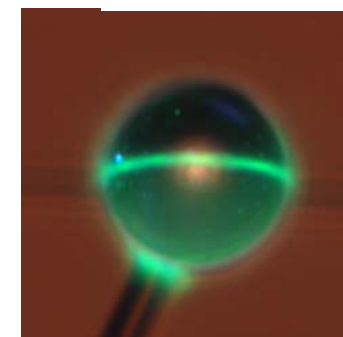
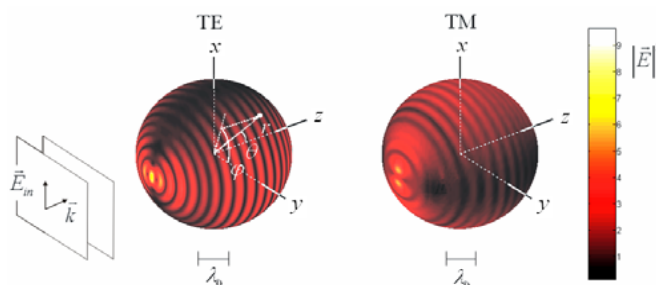
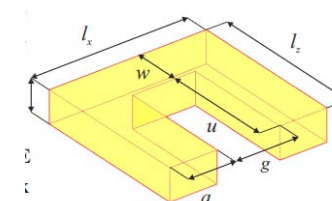
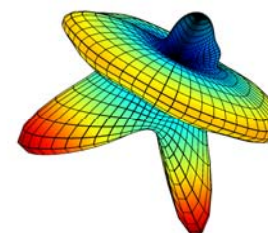
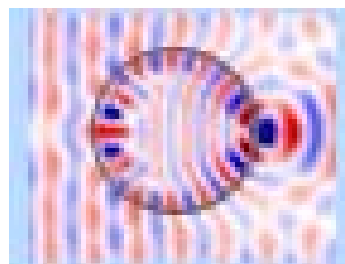
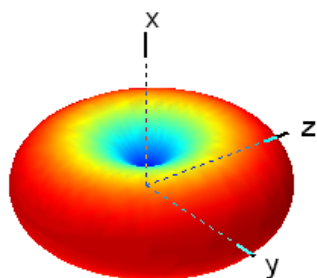
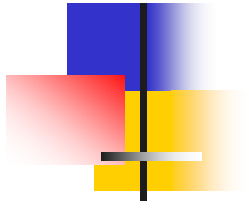




# ОТКРЫТЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ СИСТЕМЫ. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ШАРА

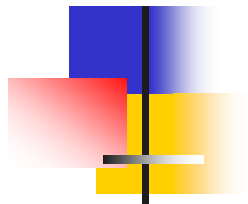
Журавлев Антон Викторович,  
Белокопытов Геннадий Васильевич





## План

- Сферические волны
- Возбуждение колебаний в сферических частицах
- Постановка задачи Ми
- Моды шепчущей галереи
- Приложения



## Сферические волны

Сферическая система координат

$$x = r \sin \theta \cos \varphi$$

$$y = r \sin \theta \sin \varphi$$

$$z = r \cos \theta$$

Метрический тензор (квадрат дифференциала дуги)

$$ds^2 = r^2 d\theta^2 + (r \sin \theta)^2 d\varphi^2 + dr^2$$

Параметры Ламе

$$h_1 = r, h_2 = r \sin \theta, h_3 = 1$$



## Сферические волны

В сферической системе координат уравнения Максвелла записываются в виде:

$$\frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \sigma \mathbf{E} = \text{rot} \mathbf{H}$$

$$-\frac{\mu}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \text{rot} \mathbf{E}$$

временная зависимость:

$$\exp(i\omega t)$$

$$ik\varepsilon_s E_r = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left\{ \frac{\partial(rH_\varphi \sin \theta)}{\partial \theta} - \frac{\partial(rH_\theta)}{\partial \varphi} \right\},$$

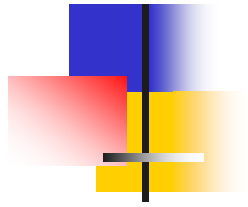
$$ik\varepsilon_s E_\theta = \frac{1}{r \sin \theta} \left\{ \frac{\partial H_r}{\partial \varphi} - \frac{\partial(rH_\varphi \sin \theta)}{\partial r} \right\},$$

$$ik\varepsilon_s E_\varphi = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial(rH_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right\},$$

$$ik\mu_s H_r = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left\{ \frac{\partial(rE_\varphi \sin \theta)}{\partial \theta} - \frac{\partial(rE_\theta)}{\partial \varphi} \right\},$$

$$ik\mu_s H_\theta = \frac{1}{r \sin \theta} \left\{ \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} - \frac{\partial(rE_\varphi \sin \theta)}{\partial r} \right\},$$

$$ik\mu_s H_\varphi = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial(rE_\theta)}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial \theta} \right\}.$$



## Сферические волны

Будем искать решение в виде суперпозиции двух линейно независимых полей.

$TE$  ( $H$  – моды)

$$E_r = 0$$

$TM$  ( $E$  – моды)

$$H_r = 0$$

Из уравнений поля следует, что в этом случае все компоненты электрического и магнитного полей для волн обоих семейств могут быть выражены через производные некоторых вспомогательных скалярных потенциальных функций:

$$\nabla^2 U + k^2 U = 0$$

$$\nabla^2 U + k^2 U = 0$$



## Сферические волны

Электромагнитные поля через скалярные функции выражаются следующим образом.

$TE$  ( $H$  – моды)

$$E_{\theta} = \frac{ik\mu}{r \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \varphi}$$

$$E_{\varphi} = -\frac{ik\mu}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta}$$

$$E_r = 0$$

$$H_{\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 U}{\partial r \partial \theta}$$

$$H_{\varphi} = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial r \partial \varphi}$$

$$H_r = k^2 \varepsilon \mu U + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2}$$

$TM$  ( $E$  – моды)

$$E_{\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 V}{\partial r \partial \theta}$$

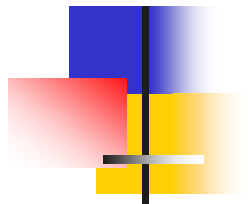
$$E_{\varphi} = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 V}{\partial r \partial \varphi}$$

$$E_r = k^2 \varepsilon \mu V + \frac{\partial^2 V}{\partial r^2}$$

$$H_{\theta} = -\frac{ik\varepsilon}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \varphi}$$

$$H_{\varphi} = \frac{ik\varepsilon}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta}$$

$$H_r = 0$$



## Сферические волны

Уравнение для потенциалов  $U, V$  в сферических координатах:

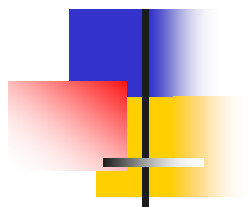
$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right) \right] + k^2 \varepsilon \mu U = 0$$

Будем искать решение уравнения методом разделения переменных.  
Разделим все члены на  $U$  и положим:

$$U = F_1(r) F_2(\theta, \varphi)$$

Получим:

$$\left( \frac{1}{F_1} \frac{\partial^2 F_1}{\partial r^2} + k^2 \varepsilon \mu \right) + \frac{1}{r^2} \left\{ \frac{1}{F_2 \sin \theta} \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial F_2}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial F_2}{\partial \varphi} \right) \right] \right\} = 0$$



## Сферические волны

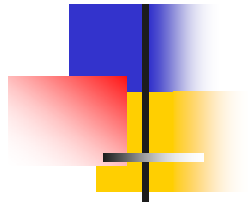
$$\left( \frac{1}{F_1} \frac{\partial^2 F_1}{\partial r^2} + k^2 \varepsilon \mu \right) + \frac{1}{r^2} \left\{ \frac{1}{F_2 \sin \theta} \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial F_2}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial F_2}{\partial \varphi} \right) \right] \right\} = 0$$

Выражение, заключенное в фигурную скобку, не зависит от радиальной координаты. Обозначим:

$$\frac{1}{F_2 \sin \theta} \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial F_2}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial F_2}{\partial \varphi} \right) \right] = -\gamma$$

Если положить, что  $\gamma$  — постоянная величина, то переменные разделяются.





## Сферические волны

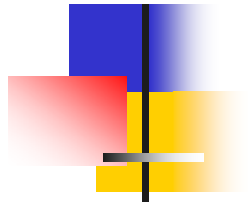
Получаются два уравнения:

для функции угловых координат  $F_2(\theta, \varphi)$  :

$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial F_2}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 F_2}{\partial \varphi^2} + \gamma F_2 = 0,$$

и для функции радиальной зависимости  $F_1(r)$  :

$$\left( \frac{1}{F_1} \frac{\partial^2 F_1}{\partial r^2} + k^2 \varepsilon \mu - \frac{\gamma}{r^2} \right) = 0.$$



## Сферические волны

В уравнении для угловых координат

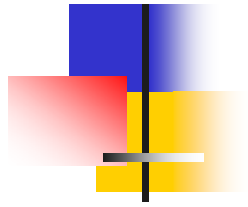
$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial F_2}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 F_2}{\partial \varphi^2} + \gamma F_2 = 0$$

функция  $F_2(\theta, \varphi)$  должна удовлетворять требованиям периодичности:

$$F_2(\theta + 2\pi, \varphi) = F_2(\theta, \varphi) \quad F_2(\theta, \varphi + 2\pi) = F_2(\theta, \varphi)$$

В результате получается краевая задача, которая имеет решения только при:

$$\gamma = n(n+1)$$



## Сферические волны

Решение уравнения для угловых координат имеет вид:

$$F_2(\theta, \varphi) = Y_n^m(\theta, \varphi) = P_n^m(\cos \theta) \begin{cases} \sin m\varphi \\ \cos m\varphi \end{cases}$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$   $m = 0, 1, 2, 3, \dots, n$  и  $P_n^m(z)$  – присоединенные функции Лежандра.

