

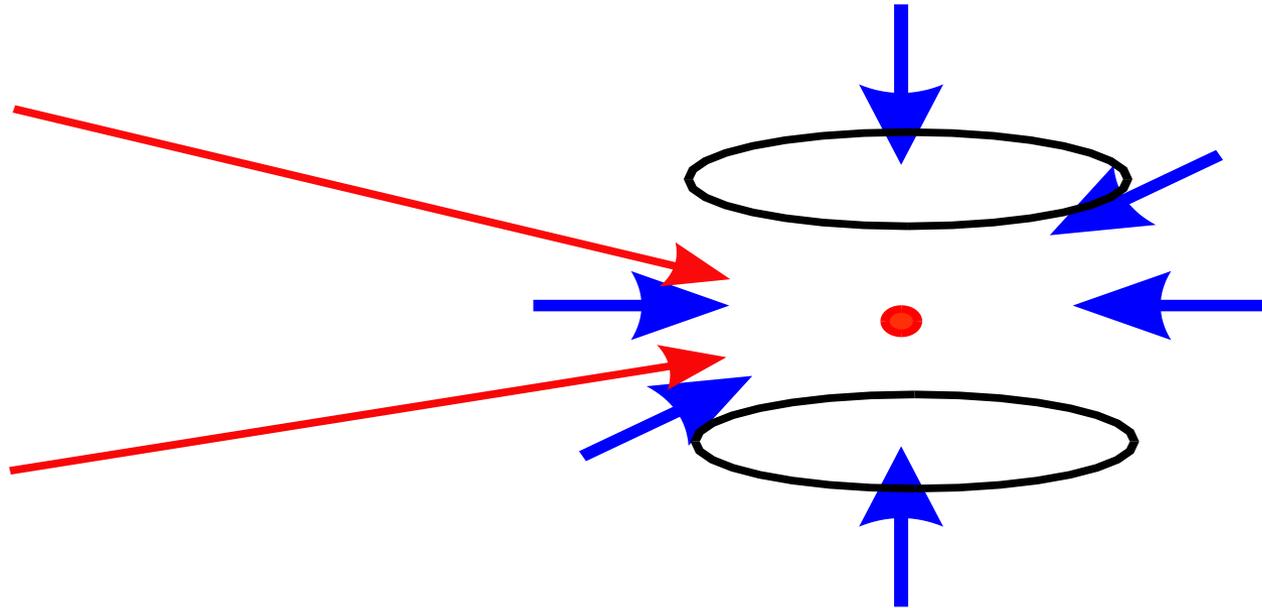
# **Поляризационные эффекты в резонансах индуцированных отдачей**

