

# ***ЯДЕРНЫЕ СТЕПЕНИЯ СВОБОДЫ В АТОМНОЙ ФИЗИКЕ***

Е.В. Грызлова

НИИЯФ МГУ  
Весенний семестр 2020 г.

- «Разминка»
- Спектры систем со сферической симметрией
- **Сжатые атомы и резонансы формы**
- **Двухуровневая система с сильно связанными состояниями**
- **Атомная спектроскопия антипротония**
- **Поляризация излучения и дихроизм**
- **Плоская волна и волновой пакет – волна вещества.**
- **Нобелевская премия по физике 2012 года.**  
**Изучение одиночной квантовой системы**
- **Ионные ловушки**
- **Когерентные и сжатые состояния волновых пакетов**
- **Начала теории рассеяния**
- **Особенности резонансного рассеяния и неэкспоненциальный распад**

## о Поляризация излучения и дихроизм

а) Параметры поляризации классического поля

б) поворот плоскости поляризации

в) понятие дихроизма, естественного и индуцированного

# Характеристики поляризации электромагнитного поля

Вектор напряженности полностью поляризованного электромагнитного поля в общем случае представляется в виде:

$$\vec{E}_\Omega = E_\Omega \{ \cos(\theta - \pi/4) \exp(i\varphi) \hat{e}_+ + \cos(\theta + \pi/4) \exp(-i\varphi) \hat{e}_- \}$$

$$e_\pm = \mp \frac{e_x \pm ie_y}{\sqrt{2}}$$

$$e_+^* = -e_-; (e_+ e_-) = -1;$$

$$(e_+ e_+) = (e_- e_-) = 0;$$

$$|E|^2 = \left| (\vec{E}_\Omega \exp(i(\omega t - kz)) + \vec{E}_\Omega^* \exp(-i(\omega t - kz))) \right|^2 =$$

$$\left| \vec{E}_\Omega \right|^2 + \left| \vec{E}_\Omega^* \right|^2 + \vec{E}_\Omega \vec{E}_\Omega^* (\exp(2i(\omega t - kz)) + \exp(-2i(\omega t - kz))) =$$

$$= \frac{E_\Omega^2}{2} \{ 1 - \cos(2\theta) \cos(2(\omega t - kz)) \}$$

# Степень эллиптичности и угол наклона эллипса поляризации

Ось  $z$  выбрана вдоль направления распространения поля.

$$|E|^2 = |E_\Omega \exp(i(\omega t - kz)) + \text{к.с}|^2 = \frac{E_\Omega^2}{2} \{1 - \cos(2\theta) \cos(2(\omega t - kz))\}$$

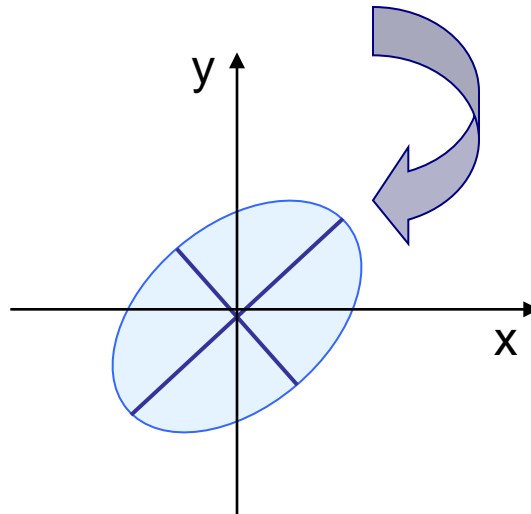
Параметры  $\theta$ ,  $\varphi$  определяют эллипс поляризации поля.

$\text{tg}(\theta)$  определяет отношение главных полуосей эллипса поляризации

Угол  $\varphi$  характеризует наклон эллипса поляризации:

$$\sin(\theta)(\hat{e}_x \cos \varphi - \hat{e}_y \sin \varphi)$$

$$e_\pm = \mp \frac{e_x \pm ie_y}{\sqrt{2}}$$



# Поляризационные характеристики поля в среде с циркулярным дихроизмом

$$\vec{E}_\Omega = E_\Omega \left\{ \cos\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) \exp(i\varphi) \hat{e}_+ + \cos\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \exp(-i\varphi) \hat{e}_- \right\}$$