В дальнейшем для удобства будем обозначать функцию  $F_2(\theta, \varphi)$  в виде:

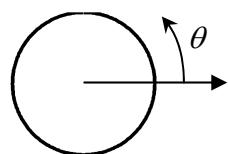
$$F_2(\theta, \varphi) = P_n^m(\cos \theta) \Phi(m\varphi)$$



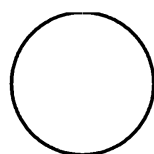
## Сферические волны

Несколько первых присоединенных функций Лежандра  $P_n^m(\cos\theta)$  :

$n = 1$ :



$m = 0$



$m = 1$

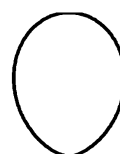
$n = 2$ :



$m = 0$

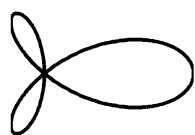


$m = 1$

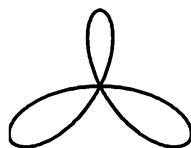


$m = 2$

$n = 3$ :



$m = 0$



$m = 1$



$m = 2$



$m = 3$



## Сферические волны

В уравнении для радиальной координаты

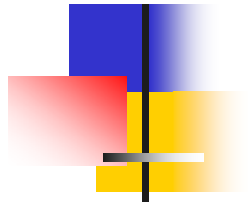
$$\left( \frac{1}{F_1} \frac{\partial^2 F_1}{\partial r^2} + k^2 \varepsilon \mu - \frac{\gamma}{r^2} \right) = 0$$

сделаем замены

$$F_1(r) = r^{1/2} f(r), \quad \rho = k \sqrt{\varepsilon \mu} r, \quad f'(\rho) = \frac{\partial f}{\partial \rho}, \quad \gamma = n(n+1).$$

В результате получается уравнение Бесселя полуцелого порядка

$$f'' + \frac{1}{\rho} f' + \left[ 1 - \frac{(n + 1/2)^2}{\rho^2} \right] f = 0.$$



## Сферические волны

Решение уравнения Бесселя имеет вид:

$$f(\rho) = c_1 J_{n+\frac{1}{2}}(\rho) + c_2 N_{n+\frac{1}{2}}(\rho).$$

Решение исходного радиального уравнения имеет вид:

$$F_1(r) = \zeta_n(k\sqrt{\varepsilon\mu}r) = c_1 \psi_n(k\sqrt{\varepsilon\mu}r) + c_2 \chi_n(k\sqrt{\varepsilon\mu}r),$$

где  $\psi, \chi$  — функции Риккати-Бесселя:

$$\psi_n(z) = \sqrt{\frac{\pi z}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}(z), \quad \chi_n(z) = \sqrt{\frac{\pi z}{2}} N_{n+\frac{1}{2}}(z),$$

$$z = k\sqrt{\varepsilon\mu}.$$



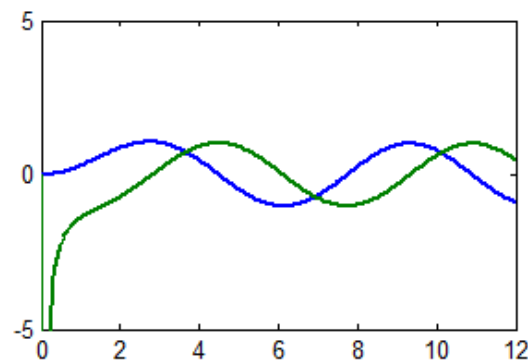
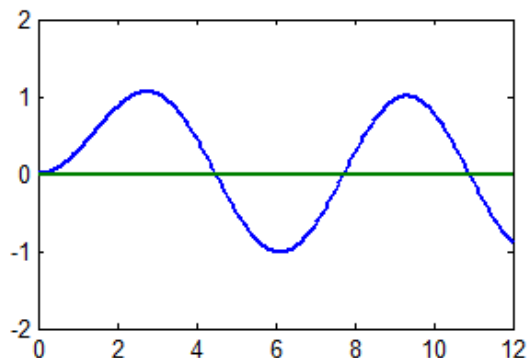
# Сферические волны

Несколько первых радиальных функций:

$$\psi_n(z) = \sqrt{\frac{\pi z}{2}} J_{n+\frac{1}{2}}(z),$$

$$\chi_n(z) = \sqrt{\frac{\pi z}{2}} N_{n+\frac{1}{2}}(z),$$

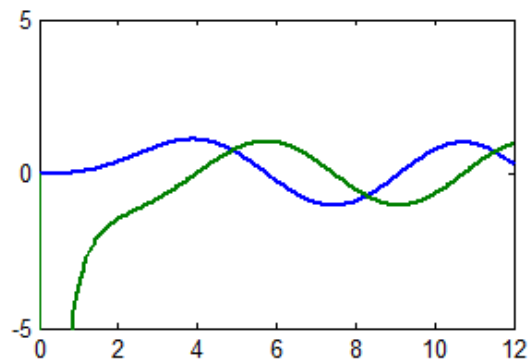
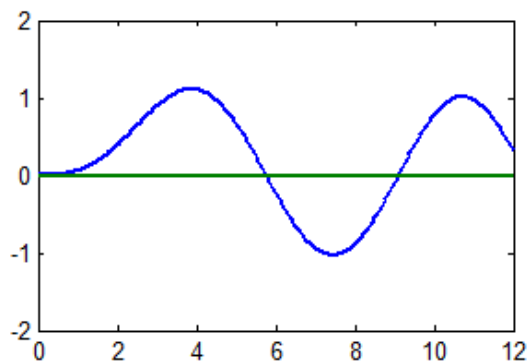
$n = 1:$



■  $-\text{Re}$

■  $-\text{Im}$

$n = 2:$





## Сферические волны

В результате решения радиального и угловых уравнений получаются следующие соотношения для полей волн ТЕ (Н) типа:

$$E_{\theta} = \frac{ik}{r \sin \theta} A_s \zeta_n(k \sqrt{\epsilon_s \mu_s} r) P_n^m(\cos \theta) \Phi'(m\varphi)$$

$$E_{\varphi} = -\frac{ik}{r} A_s \zeta_n(k \sqrt{\epsilon_s \mu_s} r) \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^m(\cos \theta) \Phi(m\varphi)$$

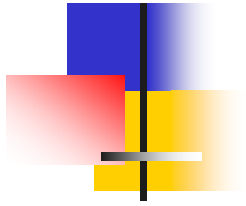
$$E_r = 0$$

$$H_{\theta} = \frac{k}{r} \sqrt{\frac{\epsilon_s}{\mu_s}} A_s \zeta'_n(k \sqrt{\epsilon_s \mu_s} r) \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^m(\cos \theta) \Phi(m\varphi)$$

$$H_{\varphi} = \frac{k}{r \sin \theta} \sqrt{\frac{\epsilon_s}{\mu_s}} A_s \zeta'_n(k \sqrt{\epsilon_s \mu_s} r) P_n^m(\cos \theta) \Phi'(m\varphi)$$

$$H_r = \frac{n(n+1)}{\mu_s r^2} A_s \zeta_n(k \sqrt{\epsilon_s \mu_s} r) P_n^m(\cos \theta) \Phi(m\varphi)$$





## Сферические волны

Аналогично, для волн ТМ (Е) типа получаются следующие соотношения:

$$E_{\theta} = \frac{k}{r} \sqrt{\frac{\mu_s}{\varepsilon_s}} B_s \zeta'_n(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s} r) \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^m(\cos \theta) \Phi(m\varphi)$$

$$E_{\varphi} = \frac{k}{r \sin \theta} \sqrt{\frac{\mu_s}{\varepsilon_s}} B_s \zeta'_n(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s} r) P_n^m(\cos \theta) \Phi'(m\varphi)$$

$$E_r = \frac{n(n+1)}{\varepsilon_s r^2} B_s \zeta_n(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s} r) P_n^m(\cos \theta) \Phi(m\varphi)$$

$$H_{\theta} = -\frac{ik}{r \sin \theta} B_s \zeta_n(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s} r) P_n^m(\cos \theta) \Phi'(m\varphi)$$

$$H_{\varphi} = \frac{ik}{r} B_s \zeta_n(k\sqrt{\varepsilon_s \mu_s} r) \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^m(\cos \theta) \Phi(m\varphi)$$

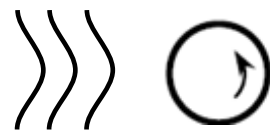
$$H_r = 0$$



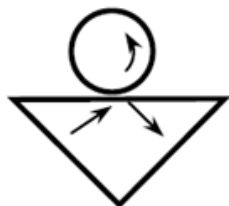
# Различные способы возбуждения колебаний в сферической частице



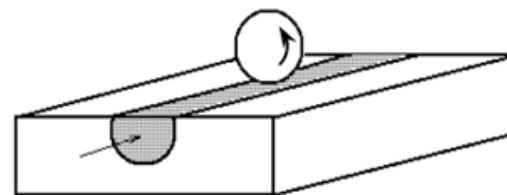
Плоской  
волной



Гауссовым  
пучком



Призменным  
элементом связи



Срезанным  
волноводом



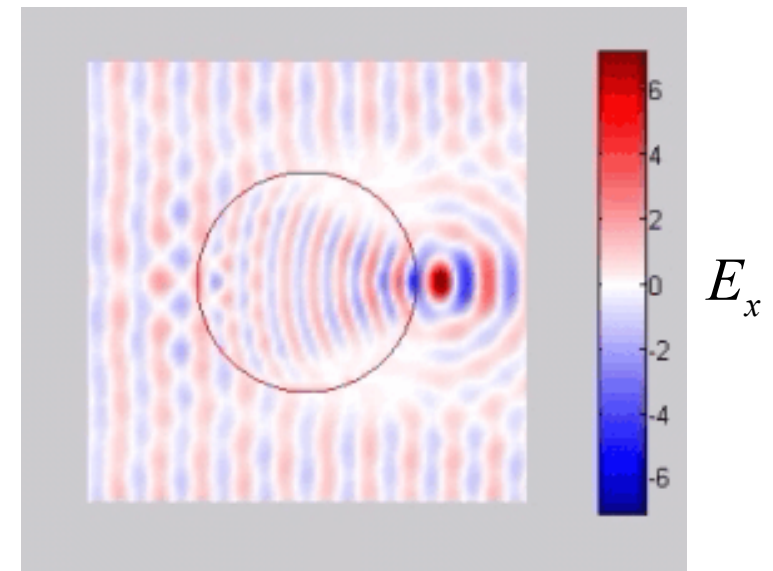
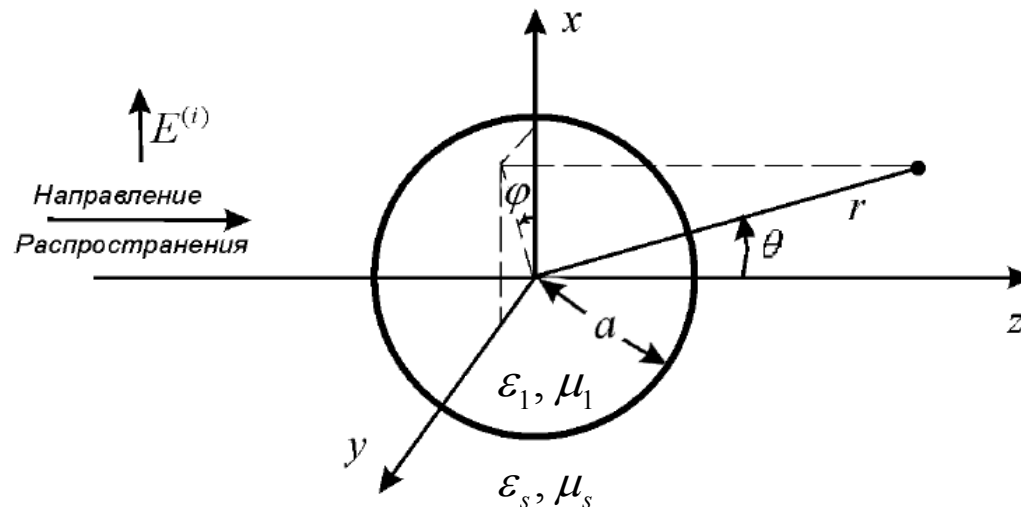
Растянутым  
волокном