*Д.Б. Лазебный, Д.В. Бражников,*

*А.В. Тайченачев, В.И. Юдин*

ИЛФ СО РАН

# Схема наблюдения РИО

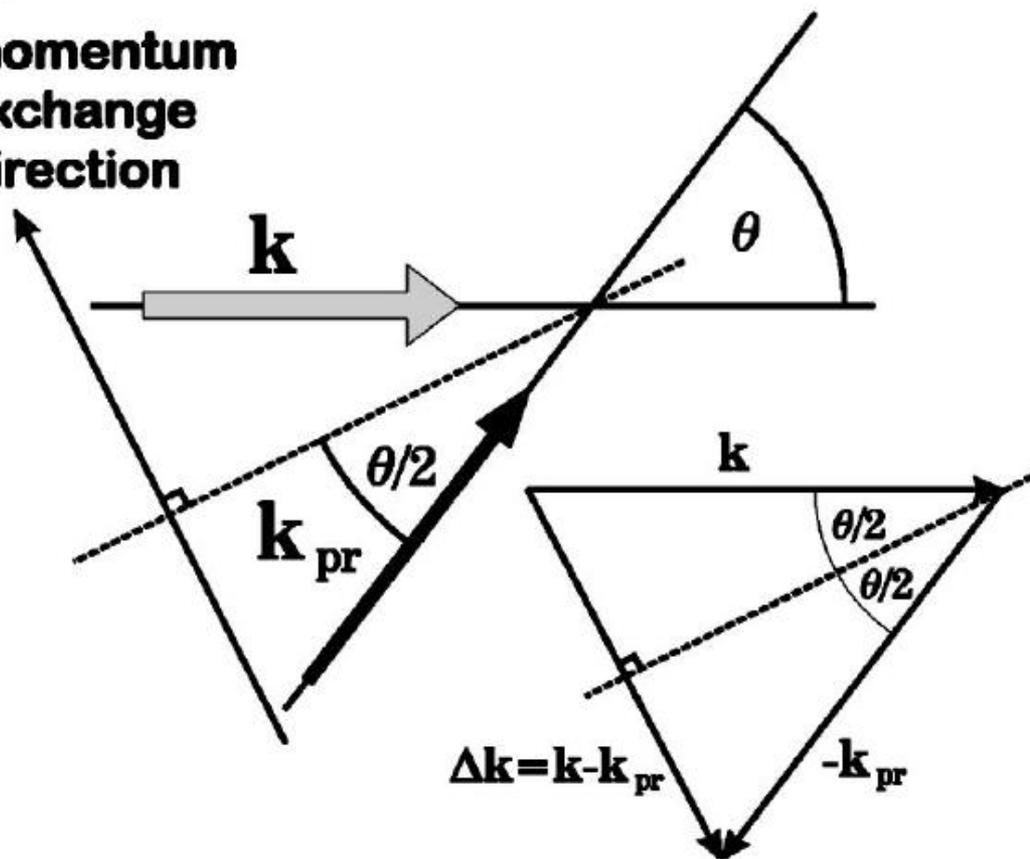


Основная задача – определение зависимости амплитуды резонанса от поляризации полей.

# Метод резонансов, индуцированных отдачей(РИО)

a)

