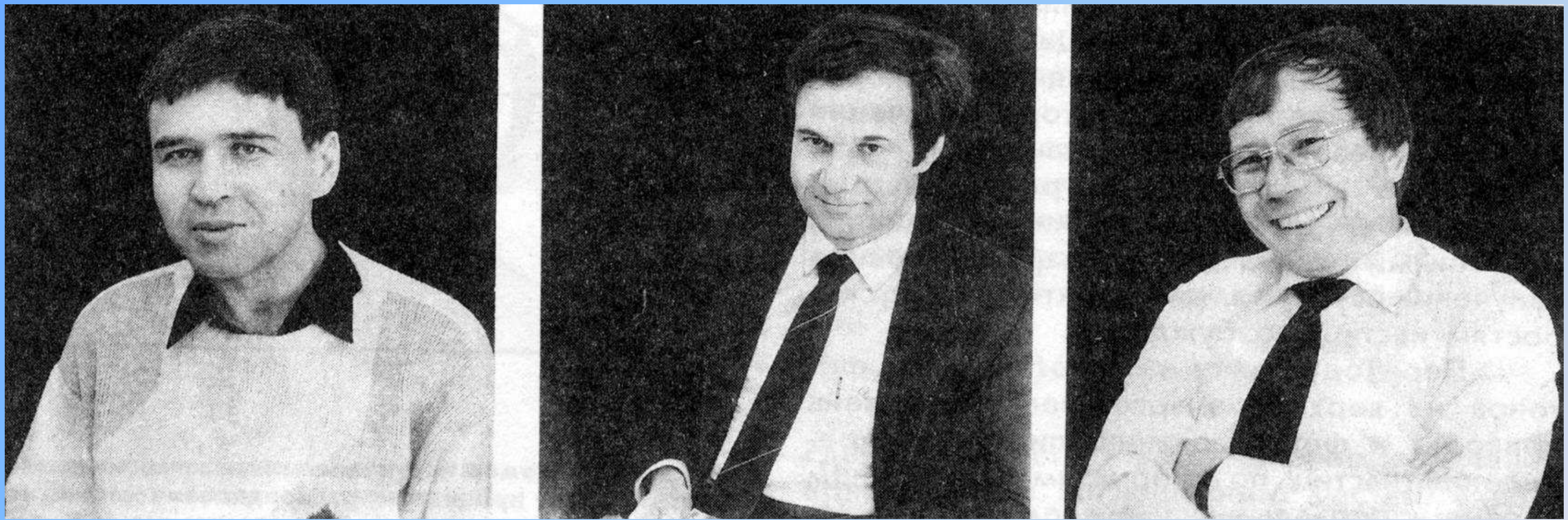


Рис. 5.1. Качественный характер деформации скоростного распределения $w(v_z)$ ансамбля атомов и зависимость силы светового давления F от проекции скорости v_z ($t_0 < t_1 < t_2$)

Лазерное охлаждение



Светоиндуцированный дрейф (СИД)



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

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
- $\rho(\upsilon_z)$ – функция распределения резонансных атомов по скоростям