Плоская линейно поляризованная волна с частотой  $\Omega$  в вакууме распространяется вдоль оси  $z$ :

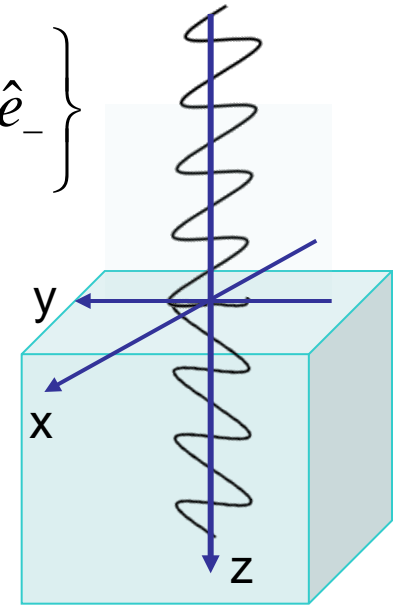
$$\vec{E}_\Omega = \frac{E_1}{\sqrt{2}} (-\hat{e}_+ + \hat{e}_-) \exp(i\Omega t - ikz)$$

После прохождения пути  $L$  в среде с дихроизмом:

$$\vec{E}'_\Omega = \frac{E_1}{\sqrt{2}} \left\{ -\hat{e}_+ \exp(i\Omega t - ik_+ L) + \hat{e}_- \exp(i\Omega t - ik_- L) \right\} =$$

$$\frac{E_1}{\sqrt{2}} \exp\left(i\Omega t - i\frac{k_+ + k_-}{2} L\right) \left\{ -\hat{e}_+ \exp\left(i\frac{\Delta k L}{2}\right) + \hat{e}_- \exp\left(-i\frac{\Delta k L}{2}\right) \right\}$$

Где  $\Delta k = k_- - k_+$



# Поляризационные характеристики поля в среде с циркулярным дихроизмом

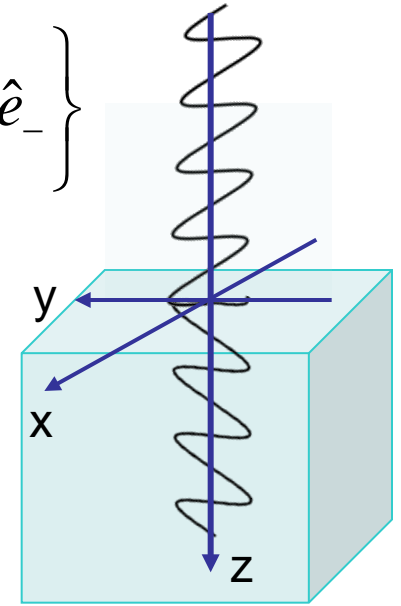
$$\vec{E}_\Omega = E_\Omega \left\{ \cos\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) \exp(i\varphi) \hat{e}_+ + \cos\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \exp(-i\varphi) \hat{e}_- \right\}$$

Плоская линейно поляризованная волна с частотой  $\Omega$  в вакууме распространяется вдоль оси  $z$ :

$$\vec{E}_\Omega = \frac{E_1}{\sqrt{2}} (-\hat{e}_+ + \hat{e}_-) \exp(i\Omega t - ikz)$$

После прохождения пути  $L$  в среде с дихроизмом:

$$\vec{E}'_\Omega = \frac{E_1}{\sqrt{2}} \exp\left(i\Omega t - i\frac{k_+ + k_-}{2} L\right) \left\{ -\hat{e}_+ \exp\left(i\frac{\Delta k L}{2}\right) + \hat{e}_- \exp\left(-i\frac{\Delta k L}{2}\right) \right\}$$



Поляризационные характеристики поля  $\Omega$  в среде в точке  $z=L$ :

$$\varphi' = \frac{\text{Re } \Delta k}{2} L, \quad \text{tg } \theta' = \frac{\exp(L \text{Im } \Delta k) - 1}{\exp(L \text{Im } \Delta k) + 1} = \frac{\text{Im } \Delta k}{2} L \quad \text{Где } \Delta k = k_- - k_+$$