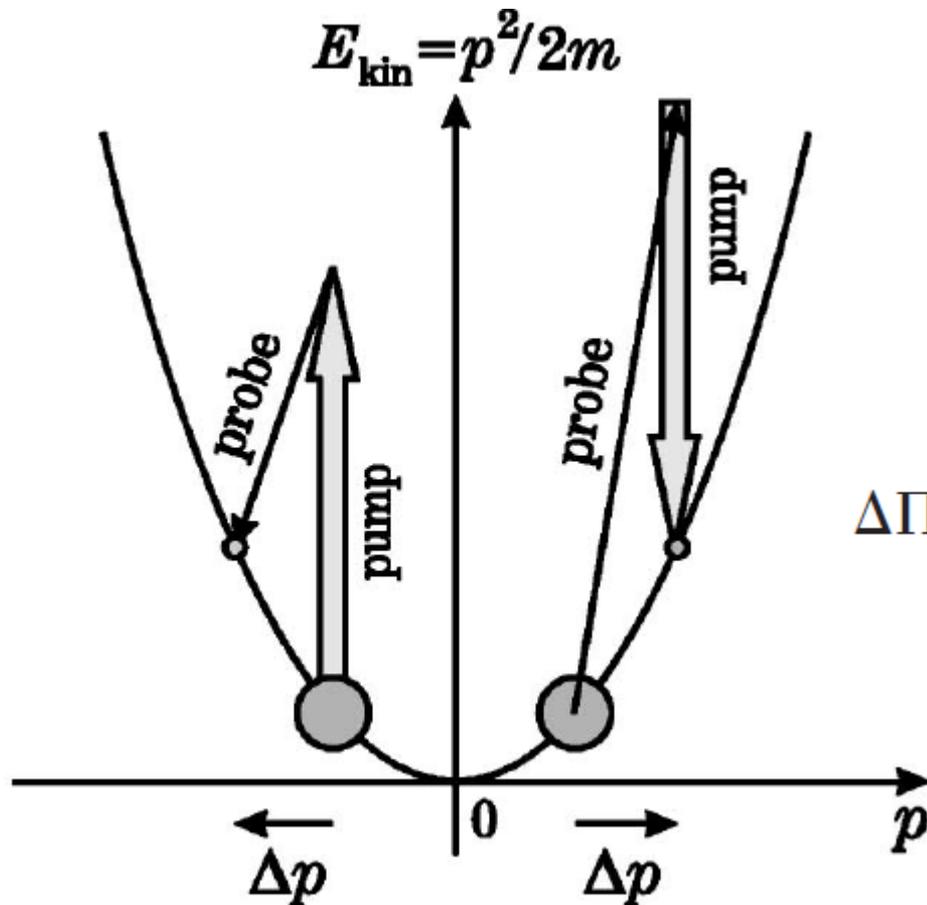
momentum  
exchange  
direction



$$\Delta p = -2\hbar k \sin \frac{\theta}{2}$$

# Метод резонансов, индуцированных отдачей(РИО)

**b)**



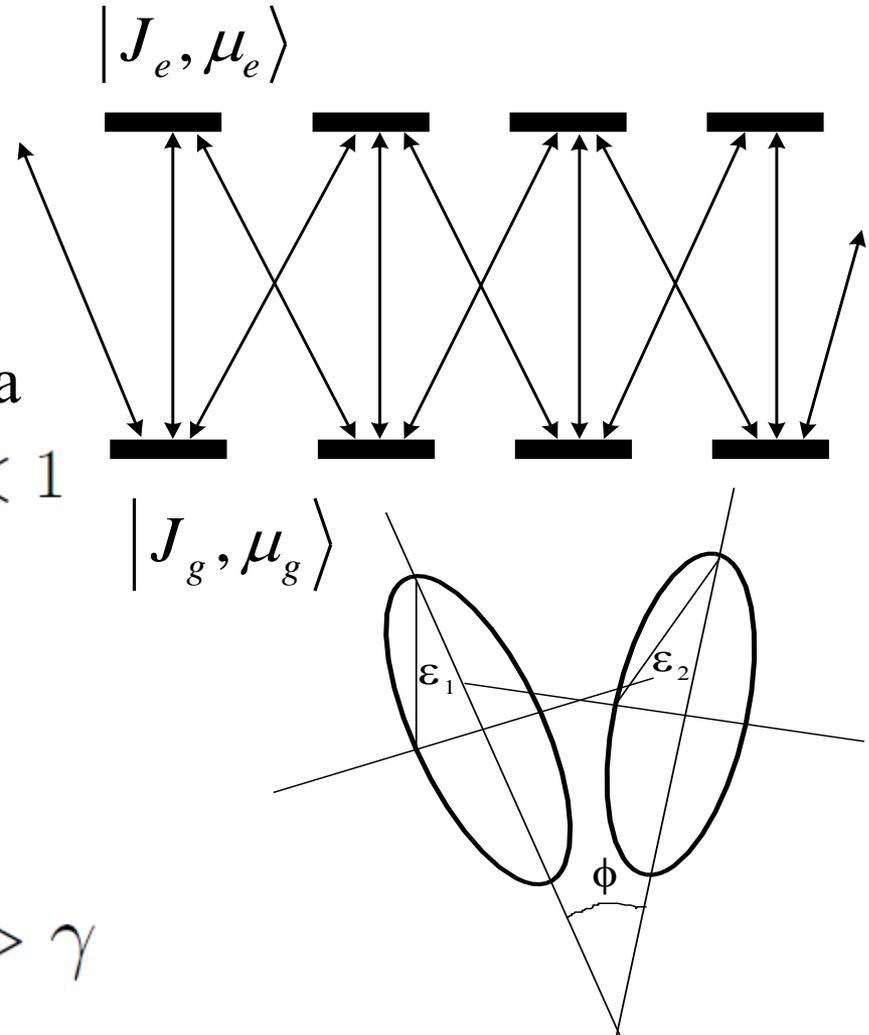
$$\delta_{\text{res}} = -\frac{2k}{m} \left( \hbar k \sin \frac{\theta}{2} - p \right) \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\Delta \Pi(p_{\text{final}}, p_{\text{initial}}) = \Pi(p + \Delta p) - \Pi(p)$$

# Основные приближения

- Замкнутый дипольный переход
- Учет эффектов отдачи
- Малое насыщение перехода  

$$S_{1,2} = \Omega_{1,2}^2 / (\gamma^2 / 4 + \delta_L^2) \ll 1$$
- Низший порядок по обоим полям
- $kv_0 \ll \gamma$  – холодные атомы
- $|\omega_1 - \omega_2| \ll \gamma$  – субнат. рез-сы
- Большая отстройка  $\delta_L \gg \gamma$



# Основные уравнения

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\mathbf{p} \cdot \nabla_{\mathbf{r}}}{m} \right) \hat{\rho}(\mathbf{r}, \mathbf{p}) = & -i \left[ \hat{H}_0, \hat{\rho}(\mathbf{r}, \mathbf{p}) \right] - \\ & -i \left( \hat{V}_{DE}(\mathbf{r} + i\hbar \nabla_{\mathbf{p}}/2, t) \hat{\rho}(\mathbf{r}, \mathbf{p}) - \hat{\rho}(\mathbf{r}, \mathbf{p}) \hat{V}_{DE}(\mathbf{r} - i\hbar \nabla_{\mathbf{p}}/2, t) \right) - \\ & - \frac{\gamma}{2} \{ \hat{\Pi}_e, \hat{\rho}(\mathbf{r}, \mathbf{p}) \} + \beta \gamma \frac{3}{2} \left\langle \sum_{s=1,2} \left( \hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_s(\mathbf{k}) \right)^\dagger \hat{\rho}(\mathbf{r}, \mathbf{p} + \hbar \mathbf{k}) \left( \hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_s(\mathbf{k}) \right) \right\rangle_{\Omega_{\mathbf{k}}} \end{aligned}$$

Оператор взаимодействия в дипольном приближении:

$$\hat{V}_{DE}(\mathbf{r}, t) = \hat{V}(\mathbf{r}, t) + \hat{V}^\dagger(\mathbf{r}, t)$$

$$\hat{V}(\mathbf{r}, t) = \hat{V}_1 \exp(-i(\omega_1 t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r})) + \hat{V}_2 \exp(-i(\omega_2 t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}))$$

$$\hat{V}_i = \Omega_i (\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_i); \quad \langle F_e, \mu_e | \hat{D}_q | F_g, \mu_g \rangle = C_{F_g, \mu_g; 1, q}^{F_e, \mu_e}$$

