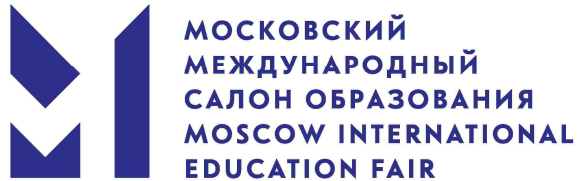


Как сделать шапку невидимку и что такое метаматериалы?



Алексей Андреевич Башарин

Alexey.basharin@misis.ru

Доцент, научный сотрудник

Лаборатория «Сверхпроводящие метаматериалы»

Кафедра Теоретической физики и квантовых технологий

Лаборатория «Сверхпроводящие метаматериалы» НИТУ МИСиС

Самое холодное место в Москве.



Криостат: $T=0.25\text{ K}$ или -273 C

Самое чистое место в Москве.



Чистая комната **для производства**
метаматериалов



Проф. Алексей А. Абрикосов,
Нобелевская Премия по физике, 2003

Самое тихое место в Москве



Компактная безэховая камера

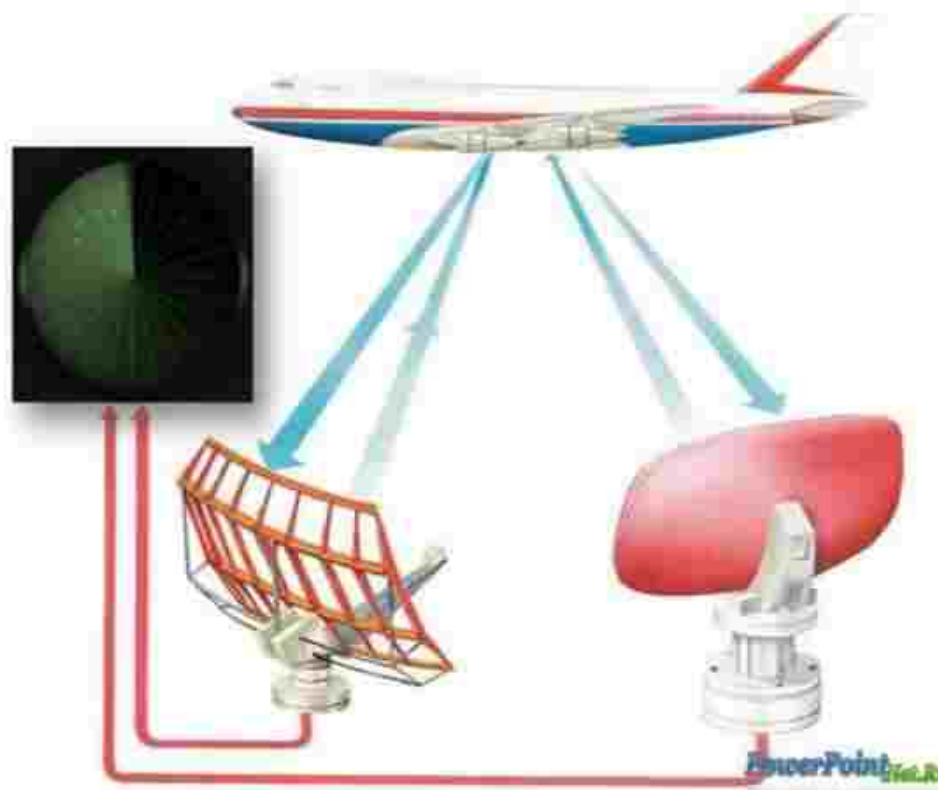


Проф. Алексей Устинов

Как мы видим?



Отраженный от предмета свет попадает на сетчатку глаза, откуда полученная "информация" передается в мозг



Как создать шапку невидимку?

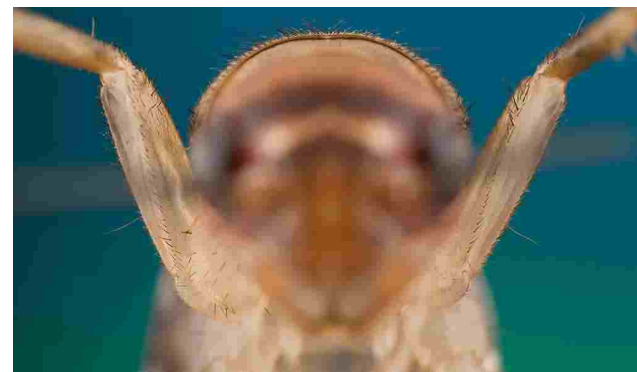


Невидимость или как можно скрыть объект

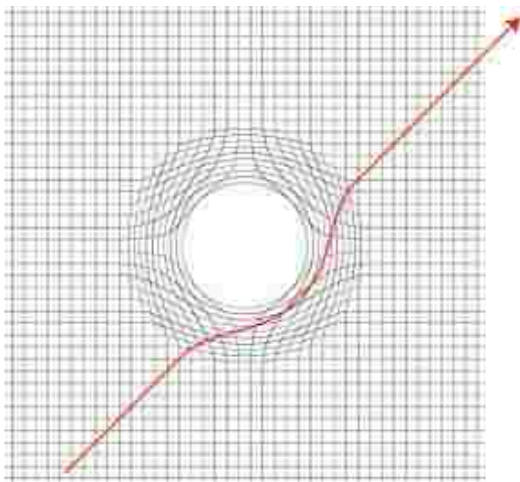
СТЕЛС- технологии



Дифракционный предел



Трансформационная оптика



Анаполь

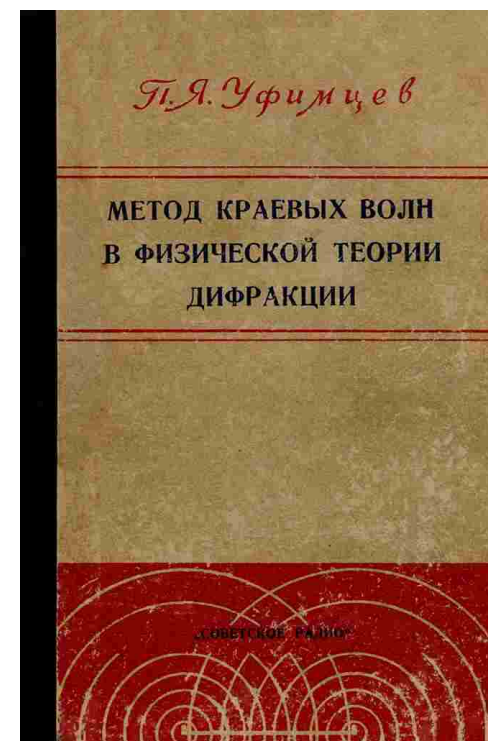


СТЕЛС- технологии

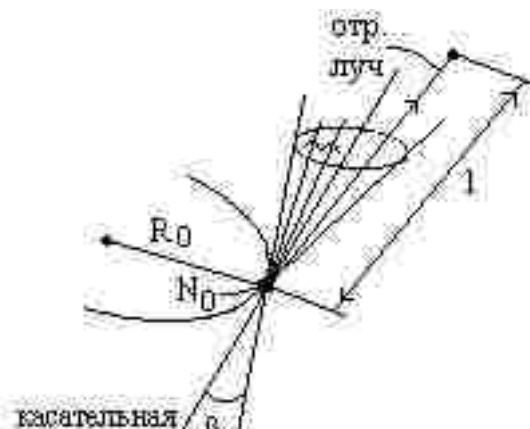
Комплекс способов снижения заметности боевых машин в радиолокационном, инфракрасном и других областях спектра обнаружения посредством специально разработанных геометрических форм и использования радиопоглощающих материалов и покрытий.



Уфимцев П.Я (1962)



СТЕЛС- технологии



Проблемы СТЕЛС- технологий



Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий

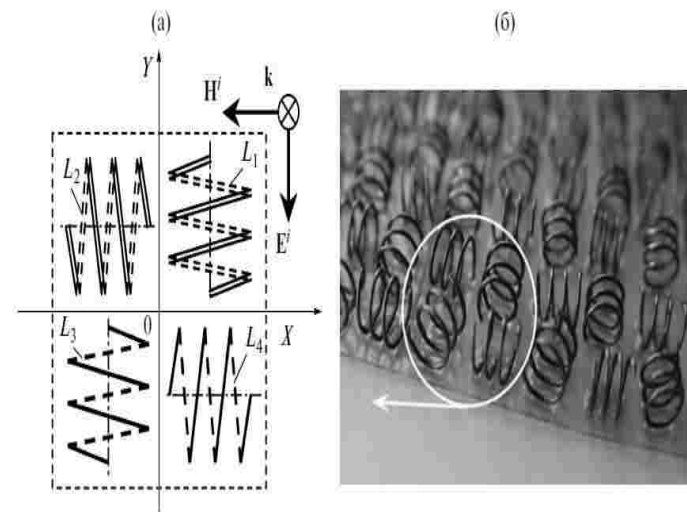
Авторы: А.Н. Лагарьков, М.А. Погосян

ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК том 73, № 9, с. 848 (2003)

СТЕЛС- технологии



СТЕЛС- технологии. Решение проблем- МЕТАматериалы



Дифракционный предел

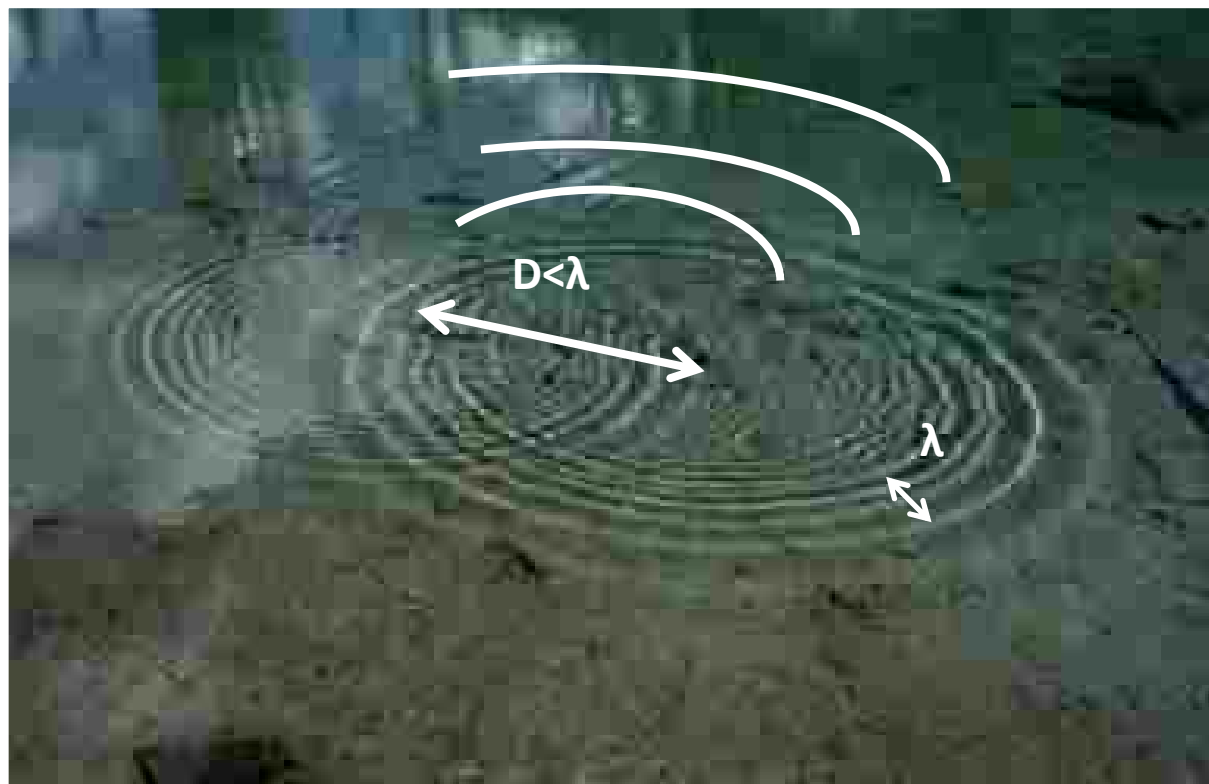
**Мы не можем различить
предметы, если расстояние между
ними менее длины волны света**



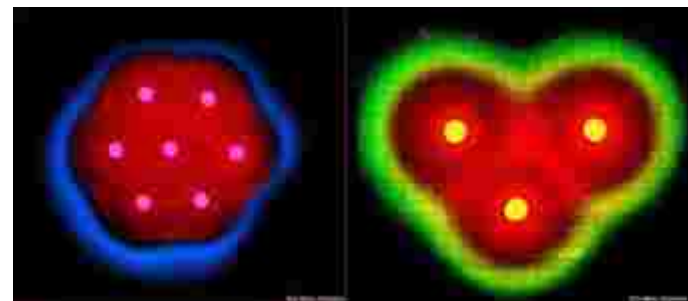
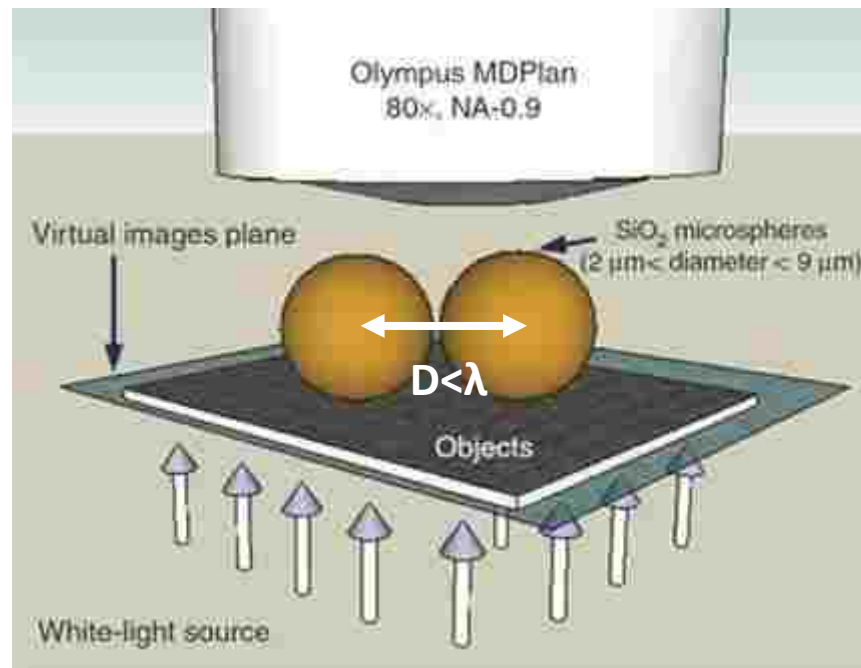
Ограничение микроскопии

Бросая в воду камешки, смотри на круги, ими образуемые: иначе такое бросание будет пустою забавой.

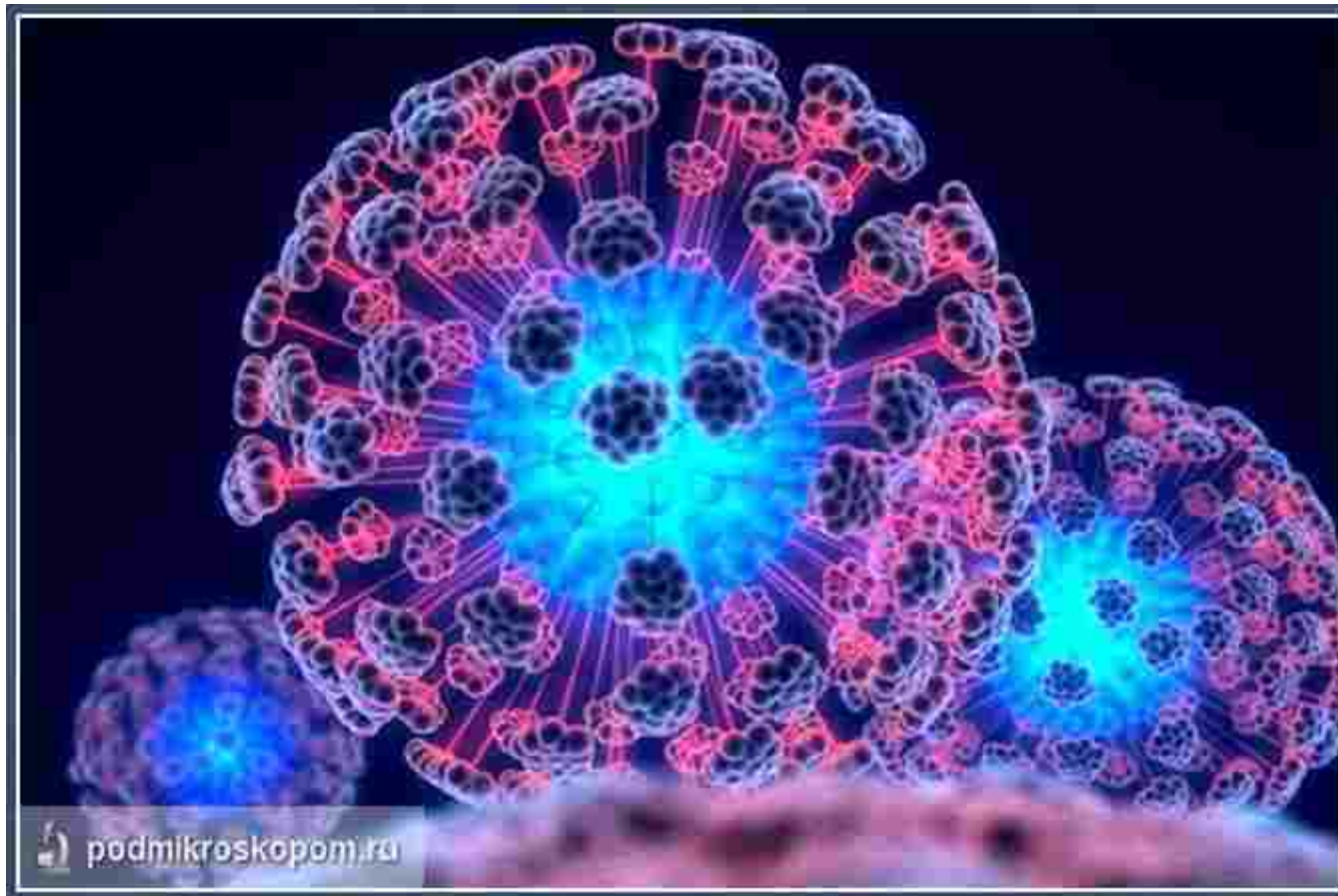
Козьма Прутков



Дифракционный предел

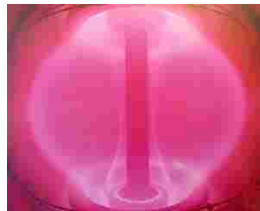


Как преодолеть дифракционный предел? МЕТАматериалы



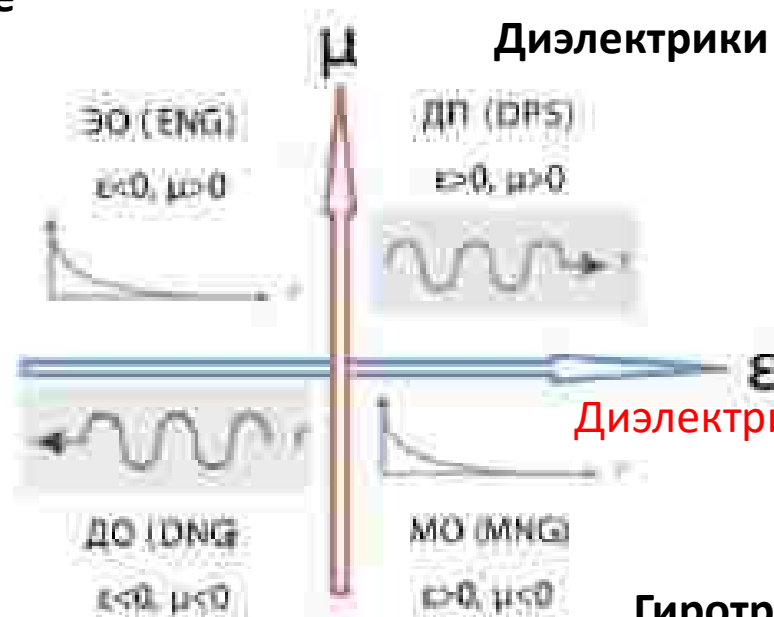
Классификация оптических свойств веществ

Плазма,
металлы в оптике



Магнитная проницаемость

Диэлектрики и магнетики

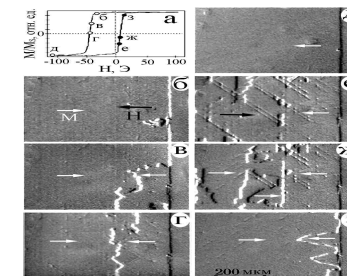


Диэлектрическая проницаемость

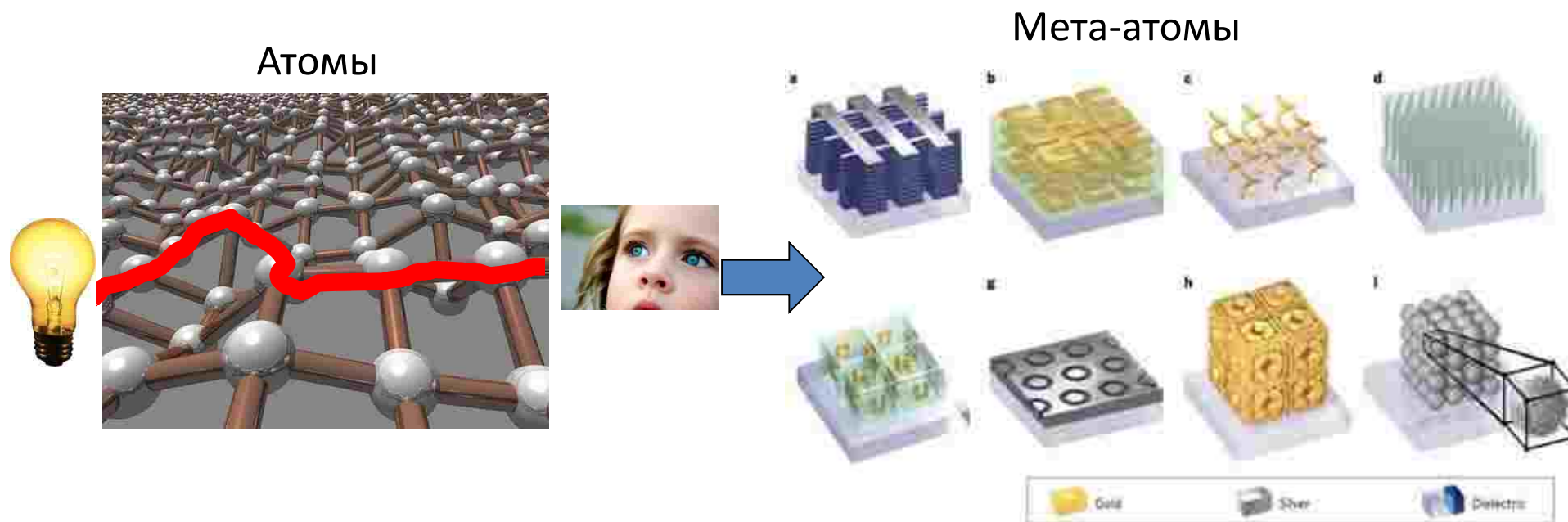
Метаматериалы



Гиротропные магнитные материалы



Что такое метаматериалы?