# Изменение поляризационных характеристик поля в среде со слабой нелинейностью

В общем виде волновой вектор в среде связан с волновым вектором в вакууме и нелинейной восприимчивостью соотношением:

$$k'^2 = (1 + N\chi)k^2$$

Если нелинейная восприимчивость среды мала ( $N\chi \ll 1$ ), то:

$$k' - k \approx \frac{N\chi k}{2} \Rightarrow \begin{cases} \operatorname{Re} \Delta k \approx \operatorname{Re}(\chi_- - \chi_+) \frac{k}{2} = \frac{\Omega N}{2c} \operatorname{Re}(\chi_- - \chi_+) \\ \operatorname{Im} \Delta k \approx \operatorname{Im}(\chi_- - \chi_+) \frac{k}{2} = \frac{\Omega N}{2c} \operatorname{Im}(\chi_- - \chi_+) \end{cases}$$

Тогда поворот плоскости поляризации:

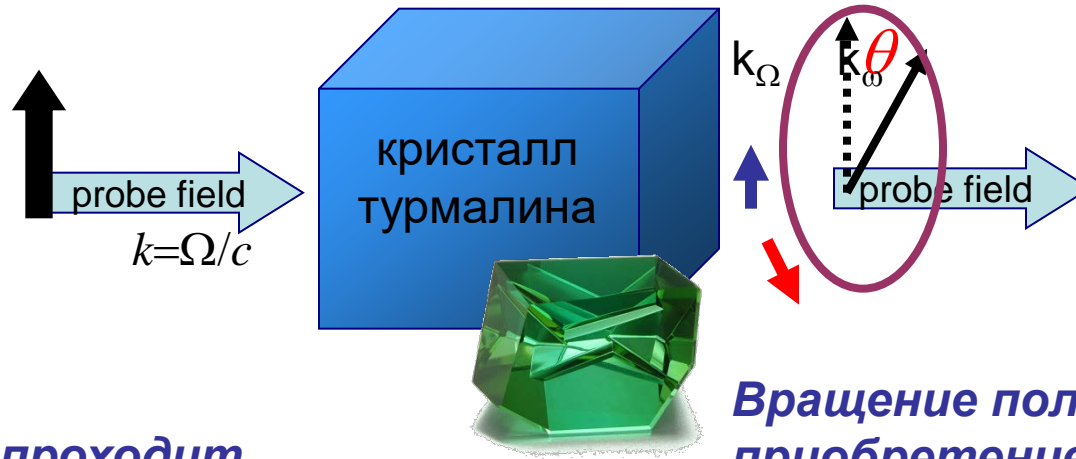
$$\varphi' = \frac{\operatorname{Re} \Delta k}{2} L = \frac{\Omega L N}{4c} \operatorname{Re}(\chi_- - \chi_+)$$

$$\varepsilon = \frac{\operatorname{Im} \Delta k}{2} L = \frac{\Omega L N}{4c} \operatorname{Im}(\chi_- - \chi_+)$$



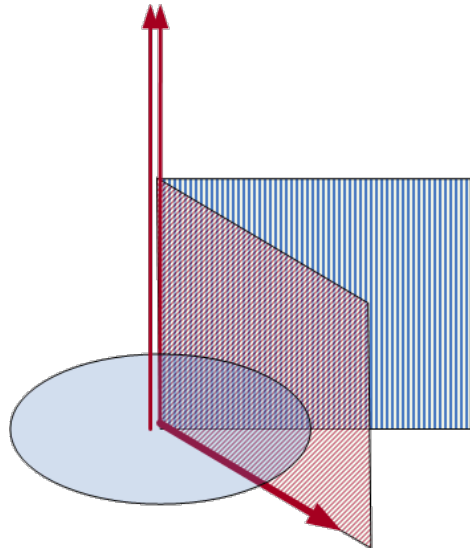
# Дихроизм

Циркулярный дихроизм это разница между коэффициентами отражения для право и лево поляризованной компоненты электромагнитного поля



*Вращение поляризации, приобретение эллиптичности*

*Пробное поле проходит через среду с дихроизмом ( $\Delta n = n_+ - n_-$ )*



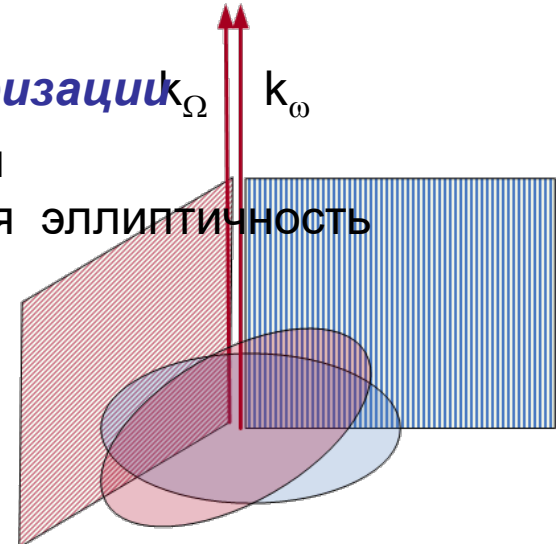
*Вращение поляризации  $k_{\Omega}$   $k_{\omega}$*