Оптическая когерентность:

$$\hat{\rho}_{eg}(\mathbf{r}, \mathbf{p}) = \hat{\rho}_{eg}^{(1)}(\mathbf{r}, \mathbf{p}) \exp(-i(\omega_1 t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r})) + \hat{\rho}_{eg}^{(2)}(\mathbf{r}, \mathbf{p}) \exp(-i(\omega_2 t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}))$$

Поглощение пробного поля от частоты:

$$A_1 = -\text{Im} \{ \text{Tr} \{ \hat{V}_1 \hat{\rho}_{ge}^{(1)}(\mathbf{r}, \mathbf{p}) \} \}$$

# Сигнал РИО свободных атомов, $\delta_L \gg \gamma$

$$A_1^{(RIR)} = \frac{|\Omega_1|^2 |\Omega_2|^2}{2J_g + 1} \text{Tr}\{(\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_2)^\dagger (\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_1) (\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_1)^\dagger (\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_2)\} \times \\ \times \text{Re} \left\{ \frac{1}{\gamma/2 + i\delta_L} \frac{i\delta_L}{(\gamma/2)^2 + \delta_L^2} \int \frac{f(\mathbf{p} + \hbar\Delta\mathbf{k}/2) - f(\mathbf{p} - \hbar\Delta\mathbf{k}/2)}{\Gamma + i\Delta\omega - i\Delta\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}} d\mathbf{p} \right\}$$

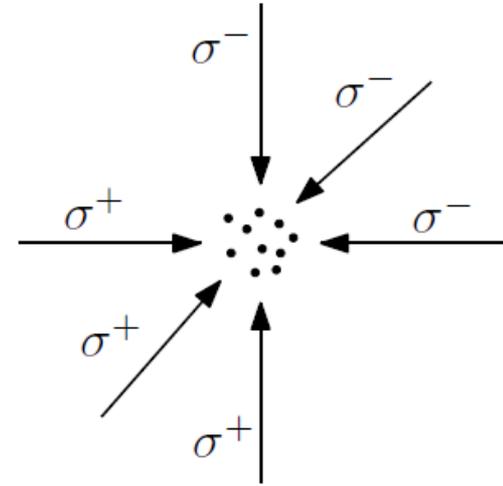
Поляризационная зависимость РИО:

$$\mathcal{A}_1^{(RIR)} = \frac{1}{2J_g + 1} \text{Tr}\{(\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_2)^\dagger (\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_1) (\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_1)^\dagger (\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_2)\} = \\ = \frac{(2J_e + 1)^2}{2J_g + 1} \sum_{\kappa} \left\{ \begin{array}{ccc} \kappa & 1 & 1 \\ J_e & J_g & J_g \end{array} \right\}^2 (\{\mathbf{e}_2^* \otimes \mathbf{e}_1\}_{\kappa} \cdot \{\mathbf{e}_1^* \otimes \mathbf{e}_2\}_{\kappa})$$

# Сигнал РИО в действующей МОЛ, $\delta_L \gg \gamma$

$$A_1^{(RIR)} = |\Omega_1|^2 |\Omega_2|^2 \text{Tr}\{(\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_2)^\dagger (\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_1) \hat{\sigma}^{(0)}\} \text{Tr}\{(\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_1)^\dagger (\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_2) \hat{\sigma}^{(0)}\} \times \\ \times \text{Re} \left\{ \frac{1}{\gamma/2 + i\delta_L} \frac{i\delta_L}{(\gamma/2)^2 + \delta_L^2} \int \frac{f(\mathbf{p} + \hbar\Delta\mathbf{k}/2) - f(\mathbf{p} - \hbar\Delta\mathbf{k}/2)}{\Gamma + i\Delta\omega - i\Delta\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}} d\mathbf{p} \right\}.$$

$\sigma^{(0)}$  - Распределение по внутренним степеням свободы, определяемое полями ловушки.



Поляризация зависимость РИО:

$$\mathcal{A}_1^{(RIR)} = \left\langle \text{Tr}\{(\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_2)^\dagger (\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_1) \hat{\sigma}^{(0)}\} \text{Tr}\{(\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_1)^\dagger (\hat{\mathbf{D}} \cdot \mathbf{e}_2) \hat{\sigma}^{(0)}\} \right\rangle_{\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon} = \\ = (2J_e + 1)^2 \sum_{\kappa} \left\{ \begin{matrix} \kappa & 1 & 1 \\ J_e & J_g & J_g \end{matrix} \right\}^2 (\{\mathbf{e}_2^* \otimes \mathbf{e}_1\}_{\kappa} \cdot \{\mathbf{e}_1^* \otimes \mathbf{e}_2\}_{\kappa}) \frac{\left\langle \left( \sigma_{\kappa}^{(0)} \cdot \sigma_{\kappa}^{(0)} \right) \right\rangle_{\varepsilon}}{2\kappa + 1}$$