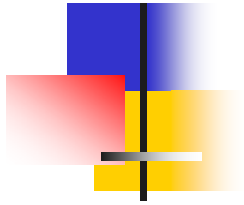


Волоконно –  
призменным  
элементом

## Постановка задачи Ми

- Плоская волна распространяется вдоль оси  $z$  и рассеивается на сферической частице
- Падающую плоскую волну следует разложить в ряд по сферическим волнам
- Решение внутри и снаружи шара следует представить в виде ряда по сферическим волнам с неизвестными коэффициентами
- Коэффициенты разложения нужно найти используя граничные условия
- В результате проведения этих действий получается, что возбуждаются моды только с индексом  $m=1$





## Задача Ми

Коэффициенты разложения  
для поля рассеянной волны:

$$a_n = \frac{m\psi_n(mx)\psi'_n(x) - \psi_n(x)\psi'_n(mx)}{m\xi_n(x)\psi'_n(mx) - \psi_n(mx)\xi'_n(x)} \quad \text{TM}$$

$$d_n = \frac{\psi_n(mx)\psi'_n(x) - m\psi_n(x)\psi'_n(mx)}{\xi_n(x)\psi'_n(mx) - m\psi_n(mx)\xi'_n(x)} \quad \text{TE}$$

для поля внутри шара:

$$c_n = \frac{-im}{m\xi_n(x)\psi'_n(mx) - \psi_n(mx)\xi'_n(x)} \quad \text{TE}$$

$$d_n = \frac{-im}{\xi_n(x)\psi'_n(mx) - m\psi_n(mx)\xi'_n(x)} \quad \text{TM}$$

обозначения:

$m$  – относительный  
показатель  
преломления

$$m = \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1}}{\sqrt{\varepsilon_s \mu_s}}$$

$x$  – параметр  
дифракции

$$x = ka$$



## Моды шепчущей галереи



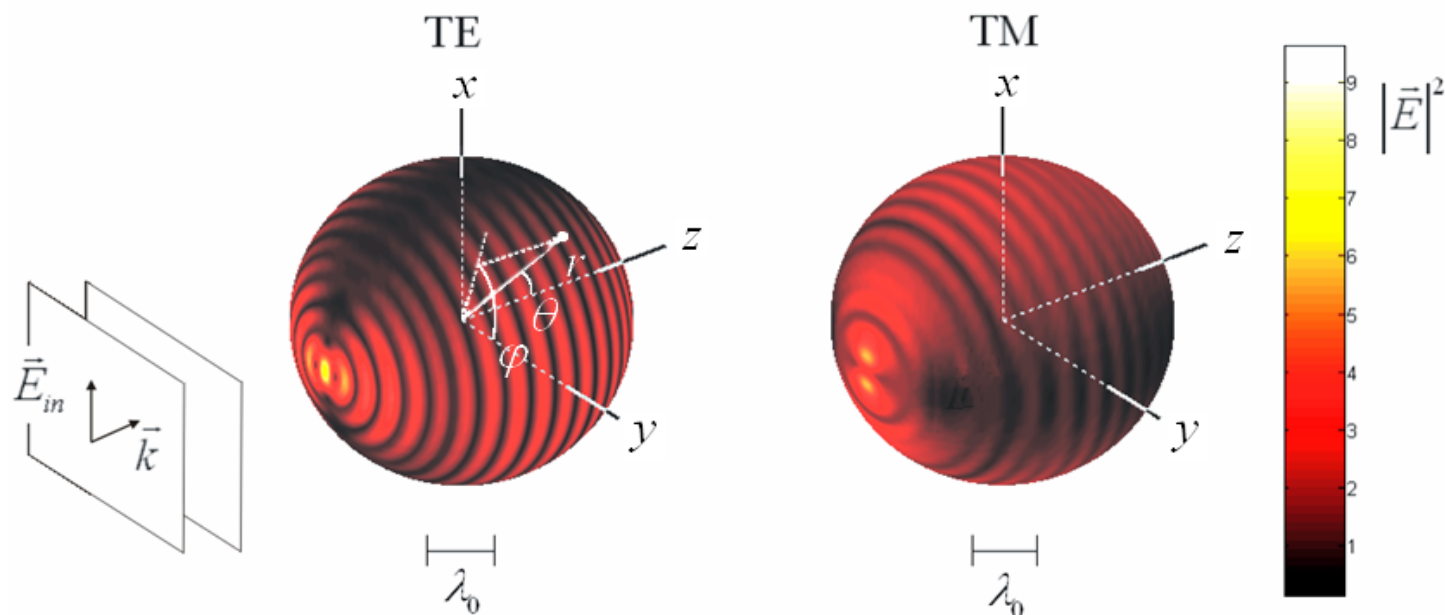
Собор Святого Павла



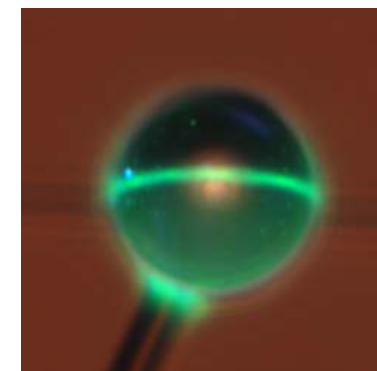
Круглая комната



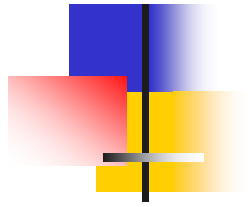
## Распределение полей TE и TM мод



- Структура электрического поля внутри резонатора вблизи поверхности
- Рассмотрены TE и TM моды с  $n=20$ ,  $l=1$



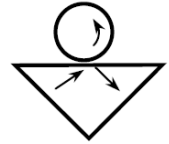
Возбуждение растянутым  
волокном



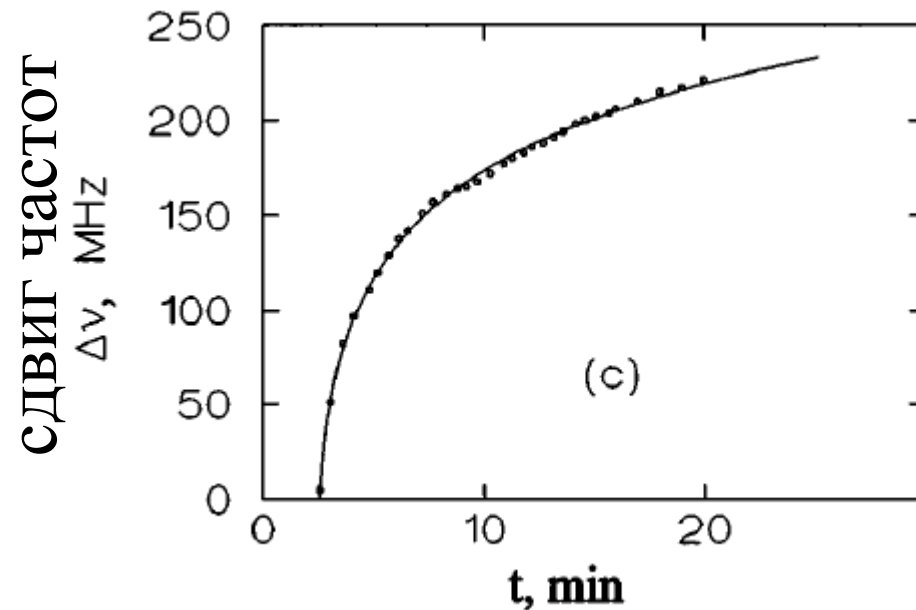
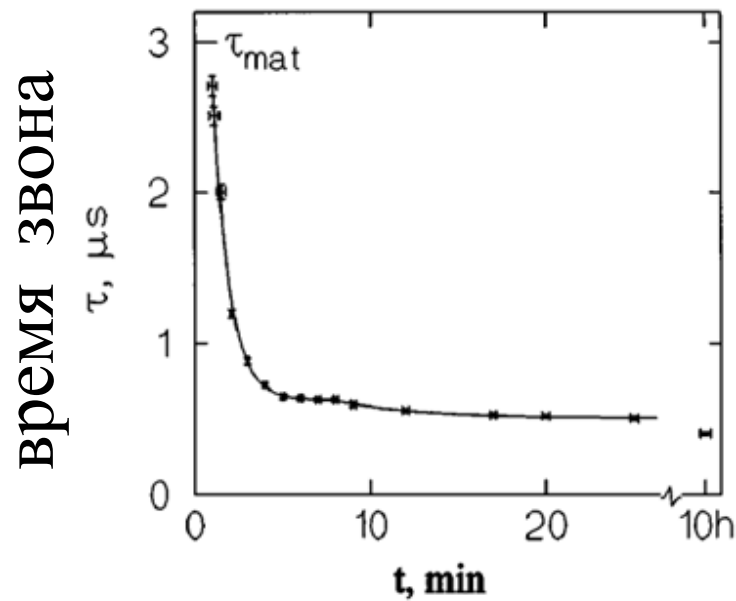
## Приложения

- Диэлектрические частицы
  - Сенсоры поверхностного слоя
  - Механические сенсоры
  - Кинематические сенсоры
  - Резонаторно-улучшенная спектроскопия
  - Квантовая электродинамика резонатора
- Металлические наночастицы
  - Биосенсоры на металлических наночастицах
  - Визуализация тканей и фототермическая терапия
  - Поверхностно-усиленная спектроскопия
  - Оптическая микроскопия ближнего поля