Метаматериалы обладают **оптическими** свойствами, **недостижимыми** в природных материалах!

Историческая справка

Витражи собора г. Шатр, Франция

Древнеримская чаша Ликурга, 1 век н.э.



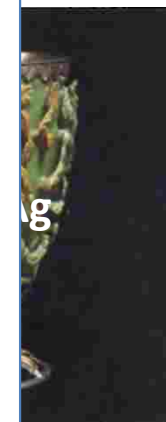
Сечение рассеяния (произв. ед.)

Liz-Marzan 2004

Иоган Кунгель 17 век

Михаил Ломоносов 18 век

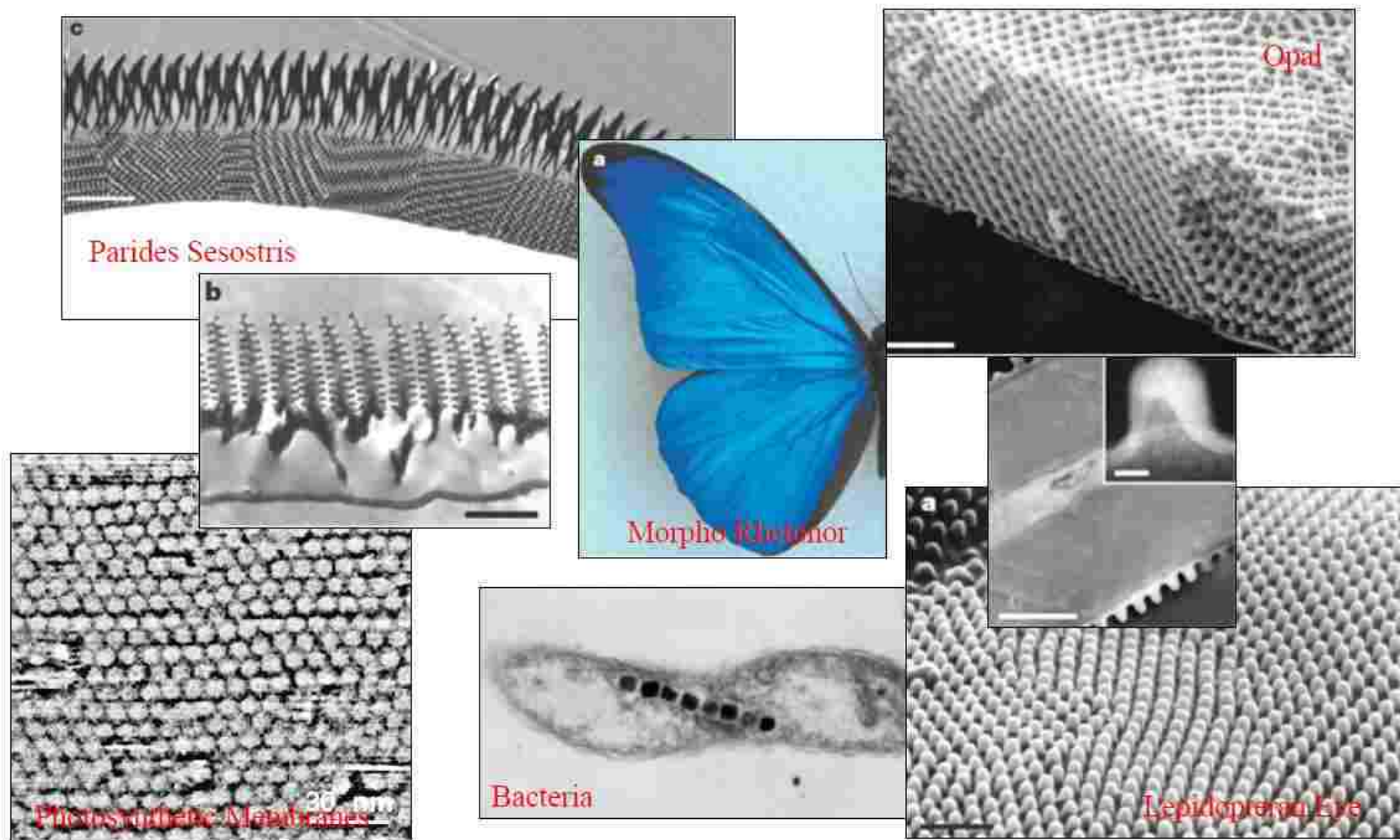
Н. Курочкин 20 век



ды Кремля

Наночастицы Au и Se

Историческая справка. Нано-частицы в природе



Теория. Уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} H = \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t}$$

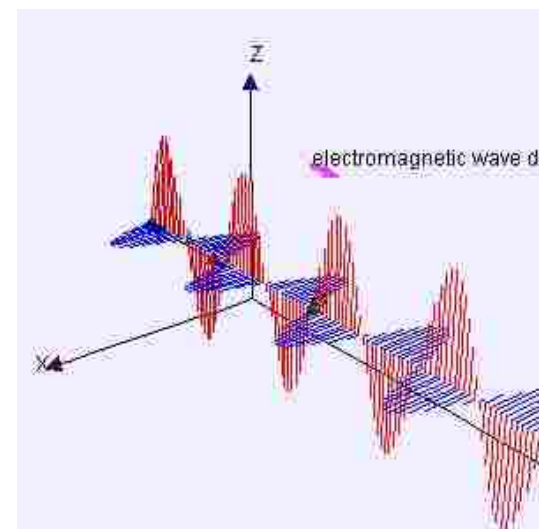
$$\operatorname{rot} E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$D = \varepsilon E$$

$$B = \mu H$$

E, H - напряженности электрического и магнитного полей

$S = [EH]$ - Вектор Пойтинга, энергия волны

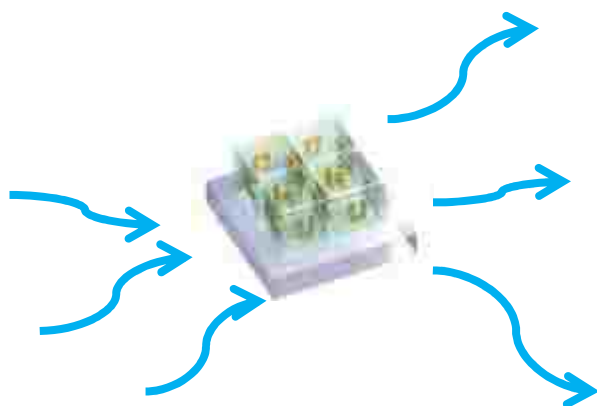


Резонанс? Добротность?

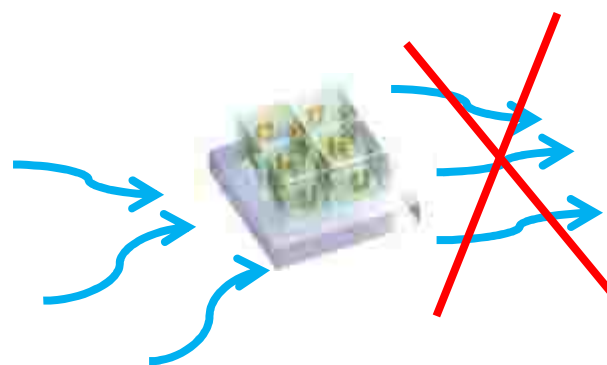
Добротность- параметр **резонатора (МЕТАатома)**, характеризующий во сколько раз **запасы** энергии в системе больше чем **потери** энергии!

$$Q=W/P,$$

Где W- запасенная энергия, P- рассеиваемая мощность



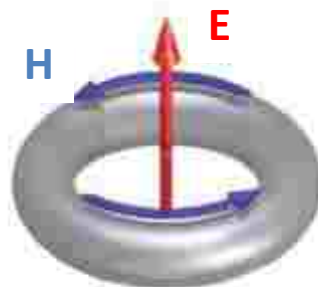
Плохой резонатор



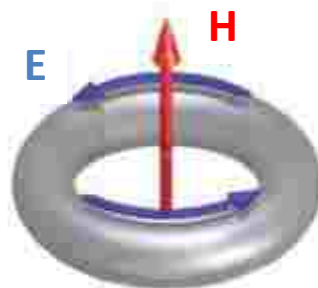
Хороший резонатор

Теория. Уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot} H = \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t}$$



$$\operatorname{rot} E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}$$



rot- оператор вращения

Работы Веселаго



$$\operatorname{rot} H = \frac{1}{c} \frac{\partial D}{\partial t}$$

В случае $\epsilon, \mu > 0$ вектора E, H, S образуют
правую тройку векторов

$$\operatorname{rot} E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$D = \epsilon E$$
$$B = \mu H$$

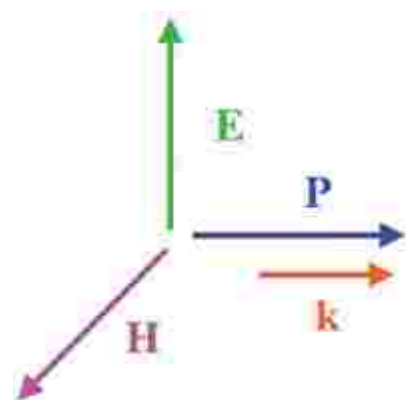
В случае $\epsilon, \mu < 0$ вектора E, H, S образуют
левую тройку векторов

$$S = [EH]$$

Веселаго, 1967

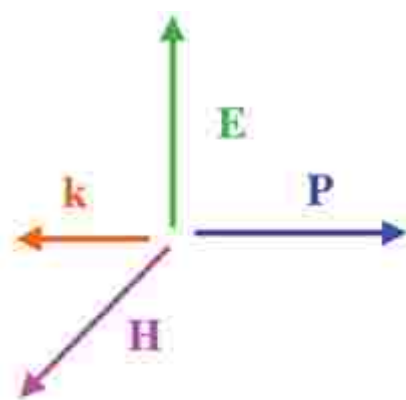
Работы Веселаго

$\epsilon, \mu > 0$



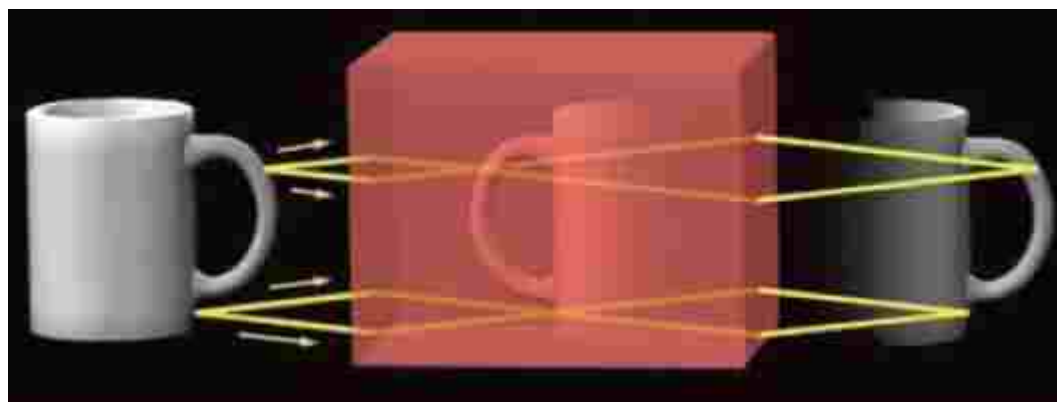
(a) Right-handed material (RHM)

$\epsilon, \mu < 0$



(b) Left-handed material (LHM)

P - Вектор Пойтинга или направление распространения энергии
 k - фаза волны, фазовая скорость



Отрицательное преломление



Пустой стакан

Стакан с обычной
водой, $n = 1.3$

Стакан с «левой»
водой, $n = -1.3$

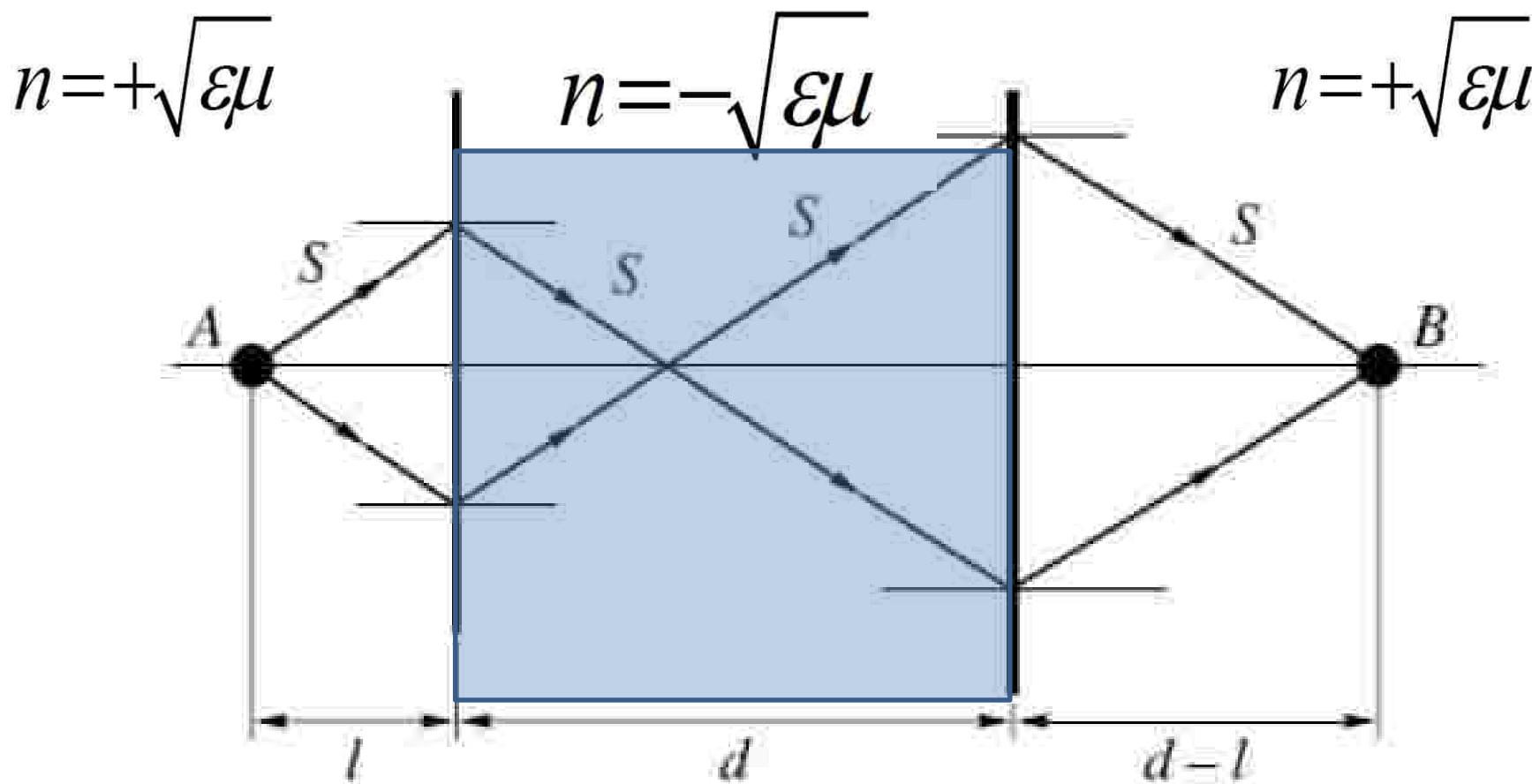
$$n = +\sqrt{\epsilon\mu}$$

$$\epsilon, \mu > 0$$

$$n = -\sqrt{\epsilon\mu}$$

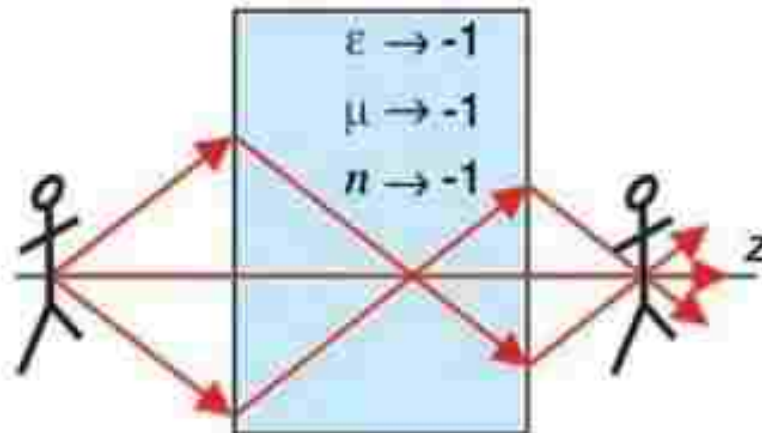
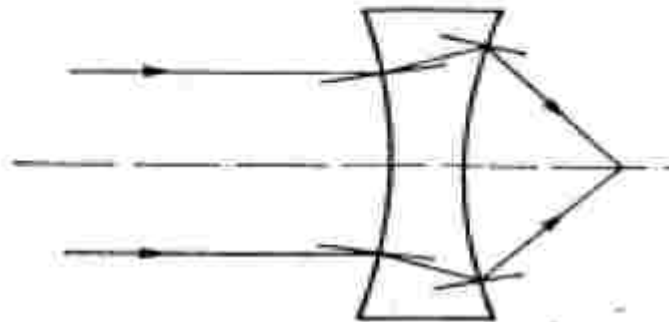
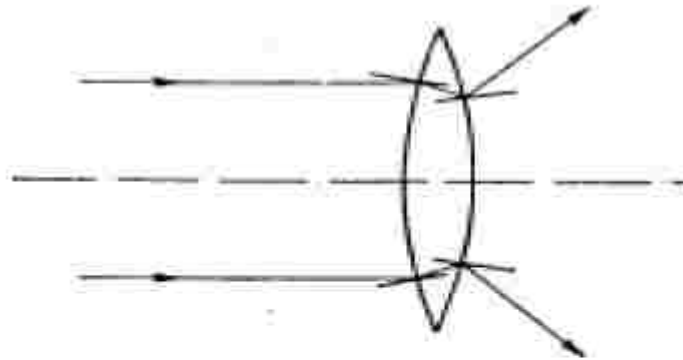
$$\epsilon, \mu < 0$$

Идеальная линза Веселаго

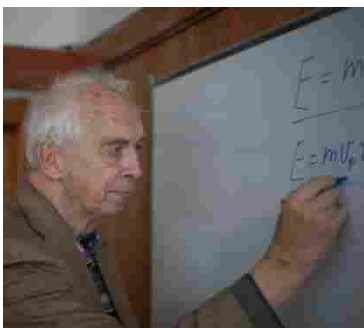


**Линза без аберраций! Нет
сферических нет хроматических**

Обычные линзы



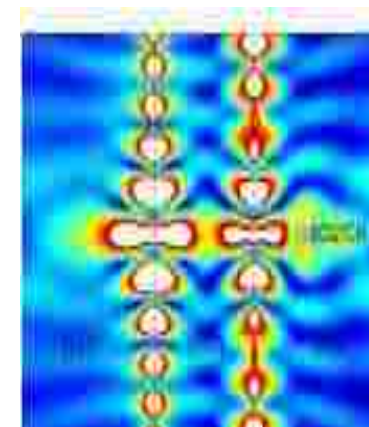
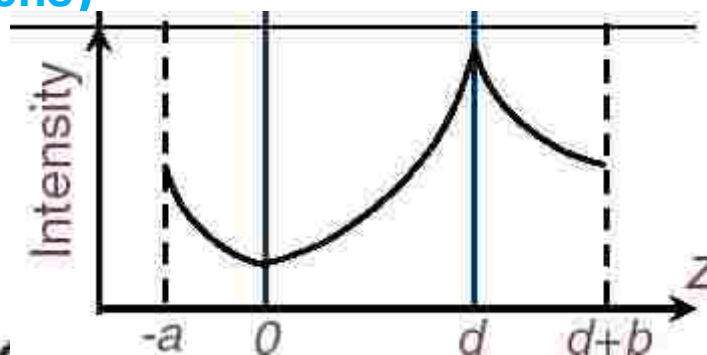
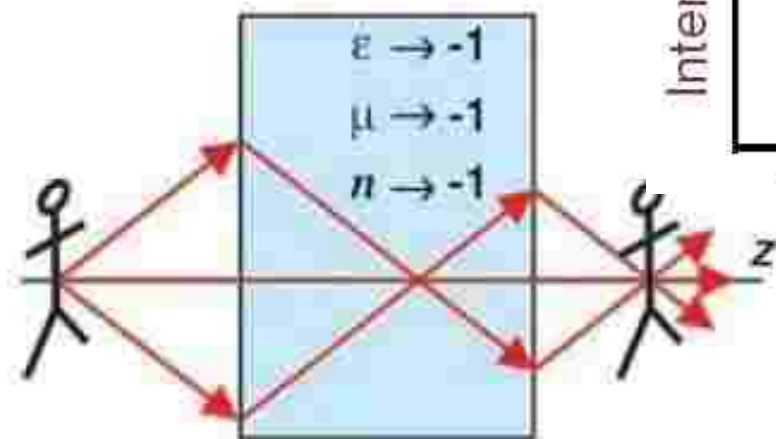
Линзы Веселаго и Пендри



Виктор Георгиевич Веселаго, Россия
(1967-Veselago Lens)



Sir John Pendry, UK
(2000-Pendry Lens)



Плазмоны- волны локализованные в «нано», вдоль границ металлов

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 182, NUMBER 2

10 JUNE 1969

Surface Plasmons in Thin Films

E. N. ECONOMOU*†

The James Franck Institute and Department of Physics, The University of Chicago, Chicago, Illinois 60637

(Received 15 January 1969)

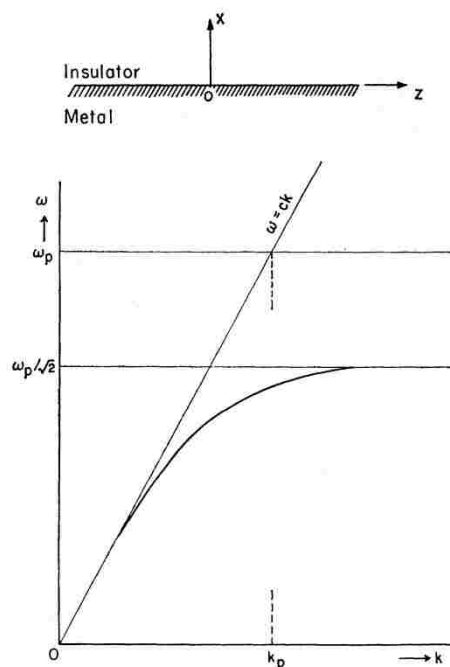
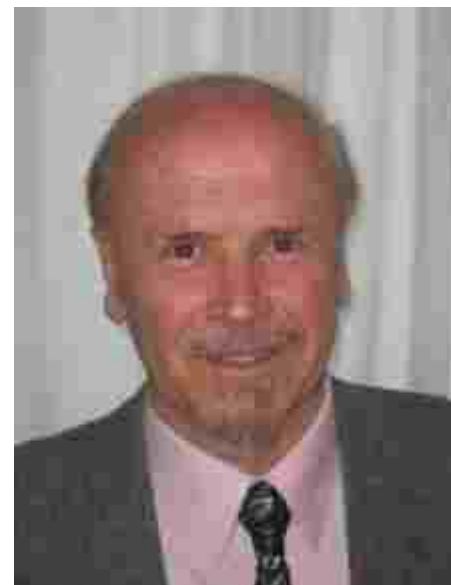
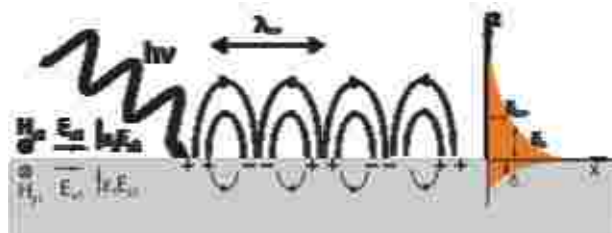


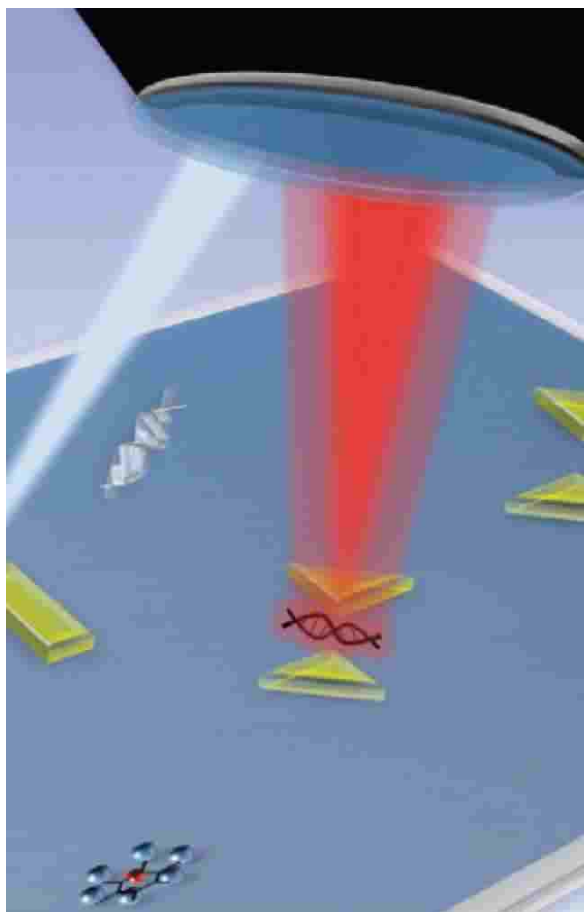
FIG. 1. Geometry and the dispersion relation for SPO of an insulator-metal interface ($\epsilon_i=1$, $\epsilon_m=1-\omega_p^2/\omega^2$). The analytical expression for the curve shown schematically here is (3.15).