# Усреднение по $\varepsilon$

$$\frac{\left\langle \left( \sigma_{\kappa}^{(0)} \cdot \sigma_{\kappa}^{(0)} \right) \right\rangle_{\varepsilon} \Big|_{\kappa=0}}{2\kappa + 1} = \frac{1}{2J_g + 1}$$

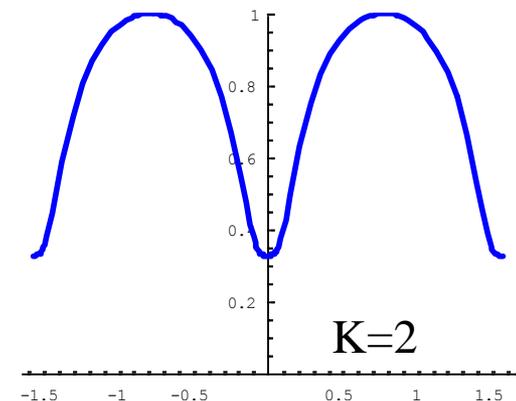
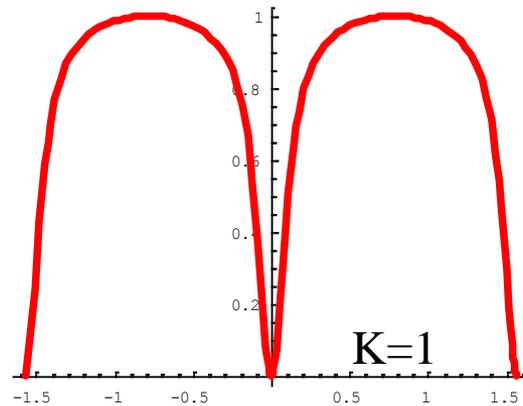
$$\frac{\left\langle \left( \sigma_{\kappa}^{(0)} \cdot \sigma_{\kappa}^{(0)} \right) \right\rangle_{\varepsilon} \Big|_{\kappa=1}}{2\kappa + 1} < \frac{J_g}{(J_g + 1)(2J_g + 1)}$$

$$\frac{\left\langle \left( \sigma_{\kappa}^{(0)} \cdot \sigma_{\kappa}^{(0)} \right) \right\rangle_{\varepsilon} \Big|_{\kappa=2}}{2\kappa + 1} < \frac{J_g(2J_g - 1)}{(J_g + 1)(2J_g + 1)(2J_g + 3)} .$$

