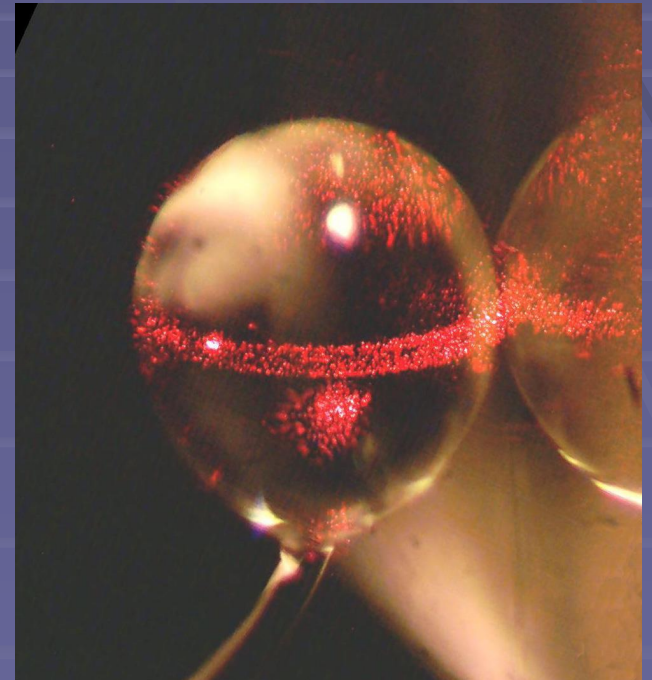


Оптические мега и микрорезонаторы

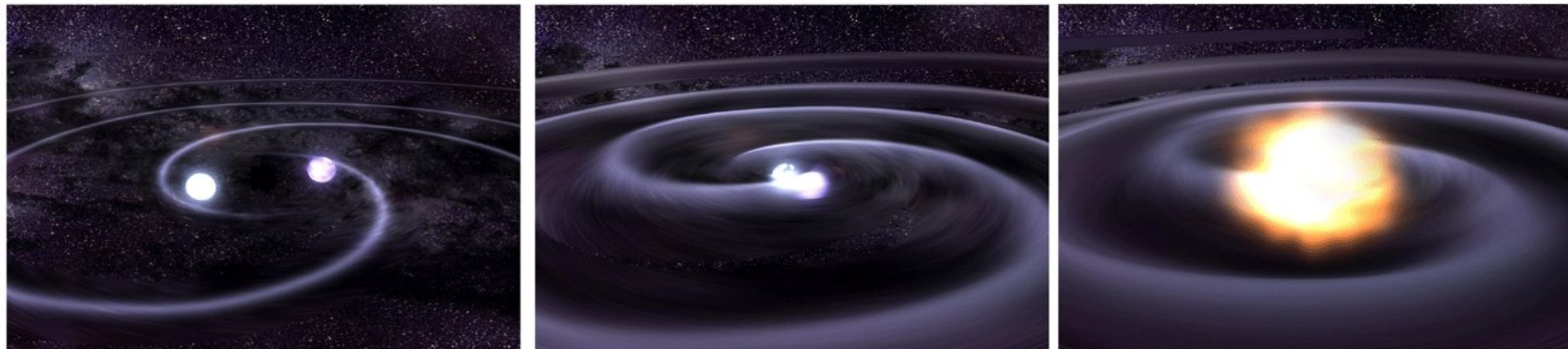


- Гигантские оптические резонаторы с аттометровым разрешением
Размер – 4 км

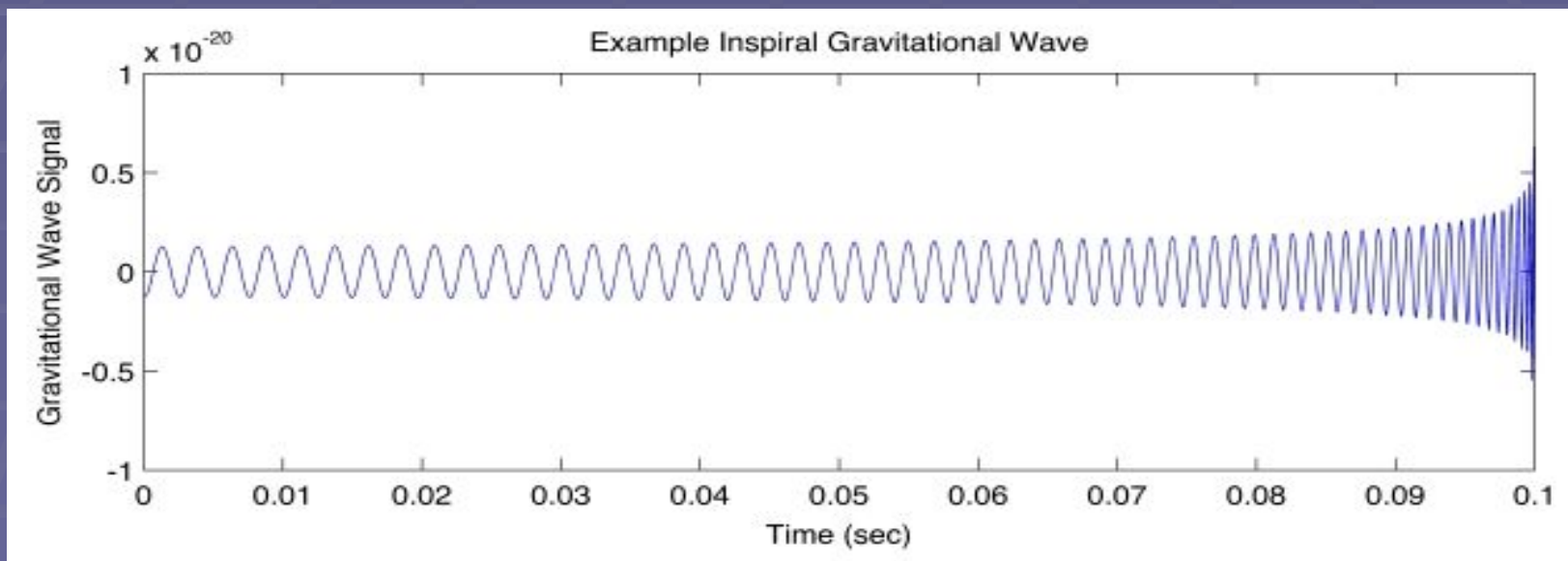
- Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью
Размер <math><100\text{ мкм}</math>



Гравитационные волны



Нобелевская премия 1993 года (косвенное подтверждение)





Россия:
2 научные группы

США (LIGO) - 2.5 антенны
4 км × 2 + 2 км



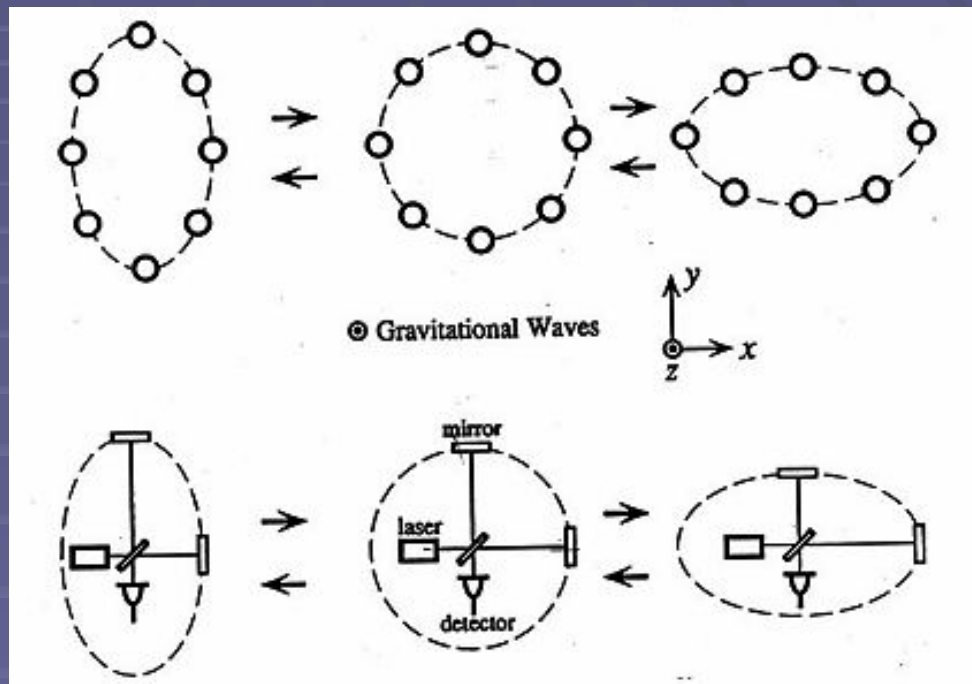
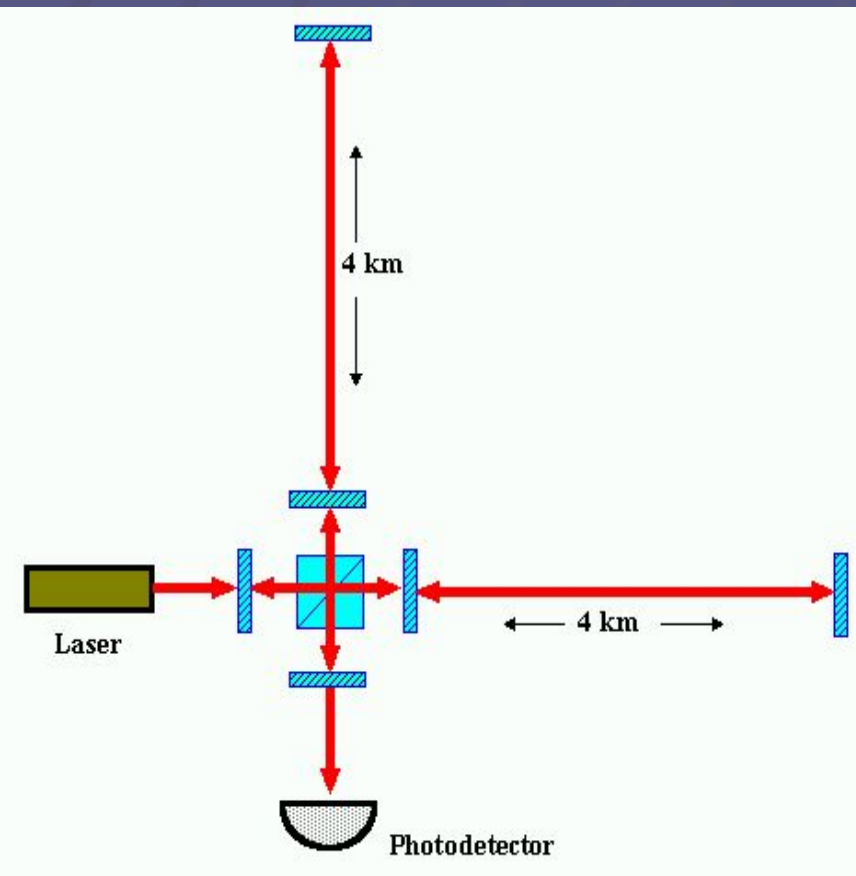
Франция-Италия
(VIRGO) 3 км