Prof. Eleftherios N. Economou, 1969

Плазмоны- волны локализованные в «нано», вдоль границ металлов

Плазмоника- наука о распространении и локализации света на металлических нано-мета-частицах и нано-областях .



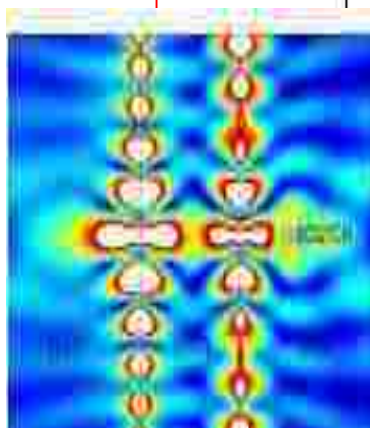
Линза Пендри

Уси.
Лин
Эва



Усиление и сверхразрешение!

$\epsilon, \mu = -1$



$$H^{(tr)} = \frac{1}{2D(k_z)} \left(1 + \frac{k_z \epsilon}{q_z} \right) \exp(-iq_z z_r + ik_z z_l),$$

$$+ \left(\frac{k_z \epsilon}{q_z} - \frac{q_z}{k_z \epsilon} \right) \sin(q_z d),$$

$$\exp(-ik_z d),$$

$$\left(1 - \frac{k_z \epsilon}{q_z} \right) \exp(iq_z z_r + ik_z z_l),$$

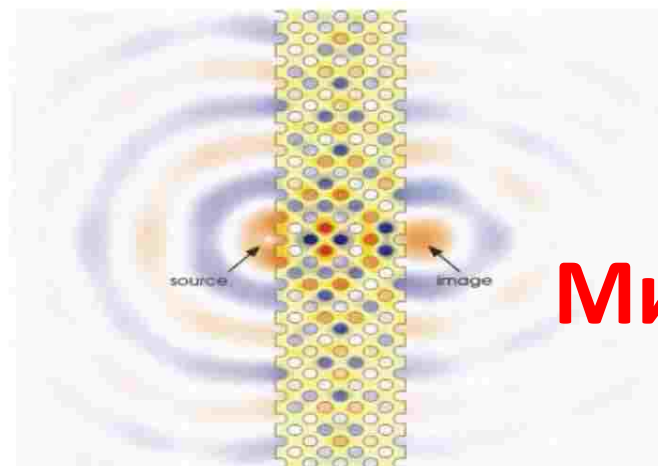
$$- \frac{i}{2} \left(\frac{k_z \epsilon}{q_z} + \frac{q_z}{k_z \epsilon} \right) \sin(q_z d),$$

For k and q are imaginary components

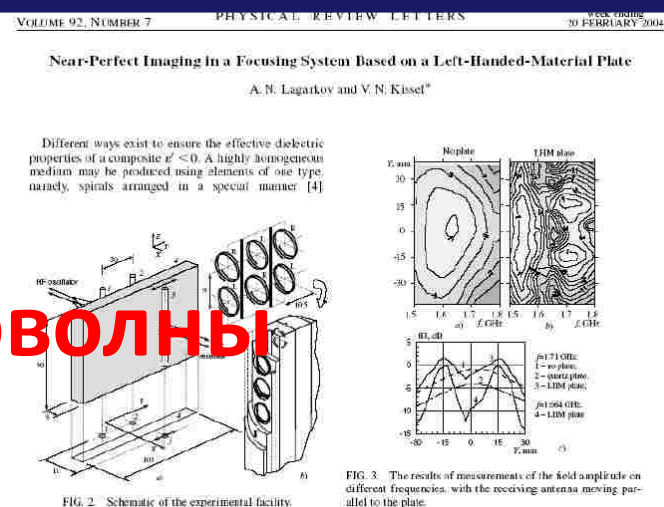
$$D(k_z) = \frac{1}{2} \exp(-|q_z|d) \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{|k_z|\epsilon}{|q_z|} + \frac{|q_z|}{|k_z|\epsilon} \right) \right] +$$

$$+ \frac{1}{2} \exp(|q_z|d) \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{|k_z|\epsilon}{|q_z|} + \frac{|q_z|}{|k_z|\epsilon} \right) \right].$$

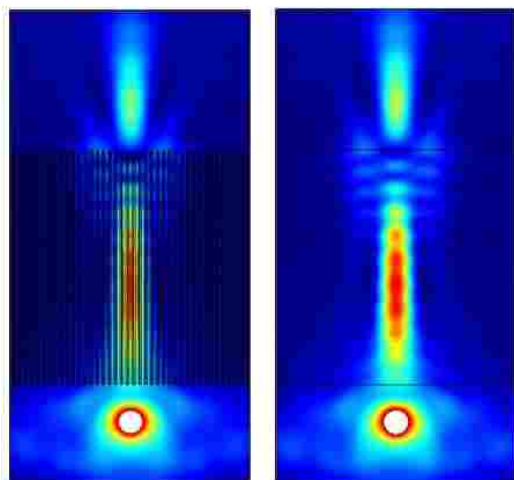
Другие типы плоских линз



Микроволны

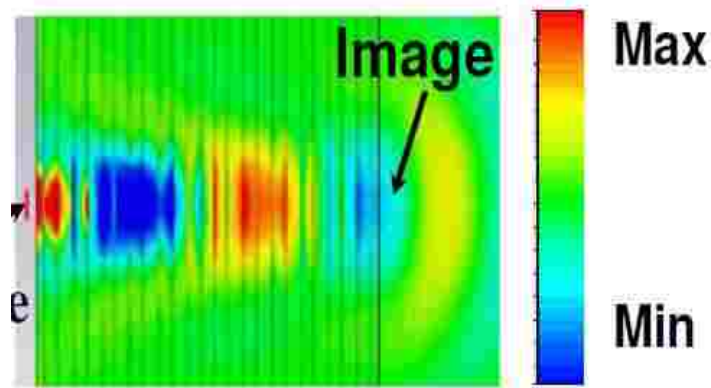


Luo at al, 2002, Фотонный кристалл



Оптика

Fang at al, 2009, Гиперлинза



THz

Basharin at al, 2012

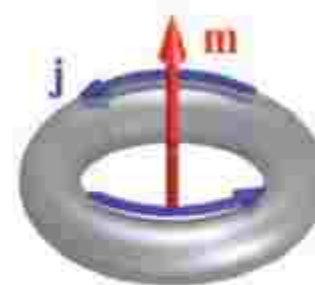
Как получить сделать такое мета- вещество?

Как мы можем сделать
метаматериал с ϵ и (или) μ ?

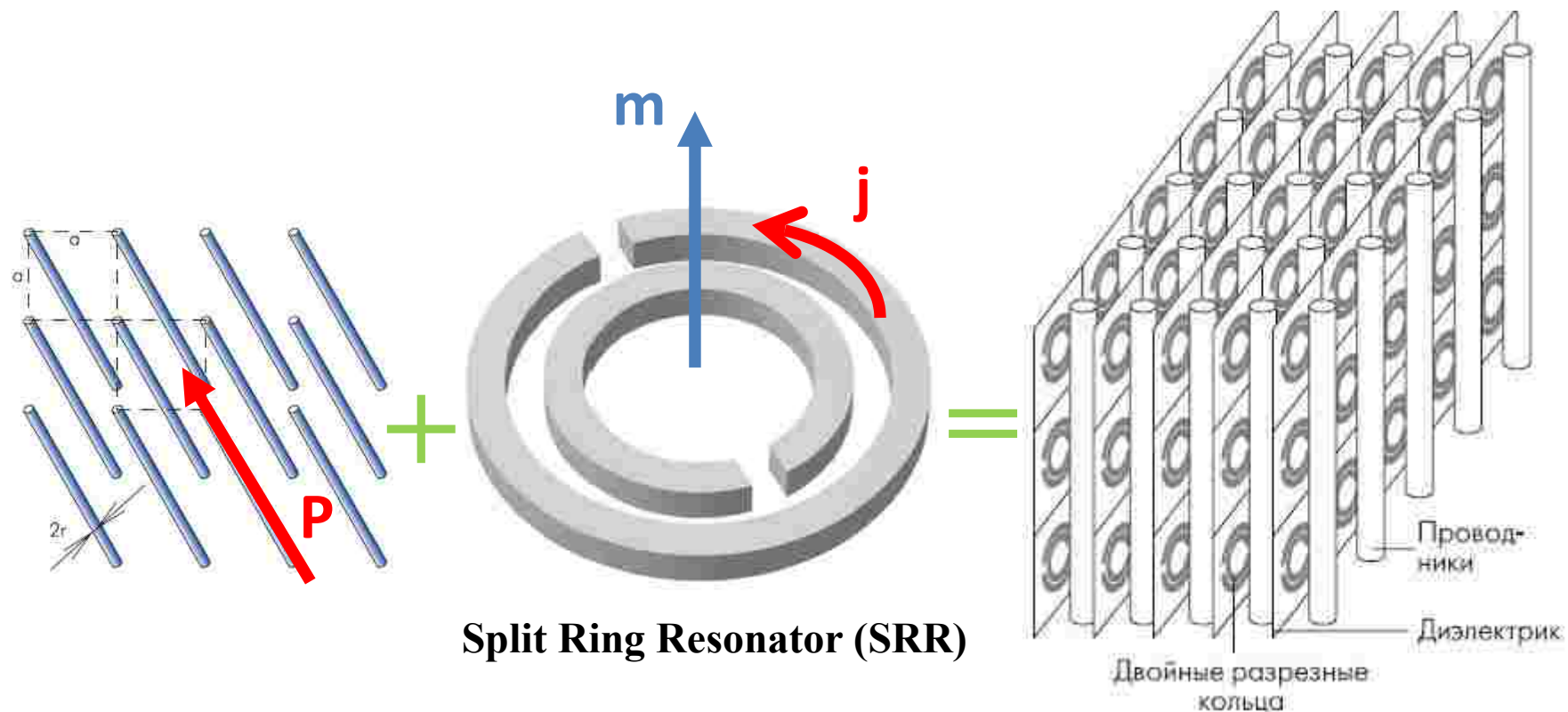
Электрический диполь



Магнитный диполь

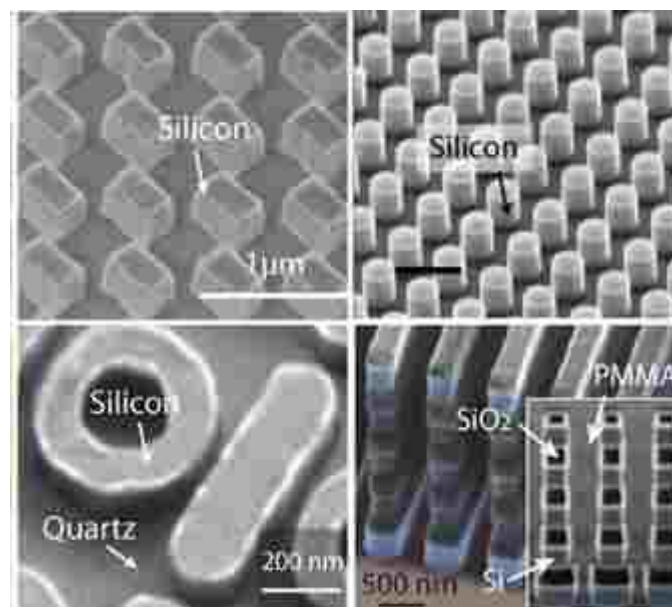
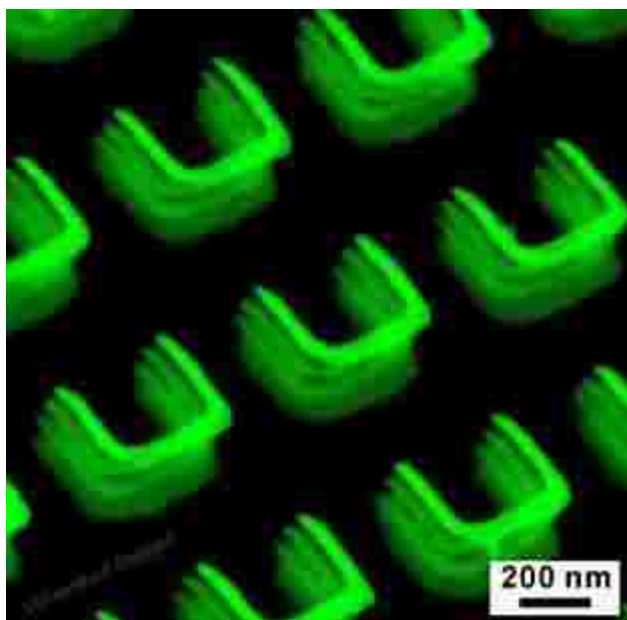


Метаматериалы с магнитным и электрическими МЕТАатомами



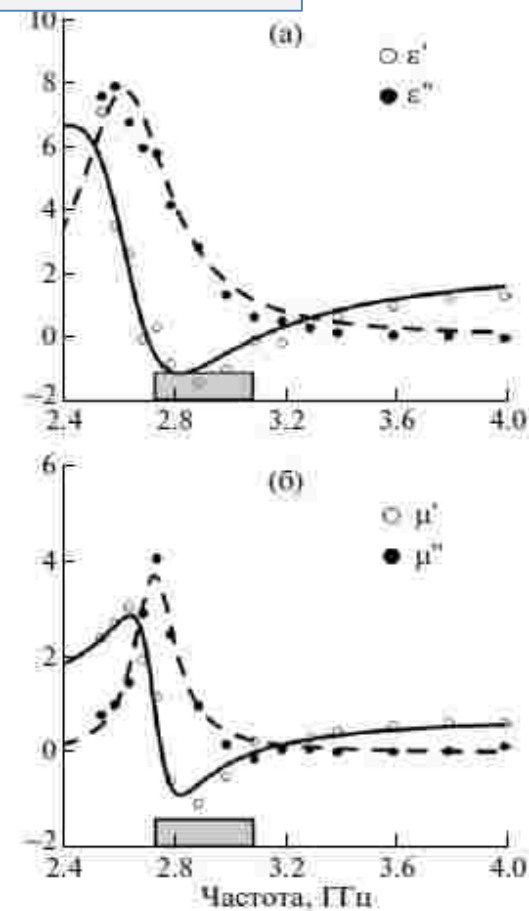
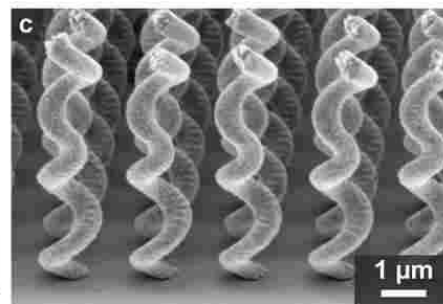
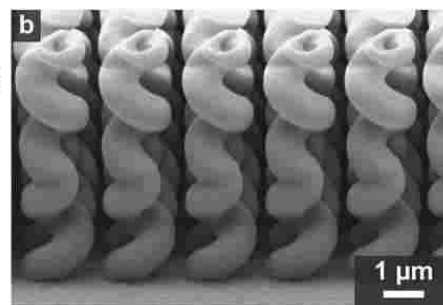
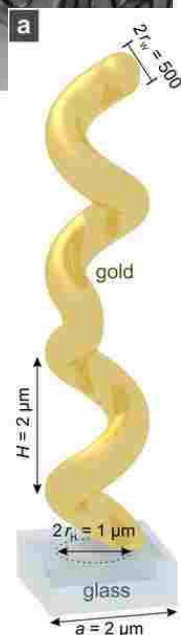
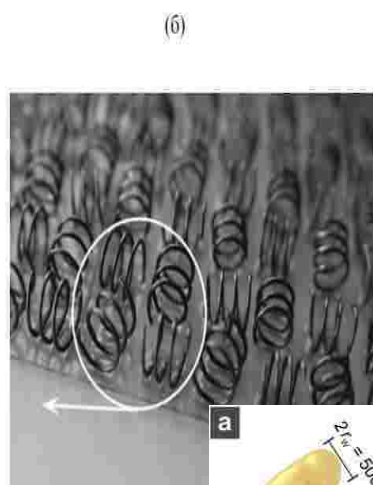
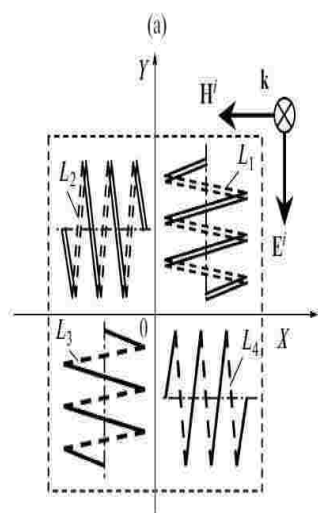
Pendry, Smith et al., 2000, Костин и Шевченко, 1992

Метаматериалы с магнитным и электрическими МЕТАатомами в оптике



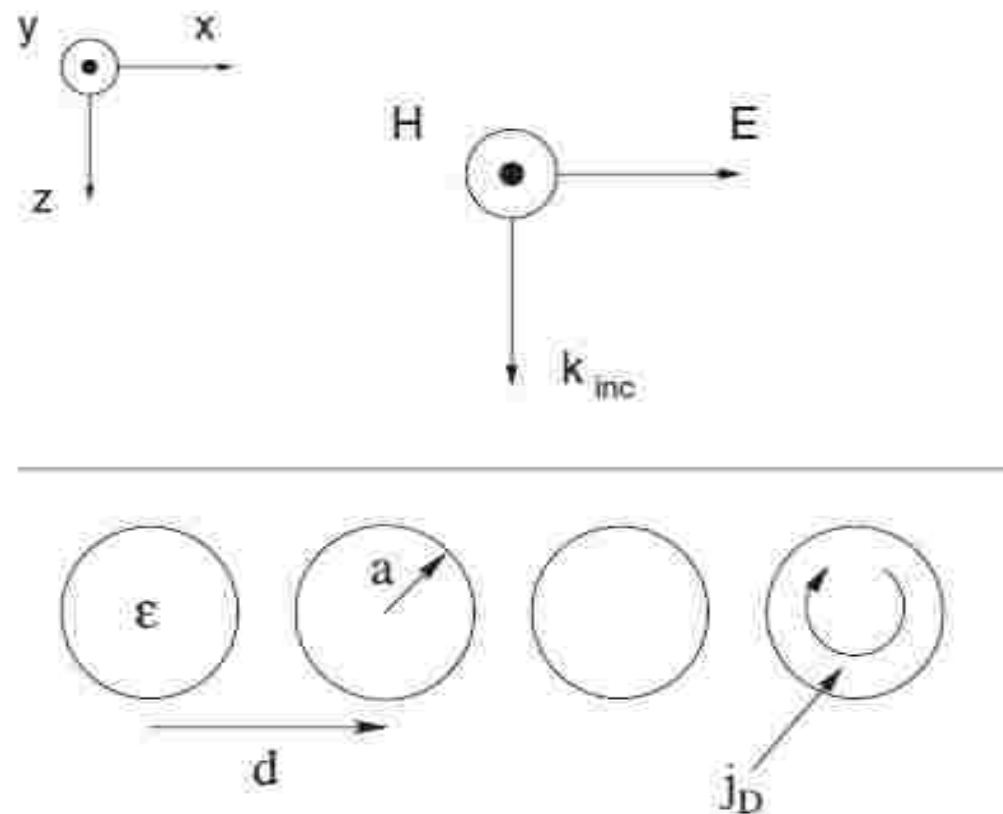
Среды с отрицательными значениями диэлектрической и магнитной проницаемостями

Спираль



Lagarkov et al., 1997

Искусственный магнетизм в диэлектриках?