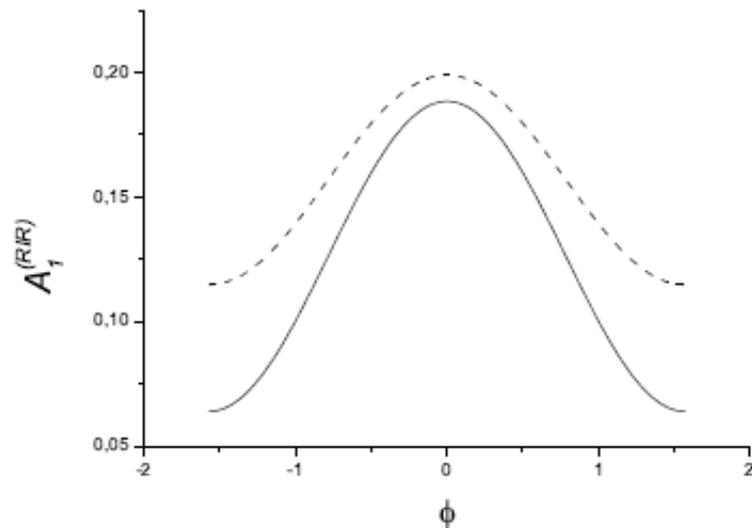
$J_g=3 \rightarrow J_e=4;$

$K=1 \rightarrow 0.78$

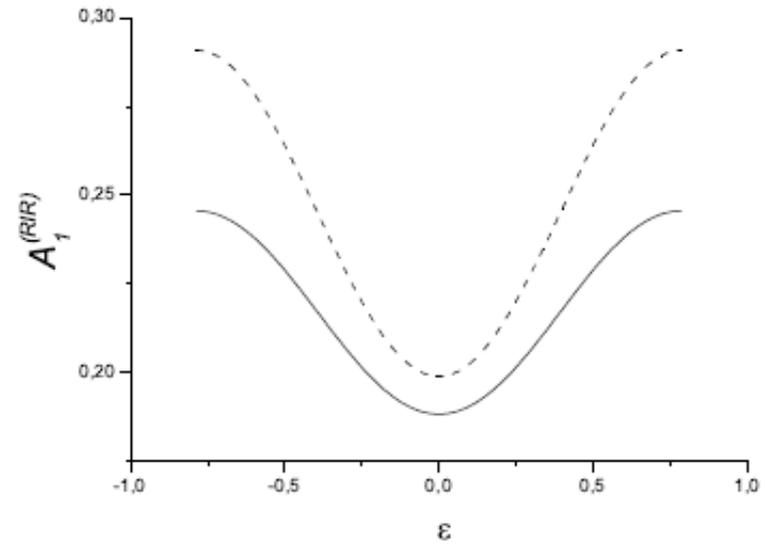
$K=2 \rightarrow 0.74$



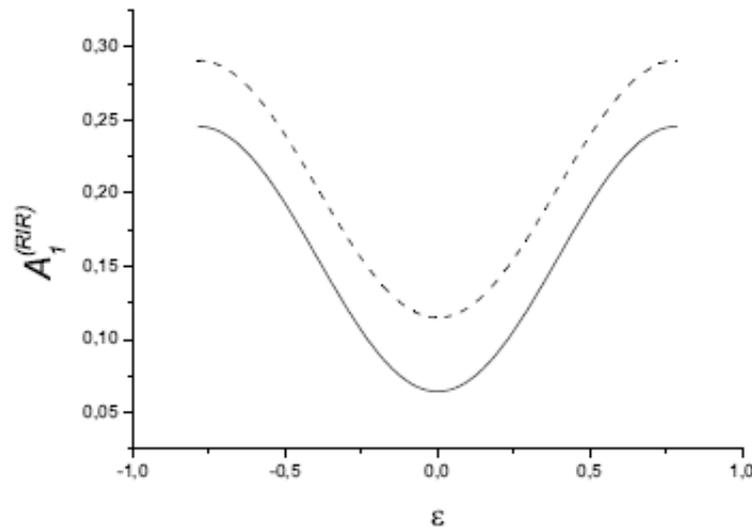
# Поляризационные зависимости (3→4)



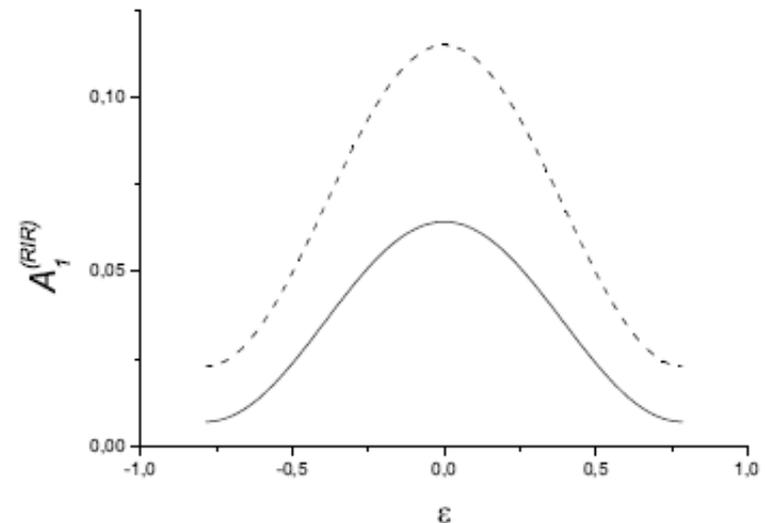
(a)  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$