$\theta$  – угол вращения

$\varepsilon$  – приобретаемая эллиптичность

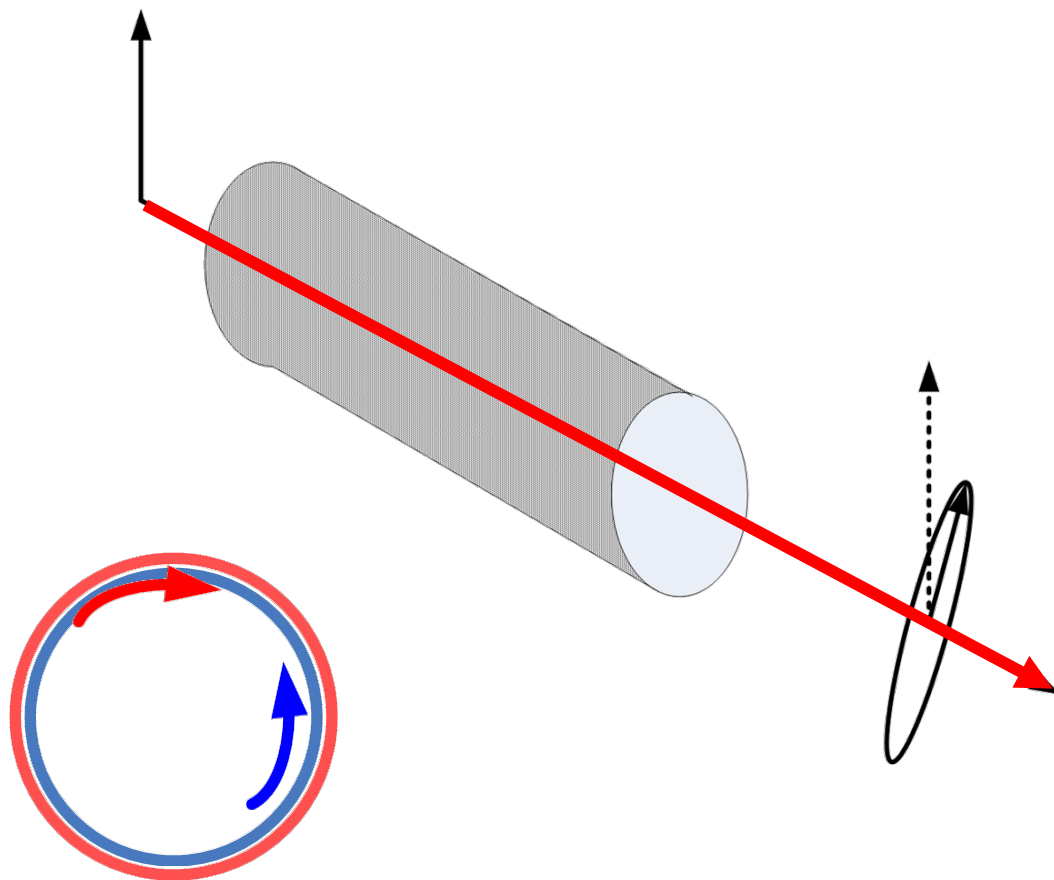
$$\varepsilon = k \operatorname{Im}(\Delta n) L / 4$$

$$\theta = k \operatorname{Re}(\Delta n) L / 4$$



# Первые наблюдения кругового дихроизма в естественно хиральных средах

В средах, обладающих разным показателем преломления относительно право и лево поляризованных компонент света, наблюдается эффект **двойного лучепреломления**.