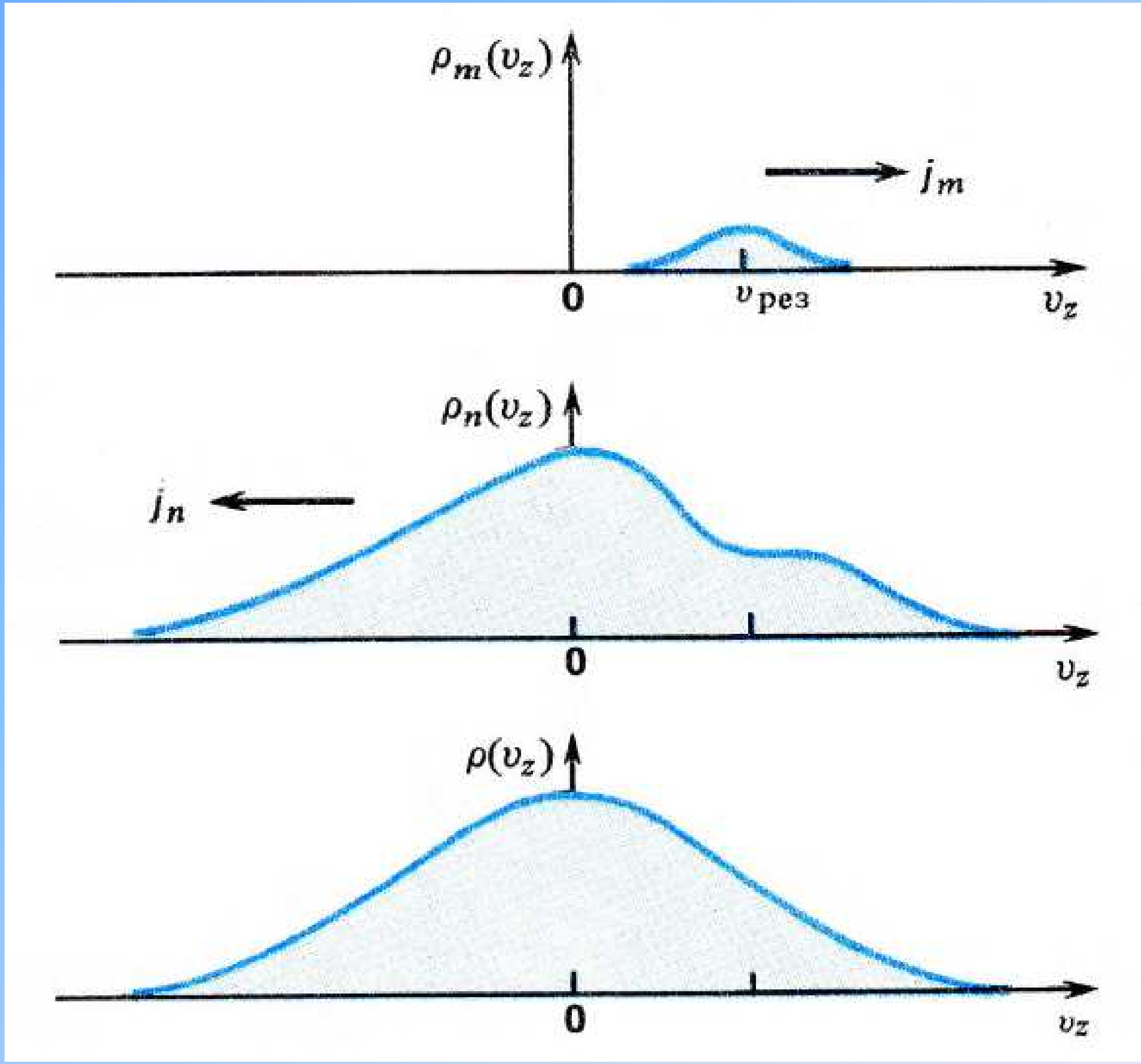
Резонансная скорость

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

Эффективный интервал скоростей

$$\Delta\upsilon \sim \Gamma / k$$

Деформация функции распределения атомов по скоростям



Потоки возбужденных и невозбужденных атомов

$$J_m = \int \upsilon_z \rho_m(\upsilon_z) d\upsilon_z$$

$$J_n = \int \upsilon_z \rho_n(\upsilon_z) d\upsilon_z$$

в отсутствие столкновений $J_m = J_n$

Сила сопротивления потоку

$$F^{m}_{трен} = -M\nu^{m}_{столк} J_{m}$$

$$F^{n}_{трен} = -M\nu^{n}_{столк} J_{n}$$