(b)  $\phi = 0, \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$

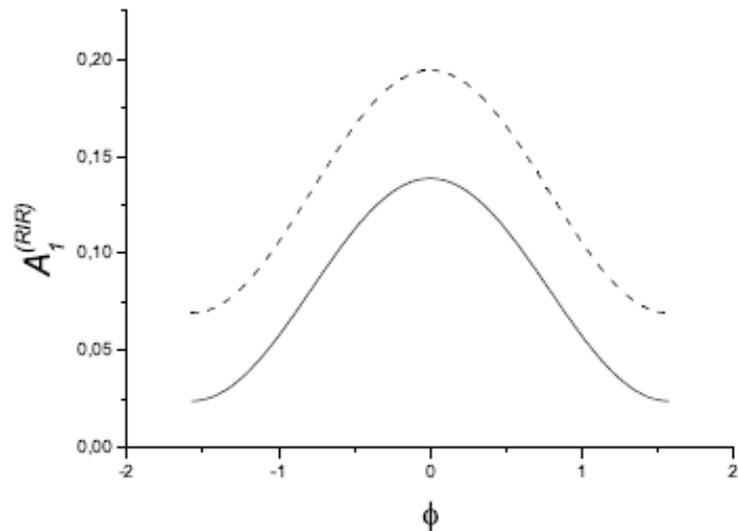


(c)  $\phi = \pi/2, \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$

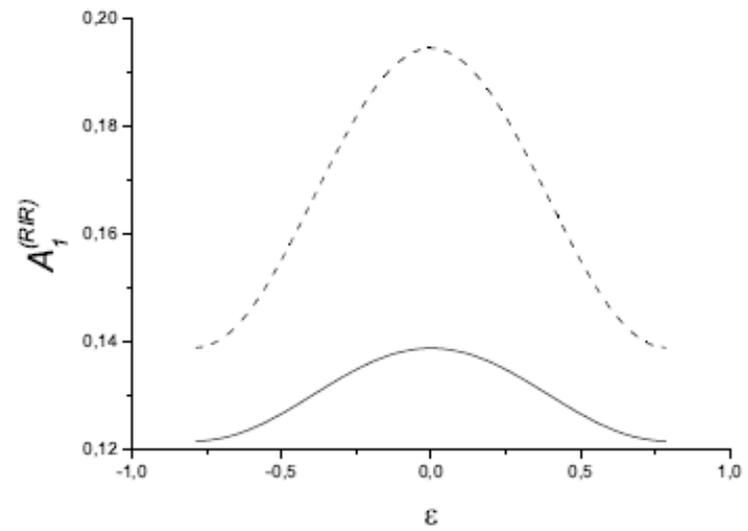


(d)  $\phi = \pi/2, \varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon$

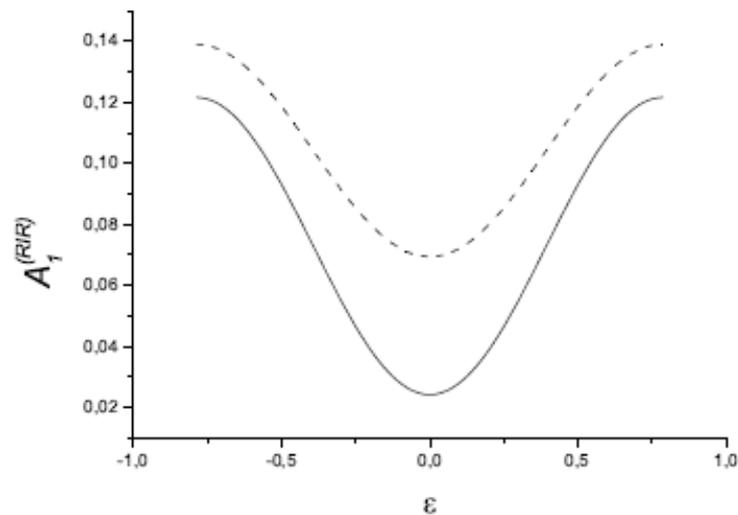
# Поляризационные зависимости ( $3 \rightarrow 3$ )



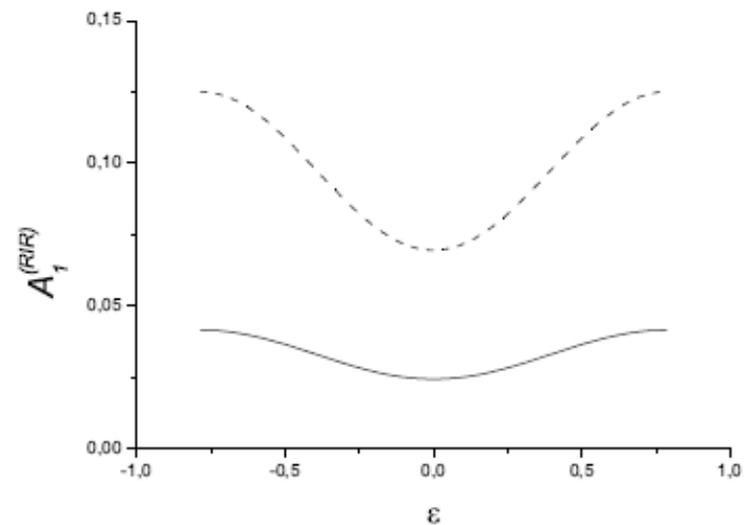
(a)  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$