Jean-Baptiste Biot  
(1774-1862)



François Arago  
(1786-1853)

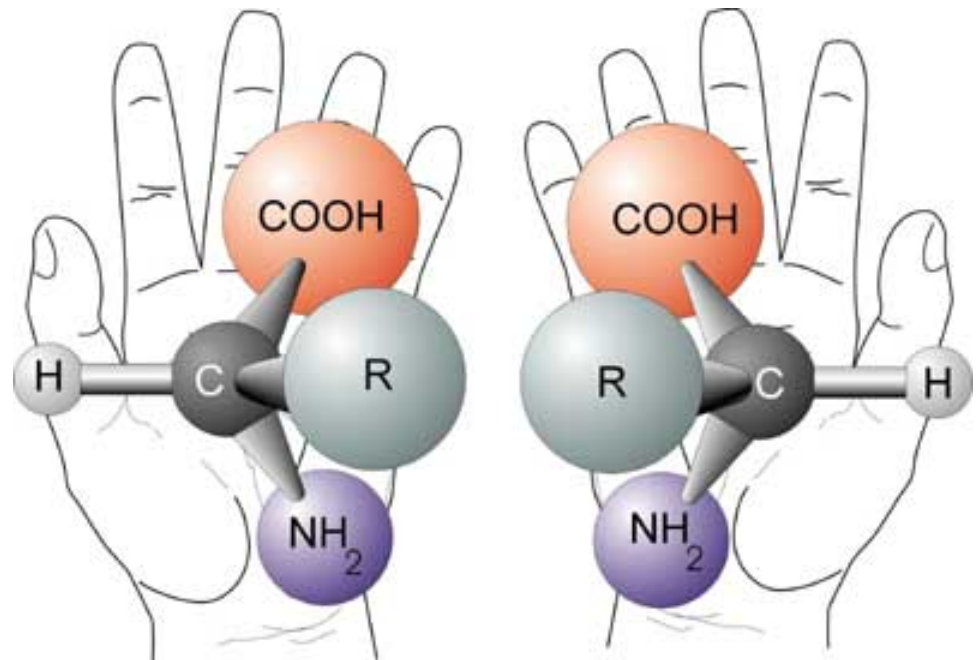
# Хиральность

Молекула называется **хиральной** если ее зеркальное отражение невозможно совместить с исходной молекулой вращениями и сдвигами. Происходит от греческого  $\chi\epsilon\iota\rho$  – рука.



**Louis Pasteur**  
1822-1895

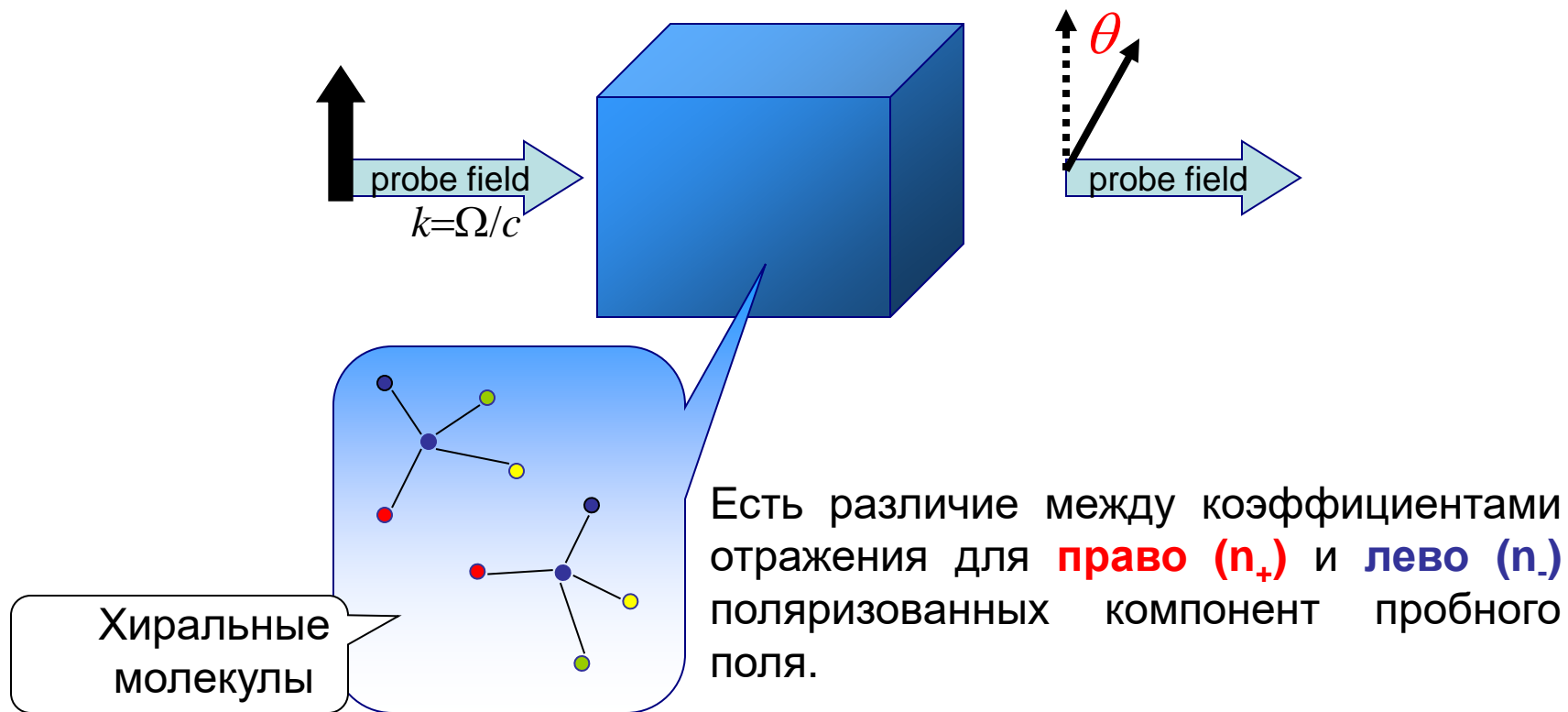
Разделил раствор виноградной кислоты  $C_4H_5O_6Na$  на два хиральных раствора