Displacement currents induce second enhanced H-fields in cylinders

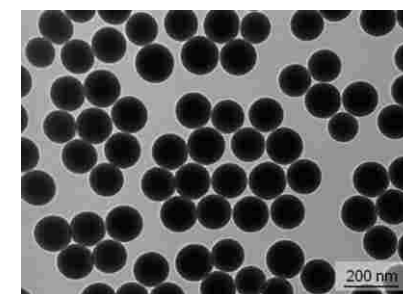
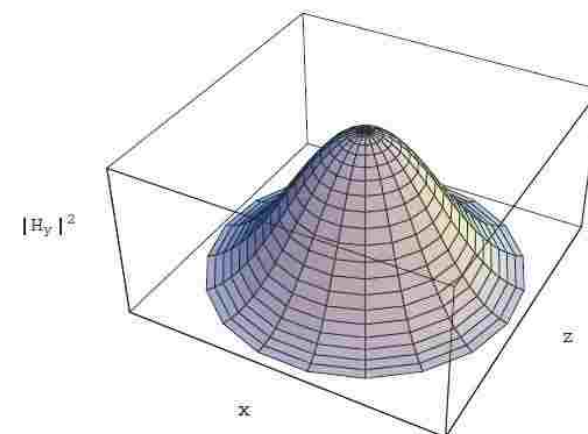
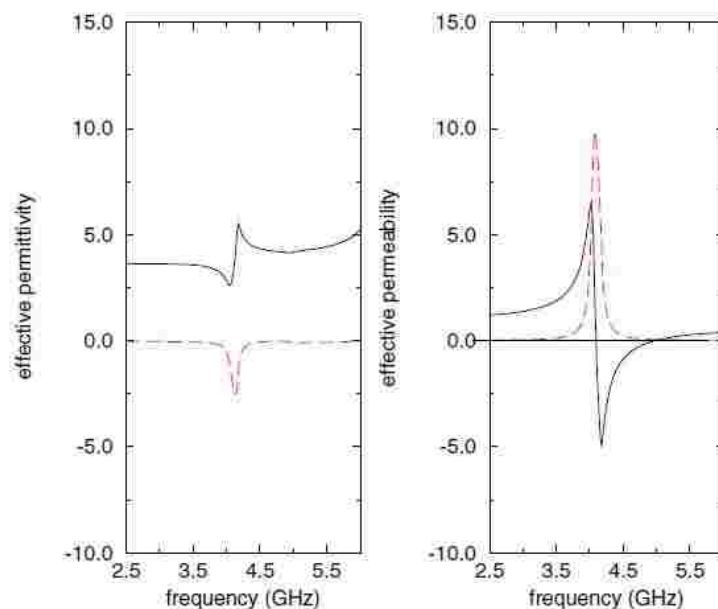
O' Brien and Pendry, 2002



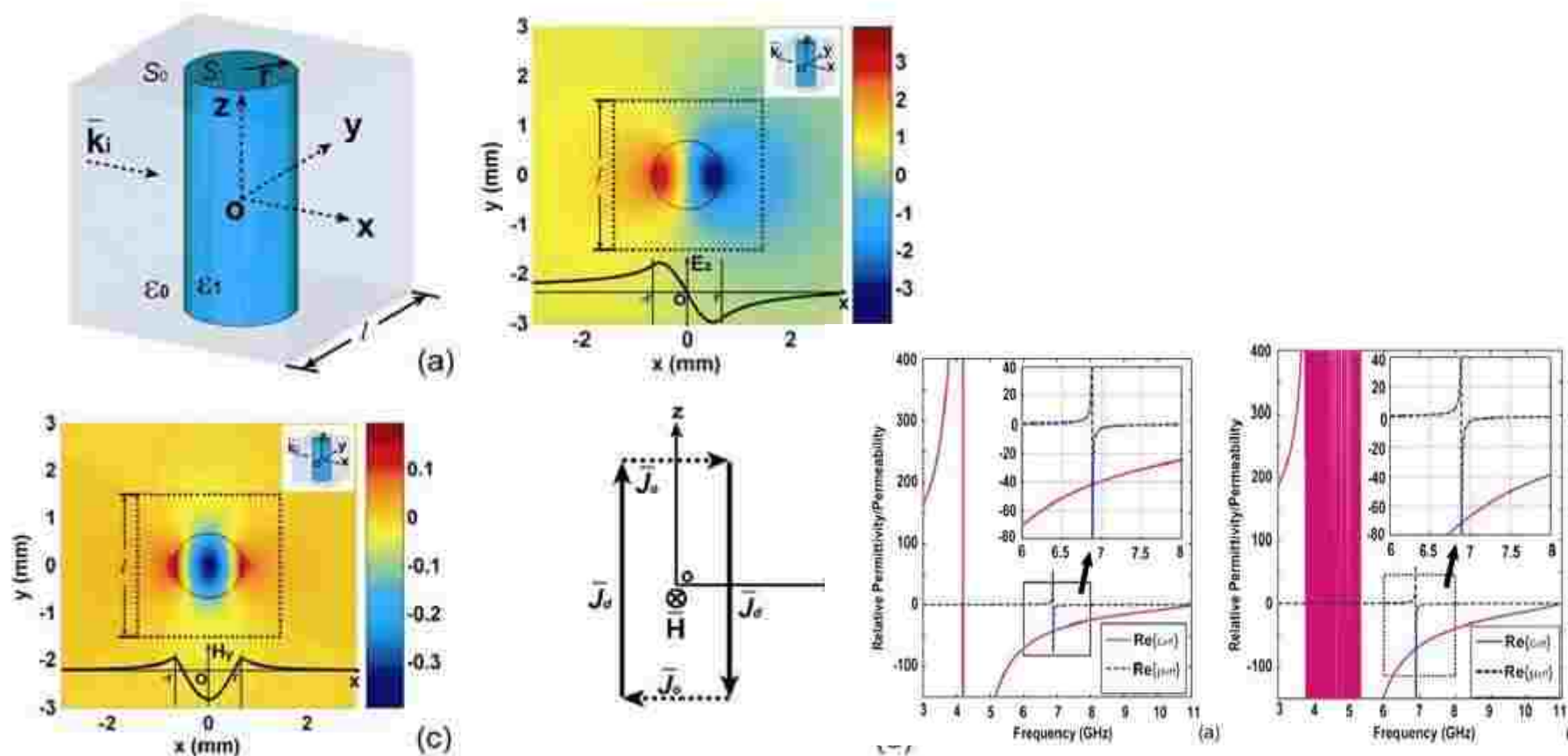
Магнетизм в диэлектрических наночастицах? Как?

Table 1. Microwave properties of BSTO–oxide composite ceramics (taken from [9]).

Oxide content	Frequency (GHz)	Dielectric constant	Loss tangent
30	2.139	646	0.0040
40	1.815	404	0.0042
	3.304	401	0.0051
60	4.581	113	0.0065

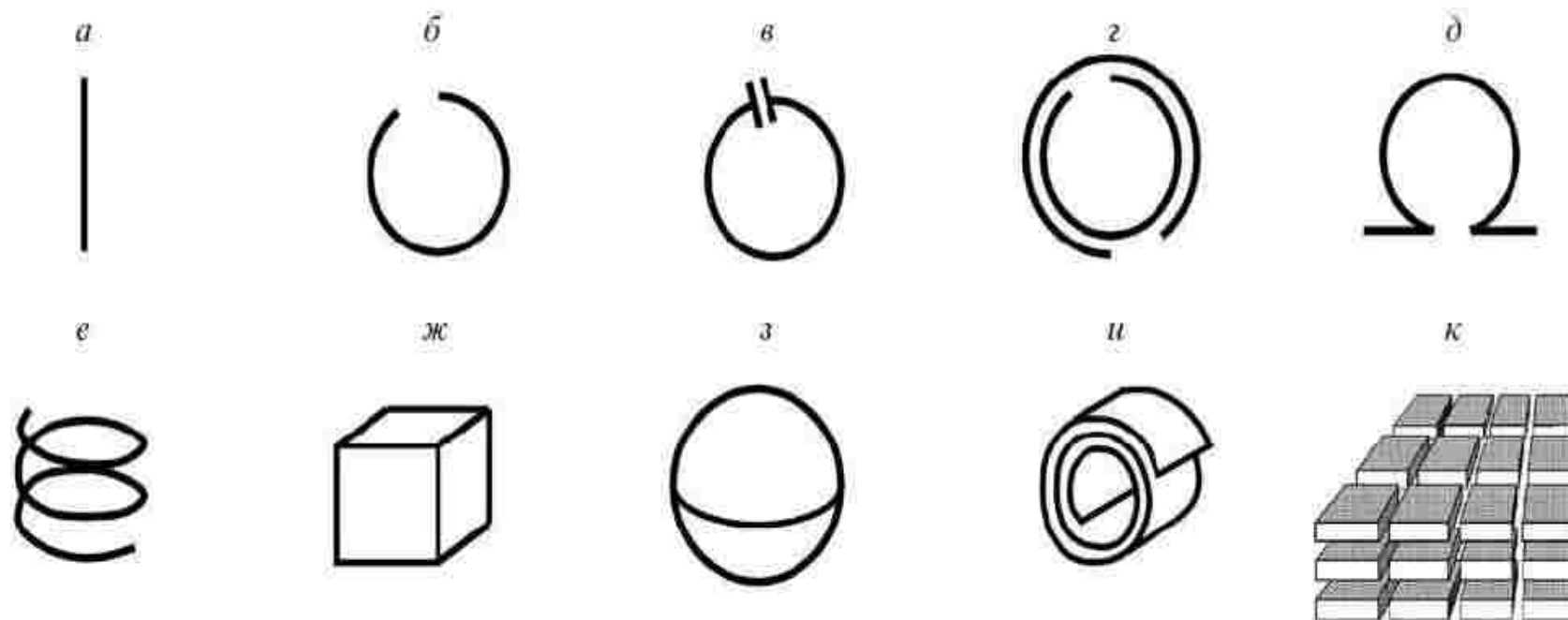


Магнетизм в диэлектрических наночастицах? Как?



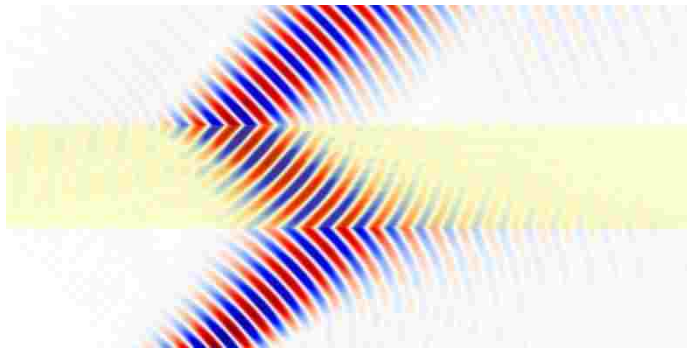
Peng at al, 2002

Другие виды наночастиц?

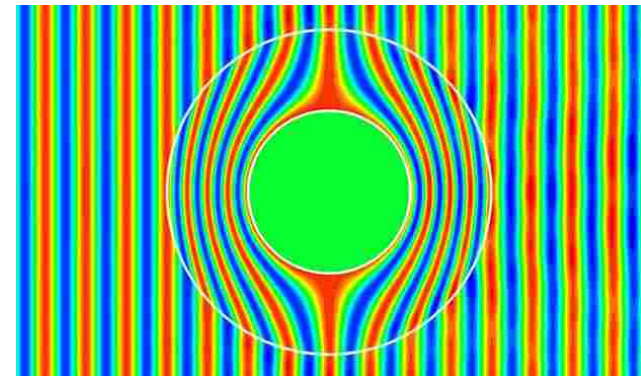


Эффекты в метаматериалах (Meta-atoms)

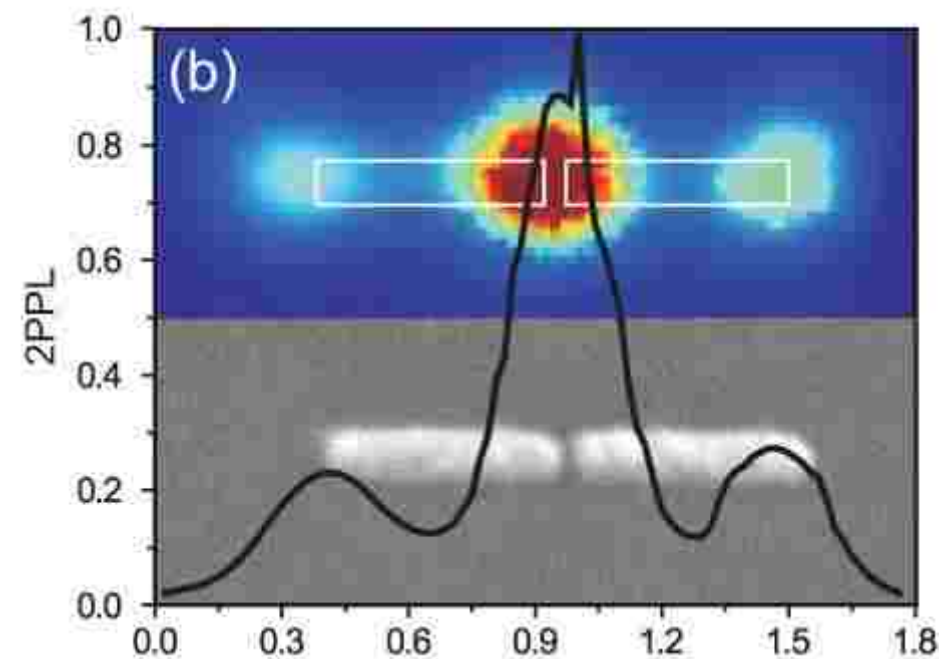
Отрицательное преломление



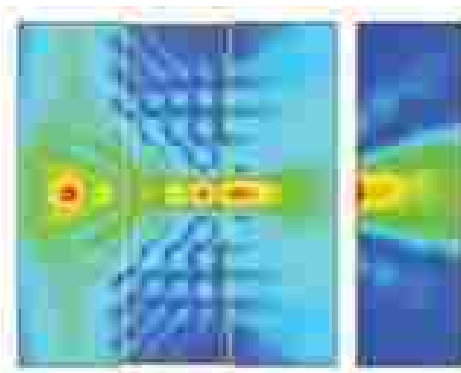
Маскировка, клокинг



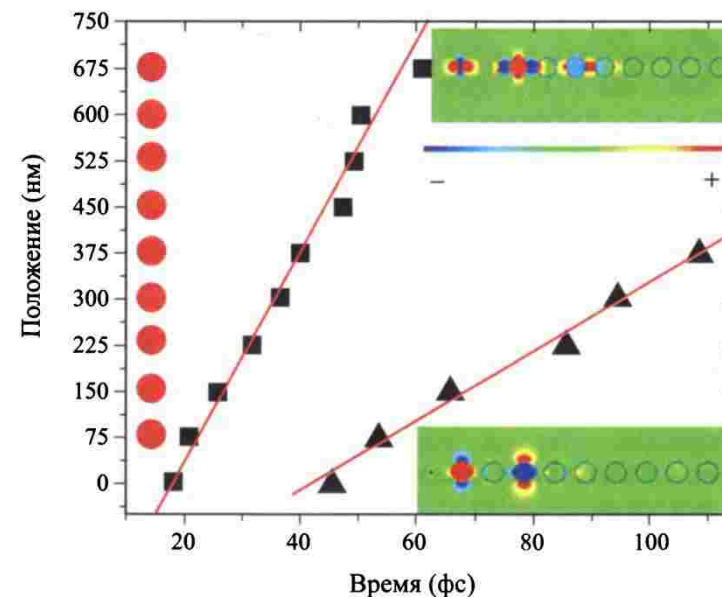
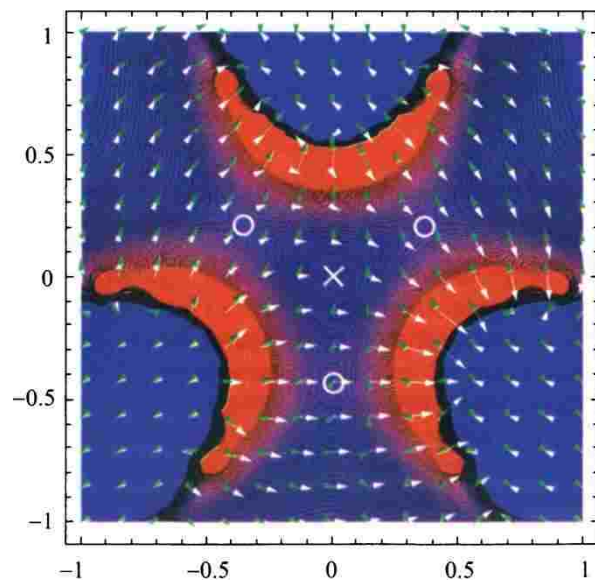
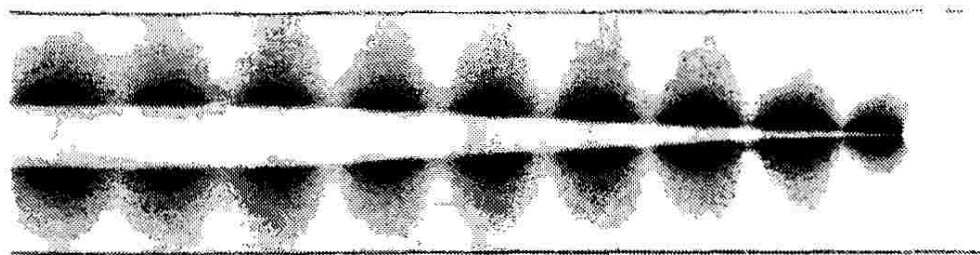
Усиление и локализация полей



Суперлинзы



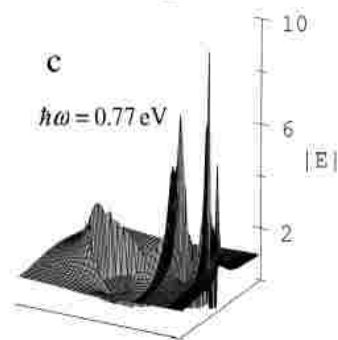
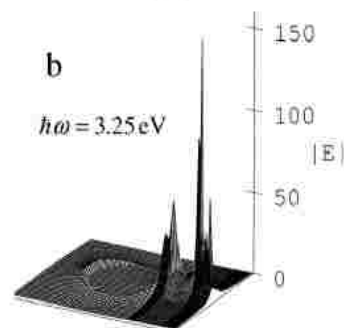
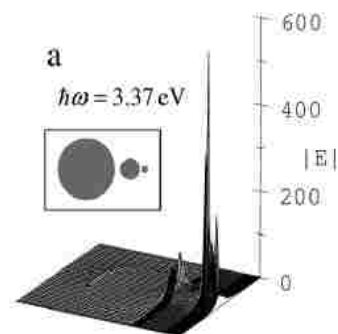
Плазмоны и волноводы



Maier 2011, Климов 2009

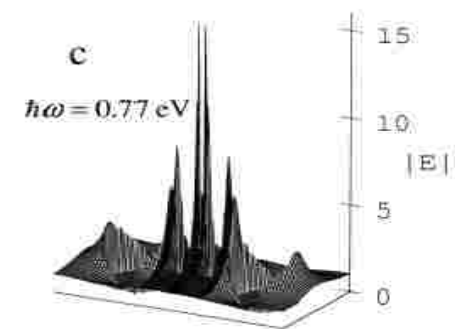
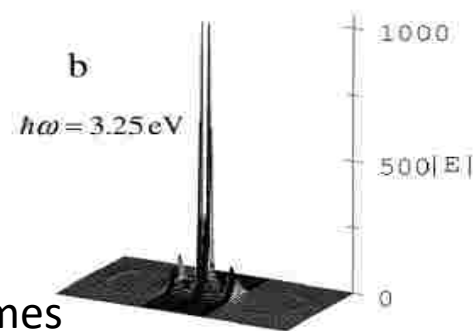
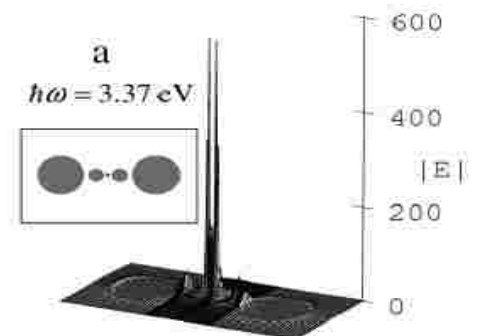