Германия-Англия
(GEO-600) 600м

Япония (TAMA) – 300 м

Гравитационные антенны

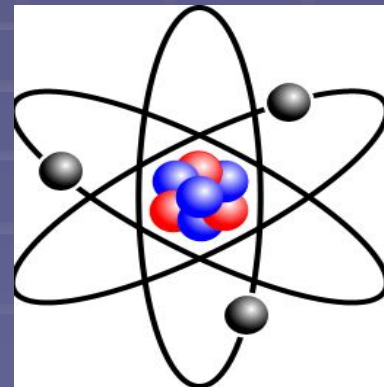
[М.Е.Герценштейн, В.И.Пустовойт // ЖЭТФ, 1962, Т.43, Вып. 2(8), С. 605]



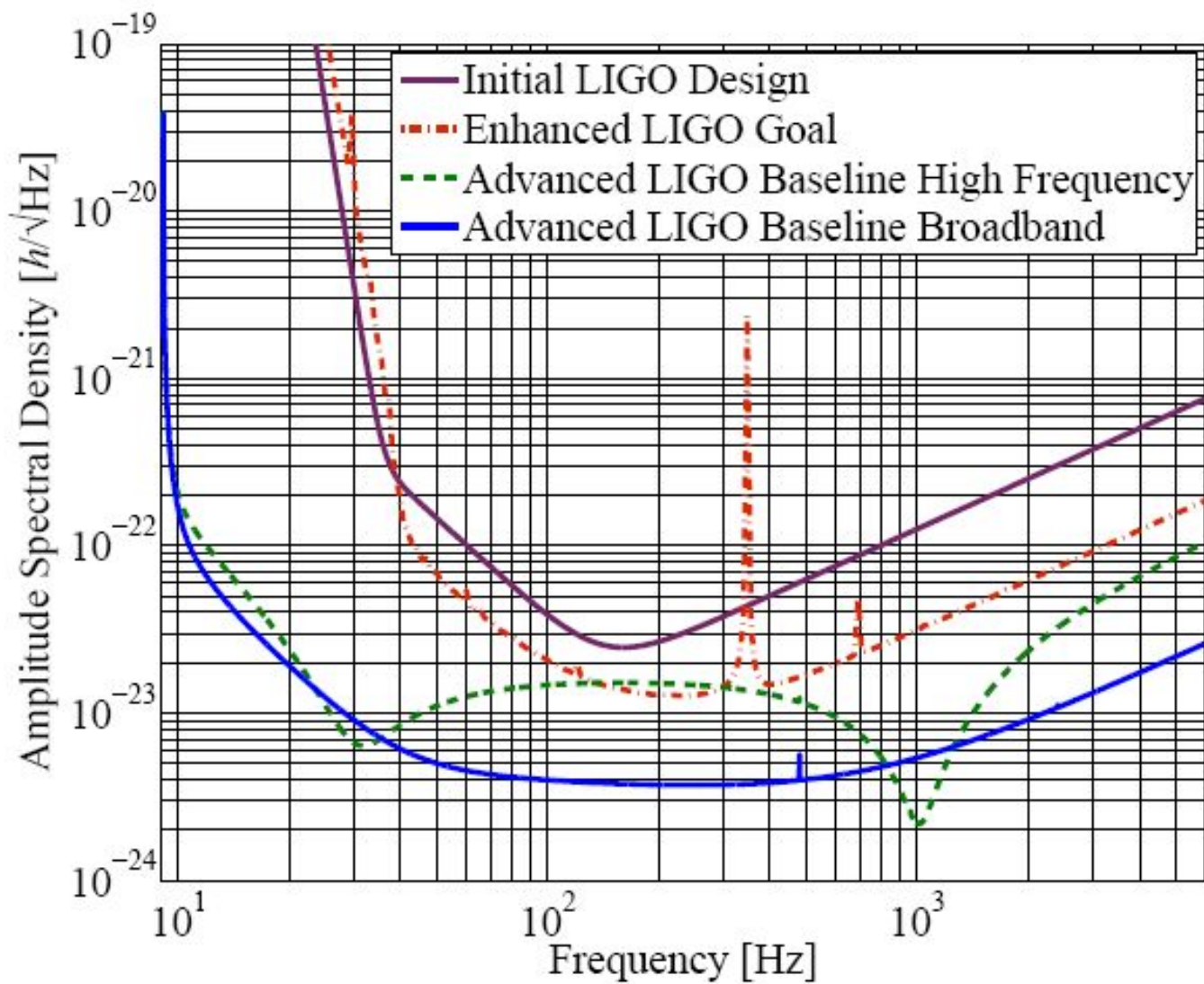
Чувствительность антенны

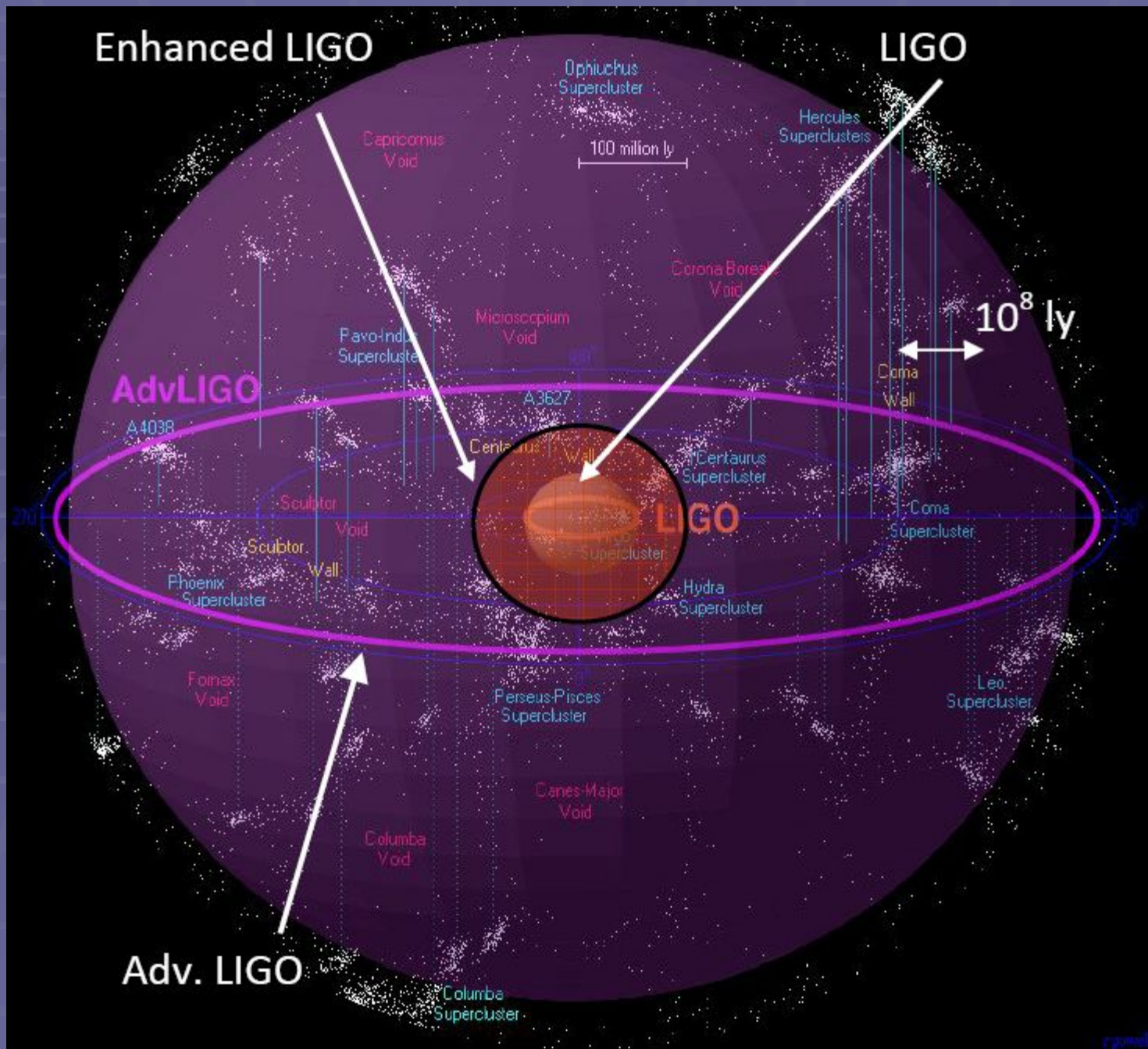
$$h_{+} = 10^{-21}$$

$$\Delta L = 10^{-21} \times 4 \text{ км} = 4 \times 10^{-18} \text{ м}$$



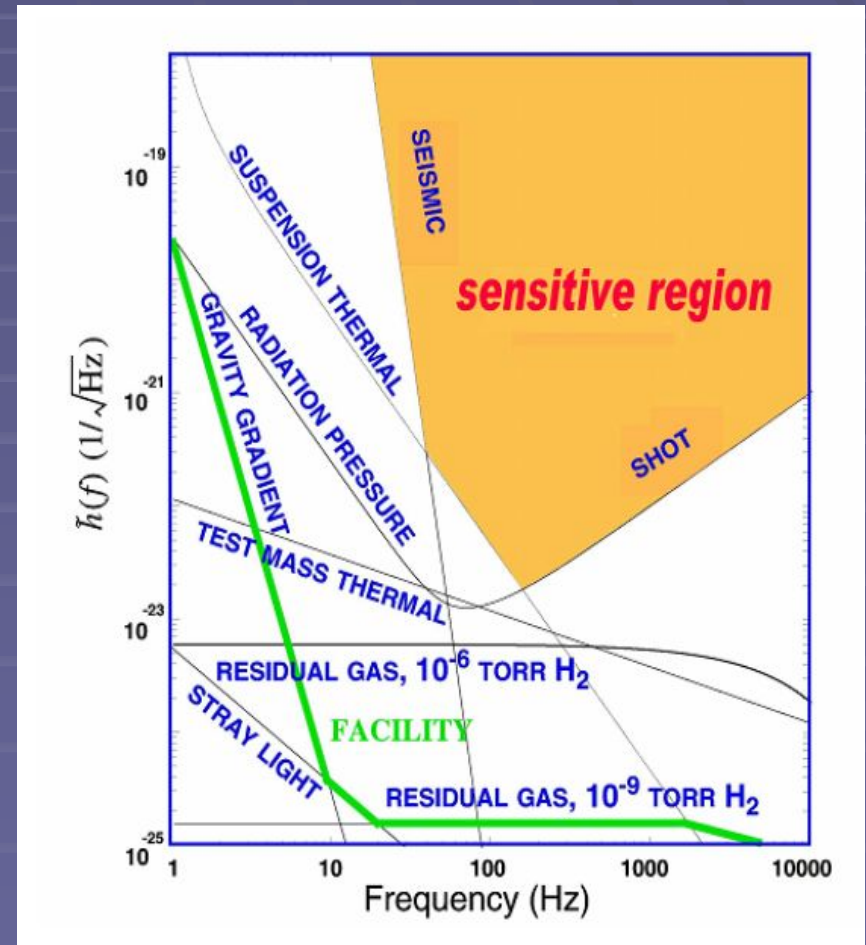
ΔL

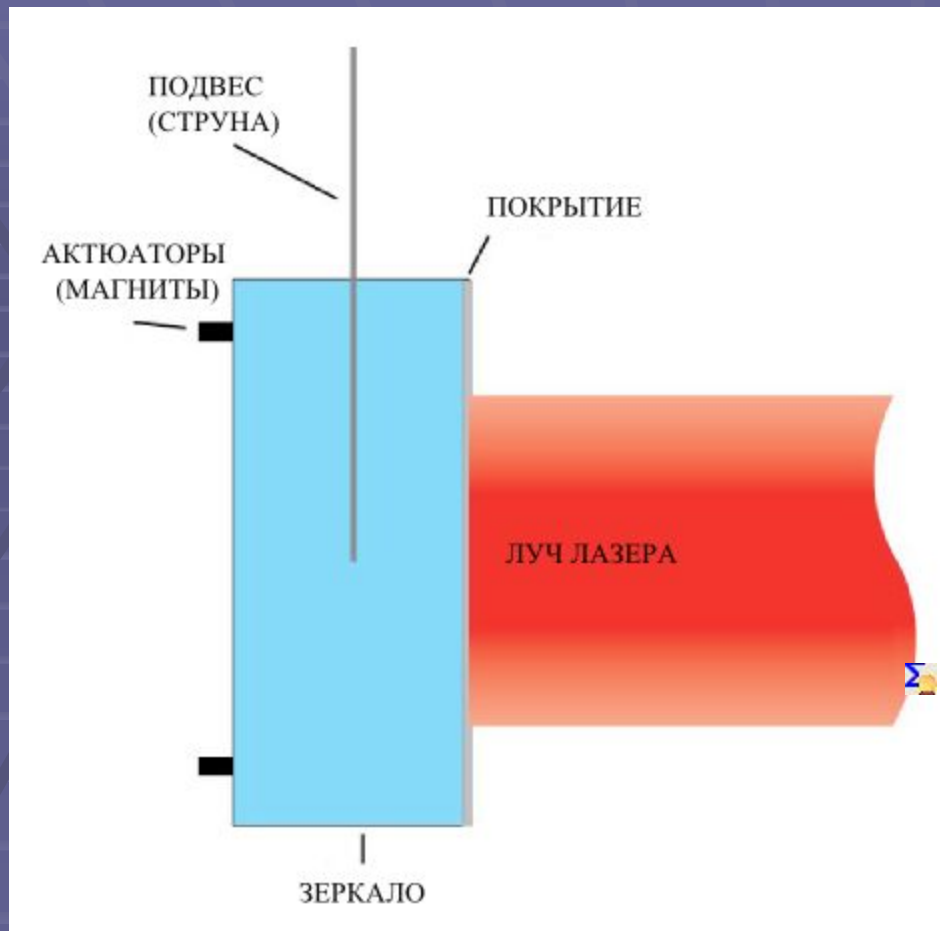




Ограничения чувствительности лазерных гравитационных антенн

1. Фазовые шумы измерительного лазера (дробовой шум)
2. Флуктуации радиационного давления
3. Шумы подвеса
4. Шумы зеркал
5. Сейсмические шумы
6. Флуктуации земной гравитации
6. Технические шумы





Шумы в зеркалах резонаторов

$$\Delta l, \Delta n$$



Термоупругий шум

V.B.Braginsky, M.L.Gorodetsky and S.P.Vyatchanin
Phys. Letts **A264** (1999) 1.

$$\langle \delta T^2 \rangle = \frac{k_B T^2}{\rho C V}$$



$$\frac{\partial L}{\partial T}$$

$$S_x(\omega) = \frac{4k_B T}{\omega} |\Im \chi(\omega)| = \frac{8k_B T W_{diss}}{\omega^2 F_0^2}$$