**Хиральность молекул крайне важна для биологии и органической химии.**

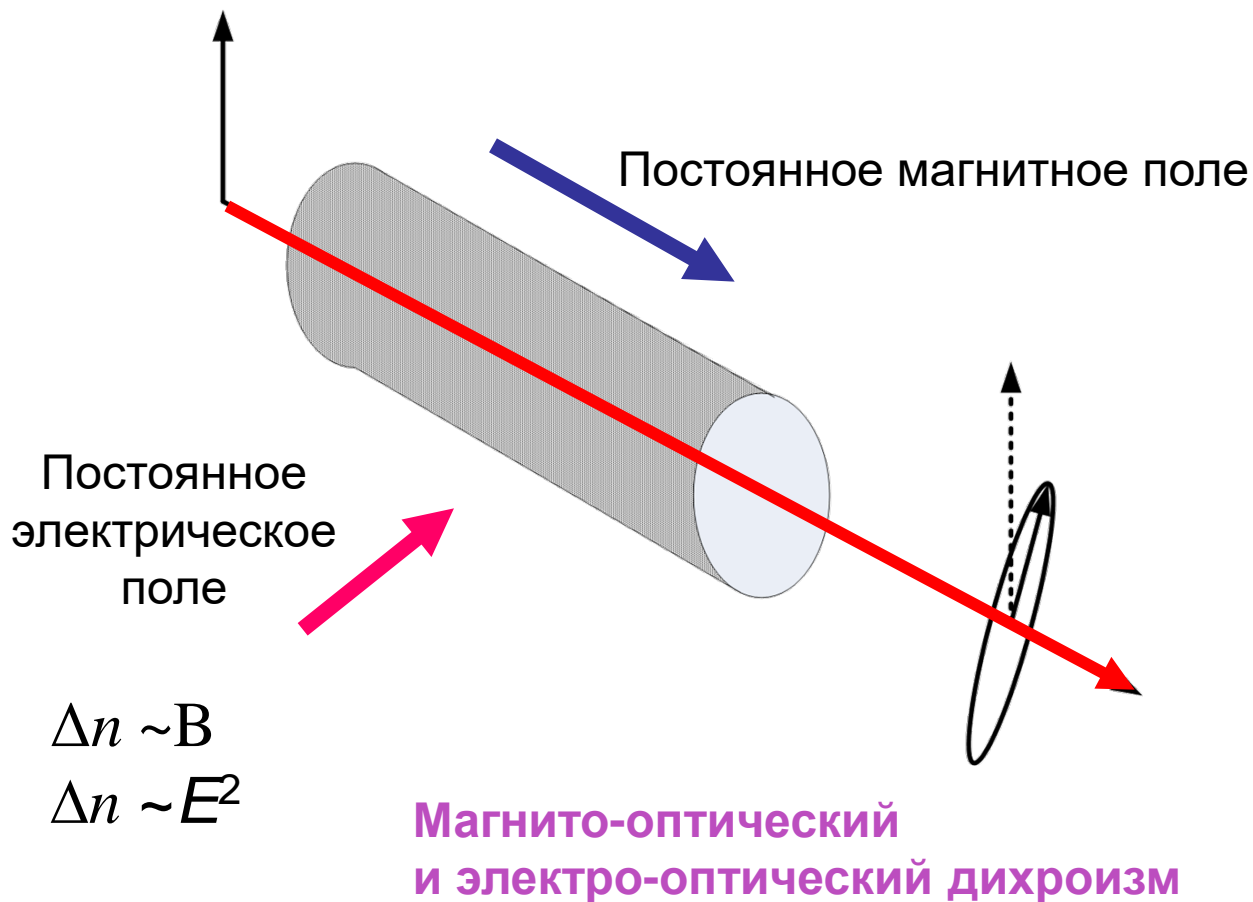
# Естественный дихроизм

Естественный дихроизм это результат хиральности молекул среды



# Первое наблюдение кругового дихроизма в индуцировано хиральных