Сильная локализация полей



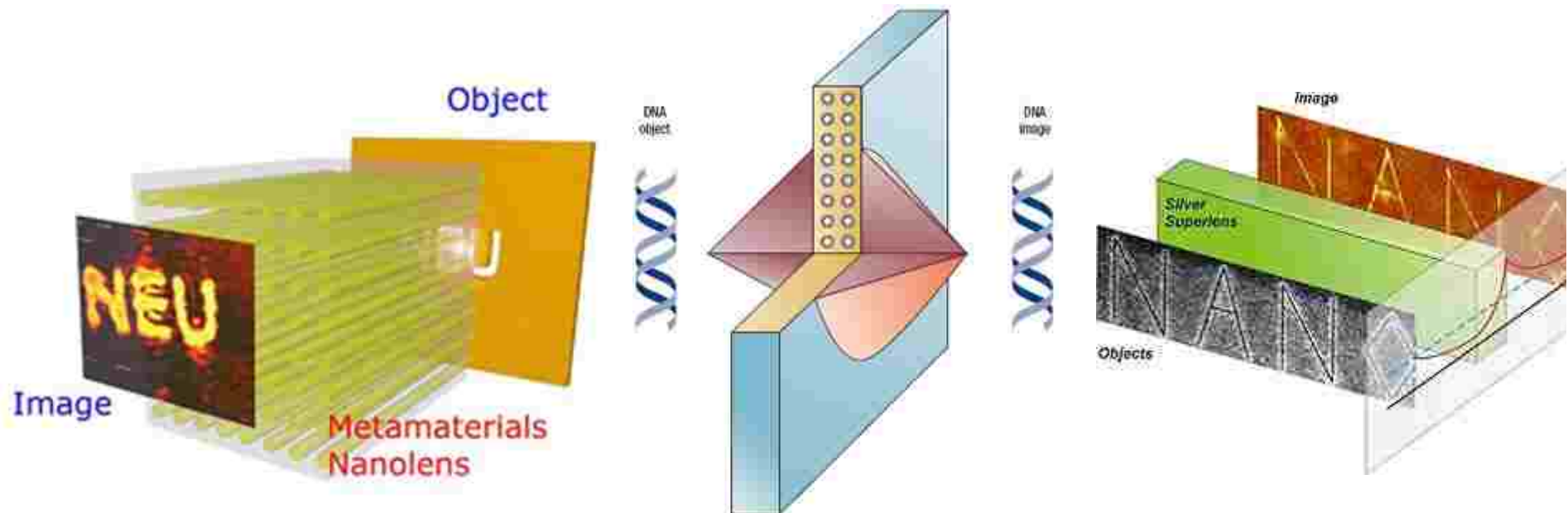
$\epsilon < 0$

Enhancement of fields more than 600 times

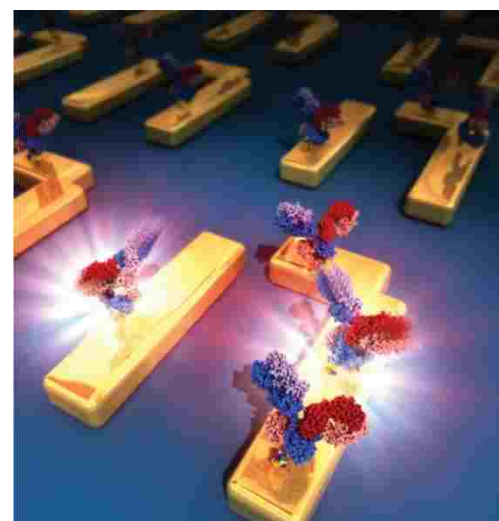
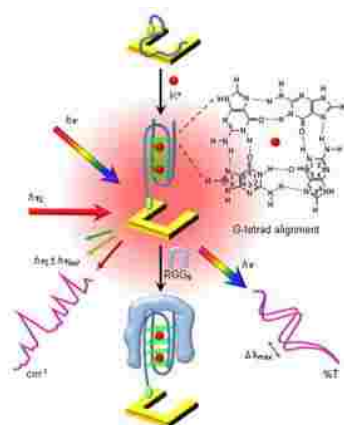
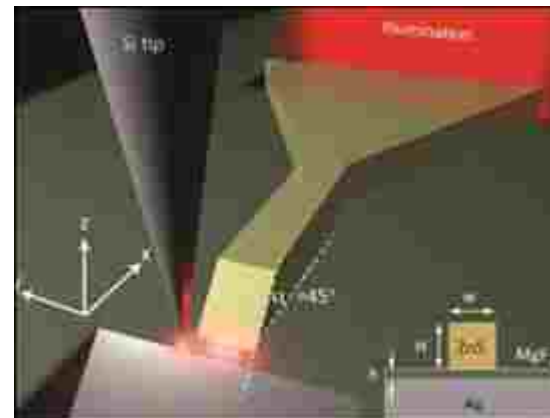
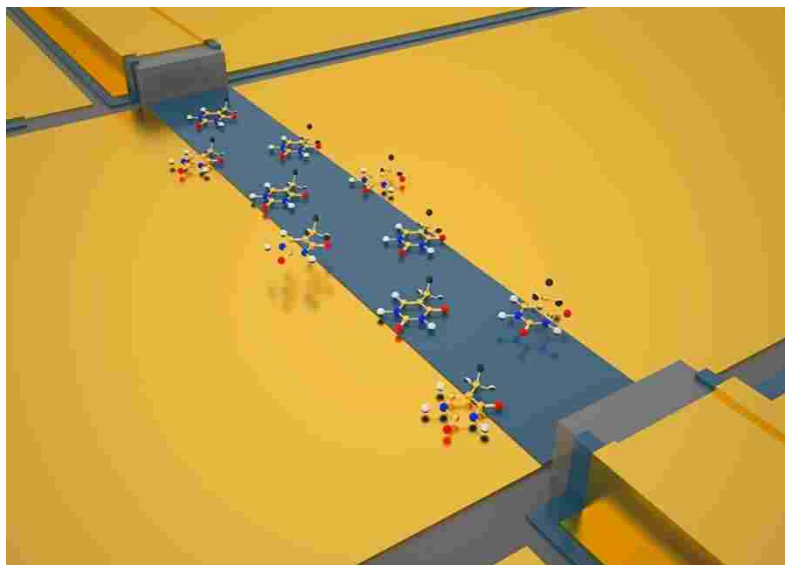


Kuiru et al., 2003

Что в итоге? Микроскопы...



Применение в химии биологии: флуоресценция белков, излучение одиночных молекул, воздействие на одиночные клетки

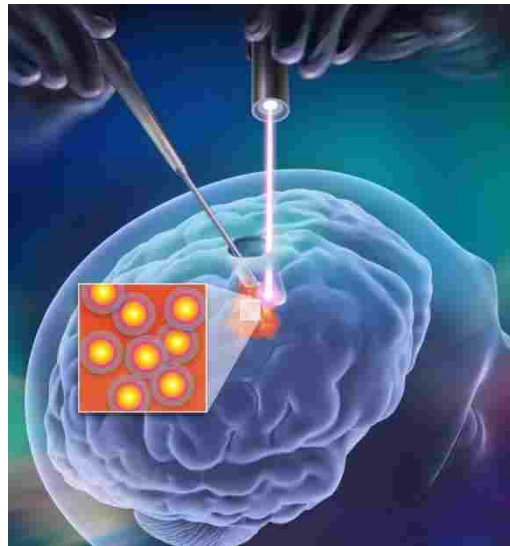


Области применения Метаматериалов в биологии:

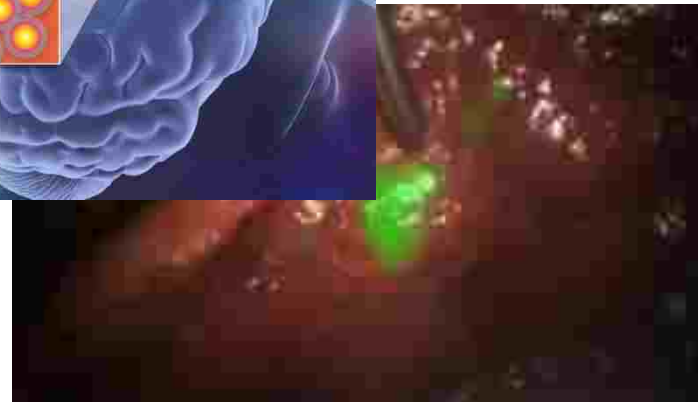


the polka-dot tree frog,
Hypsiboas punctatus.

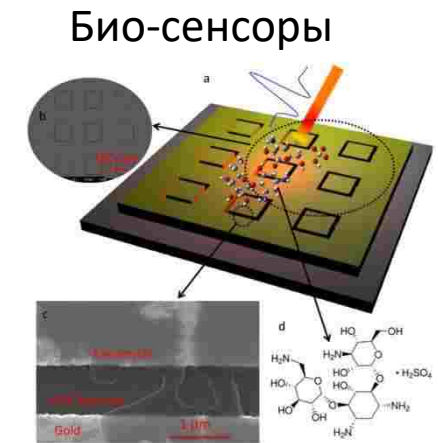
400 nm UV light



Нано-хирургия

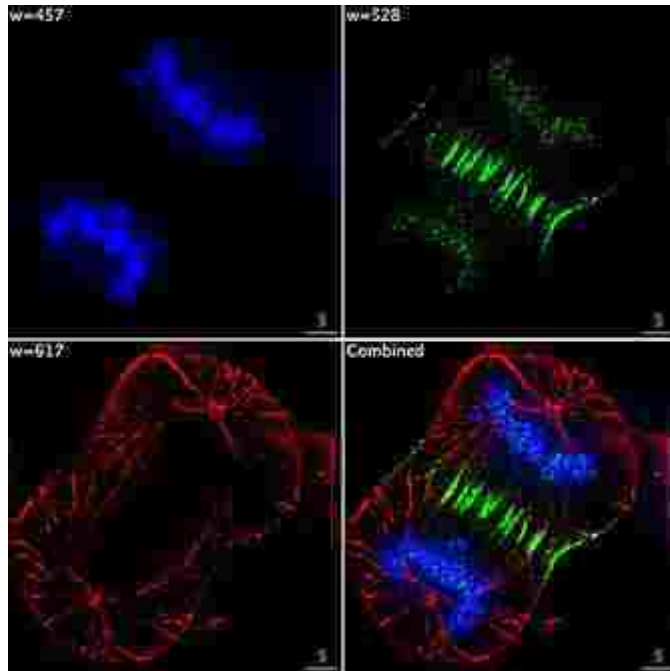


Флуоресценция злокачественной опухоли Головного мозга

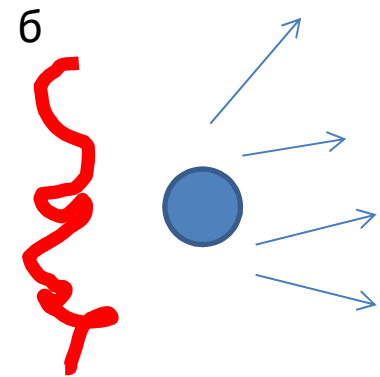


Био-сенсоры

Введение маркеров (мета-частиц) и усиление флуоресцентного излучения:



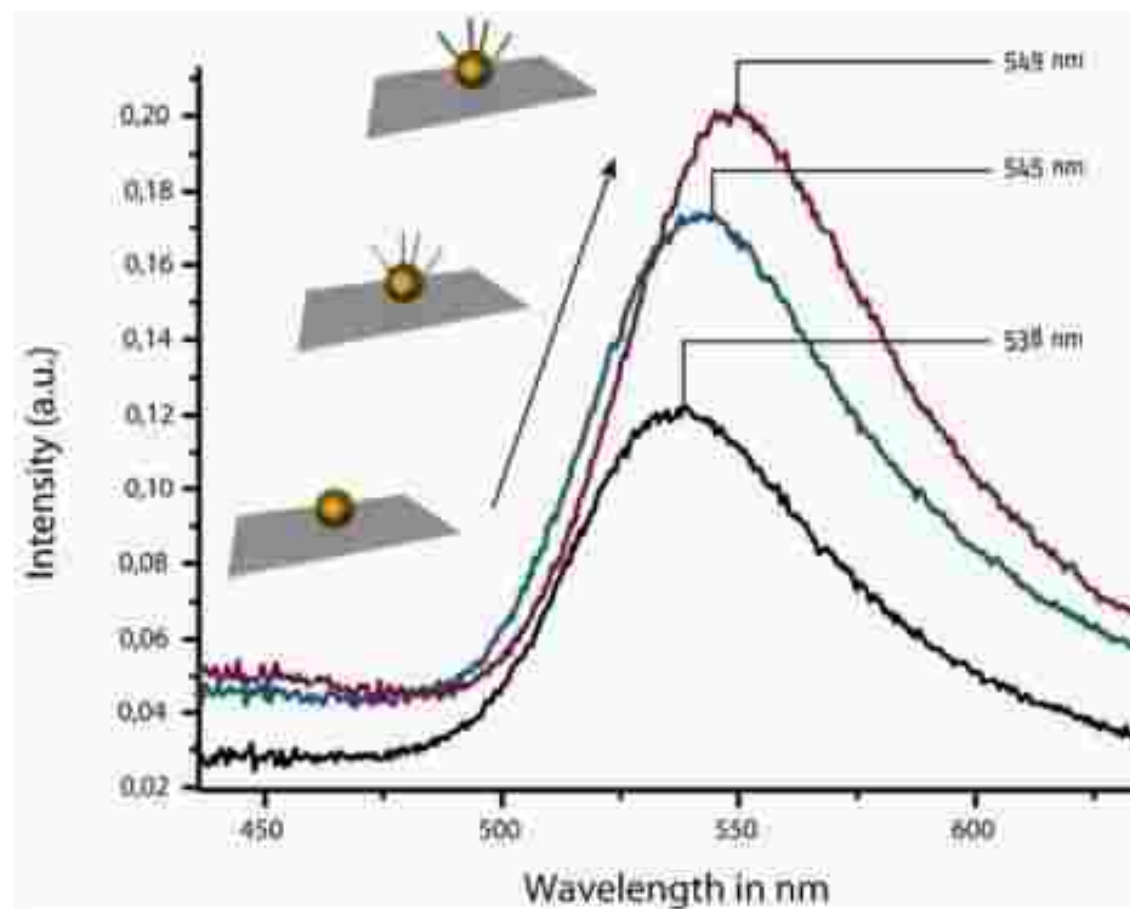
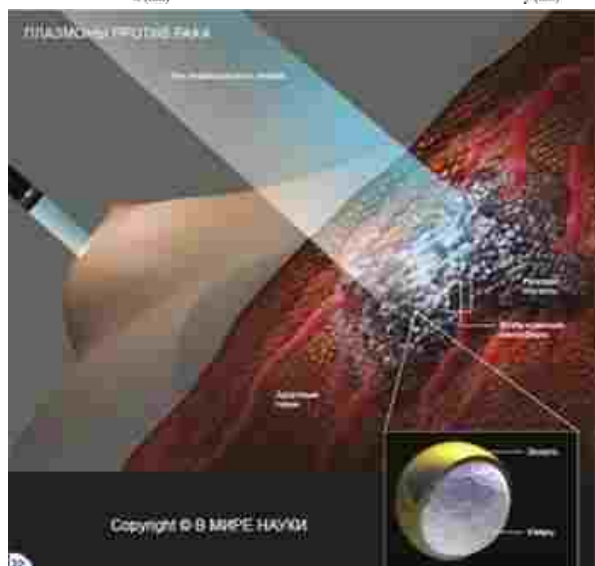
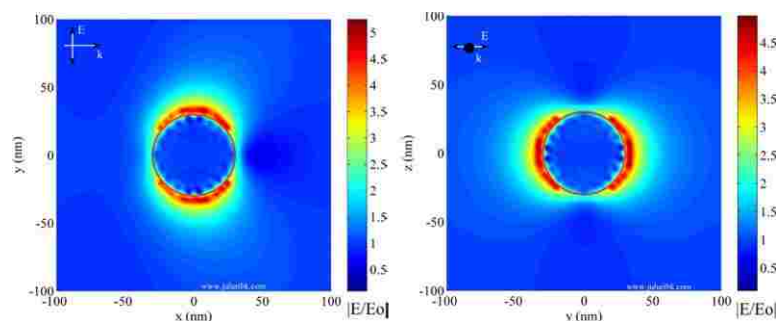
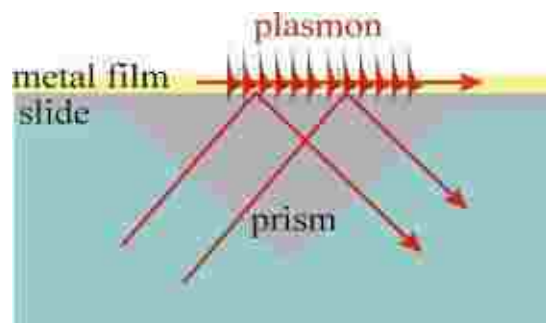
а
Био-молекула



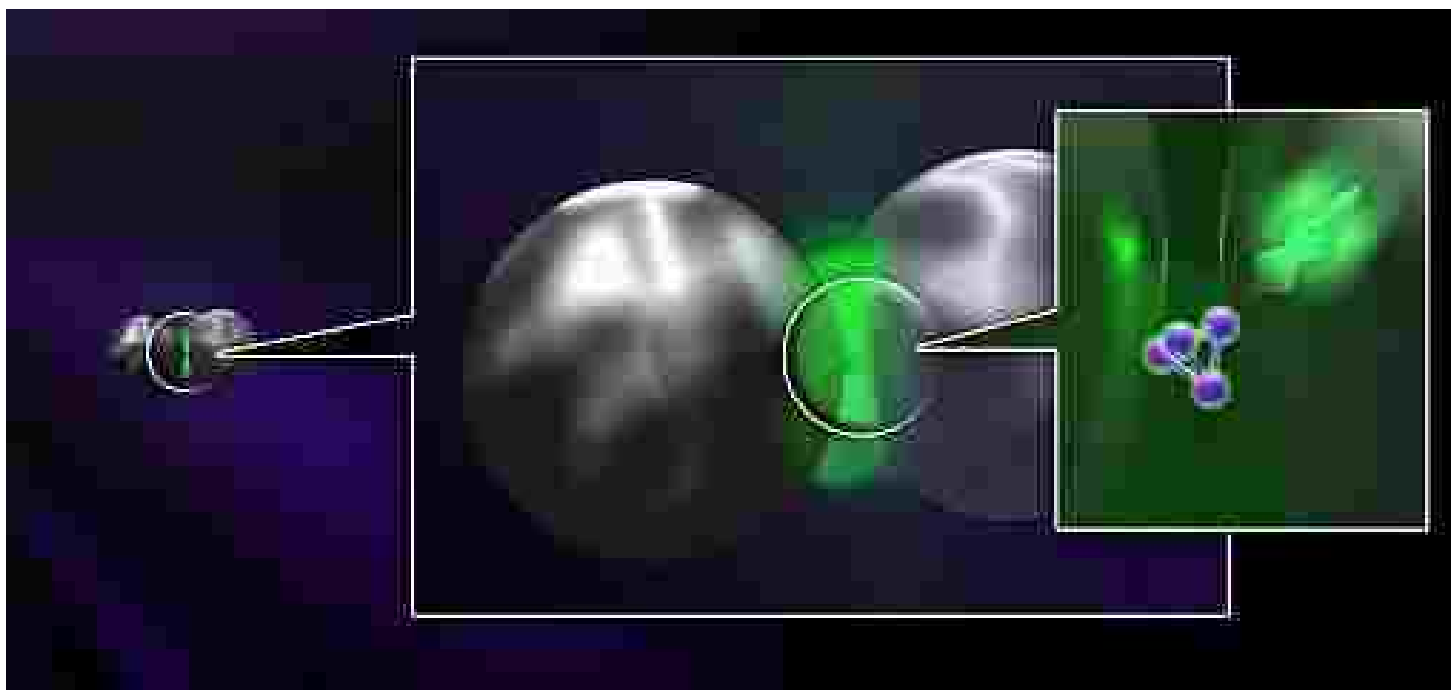
б
Мета-частица

Деление раковой клетки. Изображение получено с использованием сканирующего флуоресцентного микроскопа. Специальные методы ввода флуоресцентных маркеров и использование нескольких [светофильтров](#) позволяют наблюдать одновременно за несколькими объектами.

Метаматериалы в биологии



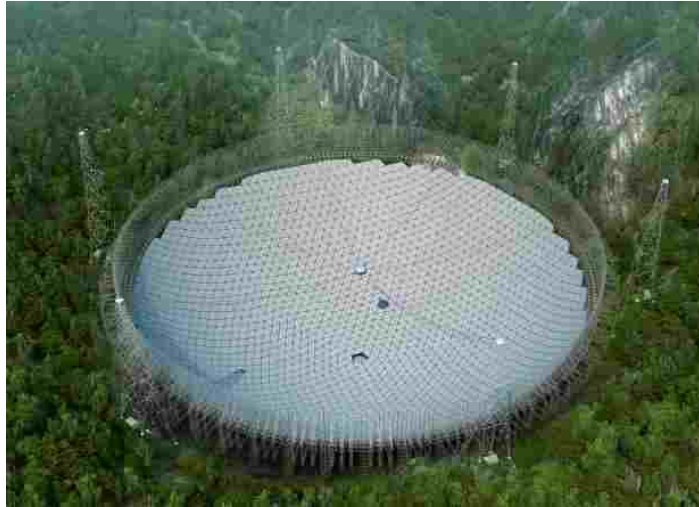
Нано-антенны



Антенны в литературе



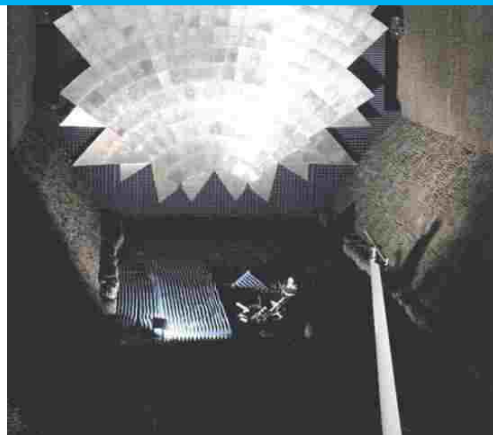
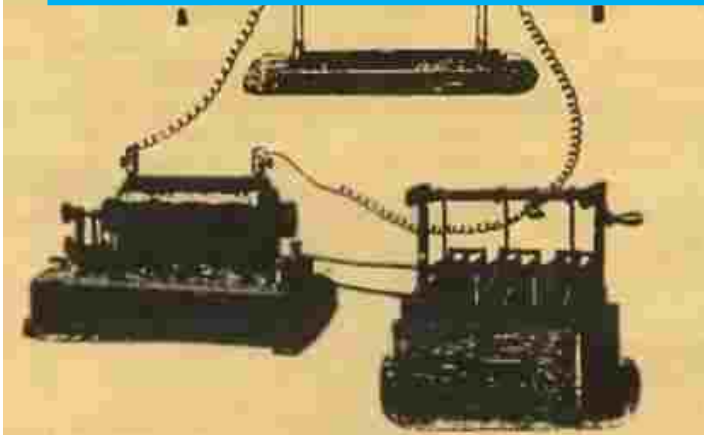
Н. Hertz



Телескоп FAST 500 м



Ограничения и недостатки ?



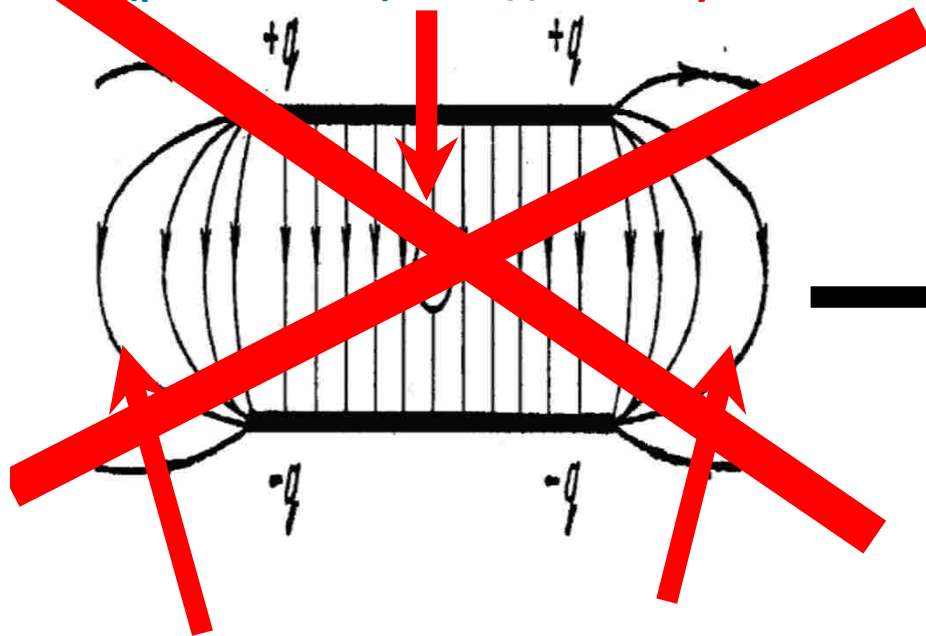
Излучение “нано” объектов

Определение

“Нано” антенна- устройство, которое преобразует электромагнитное излучение в поле, сильно локализованное в некоторой области- **ближней зоне**, и наоборот. Причем размеры **“нано” антенны** меньше длины волны.