$$Q = (0.8 \pm 0.1) \times 10^{10}$$



## Сенсоры поверхностного слоя



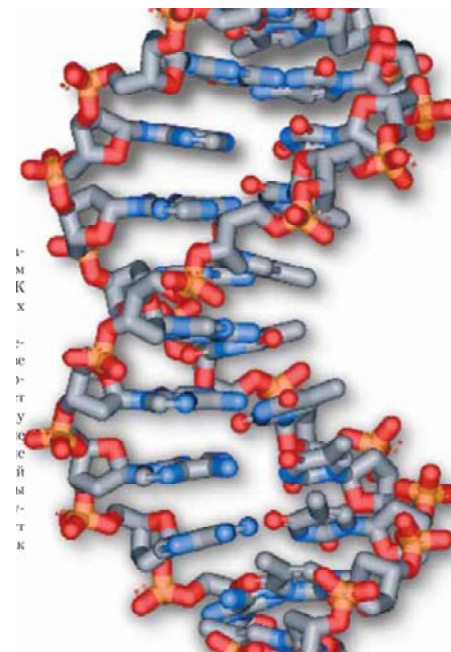
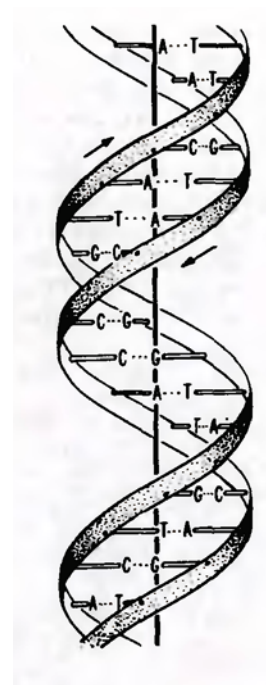
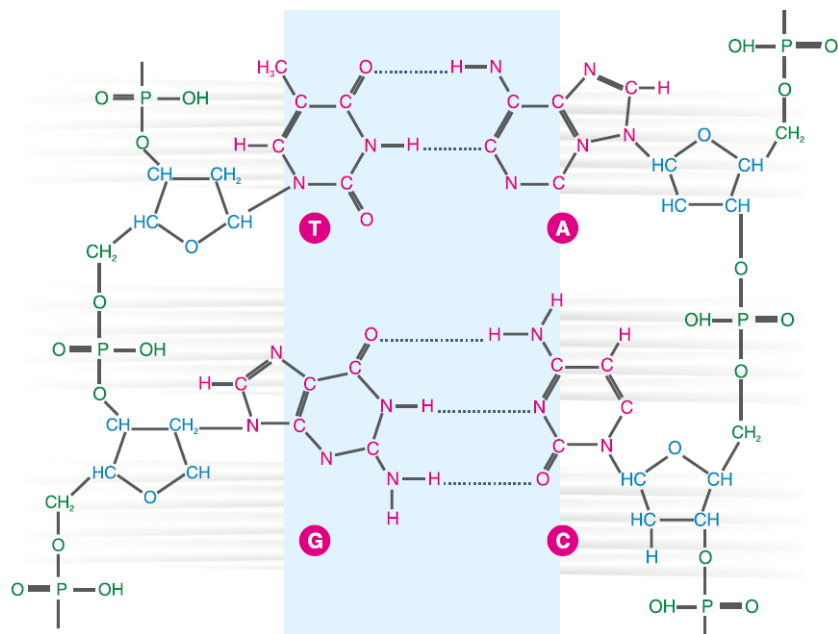
Изменение времени звона и сдвига собственной частоты в процессе адсорбции атмосферной воды на поверхности кварцевого шарика, отожденного при температуре 400° С, а затем охлажденного в течение одной минуты и помещенного на открытый воздух. Диаметр шарика 750 мкм

M. L. Gorodetsky, A. A. Savchenkov, and V. S. Ilchenko, 1996 / Vol. 21, No. 7 / Opt. Lett.





# Биоспецифические взаимодействия



четыре азотистые основания соединяются  
водородными связями - гидрофобными взаимодействиями

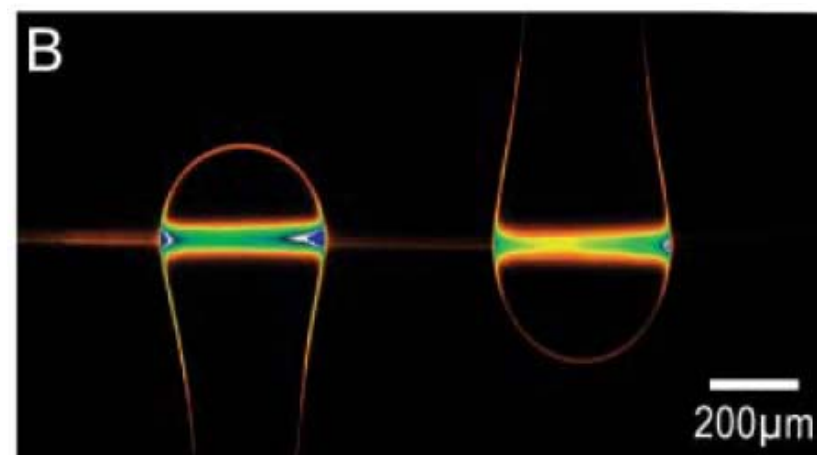
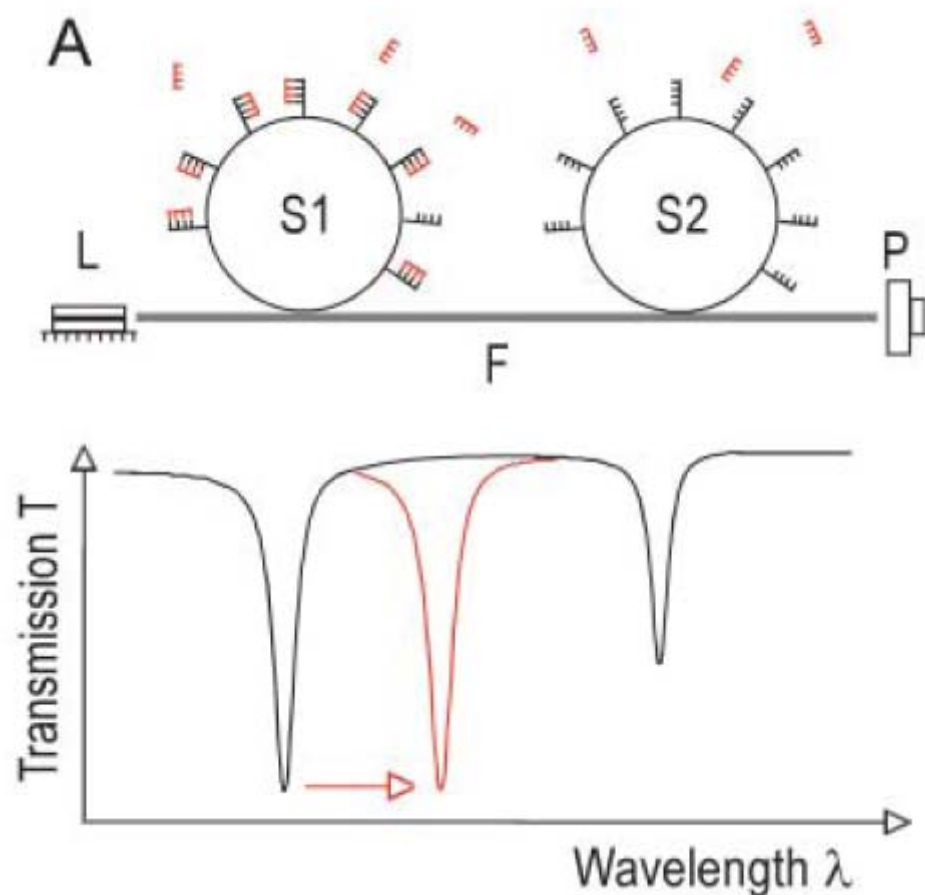
ДНК: А – Аденин, Т – Тимин,  
Г – Гуанин, С - Цитозин

РНК: Тимин <-> Урацил

У млекопитающих:  
длина ДНК  $\sim 1$  м, радиус  $\sim 20$  нм  
число пар нуклеотидов  $\sim 10^9$   
(зенгер)

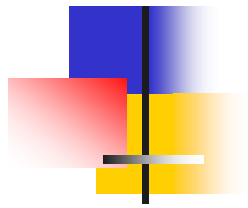


# Количественная регистрация процессов ДНК-ДНК взаимодействия



Олигонуклеотиды из 11 оснований  
Высокая чувствительность: 6 пг/мм<sup>2</sup>  
при соотношении S/N = 54  
и добротности резонаторов  $\sim 5 \times 10^5$

(у коммерческих датчиков СПР  
чувствительность  $\geq 10$  пг/мм<sup>2</sup>)



## Приложения

- Диэлектрические частицы
  - Сенсоры поверхностного слоя
  - Механические сенсоры
  - Кинематические сенсоры
  - Резонаторно-улучшенная спектроскопия
  - Квантовая электродинамика резонатора
- Металлические наночастицы
  - Биосенсоры на металлических наночастицах
  - Визуализация тканей и фототермическая терапия
  - Поверхностно-усиленная спектроскопия
  - Оптическая микроскопия ближнего поля



## Сенсоры смещений

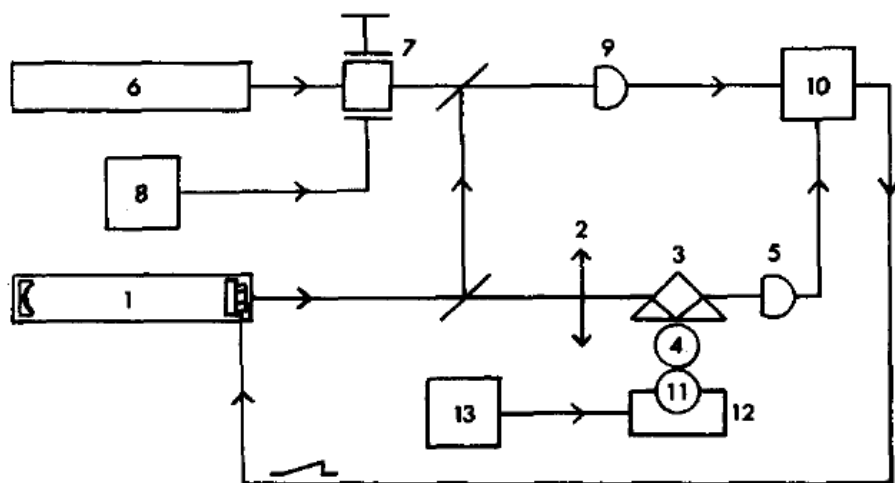


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup for measurement of mechanical tunability and quality-factor of whispering-gallery modes in coupled spherical microresonators. 1: probe laser; 2: objective; 3: prism coupler; 4: first microresonator; 5,9: photoelectron multiplier tube; 6: LO laser; 7: electrooptical modulator; 8: RF oscillator; 10: oscilloscope; 11: second microresonator; 12: piezo-positioner; 13: ac and dc voltage supply for piezo-positioner.

**Фазовая чувствительность:**

$8 \times 10^{-12}$  см/рад

$\lambda = 1.55$  мкм

$Q > 1 \times 10^9$

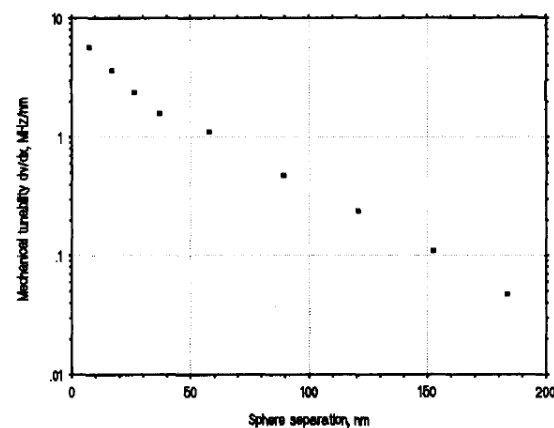
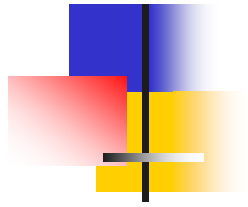


Fig. 2. Mechanical tunability of optical whispering-gallery modes in coupled spherical microresonators: displacement-to-frequency shift sensitivity  $d\nu/dx$  as function of actual gap  $x$  between the resonators. Single sphere diameter  $200 \mu\text{m}$  (mode number  $l=1400$ ); wavelength  $\lambda=632.8 \text{ nm}$  (optical frequency  $\nu=476 \text{ THz}$ ).