средах

В среде можно индуцировать разность показателей преломления относительно право и лево поляризованных компонент света магнитным или электрическим полем: **эффект Фарадея и эффект Керра.**



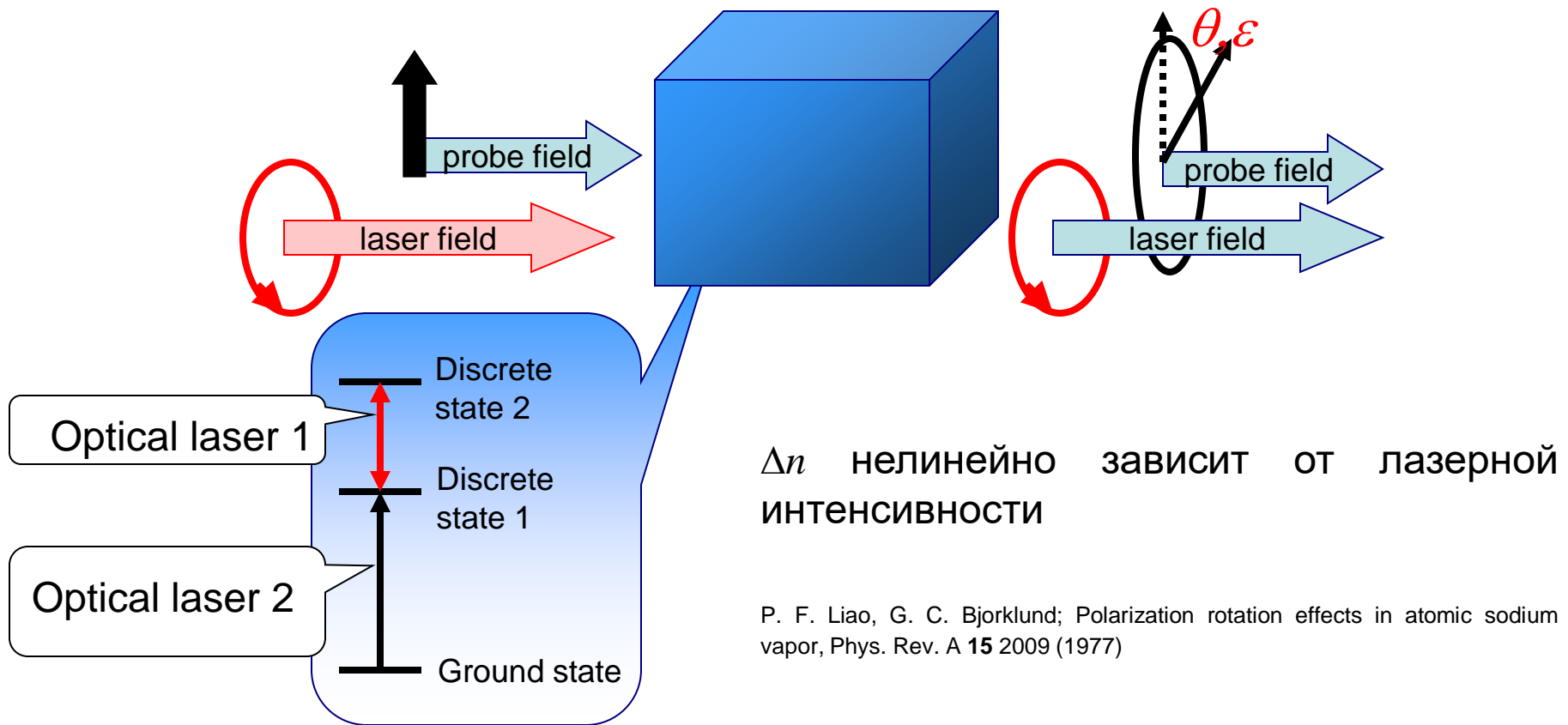
Michael Faraday  
(1791-1867)