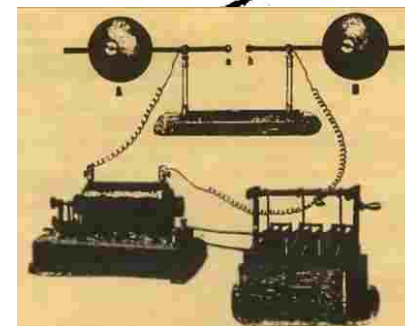
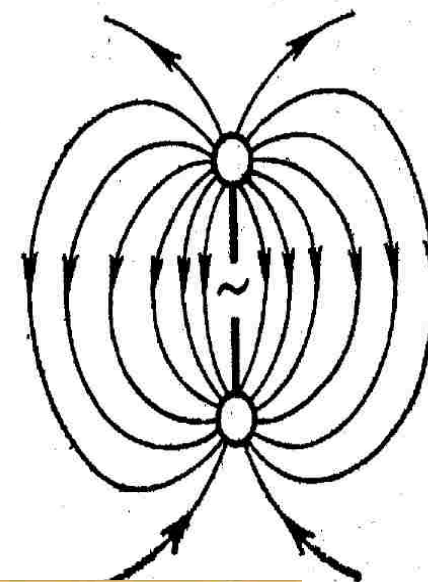
Косвенная идея Г. Герца о связанной мощности- “Nano”- antenna

Связанная энергия -паразитная!
(реактивная)- Мы должны уменьшить ее !



Свободно распространяющиеся токи смещения
(Излучение)

Развернутый конденсатор- Диполь Герца



Поля электрического вибратора

$$H_{\varphi} = \frac{Il}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \left[\left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2 + i \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right) \right] e^{-i\beta r} \sin \theta$$

$$H_r = H_{\theta} = 0.$$

(3), where $\beta = 2\pi/\lambda$

Это слагаемое отвечает за излучение в дальней зоне ($r \gg \lambda$) и определяет излученную энергию

$$E_r = \frac{Il}{2\pi\omega\epsilon_a} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^3 \left[-i \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^3 + \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2 \right] \cos \theta e^{-i\beta r}$$

$$E_{\theta} = \frac{Il}{4\pi\omega\epsilon_a} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^3 \left[-i \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^3 + \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2 + i \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right) \right] \sin \theta e^{-i\beta r}$$

$$E_{\varphi} = 0.$$

(4)

Это слагаемое отвечает за излучение в ближней зоне ($r < \lambda$)

И определяет реактивную энергию
(связанную мощность)

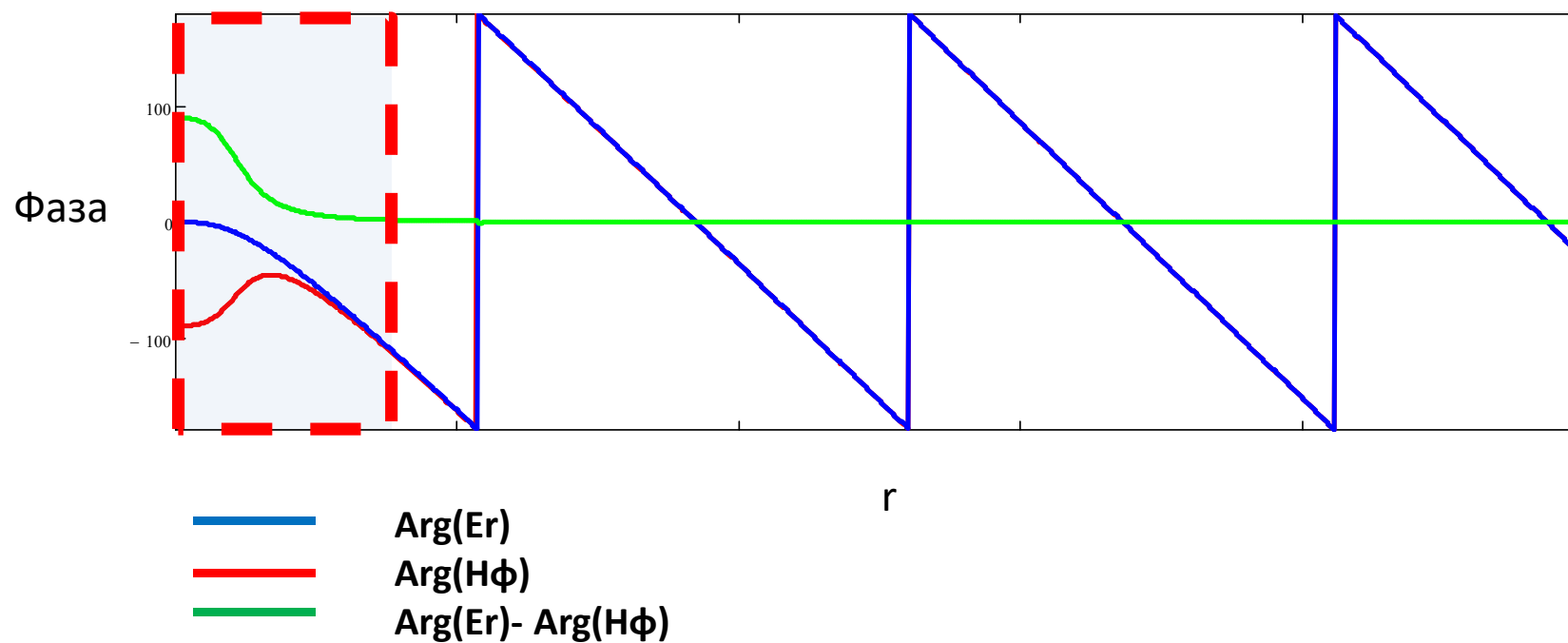
Поле электрического вибратора

Near zone

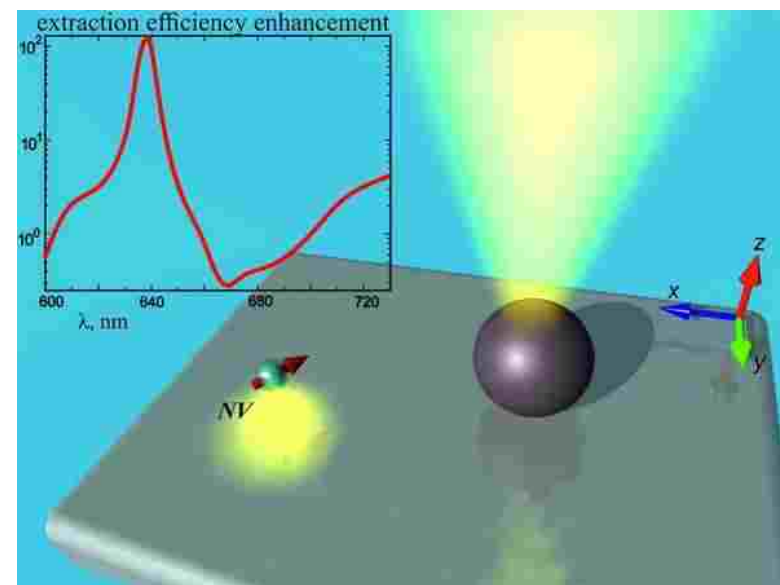
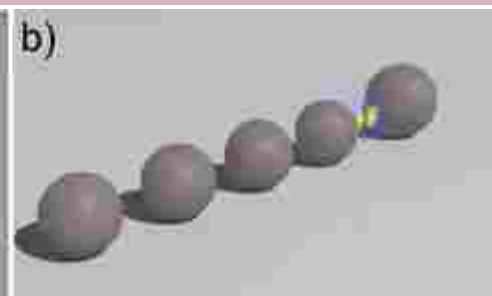
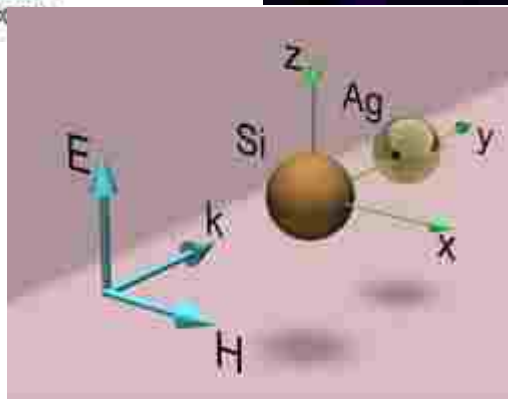
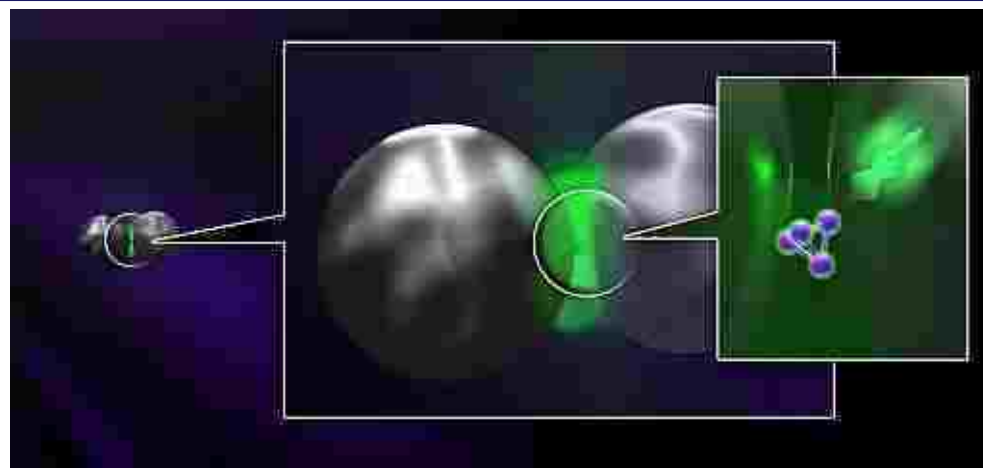
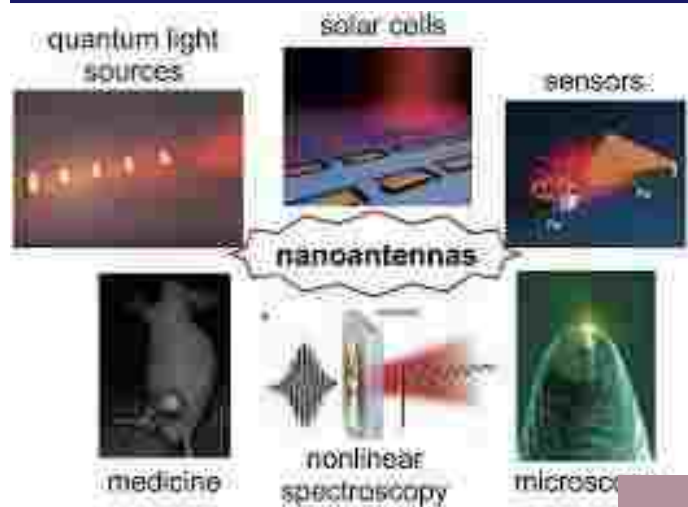
Ближняя зона $E, H = \pi/2$

Дальняя зона

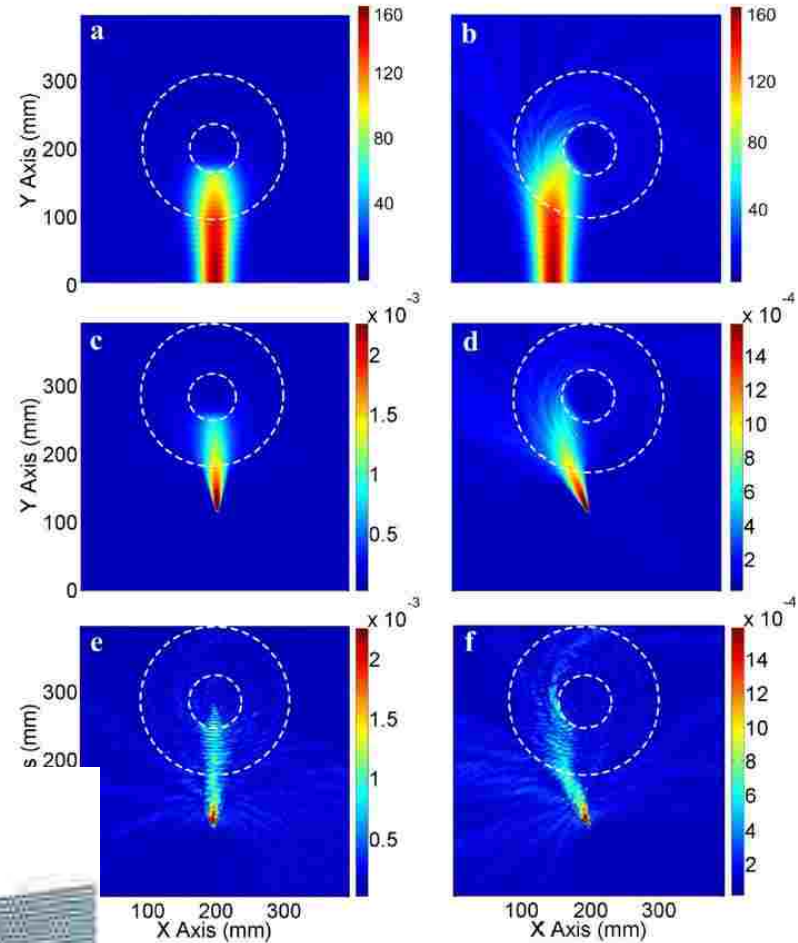
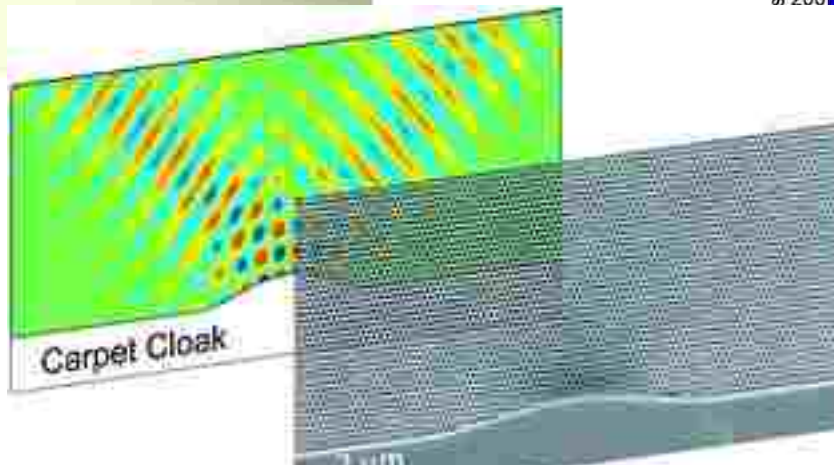
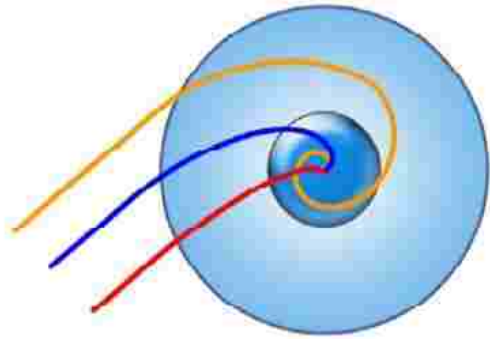
Фазы полей совпадают



“Nano” антенны в литературе

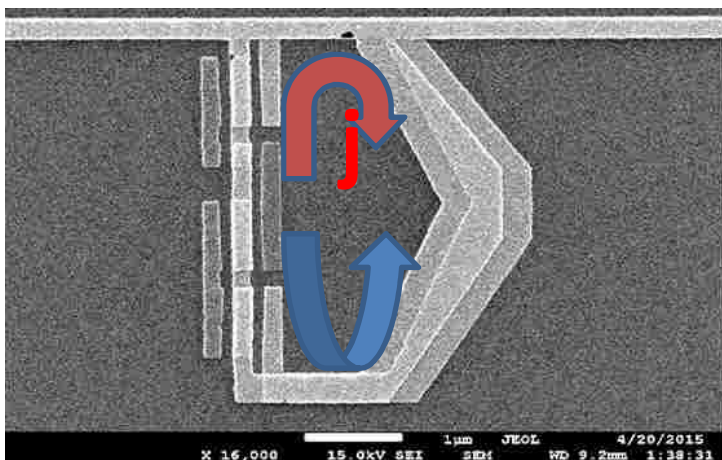


Трансформационная оптика! Модель черной дыры



Метаматериалы- элементы квантового компьютера

МЕТА- вне свойств природы!



=



“Implementation of a quantum metamaterial using superconducting qubits”,
Nature Communications 5,
Article number: 5146

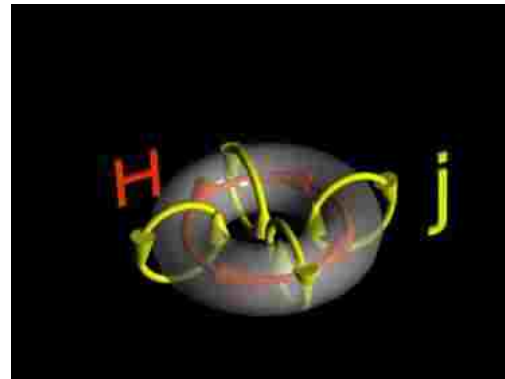
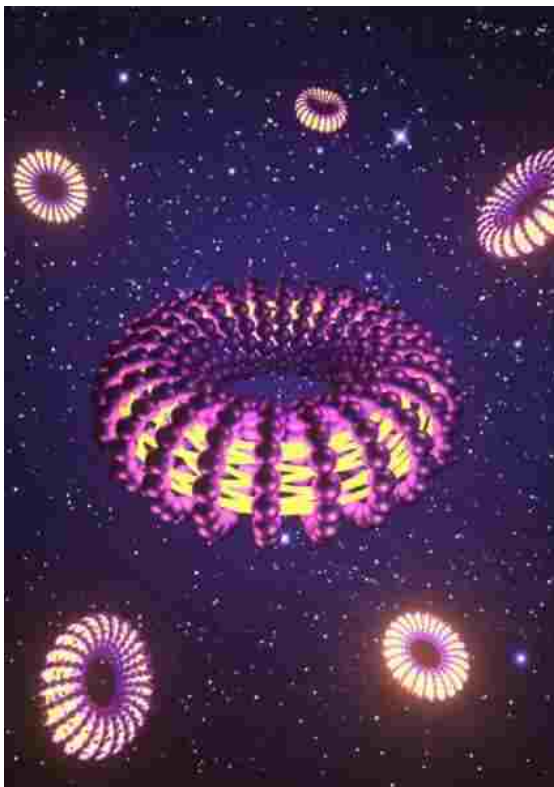
Мета-атом- элемент метаматериала и кубита

Анаполь



Анаполь. Определение

Нетривиальный Анаполь (от греч. an — отрицат. частица и polos — полюс) представляет собой неизлучающий источник или рассеиватель, который способен излучать векторные потенциалы, в отсутствие излученных электромагнитных полей, а также рассеивать векторные потенциалы, в отсутствие полей. **Анаполь**- не излучает полей и не взаимодействует с полями.

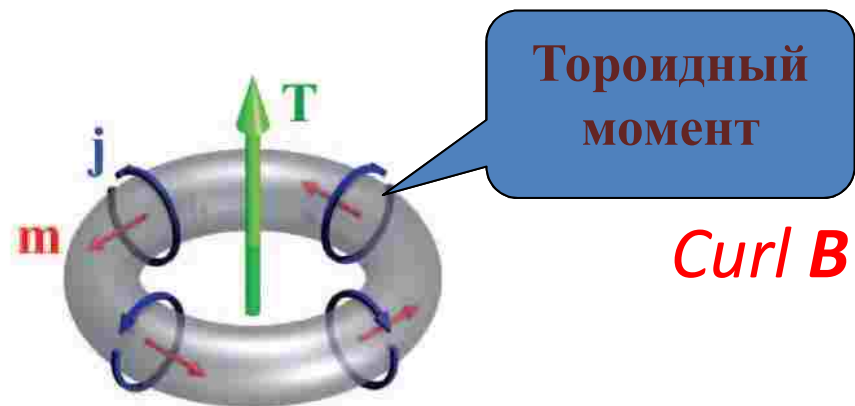
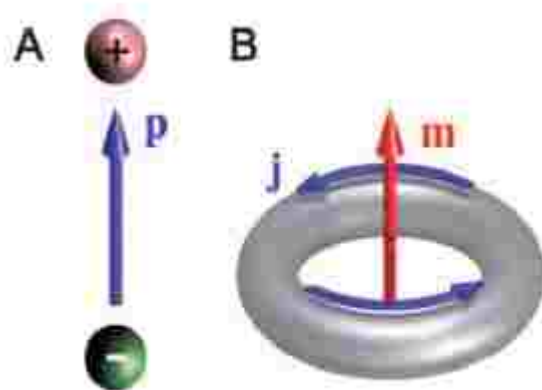


- Слабые взаимодействия в ядерной физике
- Атом цезия
- Процессы в темной материи

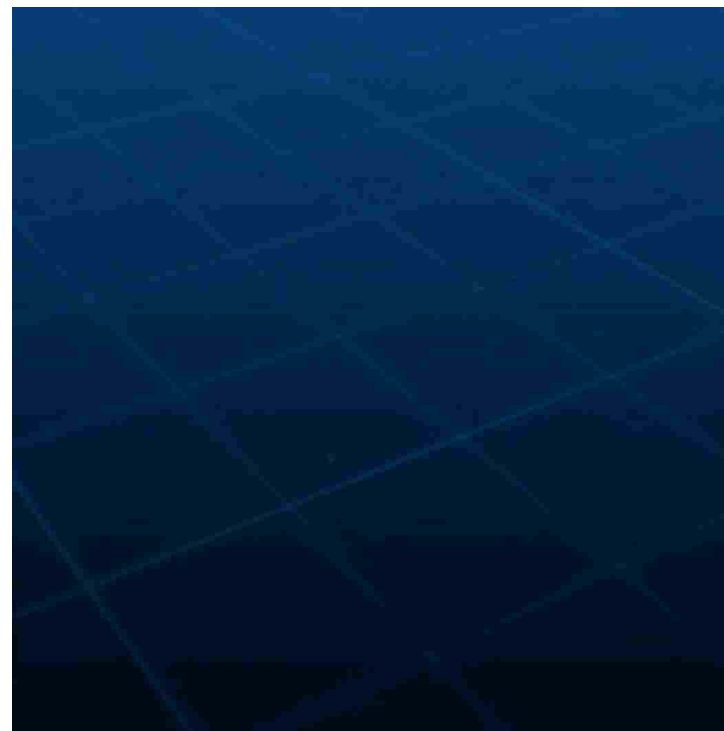


Зельдович
Яков Борисович

Тороидный дипольный момент

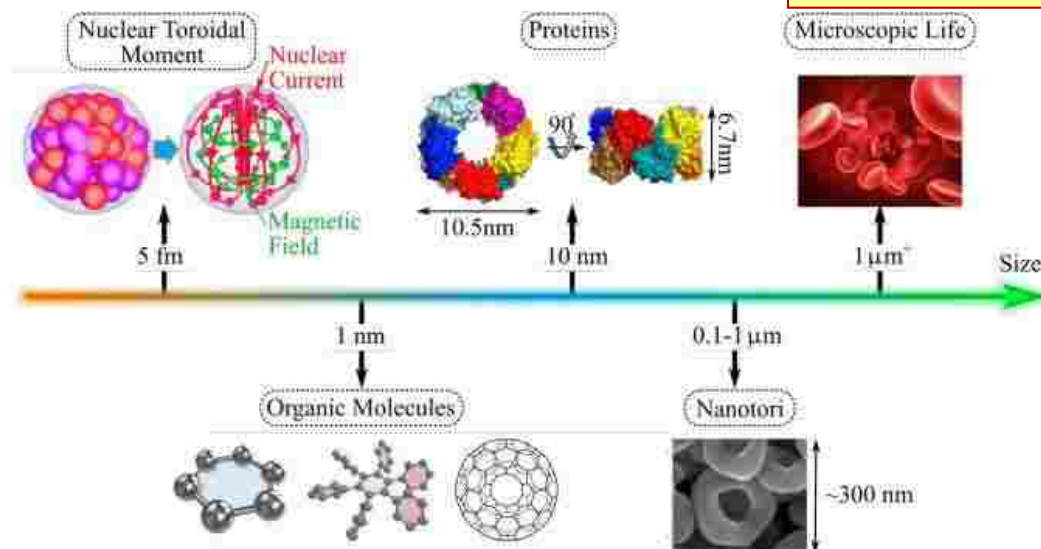


T. Kaelberer *et al*, *Science* 330, 1510 (2010)
B. Zel'dovich, *Sov. Phys. JETP*, 6,1184 (1958)



Тороидный диполь в природе

Зачем?