$$\nu^{n}_{столк} \neq \nu^{m}_{столк}$$

$$\Downarrow$$

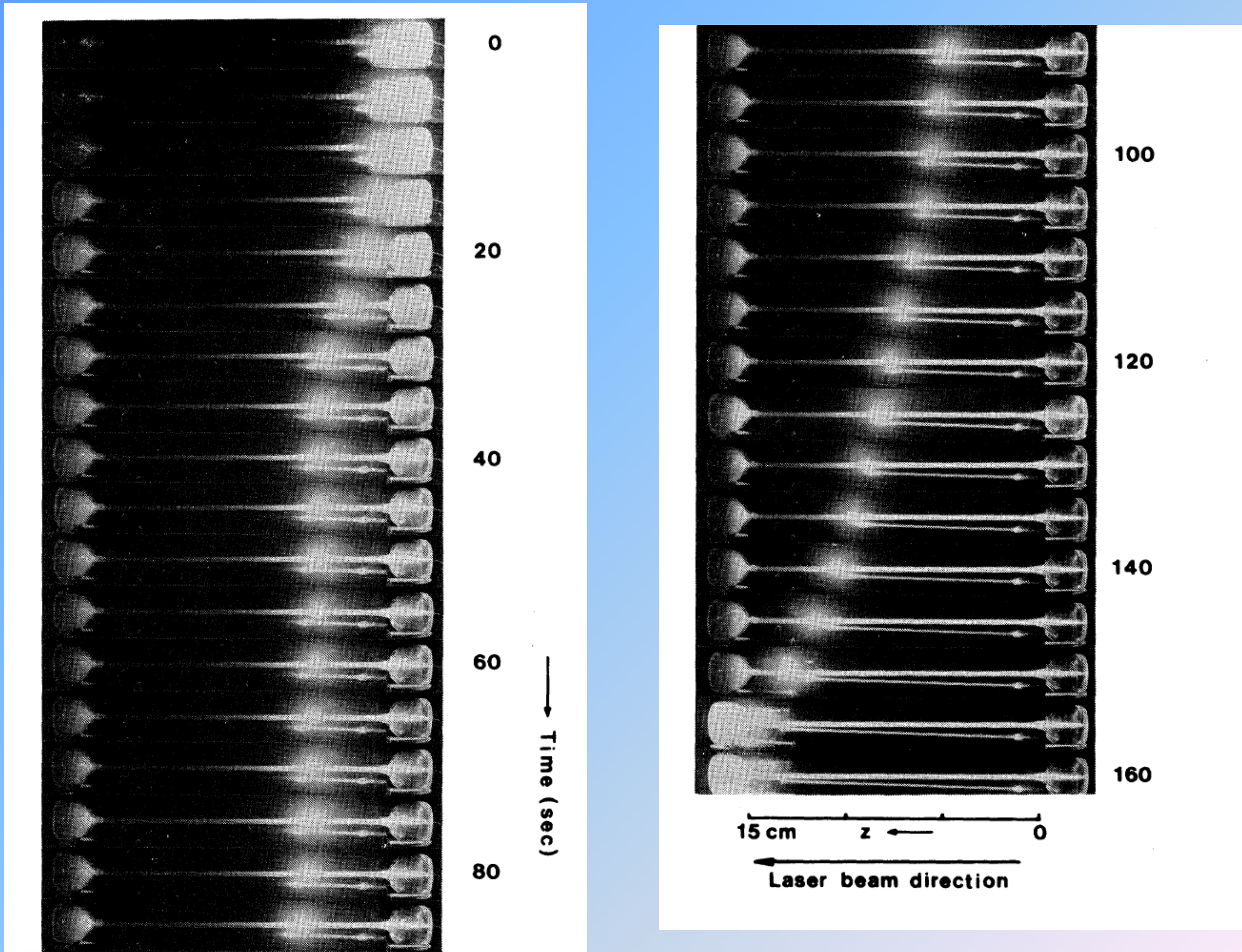
$$F = F^{m}_{трен} + F^{n}_{трен}$$

Светоиндуцированный дрейф

$$F = M\left[\left(\nu^{m}_{столк} - \nu^{n}_{столк}\right)J_{m} - \nu^{n}_{столк}J\right]$$

$$J = \frac{\left(\nu^{m}_{столк} - \nu^{n}_{столк}\right)}{\nu^{m}_{столк}}J_{m}$$

$$\upsilon_{дрейфа} = \frac{\left(\nu^{m}_{столк} - \nu^{n}_{столк}\right)}{\nu^{m}_{столк}}\frac{N_{n}}{N}\upsilon_{n}$$


0
20
40
60
80
Time (sec)
100
120
140
160
15 cm
z
0
Laser beam direction

Демон Максвелла