Большое множество разнообразных видов шумов, в которых пытаемся разобраться.

$$S_{SD}^{bulk} = \frac{4k_B T \phi(f)(1 - \nu^2)}{f \sqrt{2\pi}^{3/2} E r_0}$$

$$S_{SD}^{coat} = \frac{4k_B T \phi_{coat}(f)(1 - \nu^2)}{f \sqrt{2\pi}^{3/2} E r_0}$$

$$S_{RTE}^{coat} = \frac{32\sigma_B k_B T^5 (1 + \sigma_s)^2 \alpha_s^2 d_N^2}{\pi^2 \rho_s C_s \kappa_s w^2 f}$$

$$S_{RTR}^{coat} = \frac{8\sigma_B k_B T^5 \beta_{eff}^2 \lambda^2}{\pi^2 \rho_s C_s \kappa_s w^2 f}$$

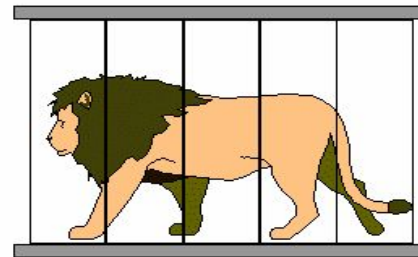
$$S_{PTE}^{coat} = \frac{4S_{abs}(1 + \sigma_s)^2 \alpha_c^2 d_N^2}{\pi^3 \rho_s C_s \kappa_s w^4 f} G_{surf}^{coat}(\omega)$$

$$S_{PTR}^{coat} = \frac{S_{abs} \beta_{eff}^2 \lambda^2}{\pi^3 \rho_s C_s \kappa_s w^4 f} G_{surf}^{coat}(\omega)$$

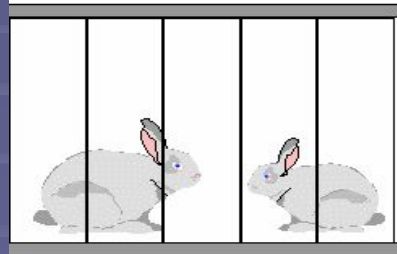
$$S_{TE}^{coat} = \frac{2\sqrt{2} k_B T^2 d_{\Sigma}^2 (1 + \nu^2) \alpha^2 (C_f \rho_f)^2}{\sqrt{f} \pi^{3/2} r_0^2 \sqrt{\kappa C \rho}} \Delta^2$$

$$S_{TR}^{coat} = \frac{k_B T^2 \beta_{eff}^2 \lambda^2}{\sqrt{f} \pi^{3/2} r_0^2 \sqrt{\kappa C \rho}}$$