Y. B. Zel'dovich, 1958

Naumov I, et al., 2004

M. Kläui et al., 2003

Виноградов А.П., 2001

Y. F. Popov et al., 1998

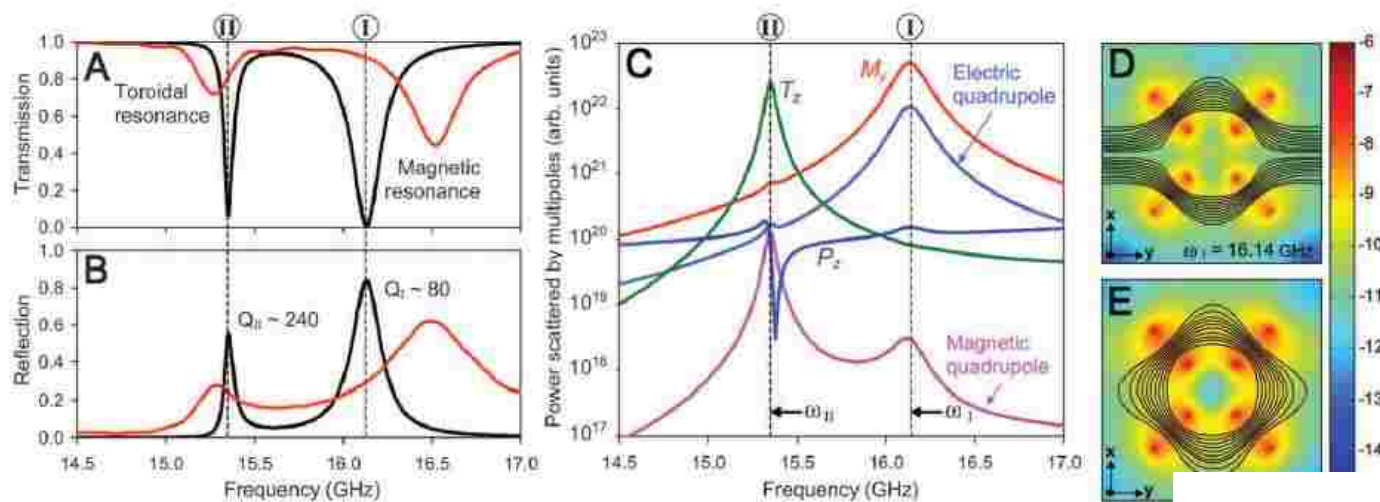
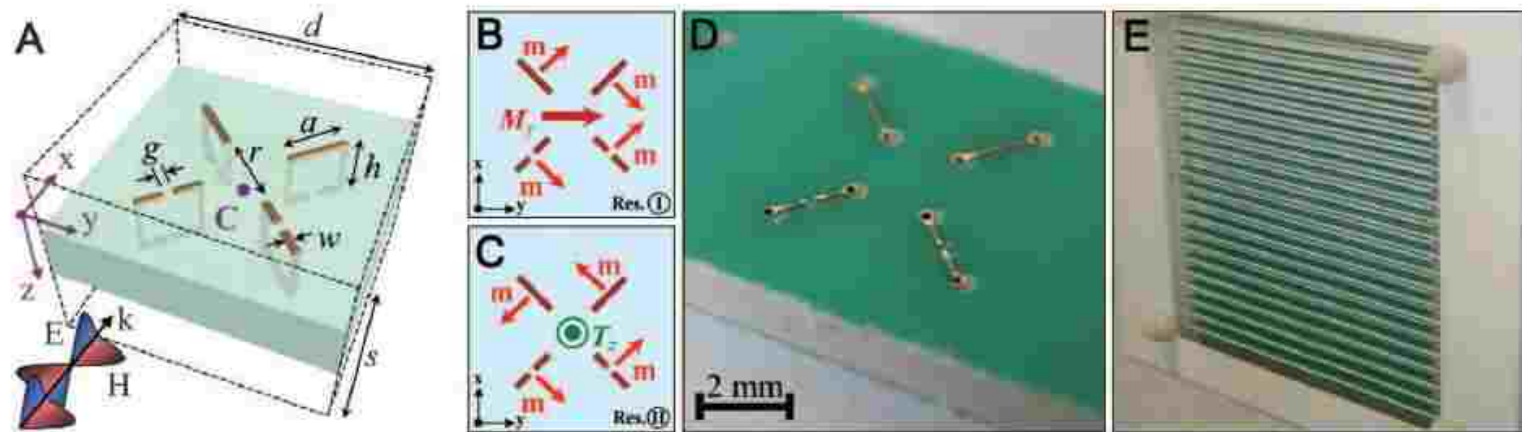
Y. V. Kopaev et al., 2009

L. Ungur et al., 2012

A. Ceulemans et al., 1998

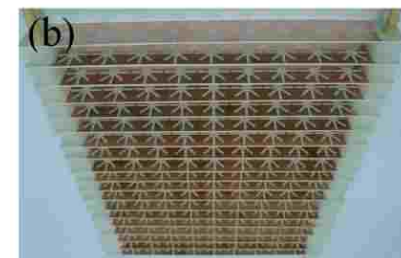
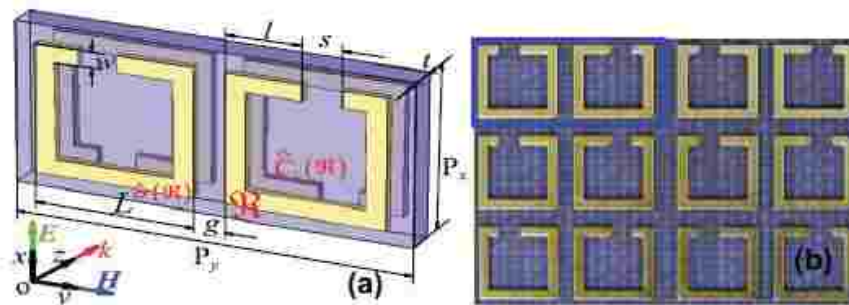
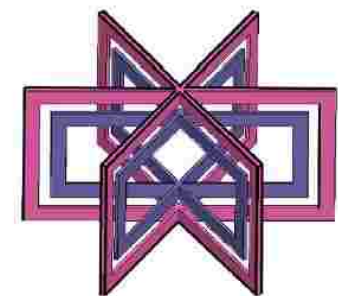
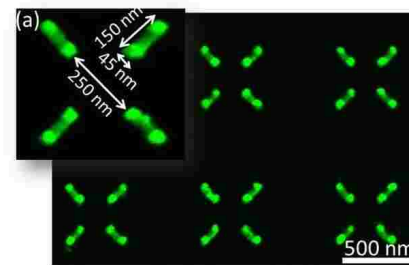
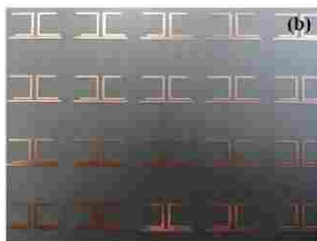
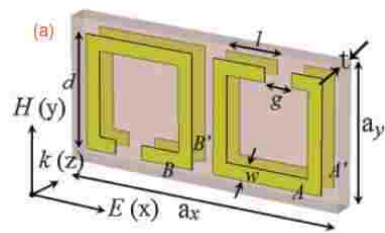
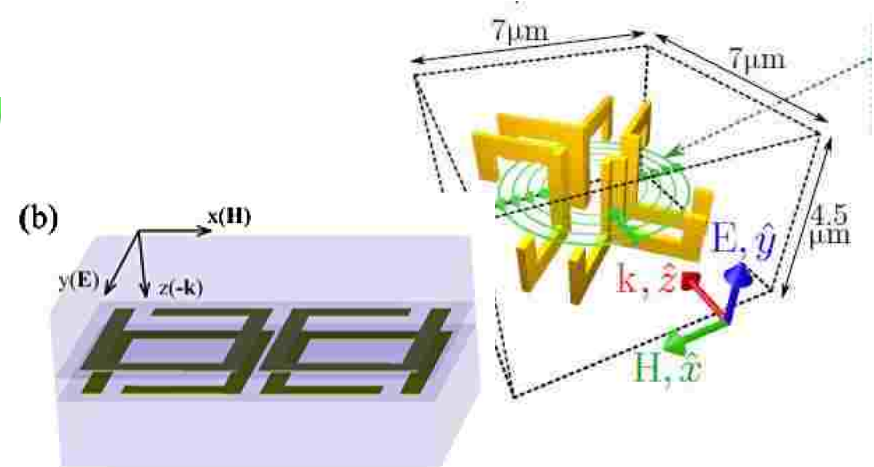
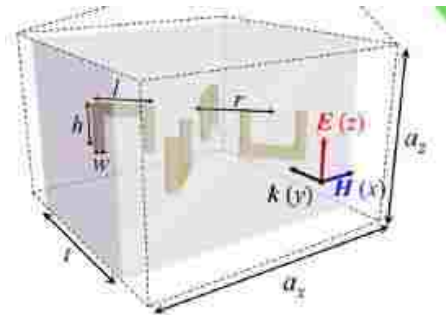
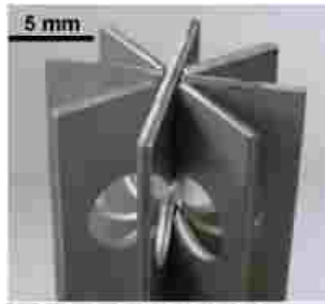
A. Karsisiotis et al., 2013

Первая демонстрация тороидного момента в метаматериалах



T. Kaelberer *et al*, *Science* 330, 1510 (2010)

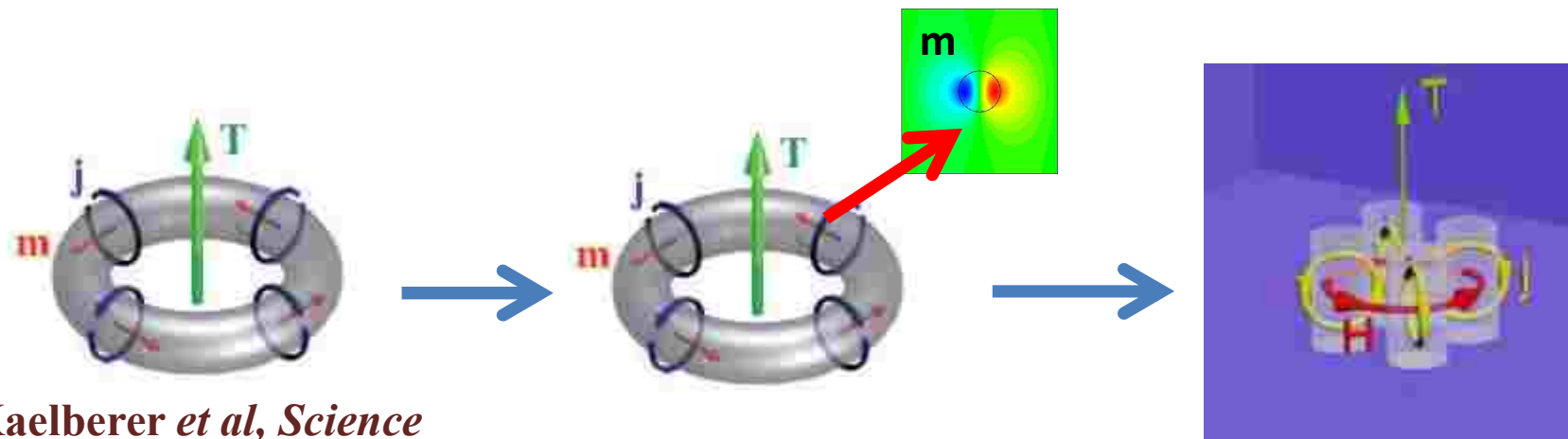
Дизайн тороидных метаматериалов



N. Papasimakis et al., *Nature Materials* 15, 263 (2016)

Диэлектрические метаматериалы с тороидным откликом

Диэлектрические метаматериалы с тороидным откликом



T. Kaelberer *et al*, *Science*
330, 1510 (2010)

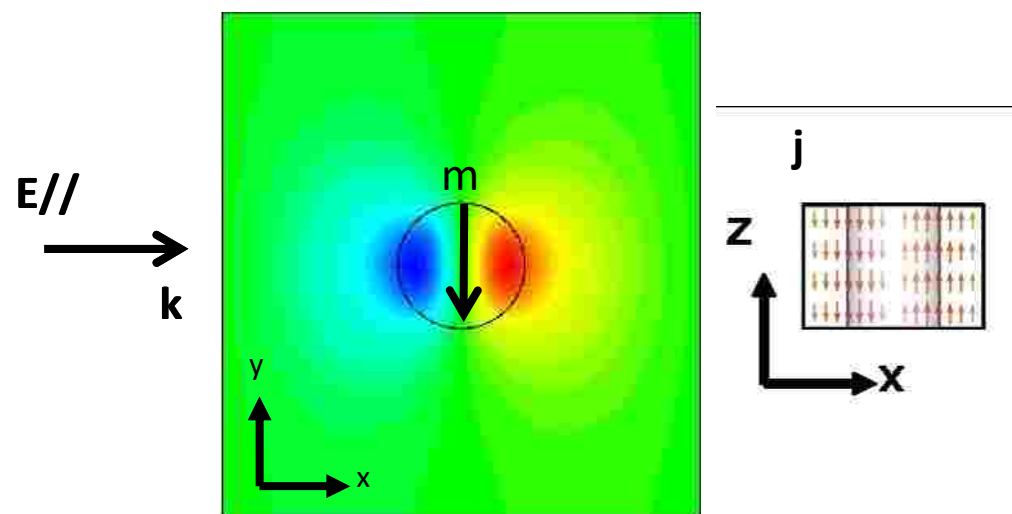
**Высокоиндексные
диэлектрики:**

BSTO ceramics в СВЧ

S. O'Brien and J. B. Pendry, 2002
L. Peng and al., 2007

**Какие материалы
есть в ТГц?**

Магнитный момент $\mathbf{m}$ в каждом цилиндре
возникает за счет $\mathbf{M}$ и резонанса.

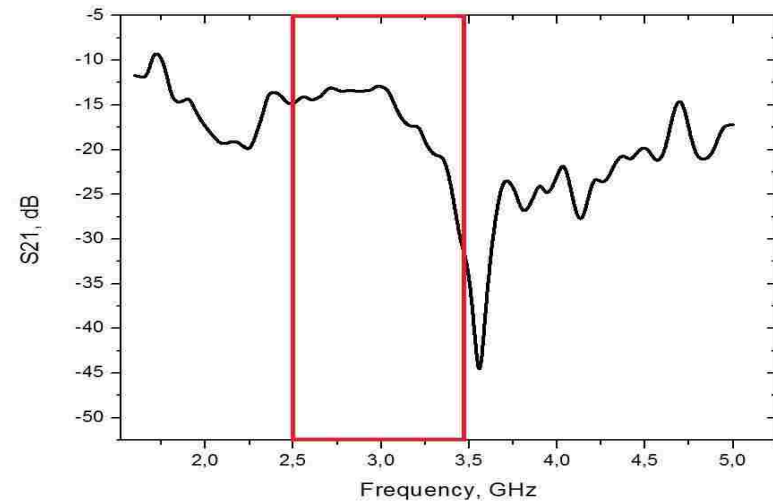


Basharin *et al.*, *Phys Rev X* 5 011036 (2015)

Эксперименты с водой. Тороидный отклик в диэлектрических метаматериалах в СВЧ диапазоне



ϵ воды = 60



- Частоты возбуждения тороидного момента 2.5 – 3.5 ГГц
- Провал в области 3.6 ГГц – частота магнитного квадруполья

Как померить свойства метаматериалов?

Безэховая камера



Никита Вольский



Иван Стенищев



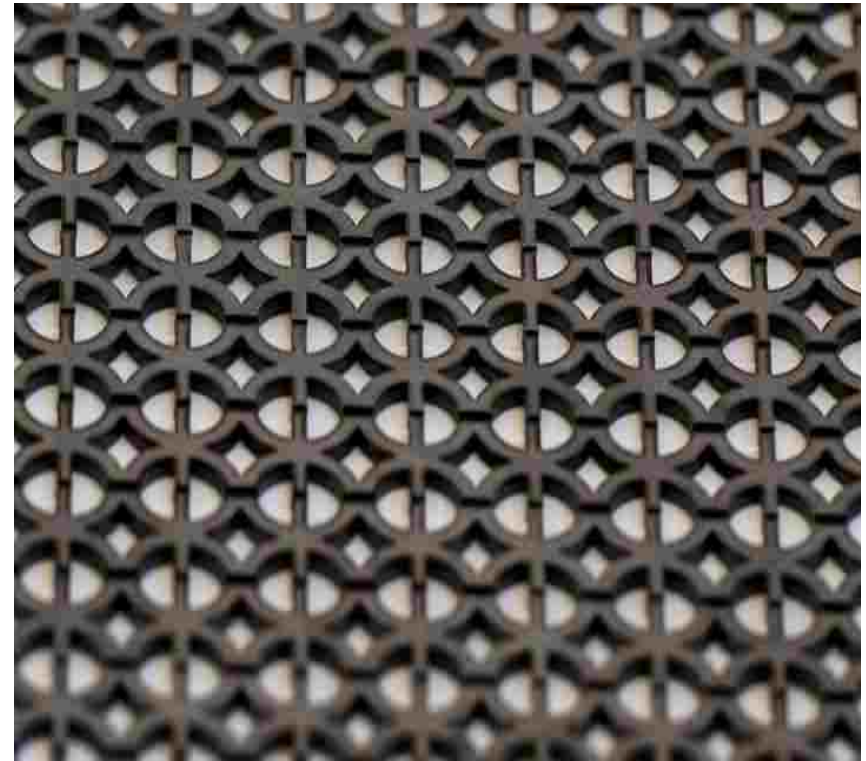
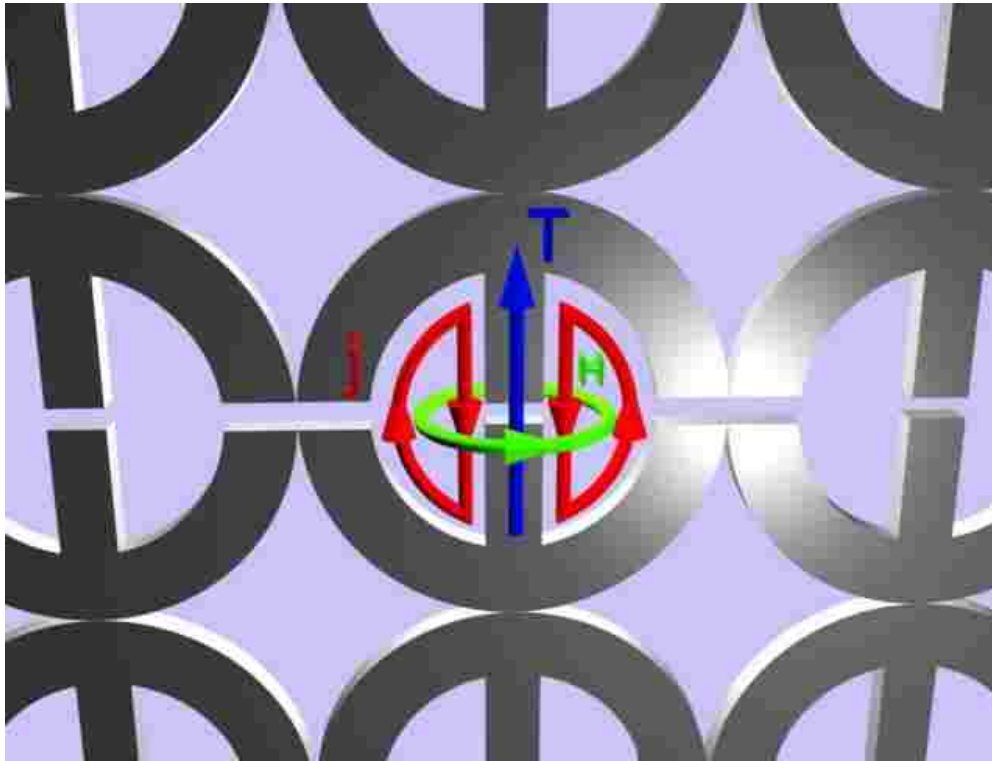
Мария Кожокарь