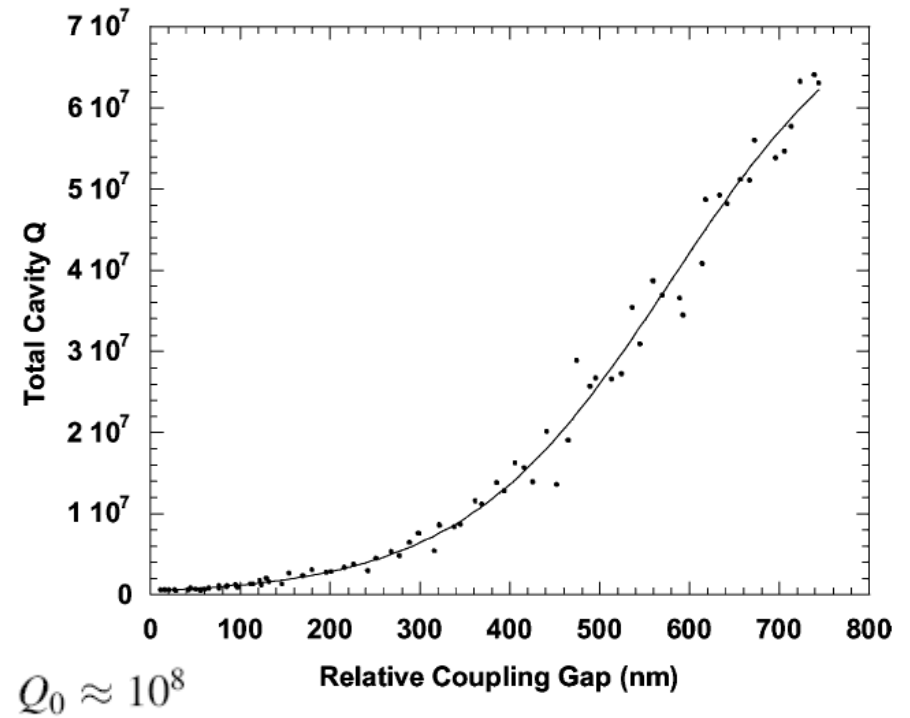
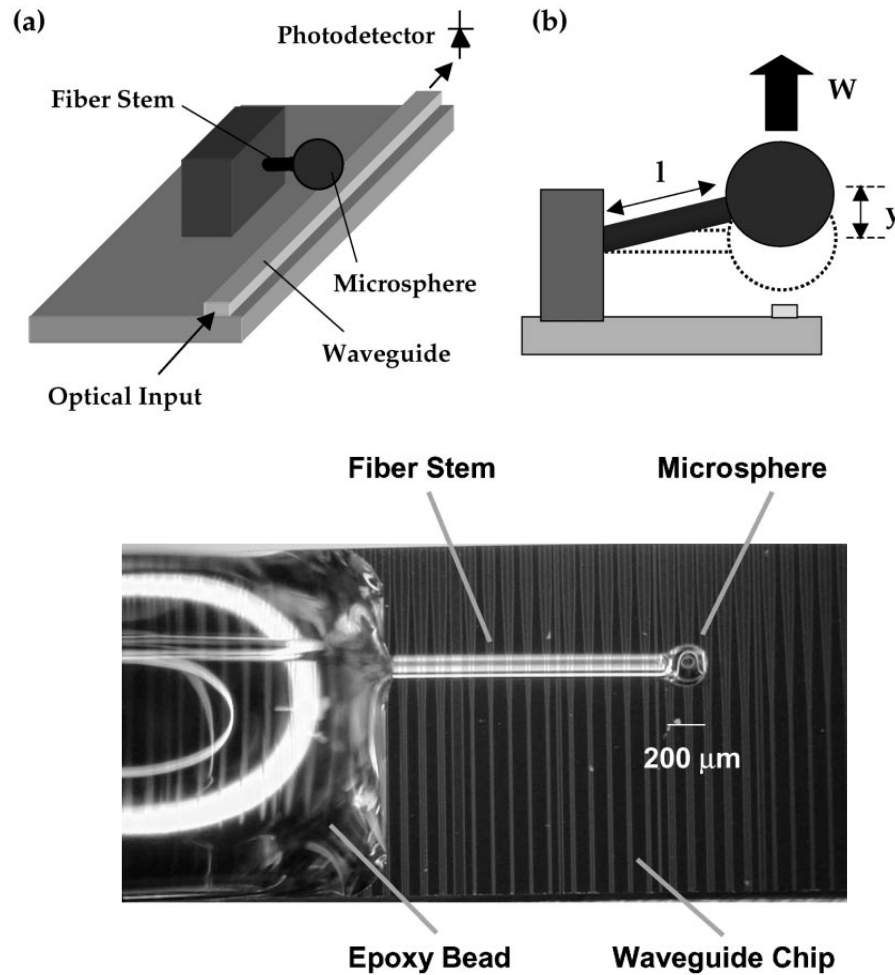


## Приложения

- Диэлектрические частицы
  - Сенсоры поверхностного слоя
  - Механические сенсоры
  - Кинематические сенсоры
  - Резонаторно-улучшенная спектроскопия
  - Квантовая электродинамика резонатора
- Металлические наночастицы
  - Биосенсоры на металлических наночастицах
  - Визуализация тканей и фототермическая терапия
  - Поверхностно-усиленная спектроскопия
  - Оптическая микроскопия ближнего поля



# Сенсоры ускорения



Чувствительность:  $10^{-3}g$   
в полосе частот  $250\text{Hz}$ ,  
и уровнем шумов  $10^{-4}g$



## Гироскопы на резонаторах с МШГ

Разность фаз между волнами,  
распространяющимися в разных  
направлениях

$$\Delta\phi = \frac{2\pi c}{\lambda} \Delta t = \frac{8\pi^2 R^2 \Omega n_0}{\lambda V_g},$$

$$V_g|_{\min} \simeq \frac{aT}{2\tau} = c \frac{T}{4\pi n_0}.$$

$T=1/F$ ,  $F$  – резкость  $\sim 10^4$

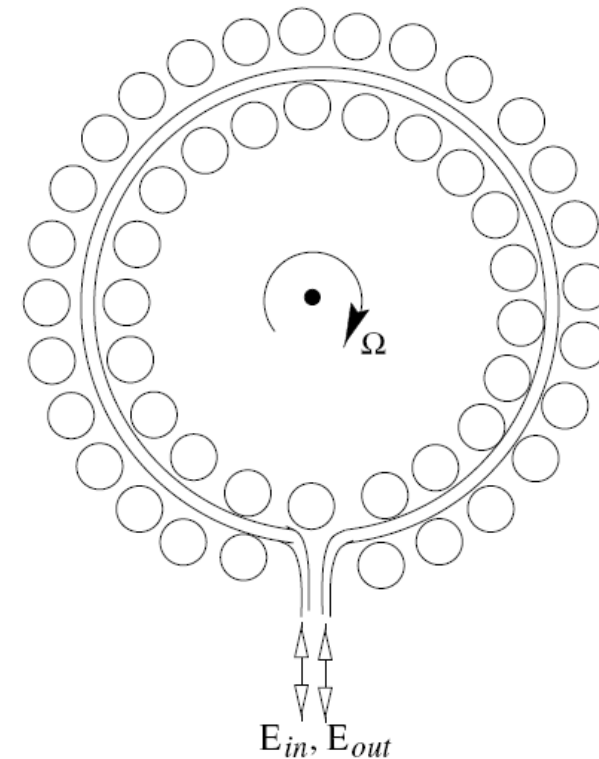
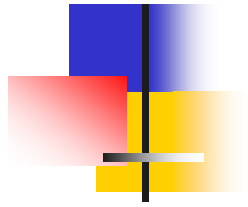


Fig. 1. A waveguide sensor for rotation measurements. High dispersion of the waveguide is achieved due to its coupling to high- $Q$  WGM resonators placed along the waveguide rim.



## Приложения

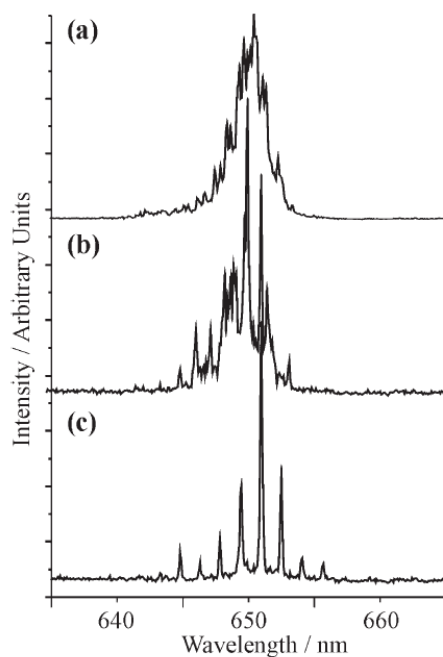
- Диэлектрические частицы
  - Сенсоры поверхностного слоя
  - Механические сенсоры
  - Кинематические сенсоры
  - Резонаторно-улучшенная спектроскопия
  - Квантовая электродинамика резонатора
- Металлические наночастицы
  - Биосенсоры на металлических наночастицах
  - Визуализация тканей и фототермическая терапия
  - Поверхностно-усиленная спектроскопия
  - Оптическая микроскопия ближнего поля





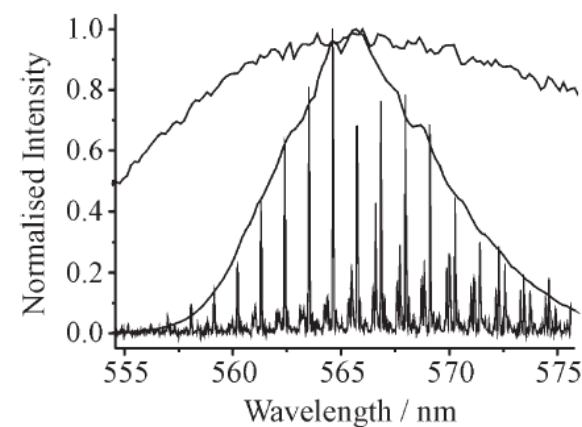
# Резонаторно-улучшенная спектроскопия

ВКР

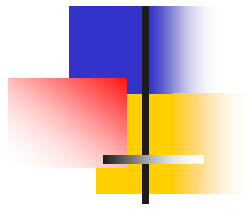


**Fig. 3** Illustration of the effect of illumination geometry on the cavity enhanced Raman fingerprint. The fingerprint shows the Raman scattered O–H stretching band from a probe 532 nm laser pulse, as discussed further in Section IV. In (a)–(c) the laser is translated progressively further from the droplet centre towards the edge.