(b)  $\phi = 0, \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$

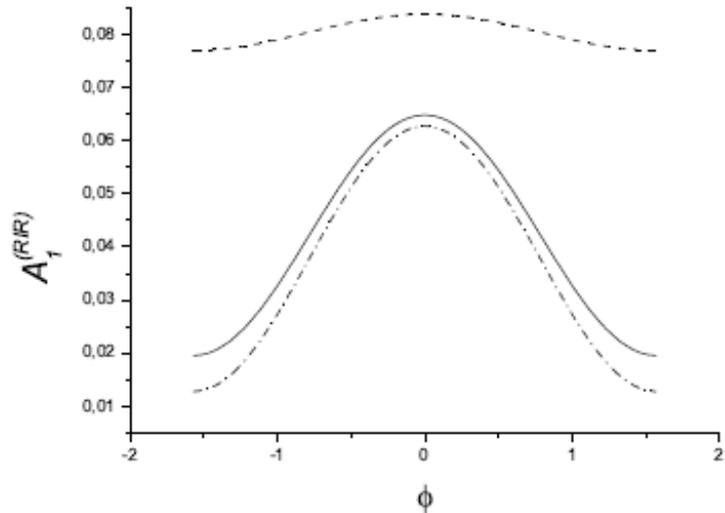


(c)  $\phi = \pi/2, \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$

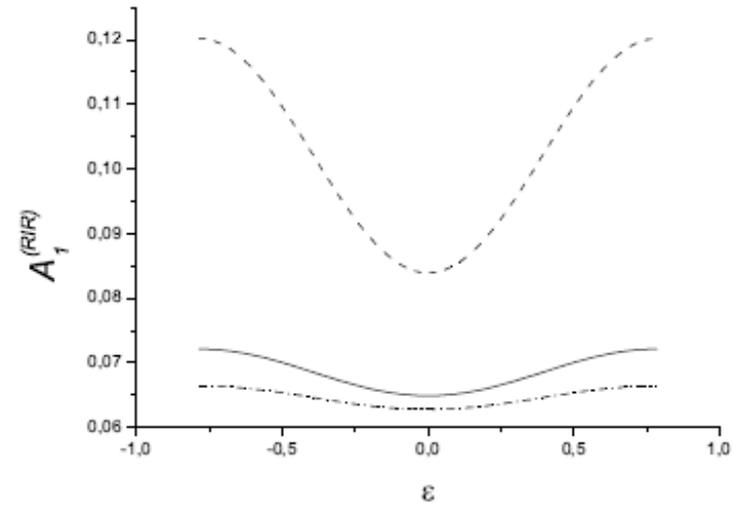


(d)  $\phi = \pi/2, \varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon$

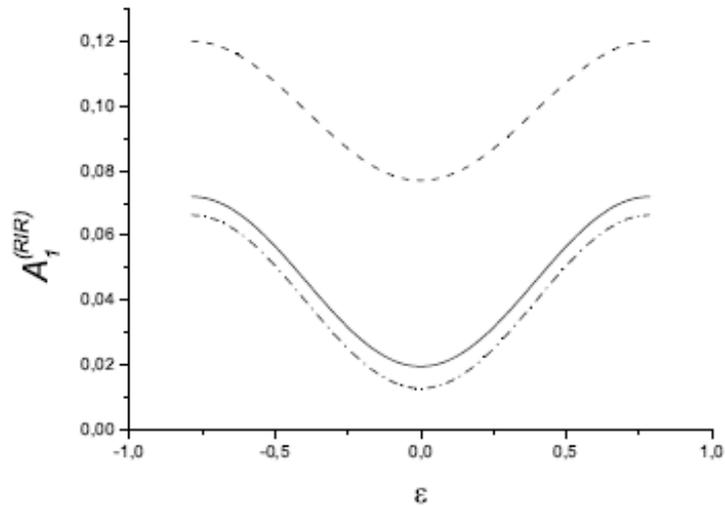
# Поляризационные зависимости ( $3 \rightarrow 2$ )



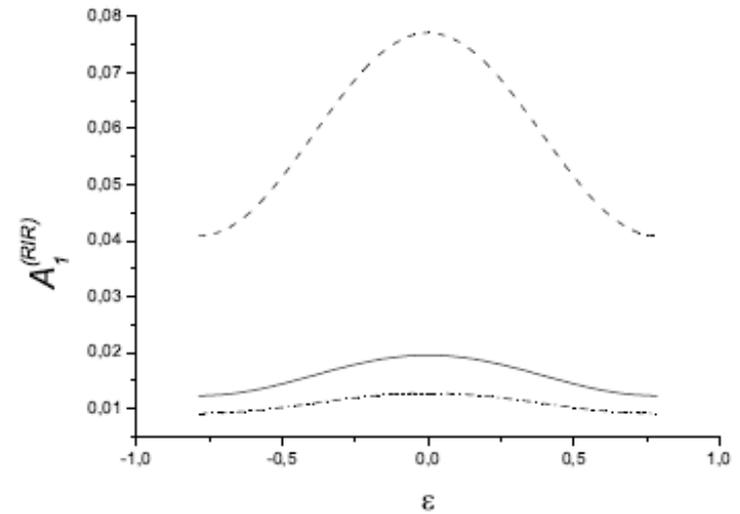
(a)  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$



(b)  $\phi = 0, \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$



(c)  $\phi = \pi/2, \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$



(d)  $\phi = \pi/2, \varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon$

# Заключение

- Для любого замкнутого дипольного перехода получены явные аналитические выражения для поляризационной зависимости амплитуды РИО, как в случае свободных атомов, так и для атомов в МОЛ. Найдены максимум и минимум.
- В действующей МОЛ вклады, связанные с ориентацией и выстраиванием, подавлены из-за усреднения по параметрам локального вектора поляризации поля ловушки. Из поляризационных измерений можно извлечь информацию о средней величине мультипольных моментов атома в МОЛ.
- Теория может быть обобщена с учетом реальной СТС.

**Спасибо за внимание!**