Эксперименты в безэховой камере



Планарные тороидные метаматериалы

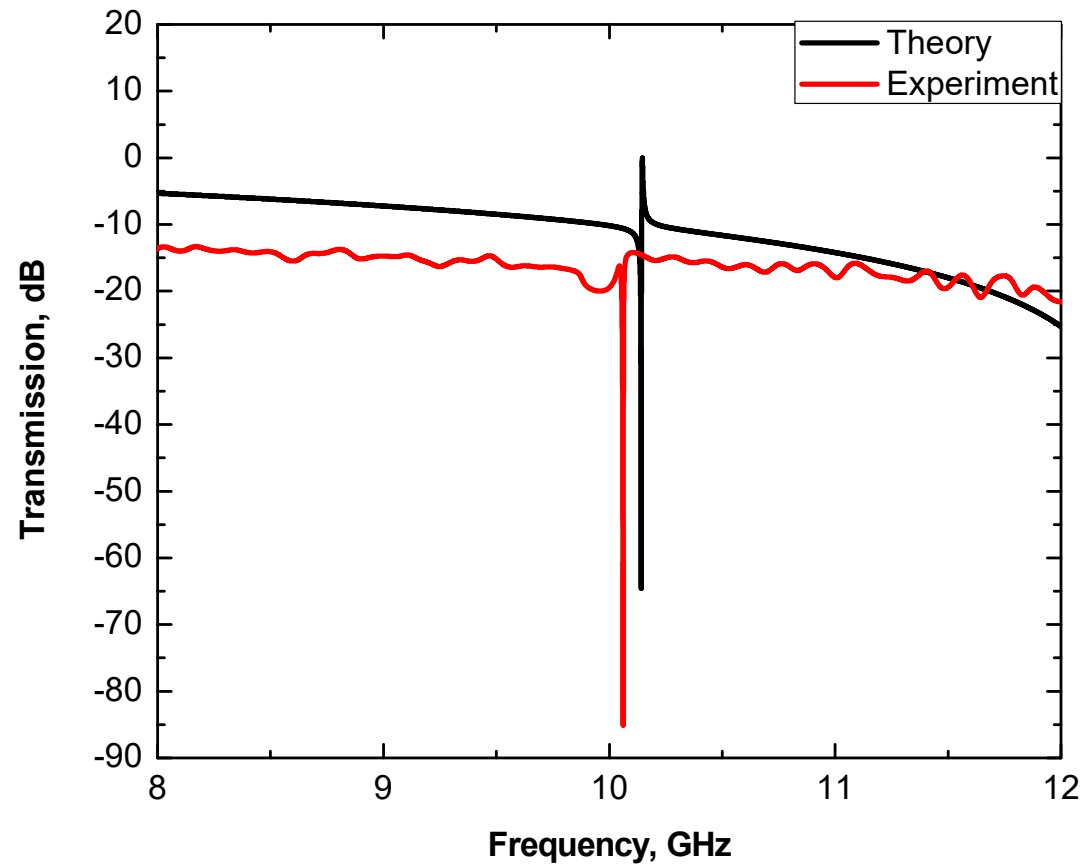
Планарные тороидные метаматериалы



Планарные тороидные метаматериалы? «Электрический» тип



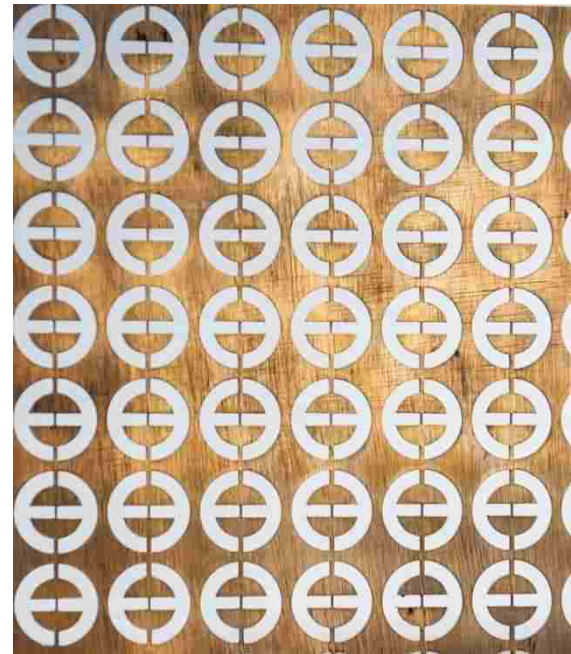
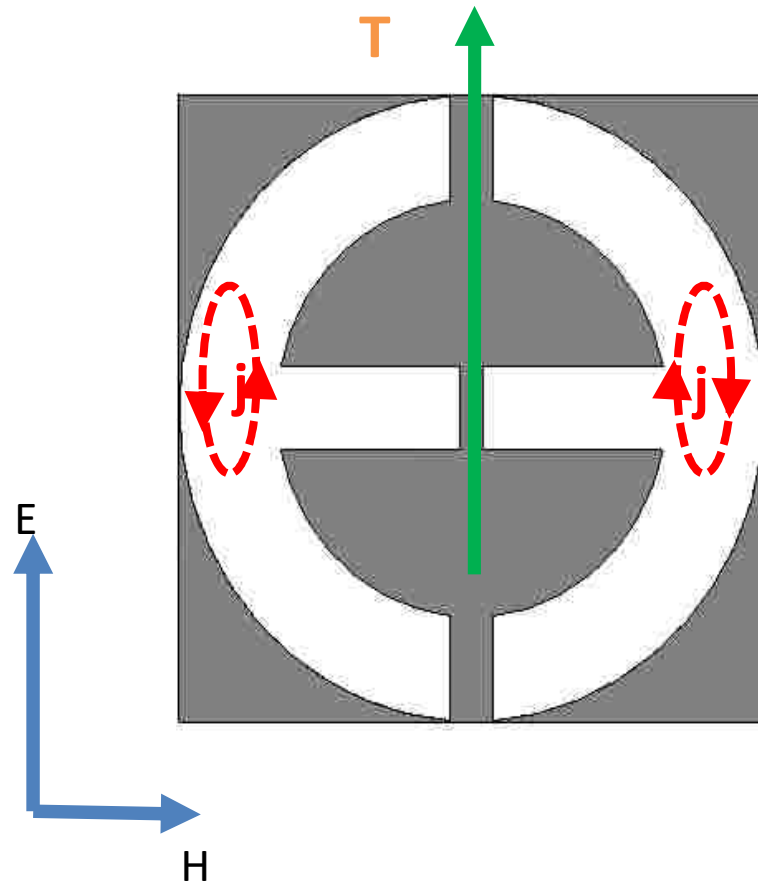
$$\epsilon/\epsilon_0 = 19160$$



•Нелинейности? Фильтры? Модуляторы? Сенсоры?

Планарные торoidalные метаматериалы?

«магнитный» тип.



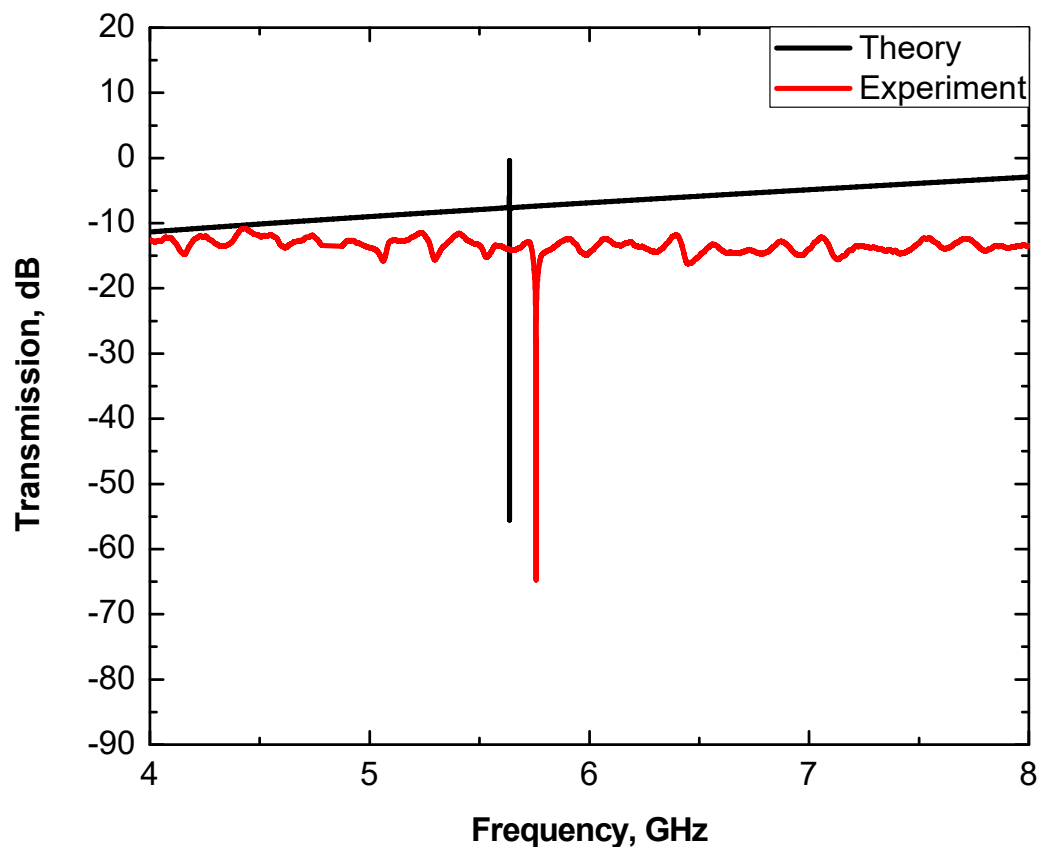
$$E=(T+Qm+Oe), \text{ Vassili Savinov Ph.D. Thesis, 2014}$$

Планарные тороидные метаматериалы?

«МАГНИТНЫЙ» ТИП

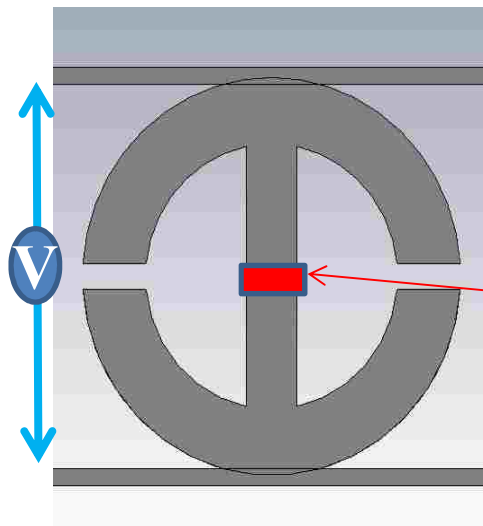
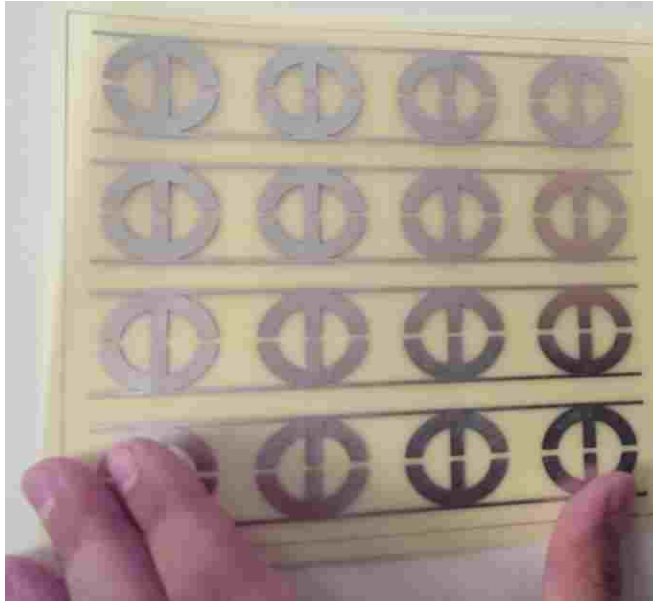


$$\mu/\mu_0 = 15870$$



- Сенсоры магнитного поля? Кубиты?

Перестраиваемые экраны для СТЕЛС-технологий

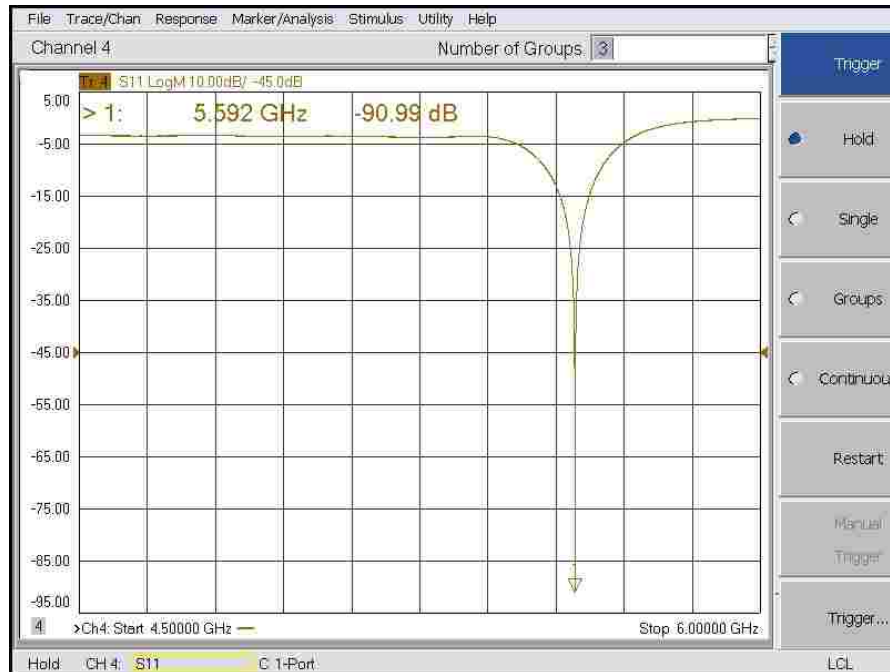


Pin-diode
Tunable element

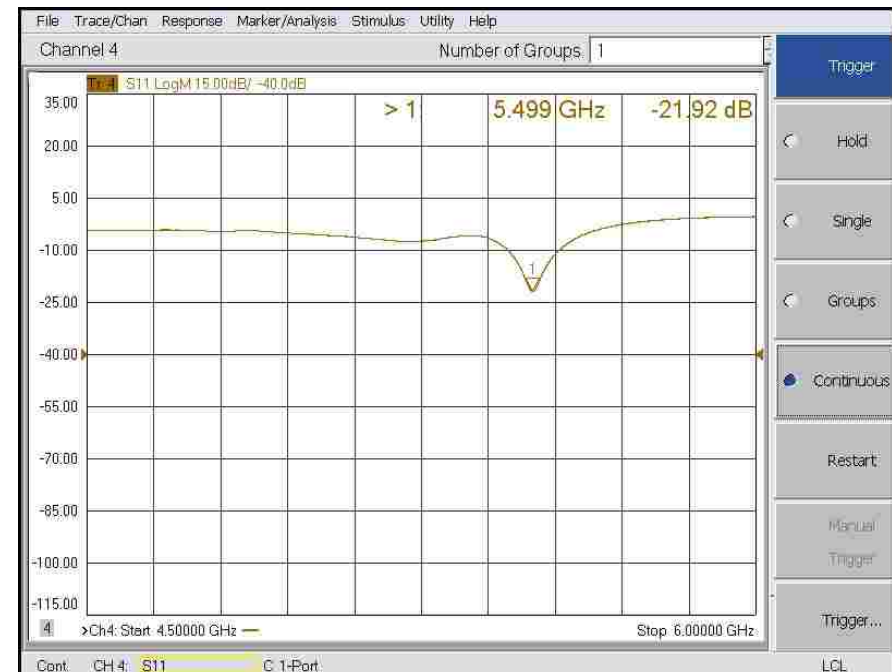


Перестраиваемые экраны для СТЕЛС-технологий

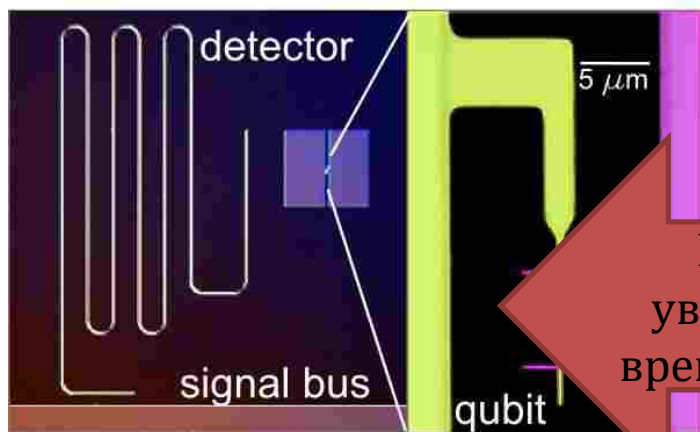
Pin диод выкл



Pin диод вкл

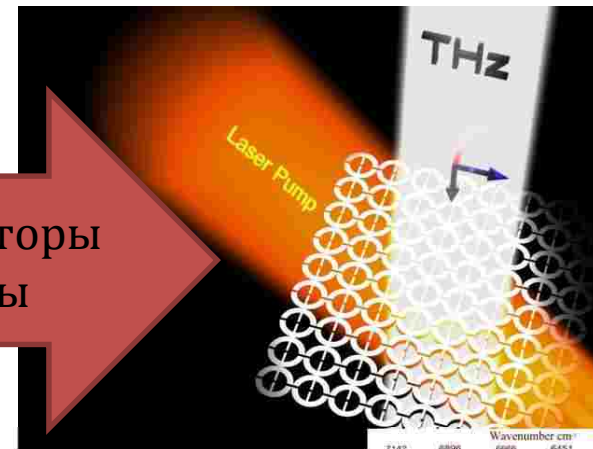


Что дальше?

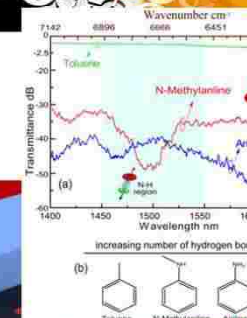


Кубиты, с
увеличенным
временем жизни

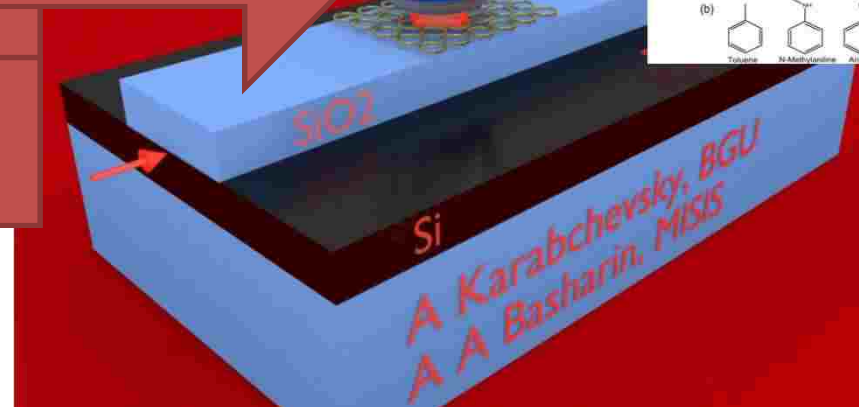
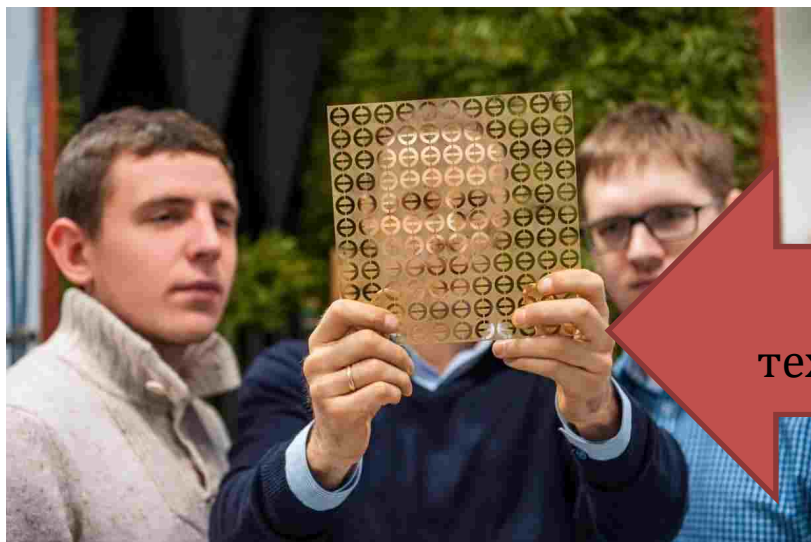
THz модуляторы
и сенсоры



Биомедицинские
приложения



Стелс-
технологии



Наша команда:



Никита
Вольский



Анар
Оспанова



Кристина Щеголева



Иван Стенищев



Мария Кожокарь



Алексей Башарин



Алексей Устинов



Никита Немков



Василий Федотов



Николай Желудев



Alina Karabchevsky



Илья Беседин

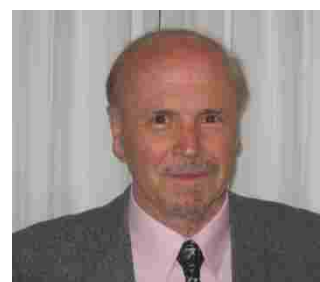


Владимир Чичков

ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Maria Kafesaki



Eleftherios Economou



Costas Soukoulis



Виталий Чугуевский

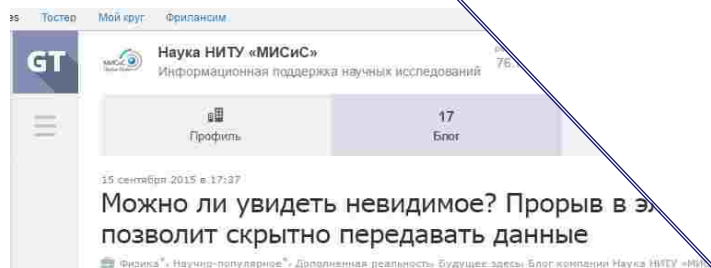
Бл...ТИ:

5100

Project № K4-201

Спасибо за
внимание!

Приходите
учиться в
НИТУ МИСиС

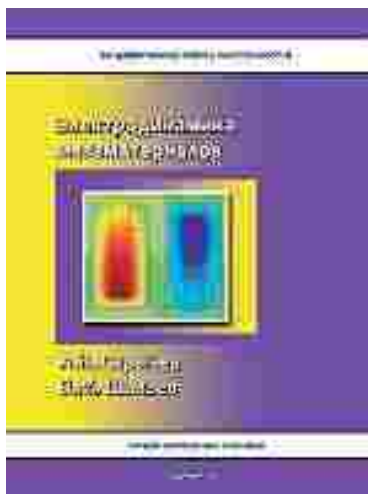


Умник 15-10

&SCHWARZ

Что почитать:

Среды Веселаго



Пионерские исследования советского физика Виктора Георгиевича Веселаго в 1967-68 гг. (3 статьи в журнале «Успехи физических наук»)

1967 г. Июль

Том 92, вып. 3

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА ВЕЩЕСТВ С ОДНОВРЕМЕННО
ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ϵ И μ

В. Г. Веселаго

Экспериментальное подтверждение через >30 лет!

Волна интереса к метаматериалам в 21 веке.

35

Тостер

Мой круг

Фрилансим

GT

МКСИС

Наука ННТУ «МИСиС»

Информационная поддержка научных исследований

рейтинг 76.75

Профиль

17 Блог

0 Вакансии

60 Подписчики

15 сентября 2015 в 17:37

Можно ли увидеть невидимое? Прорыв в электродинамике: анаполь позволит скрытно передавать данные

Физика

Научно-популярное

Дополненная реальность

Будущее здесь

Блог компании Наука ННТУ «МИСиС»