ВФ

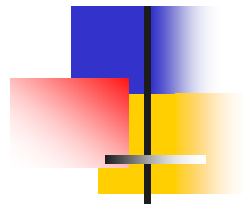


**Fig. 4** A structured fluorescence spectrum for a 34.45  $\mu\text{m}$  radius water droplet doped with  $10^{-5}$  M R6G, compared with the bulk continuous fluorescence spectrum. Progressions of fluorescence from different droplet mode orders can be seen. The scaling of the bulk spectrum, as discussed in Section IV, yields a stimulated fluorescence envelope with a gain factor of  $\sim 12$  which is consistent with the droplet spectrum.



## Приложения

- Диэлектрические частицы
  - Сенсоры поверхностного слоя
  - Механические сенсоры
  - Кинематические сенсоры
  - Резонаторно-улучшенная спектроскопия
  - Квантовая электродинамика резонатора
- Металлические наночастицы
  - Биосенсоры на металлических наночастицах
  - Визуализация тканей и фототермическая терапия
  - Поверхностно-усиленная спектроскопия
  - Оптическая микроскопия ближнего поля



# Квантовая электродинамика резонатора

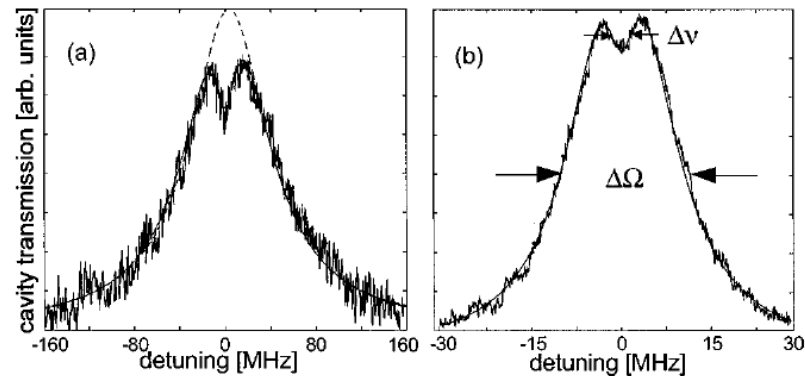


FIG. 2. The transmitted intensity  $T(\omega_L)$  for single WGMs is shown for (a)  $Q=1.5 \times 10^6$  and (b)  $Q=4 \times 10^7$ . In the regime of (a), we infer from a phenomenological model [solid line, see Eq. (3)] that the dip width is driven by a set of atoms selected by the cavity geometry. As the  $Q$  increases (b), the width of the absorptive feature narrows, suggestive of a class of atoms with small velocity. Zero detuning corresponds to the common atom-cavity resonance ( $\omega_L = \omega_a = \omega_c$ ). The inferred empty cavity transmission is indicated in (a) (dashed line).

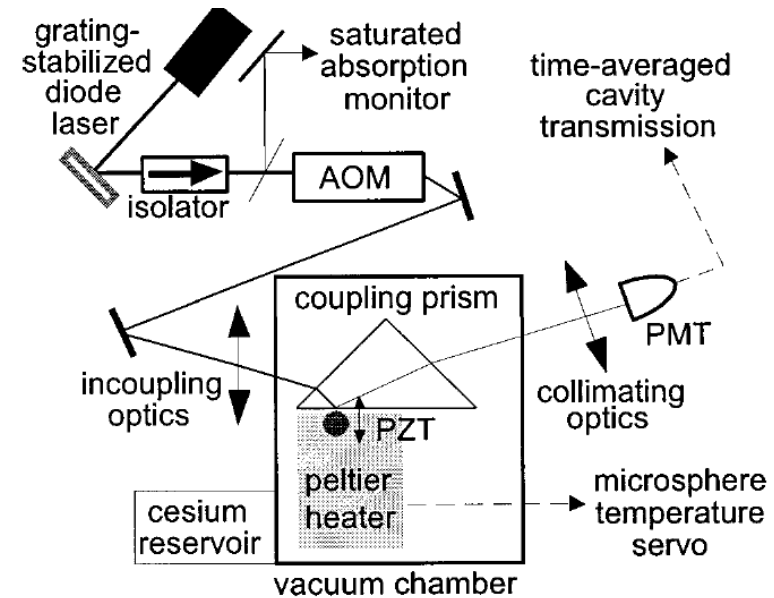
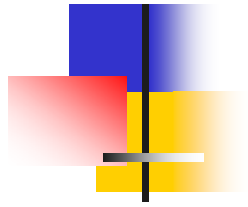


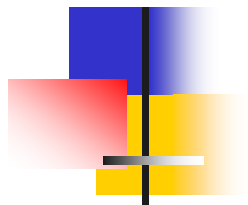
FIG. 1. A simplified schematic of the experimental setup is shown with detailed discussion in the text. The microsphere is indicated by the dark circle at the face of the coupling prism and is surrounded by a dilute atomic cesium vapor.

D. W. Vernooy, A. Furusawa, N. P. Georgiades, V. S. Ilchenko, and H. J. Kimble,  
Phys. Rev. A., 1998, Vol. 57 N 4 P. R2293

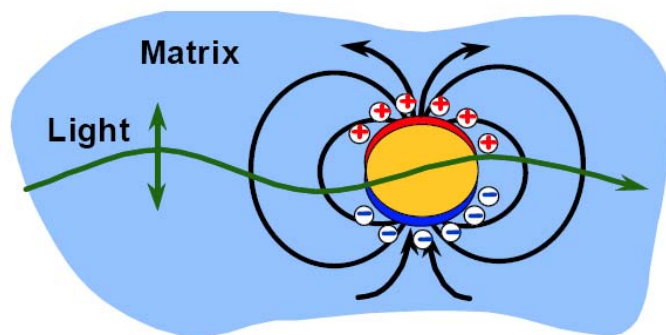


## Приложения

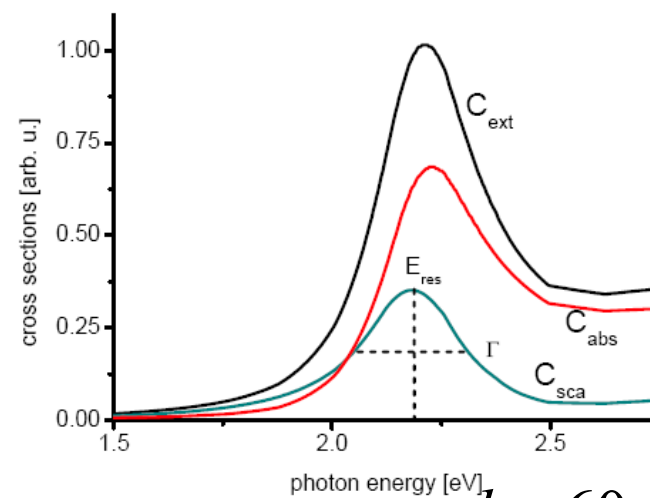
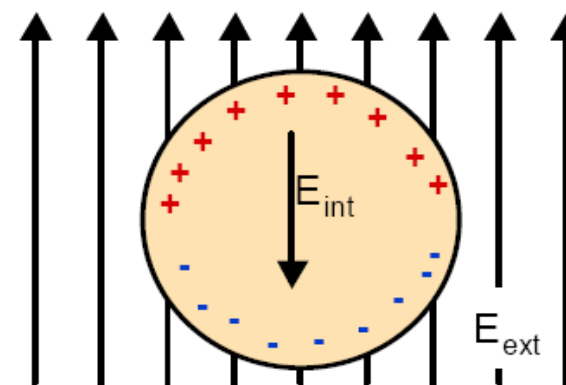
- Диэлектрические частицы
  - Сенсоры поверхностного слоя
  - Механические сенсоры
  - Кинематические сенсоры
  - Резонаторно-улучшенная спектроскопия
  - Квантовая электродинамика резонатора
- Металлические наночастицы
  - Биосенсоры на металлических наночастицах
  - Визуализация тканей и фототермическая терапия
  - Поверхностно-усиленная спектроскопия
  - Оптическая микроскопия ближнего поля



# Плазмонные резонансы



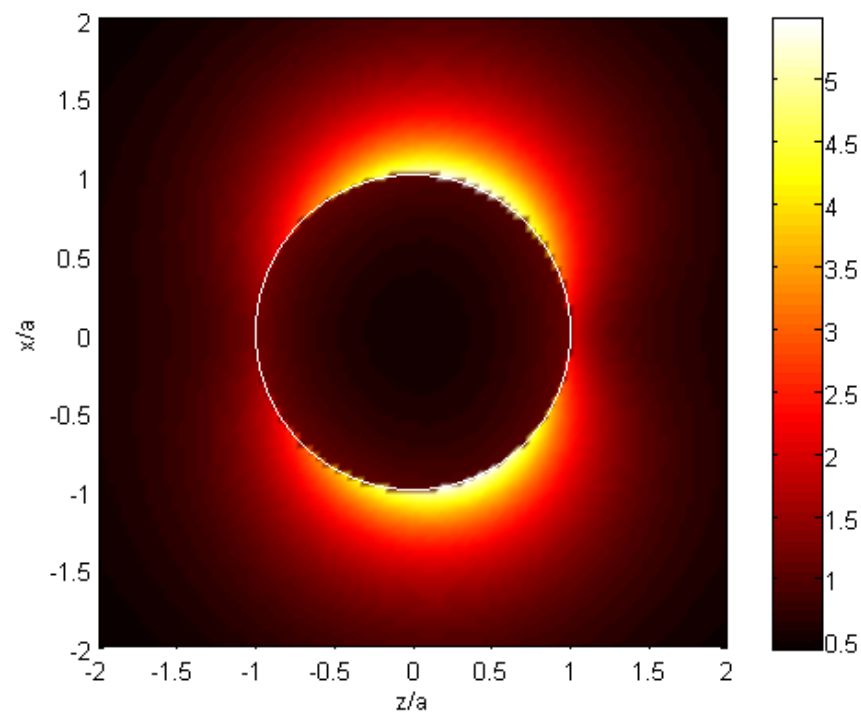
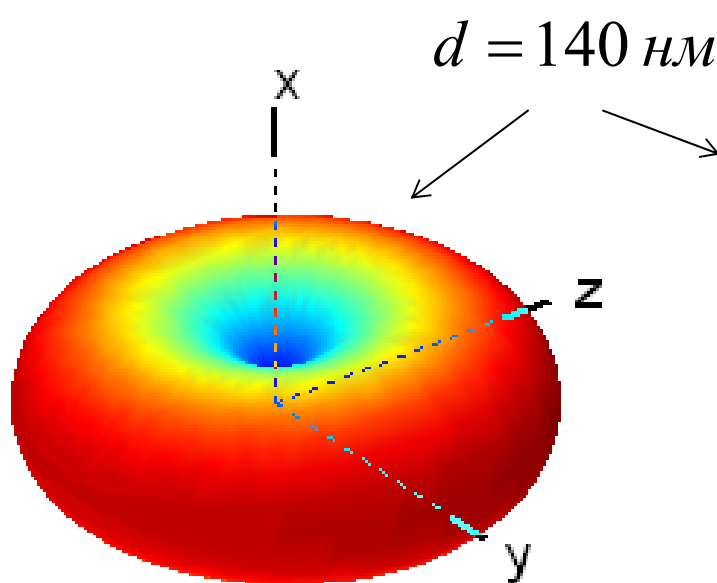
чаша Лукреция