John Kerr  
(1824-1907)

# Лазерно-индуцированный дихроизм в среде

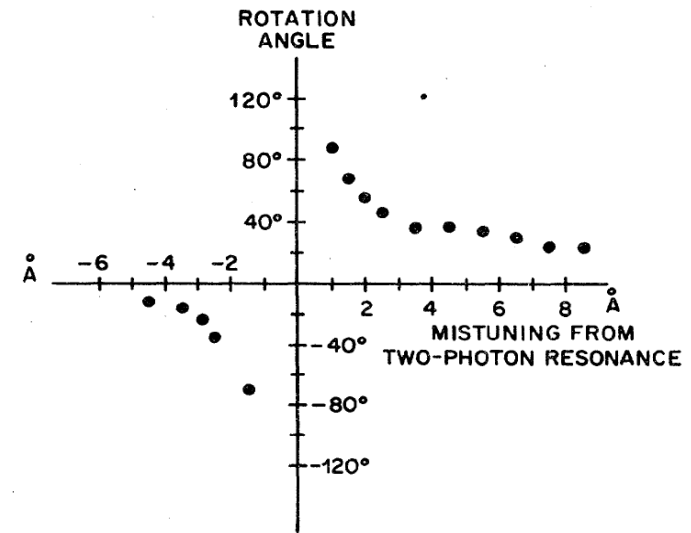
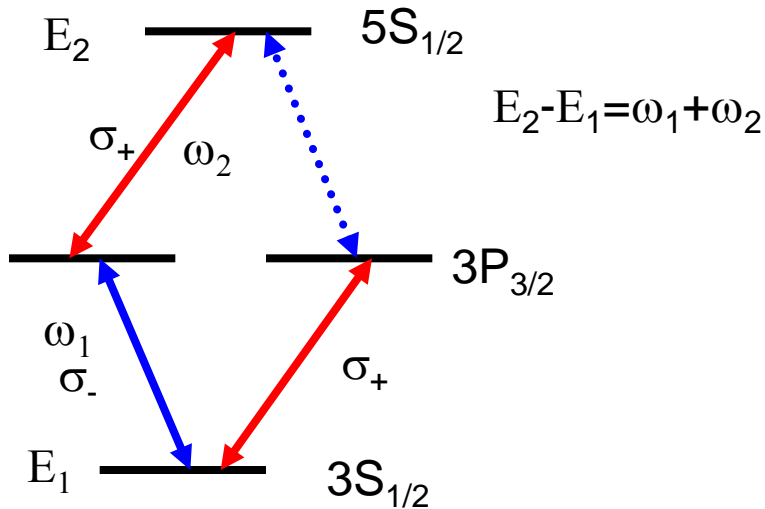
Лазерно-индуцированный дихроизм возникает как результат оптической связи дискретных состояний



# Лазерно индуцированный дихроизм в среде

Первые наблюдения лазерно индуцированного дихроизма в дискретном спектре атома.

## Атом натрия Na



$$N \sim 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}, L \sim 5 \text{ cm}$$

P. F. Liao and G. C. Bjorklund, Phys. Rev. A, 15 2009 (1977).

V. M. Arutyunyan, T. A. Papazyan, G. G. Adonts, A. V. Karmenyan, S. P. Ishkhanyan, and L. Khol'ts, JETP **41**, 22 (1976) (Калий).

# Поворот плоскости поляризации в области автоионизационных состояний

$$\Delta=0, NL=5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$$