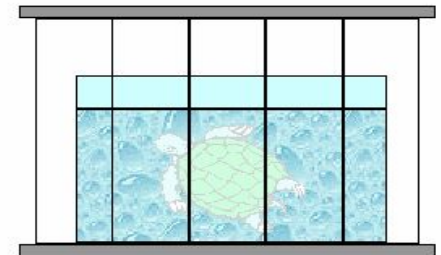
ШУМНЫЙ ЗООПАРК



Броун



Поверхностные зверушки

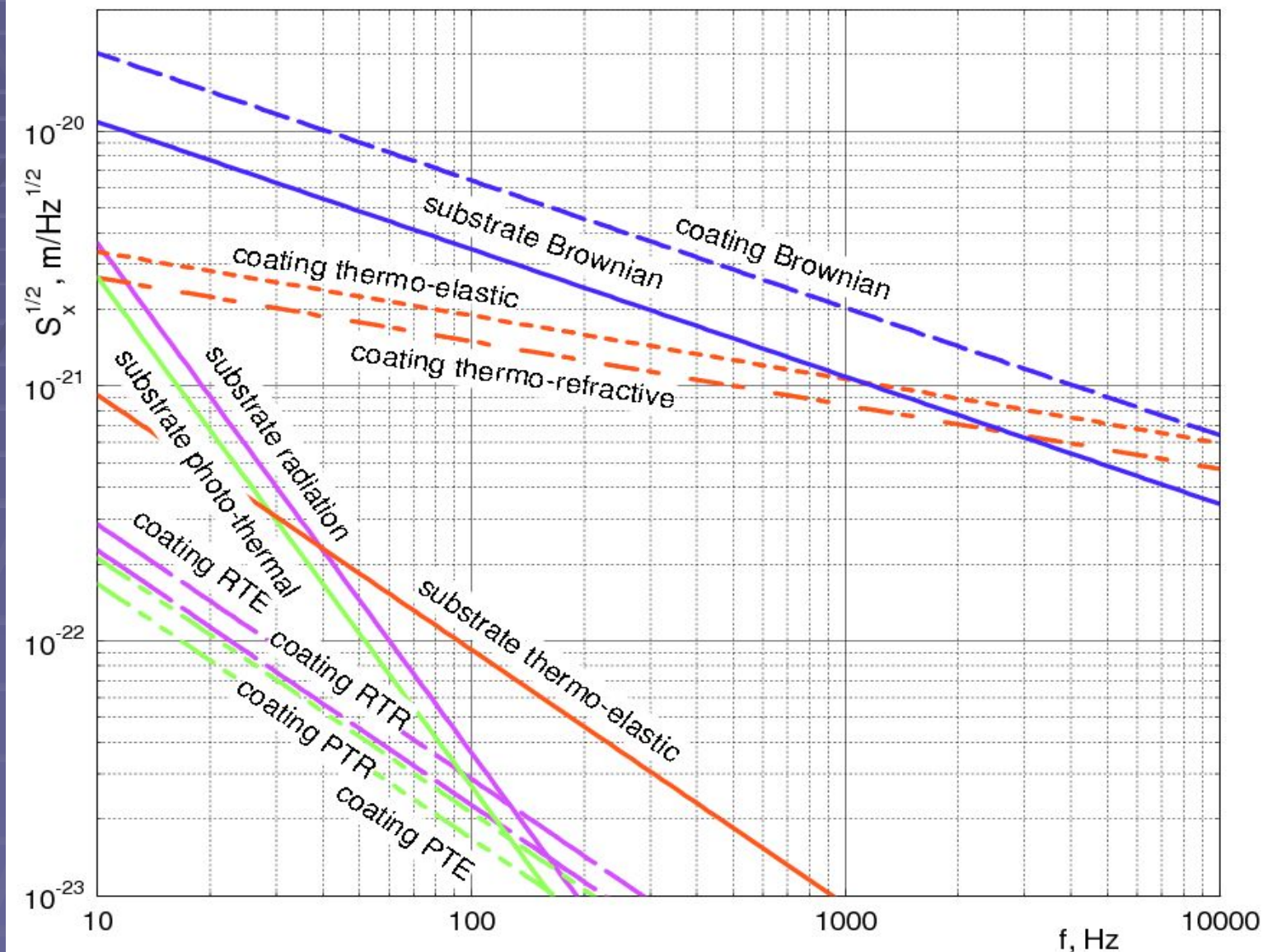


Термоупругие в среде

$$S_{PTE}^{bulk} = \frac{\alpha^2 \hbar \omega_0 W_0}{2f^2 \pi^4 \rho^2 C^2 r_0^4} \quad S_{RTE}^{bulk} = \frac{8\sigma_B k_B T^5 \alpha^2}{\pi^3 \rho_s^2 C_s^2 w^2 f^2}$$

$$S_{TE}^{sub} = \frac{4k_B T^2 \alpha_s^2 (1 + \sigma_s)^2 \kappa_s}{\pi^{5/2} (C_s \rho_s)^2 w^3 f^2}$$

Частотные зависимости основных шумов из зоопарка в зеркалах лазерных гравитационных антенн.



Большое множество разнообразных видов шумов, в которых пытаемся разобраться.

$$S_{SD}^{bulk} = \frac{4k_B T \phi(f)(1 - \nu^2)}{f \sqrt{2\pi}^{3/2} E r_0}$$

$$S_{SD}^{coat} = \frac{4k_B T \phi_{coat}(f)(1 - \nu^2)}{f \sqrt{2\pi}^{3/2} E r_0}$$

~~$$S_{RTE}^{coat} = \frac{32\sigma_E}{\pi^2 \rho_s \kappa_s w^2 f} \frac{(1 + \sigma_s)^2 \alpha_c^2 d_N^2}{s^4 f}$$~~

~~$$S_{RTR}^{coat} = \frac{8\sigma_B}{\pi^2 \rho_s \kappa_s w^2 f} \frac{3_{eff}^2 \lambda^2}{s^4 f}$$~~

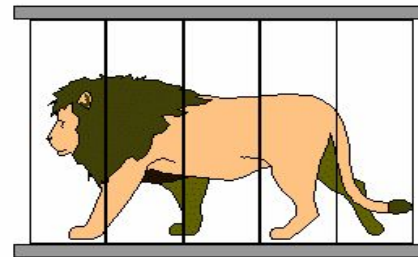
~~$$S_{PTE}^{coat} = \frac{4S_{abs}}{\pi^3} \frac{s^2 \alpha_c^2 d_N^2}{s^4 f} G_{surf}^{coat}(\omega)$$~~

~~$$S_{PTR}^{coat} = \frac{S_{ab}}{\pi^3 \rho_s} \frac{s^2}{s^4 f} G_{surf}^{coat}(\omega)$$~~

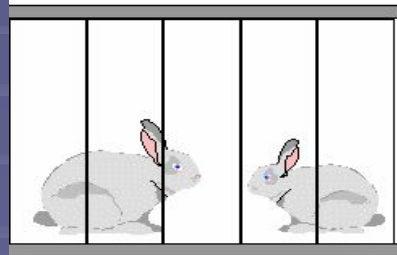
~~$$S_{TE}^{coat} = \frac{2\sqrt{2}k}{\sqrt{\dots}} \frac{(1 + \nu^2)\alpha^2 (C_f \rho_f)^2}{r_0^2 \sqrt{\kappa C \rho}} \frac{\Delta^2}{(C\rho)^2}$$~~

~~$$S_{TR}^{coat} = \frac{\Gamma^2 \beta_{eff}^2 \lambda^2}{3/2 r_0^2 \sqrt{\kappa C \rho}}$$~~

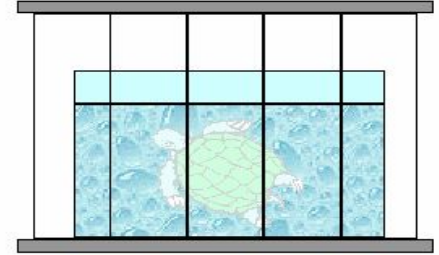
ШУМНЫЙ ЗООПАРК



Броун



Поверхностные зверушки



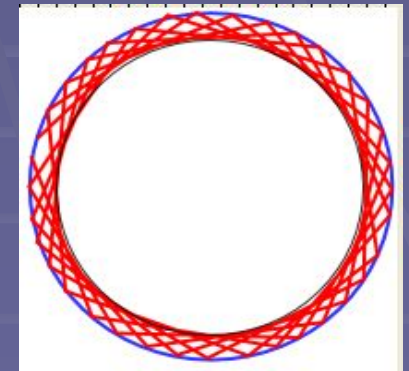
Термоупругие в среде

$$S_{PTE}^{bulk} = \frac{\alpha^2 \hbar \omega_0 W_0}{2f^2 \pi^4 \rho^2 C^2 r_0^4} \quad S_{RTE}^{bulk} = \frac{8\sigma_B k_B T^5 \alpha^2}{\pi^3 \rho_s^2 C_s^2 w^2 f^2}$$

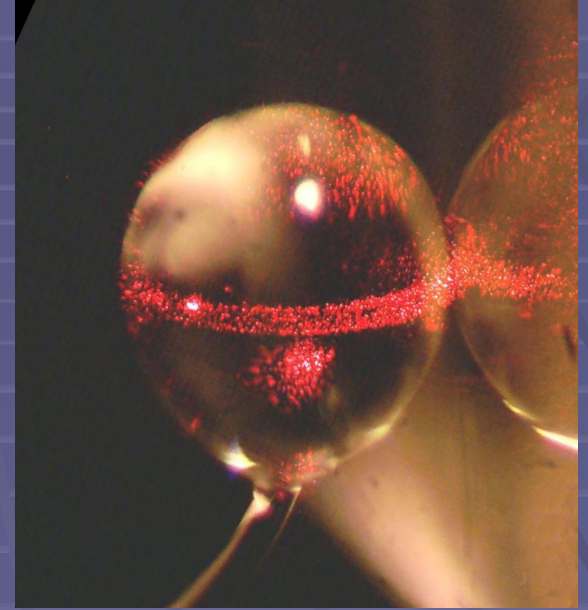
$$S_{TE}^{sub} = \frac{4k_B T^2 \alpha_s^2 (1 + \sigma_s)^2 \kappa_s}{\pi^{5/2} (C_s \rho_s)^2 w^3 f^2}$$

Предыстория микрорезонаторов с модами шепчущей галереи

- 1910 Рэлей объясняет акустические эффекты “шепчущей галереи” собора св. Павла в Лондоне
- 1939 Рихтмайер: добротность может быть очень велика
- 1977 Ашкин и Джиджич. Узкие резонансы при рассеянии света на каплях
- 1987 Брагинский и Ильченко. СВЧ кольцевые резонаторы. Добротность 10^9



- **1989 Брагинский, Городецкий, Ильченко.**
Оптические микрорезонаторы
из плавленного кварца.
Добротность 3×10^8
(Индекс цитирования ISI - 281)



- **1995 Городецкий, Савченков, Ильченко.**
Предельная добротность, ограниченная
фундаментальными потерями в кварце
 8×10^9
(Индекс цитирования ISI - 289)

Изготовление



Диаметр 10-1000 мкм, добротность 10^6 - 10^{10}

Микросферы в мире

OEwaves Inc, (Pasadena CA, USA)

L.Maleki's lab (JPL, USA)

H.J.Kimble's lab (Caltech, USA)

K.Vahala's lab (Caltech, USA)

S.Arnold's lab (Polytechnical University New York, USA)

C.Tapalian's group (MIT Draper Laboratory, USA)

R.Chang's lab (Yale Univ, USA)

A. Rosenberger's lab (Oklahoma State Univ., USA)

Xponent Photonics Inc, USA

H.Wang's lab (Univ. of Oregon, USA)

S. Blair's lab, (Univ. of Utah, USA)

Nomadics Inc, (Monrovia CA, USA)

T. Haensch's lab (LMU, MPQ Muenchen, Germany)

O.Benson's lab (Humboldt Univ. Berlin, Germany)