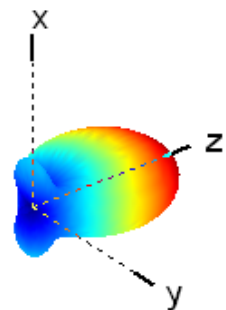
$$d = 60 \text{ нм}$$



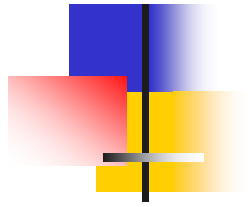
## Распределение электрического поля при рассеянии на золотой наночастице



$d = 312 \text{ нм}$



$$m_{\text{шара}} = 0.16 + 3.17i$$
$$\lambda = 0.655 \text{ мкм}$$

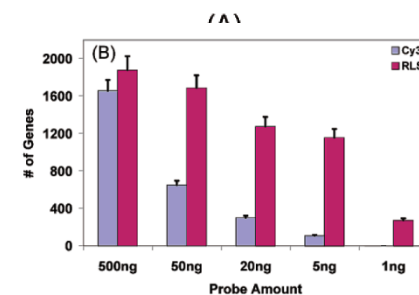
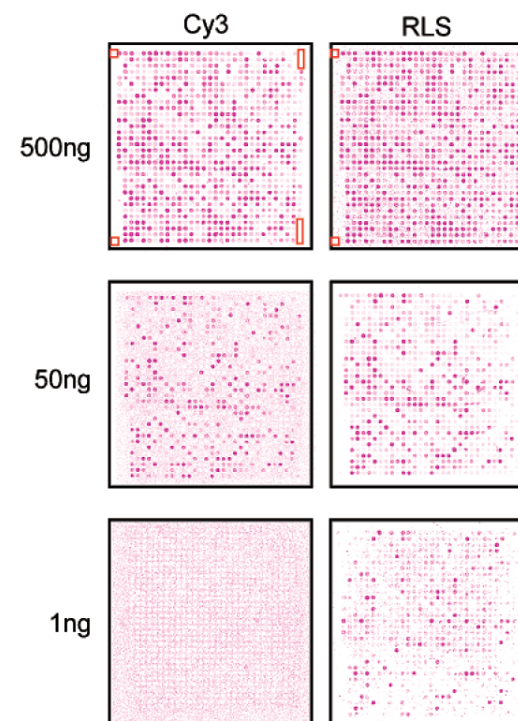
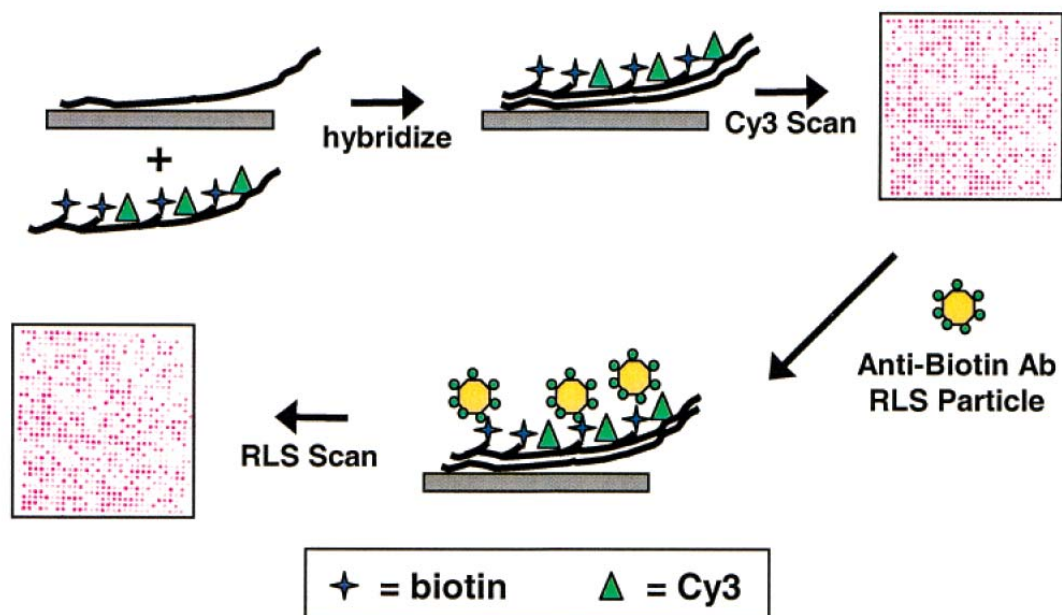


## Приложения

- Диэлектрические частицы
  - Сенсоры поверхностного слоя
  - Механические сенсоры
  - Кинематические сенсоры
  - Резонаторно-улучшенная спектроскопия
  - Квантовая электродинамика резонатора
- Металлические наночастицы
  - Биосенсоры на металлических наночастицах
  - Визуализация тканей и фототермическая терапия
  - Поверхностно-усиленная спектроскопия
  - Оптическая микроскопия ближнего поля

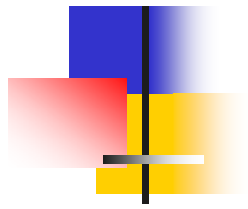


# Биосенсоры на металлических наночастицах



Bao, P.; Frutos, A. G.; Greef, C.; Lahiri, J et al.  
*Anal. Chem.*, **2002**, 74, 1792-1797



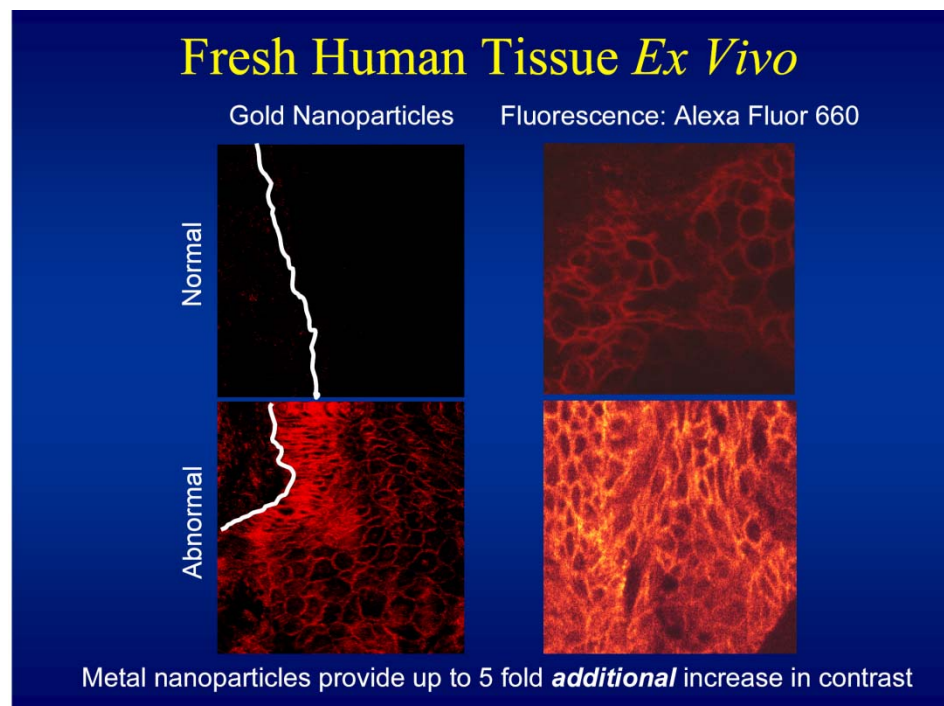


## Приложения

- Диэлектрические частицы
  - Сенсоры поверхностного слоя
  - Механические сенсоры
  - Кинематические сенсоры
  - Резонаторно-улучшенная спектроскопия
  - Квантовая электродинамика резонатора
- Металлические наночастицы
  - Биосенсоры на металлических наночастицах
  - Визуализация тканей и фототермическая терапия
  - Поверхностно-усиленная спектроскопия
  - Оптическая микроскопия ближнего поля

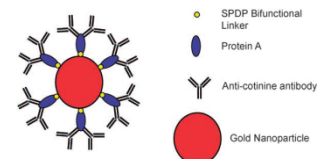
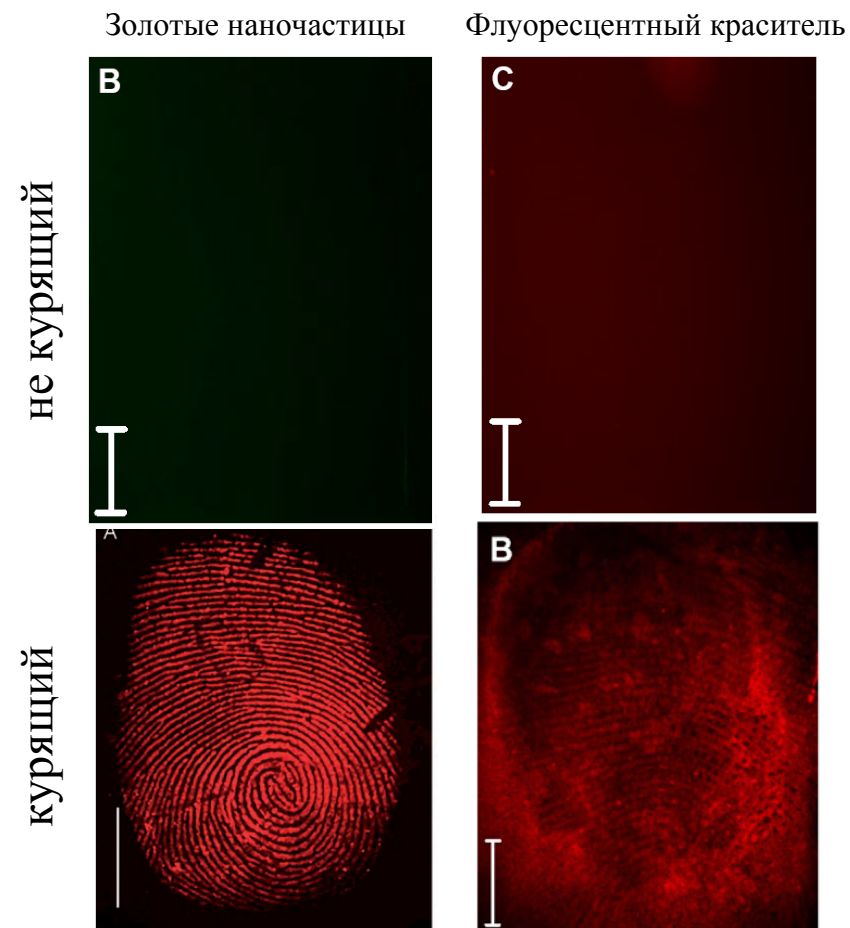