S.Haroche's lab (ENS Paris, France)

G.Stephan's lab (ENSSAT, Lannion, France)

J. Knight's lab (University of Bath, UK)

Y.-P.Laine's lab (Helsinki University of Technology, Finland)

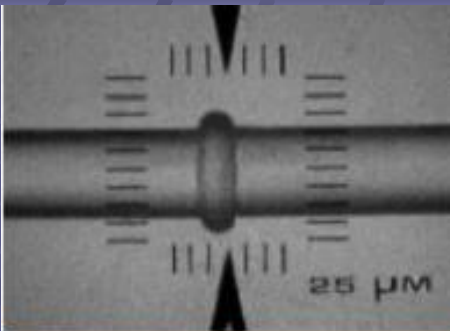
A.Serpenguezel's lab (Koc University, Turkey)

V.Sandoghdar's lab (ETH Zurich, Switzerland)

M.Kuwata's lab (University of Tokyo, Japan)

K.Hakuta's lab (University of Electro-Communications Tokyo, Japan)

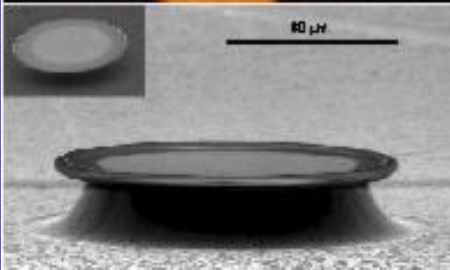
Прорыв в технологии



2001 ... Городецкий, Ильченко
Микроторы. Добротность $\sim 10^7$


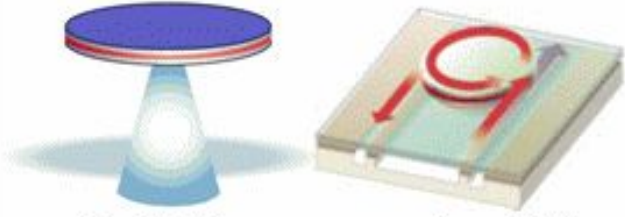
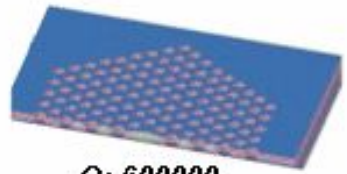
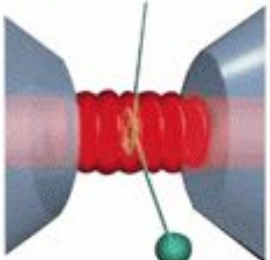
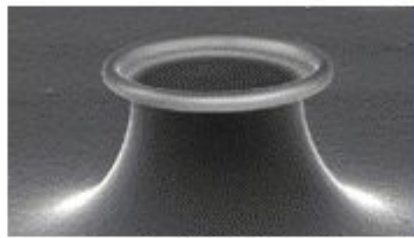

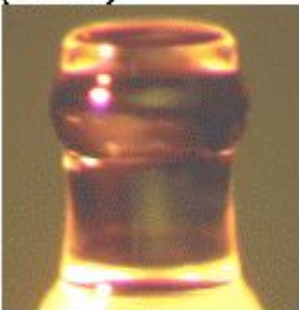


2003 ... Ильченко, Савченков,
Грудинин, Мацко кристаллические
резонаторы в JPL.
Добротность до 3×10^{11}

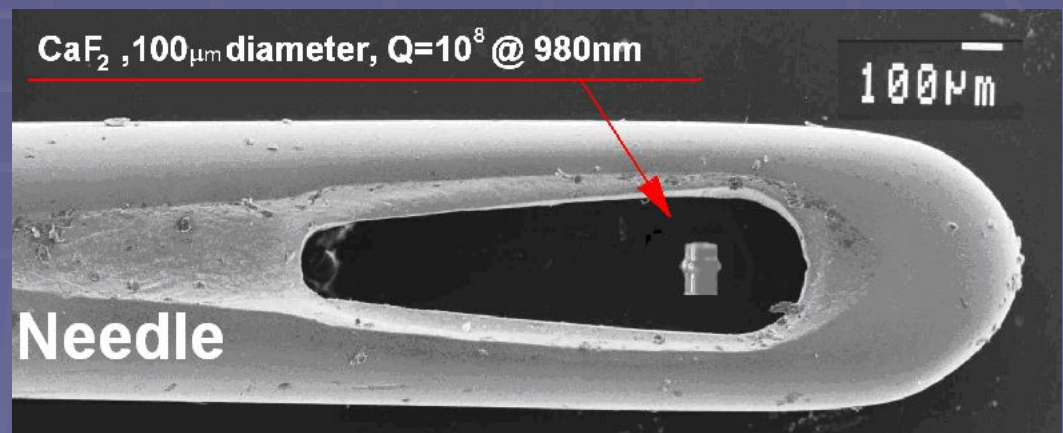
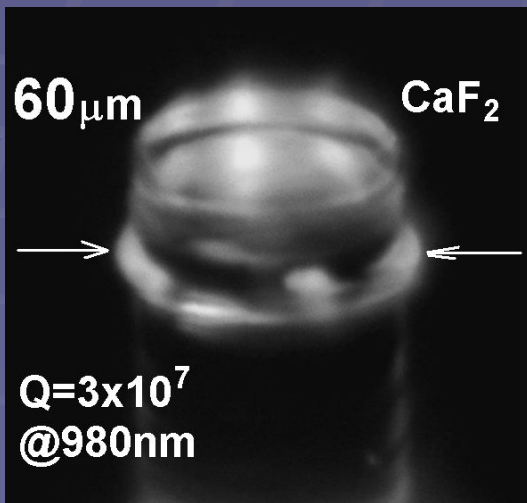
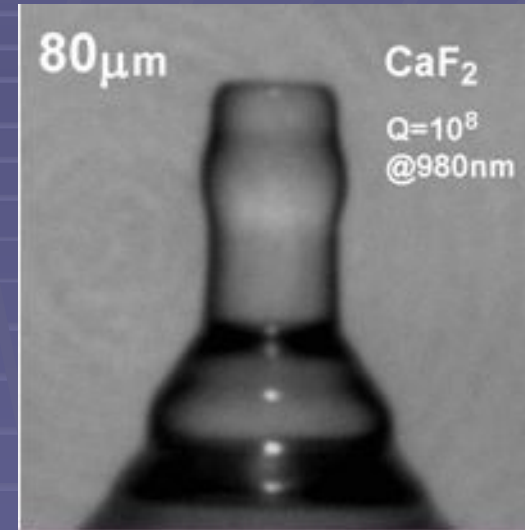
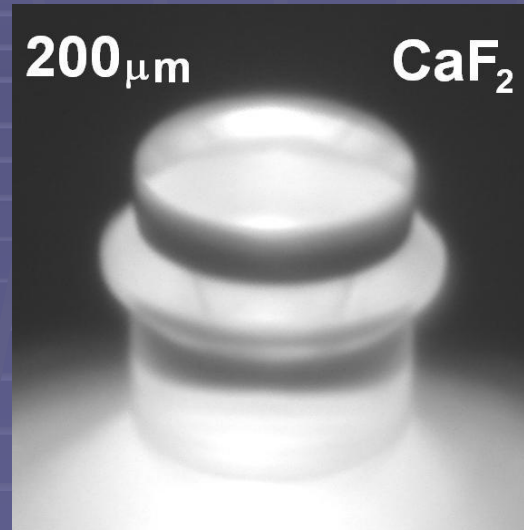
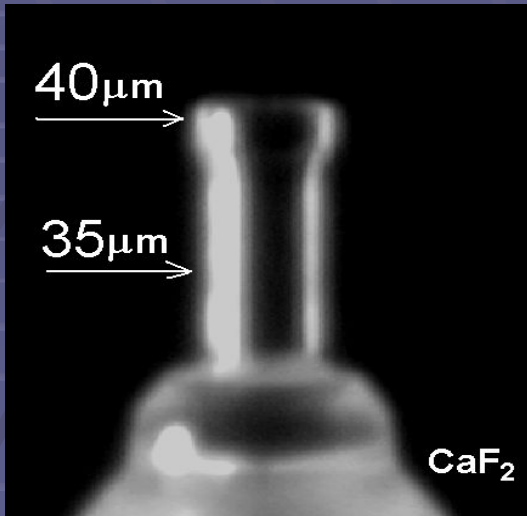


2002 Вахала, Киппенберг.
Гибридная технология микроторов.
Добротность 2×10^8

ОПТИЧЕСКИЕ МИКРОРЕЗОНАТОРЫ

	Фабри-Перо	Шепчущей галереи	Фотонные кристаллы
Добротные $\tau > 1 \text{ пс}, V \sim 1 \text{ мкм}^3$	 Q: 2000	 Q: 520000 (Painter) $Q_{\text{III-V}}: 7000$ $Q_{\text{poly}}: 130000$	 Q: 600000 (Noda)
Высокодобротные $\tau > 1 \text{ пс}, V \sim 1000 \text{ мкм}^3$	 Q: 10^7 - суперзеркала (Кимбл)	 $Q \leq 2 \times 10^8$ (Vahala)	<p style="text-align: center; font-size: 2em;">?</p>
Сверхдобротные $\tau > 1 \text{ мкс}, V \geq 1000 \text{ мкм}^3$		 $Q \leq 8 \times 10^9$ (МГУ) SiO_2	 $Q \leq 6 \times 10^{10}$ (JPL) CaF_2

Кристаллические микрорезонаторы

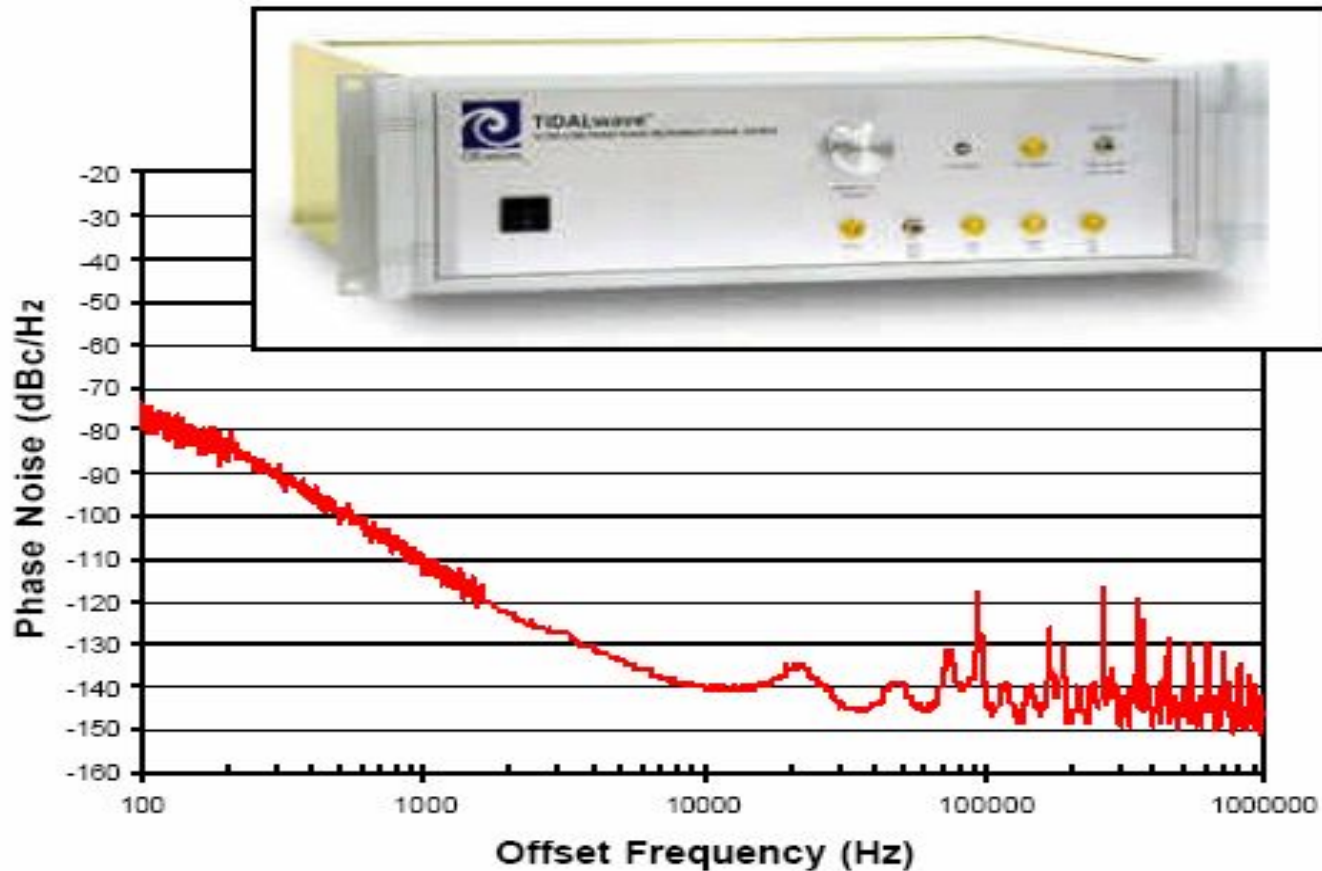


(И.С.Грудинин, 2006)

Основные результаты в МГУ

- 1996. Стабилизация частоты полупроводниковых лазеров с помощью микросфер (совместно с ФИАН и NIST).
- 1998. Разработана теория оптимальной связи с микрорезонаторами
- 2000. Теория рассеяния и связи мод в микрорезонаторах
- 2000. Измерение малых оптических потерь в жидкостях методом погруженного сферического микрорезонатора.
- 2004. Экспериментальное измерение фундаментальных оптических флуктуаций в микрорезонаторах.
- 2005. Теоретическое и экспериментальное исследование нестационарных нелинейных эффектов в микросферах.
- 2006. Квазигеометрическая теория мод шепчущей галереи в произвольных осесимметричных резонаторах
- 2007. Собственные частоты и добротность в геометрической теории мод шепчущей галереи

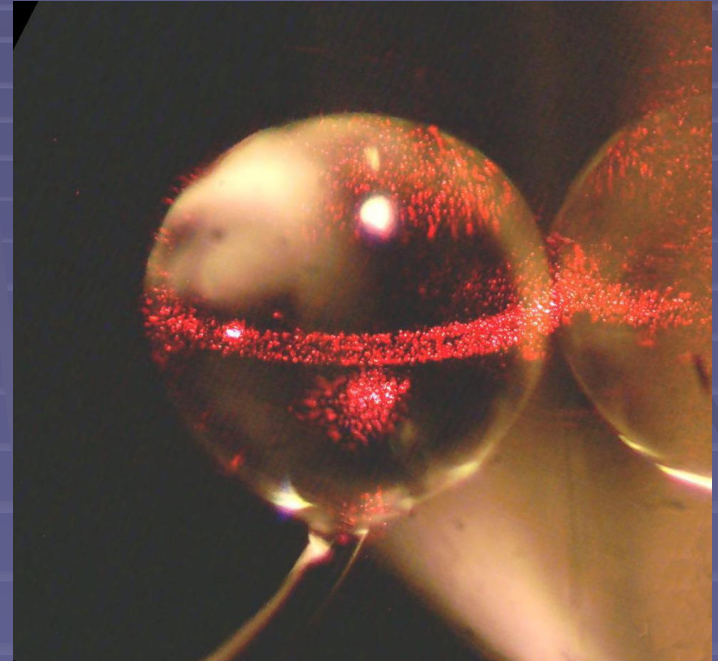
Коммерческие фильтры, модуляторы, СВЧ оптоэлектронные генераторы на основе оптических микрорезонаторов



Те же термодинамические флуктуации

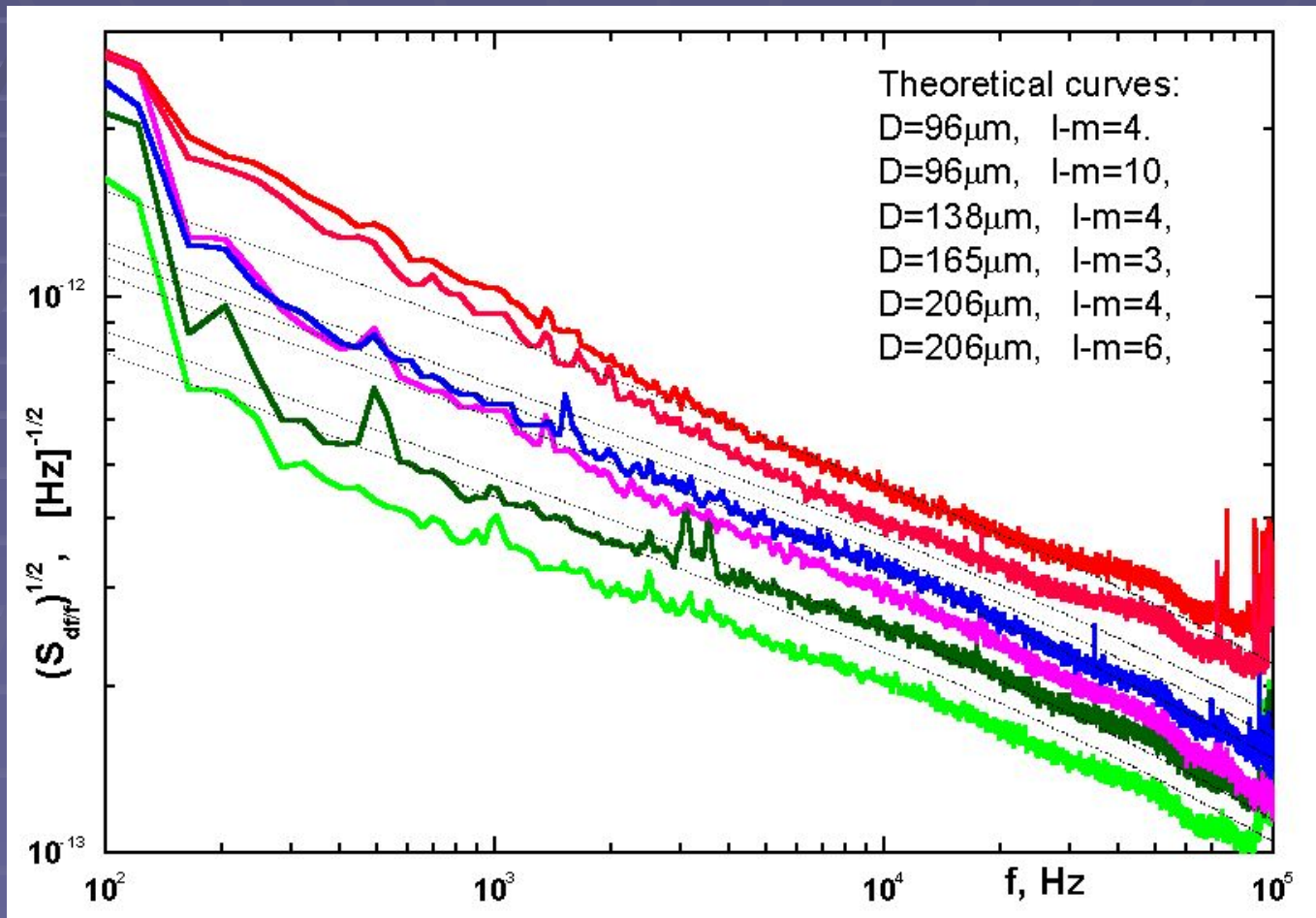


$$L = 4 \text{ км}, \quad Q > 10^{13}$$
$$\delta l \sim 10^{-16} - 10^{-18} \text{ см}$$