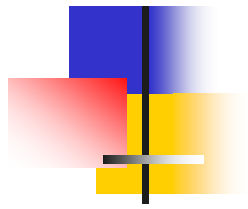
# Визуализация тканей и фототермическая терапия



K. Sokolov, presentation, 2006

R. Leggett, E. E. Lee-Smith, S. M. Jickells,  
Angew. Chem. Int. Ed. 2007, 46, 4100 –410



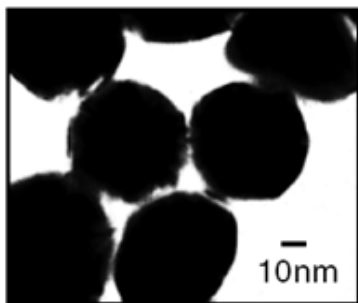
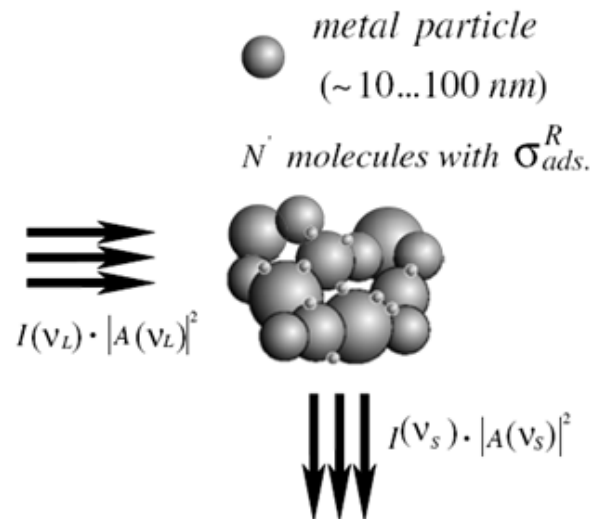


## Приложения

- Диэлектрические частицы
  - Сенсоры поверхностного слоя
  - Механические сенсоры
  - Кинематические сенсоры
  - Резонаторно-улучшенная спектроскопия
  - Квантовая электродинамика резонатора
- Металлические наночастицы
  - Биосенсоры на металлических наночастицах
  - Визуализация тканей и фототермическая терапия
  - Поверхностно-усиленная спектроскопия
  - Оптическая микроскопия ближнего поля



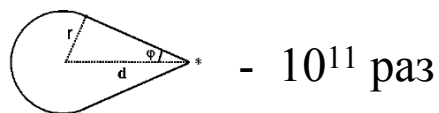
# Поверхностно – усиленная ВКР спектроскопия



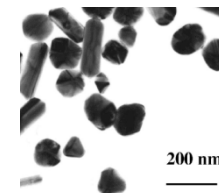
В объемных средах ВКР имеет сечение:  
 $\sim 10^{-30}$  см<sup>2</sup> на молекулу. Это намного ниже  
 соответствующего для ВФ:  
 $\sim 10^{-16}$  см<sup>2</sup> на молекулу.

При наличии наночастиц достигнуты  
 коэффициенты усиления ВКР в  
 $10^{14}$  --  $10^{15}$  раз

Изолированный одиночный сфероид, из  
 серебра или золота может обеспечить  
 усиление в  $10^6$  -  $10^7$  раз



**ГИГАНТСКОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ**  
 света — эффект, проявляющийся в увеличении (до  
 $10^6$ ) интенсивности линий при комбинац. рассеянии  
 света на адсорбир. молекулах. В зарубежной литера-  
 1988





# Поверхностно – усиленная флуоресценция

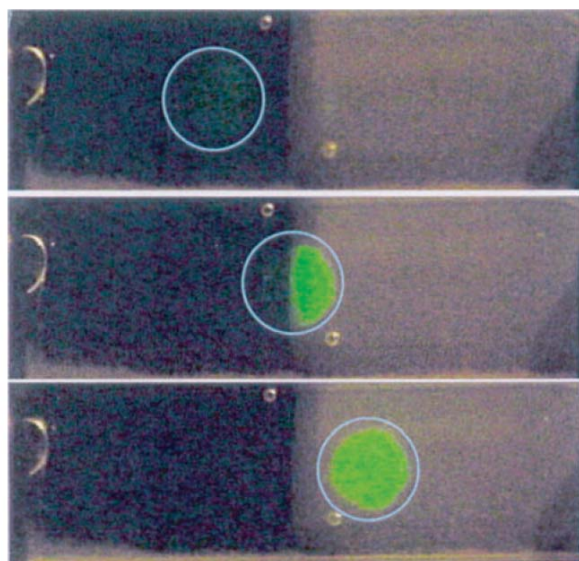


Figure 1. Photograph of fluorescein-labelled human serum albumin (HSA) on quartz and SIFs.

0-50 Å – ВФ подавляется  
50-200 Å – усиливается

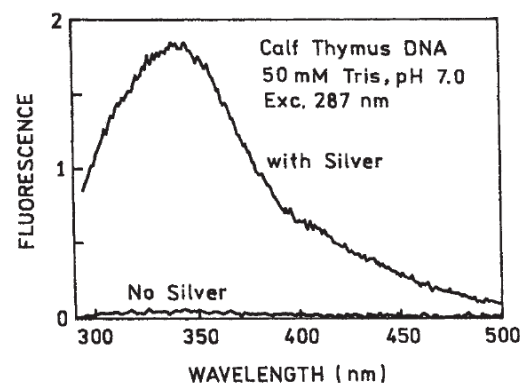
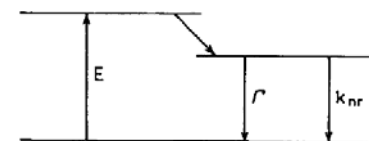
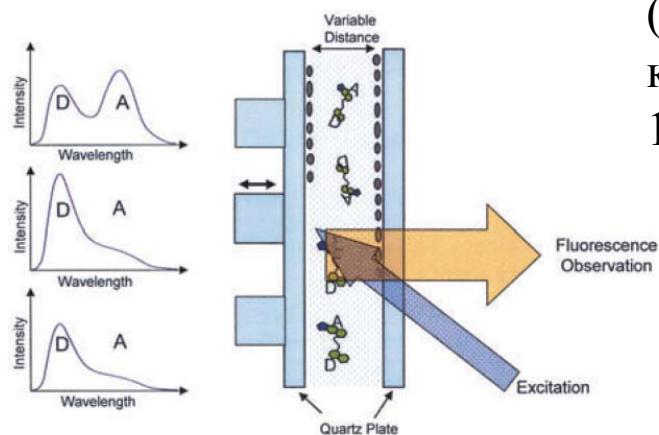
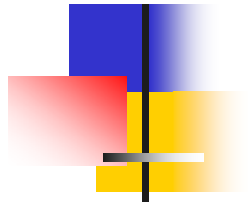


Figure 8. Emission spectra of calf thymus (ct) DNA in solution and near SIFs.



достигнуты  
коэффициенты усиления  
ВФ в 2000 раз  
(для веществ с низким  
квантовым выходом  
 $10^{-4} - 10^{-5}$ )





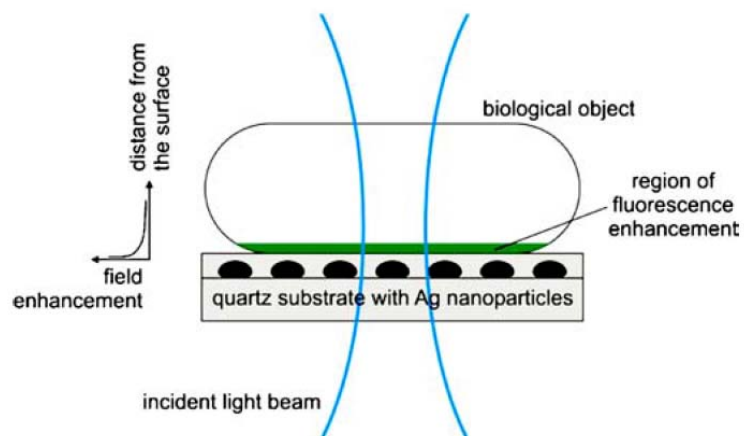
## Приложения

- Диэлектрические частицы
  - Сенсоры поверхностного слоя
  - Механические сенсоры
  - Кинематические сенсоры
  - Резонаторно-улучшенная спектроскопия
  - Квантовая электродинамика резонатора
- Металлические наночастицы
  - Биосенсоры на металлических наночастицах
  - Визуализация тканей и фототермическая терапия
  - Поверхностно-усиленная спектроскопия
  - Оптическая микроскопия ближнего поля



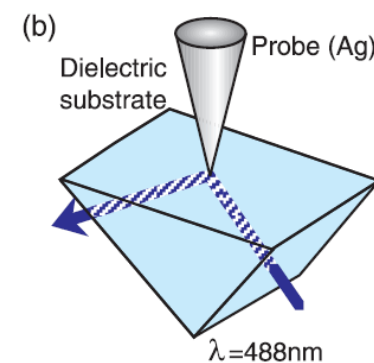
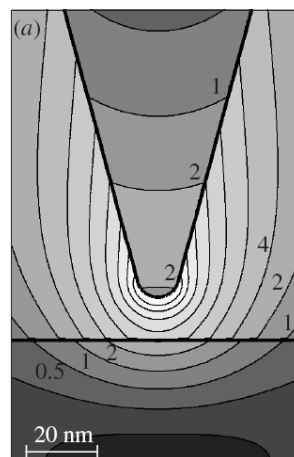
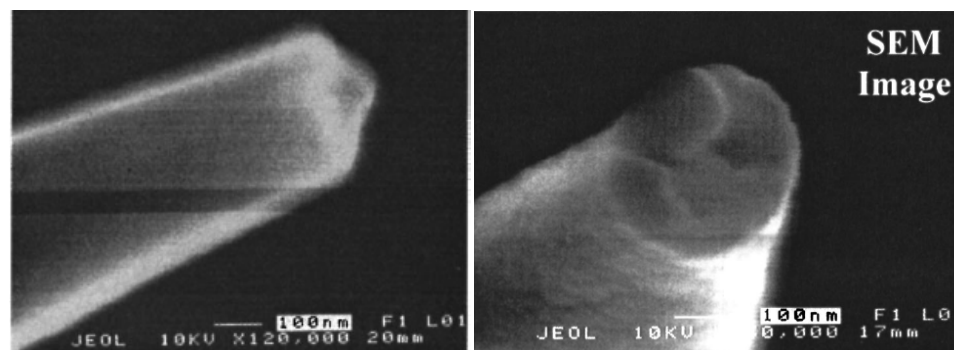
# Применение наночастиц в микроскопии

лазерной конфокальной  
сканирующей микроскопии



Alschinger, M.; Maniak, M.; Stietz, F.; Vartanyan, T. et al.  
*Appl. Phys. B*, **2003**, 76, 771-774  
Kawata S. (editor) Near-Field Optics and Surface Plasmon  
Polaritons, *Springer*, **2001**

в оптической ближнепольной  
микроскопии





Спасибо за внимание!