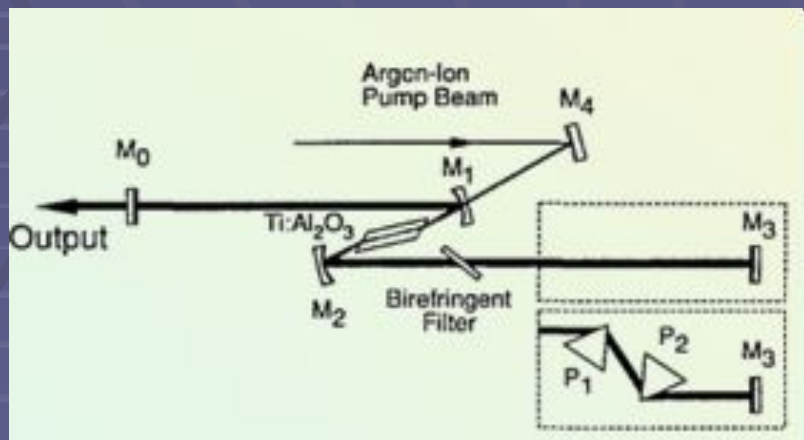
$$D \sim 100 \text{ мкм}, \quad Q > 10^9$$
$$V_{\text{eff}} \sim 10^{-9} \text{ см}^3, \quad \delta T \sim 30 \text{ мК}$$
$$\delta f/f \sim 3 \times 10^{-10}$$

Спектр терморerefрактивных флуктуаций

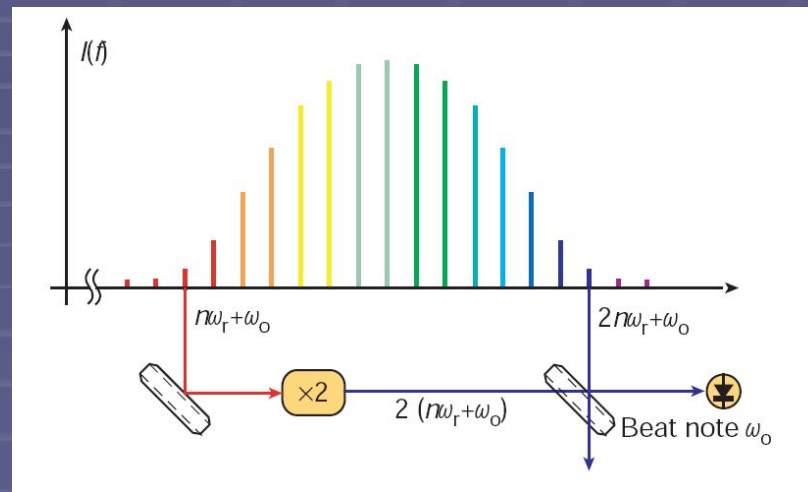


Частотные гребенки

Pulsed Laser



Частотный спектр



Spence et al, Optics Letters, 16(1):42–44,
January 1991, etc...

Nobel Prize Physics 2005:
*"for their contributions to
the development of
laser-based precision
spectroscopy, including the
optical frequency comb
technique"*



J. Hall
Hänsch

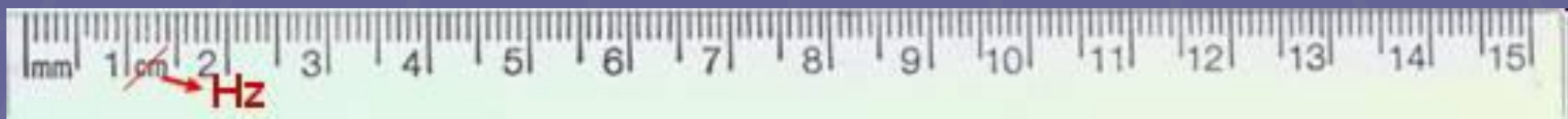
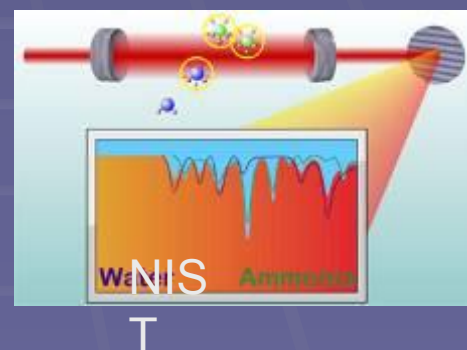
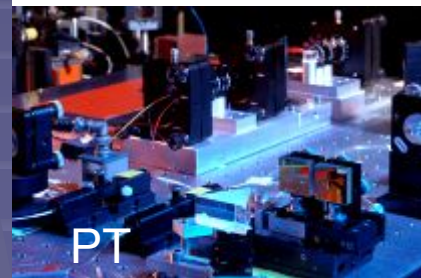
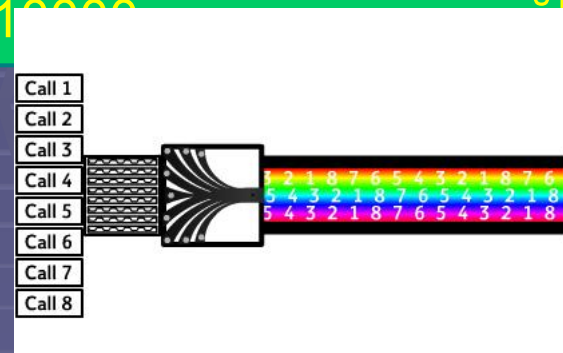


T.

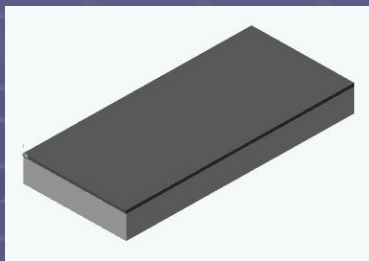
Применение частотных гребенок

Частотная гребенка может состоять более чем из 10000 линий

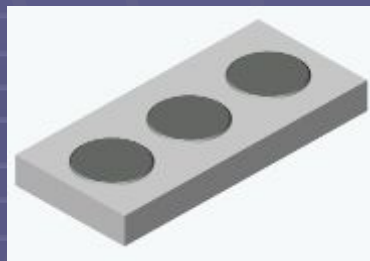
- Высокоскоростные линии связи
 - один канал на одну линию гребенки
- Прецизионная спектроскопия
 - Измерение атомных переходов



Изготовление микроторов



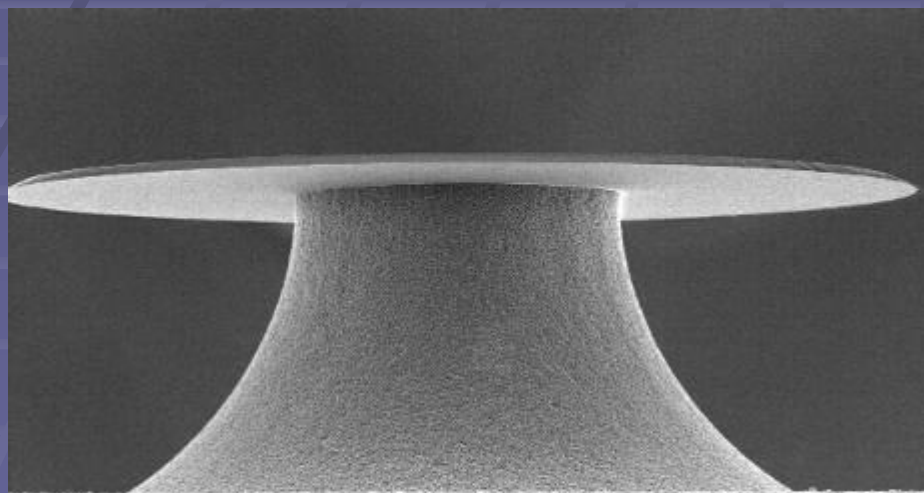
Кварцевая пленка
(2 мкм) на кремниевой
подложке



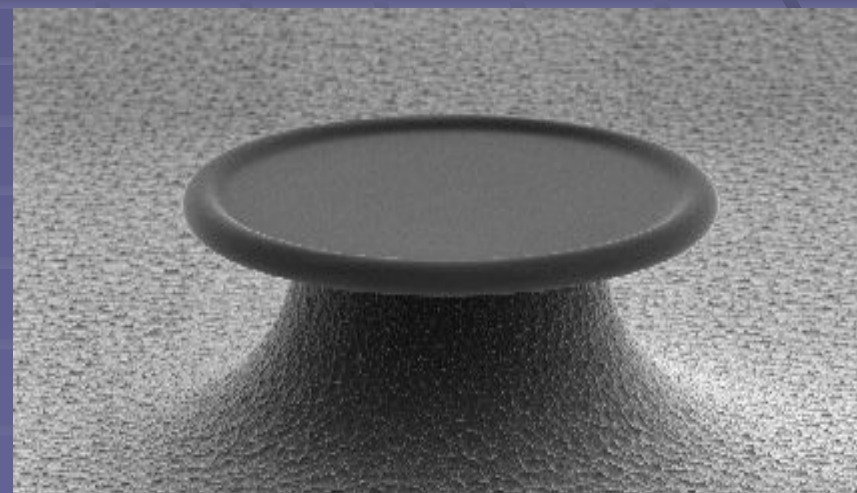
Кварцевые диски
после травления в
HF



Кварцевые диски на
ножках после
травления XeF_2



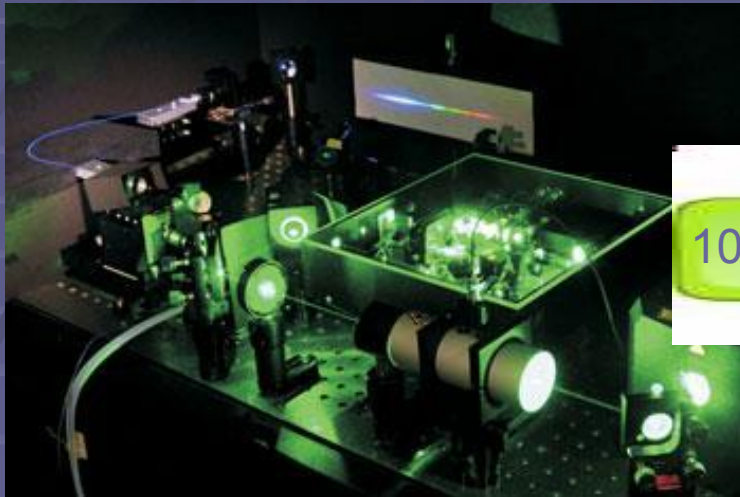
000278 5.0 kV X803 37.4 μm



Acc.V Spot Magn Det WD | 20 μm
2.00 kV 8.0 1100x SE 11.9

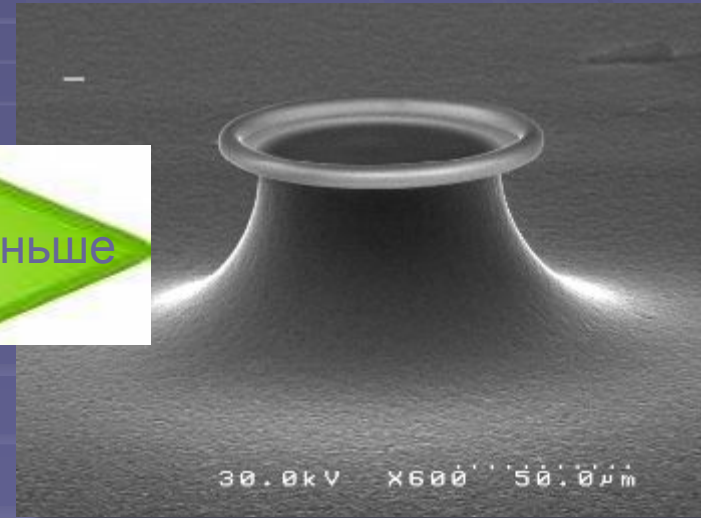
Микрорезонатор как генератор частотных гребенок

Обычная частотная гребенка



10000 раз меньше

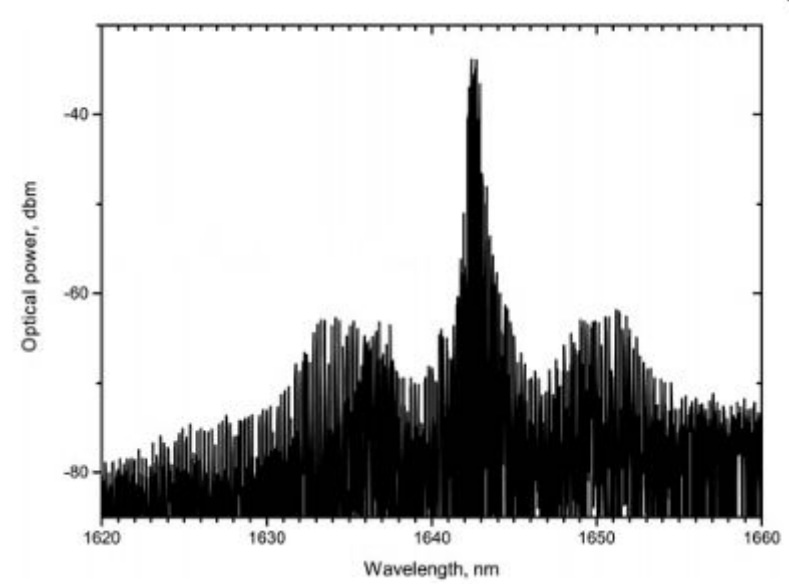
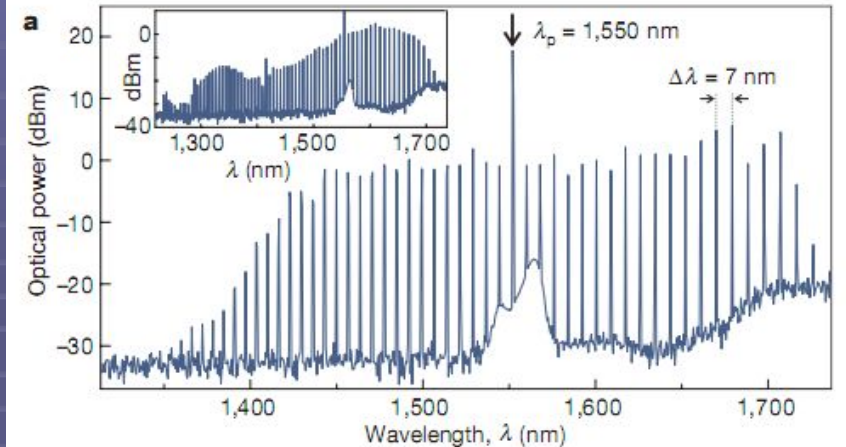
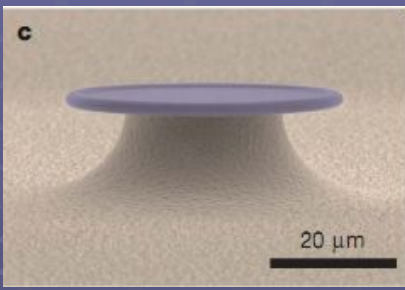
Микротороид



Размер: ~ 1м

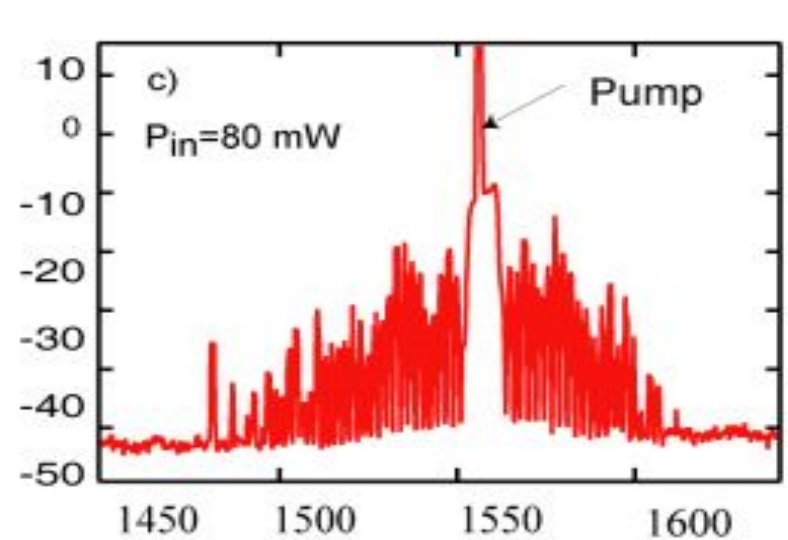
Размер: ~100 мкм

Del'Haye, et al.
Nature, 2007

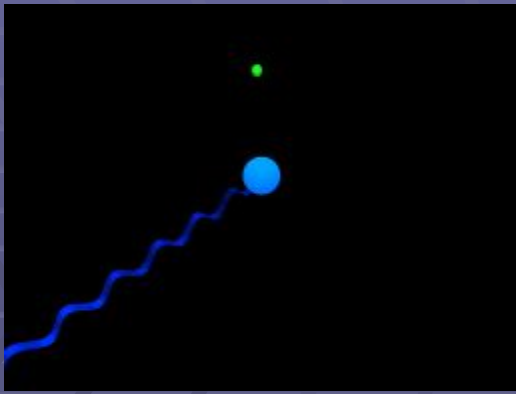


Savchenkov et al.
PRL 2008
Grudin et al.
Opt. Letts, 2009

Agha, et al.
Opt. Express, 2009

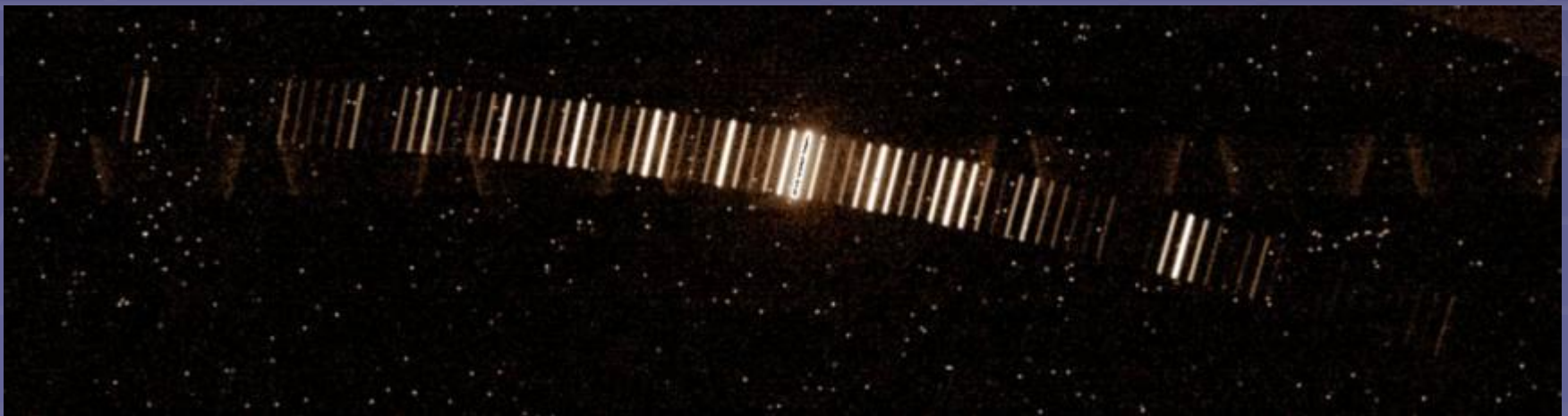


Пример использования: Поиск экзопланет



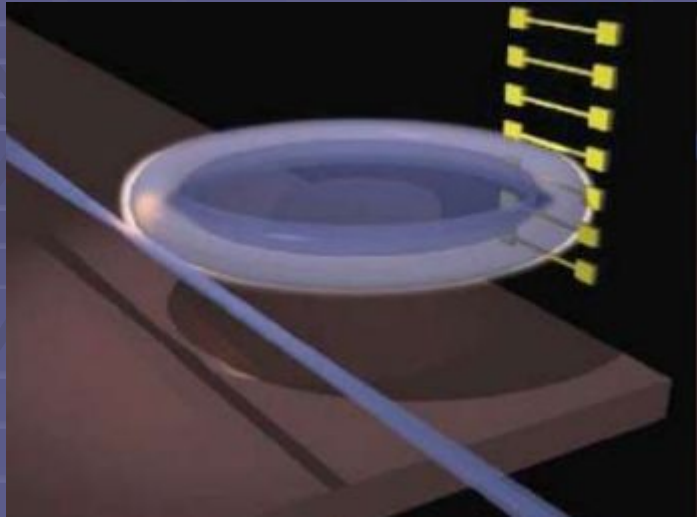
ESO Очень Большой Телескоп (VLT) в Чили

Спектрометр X-Shooter (Мюнхен)



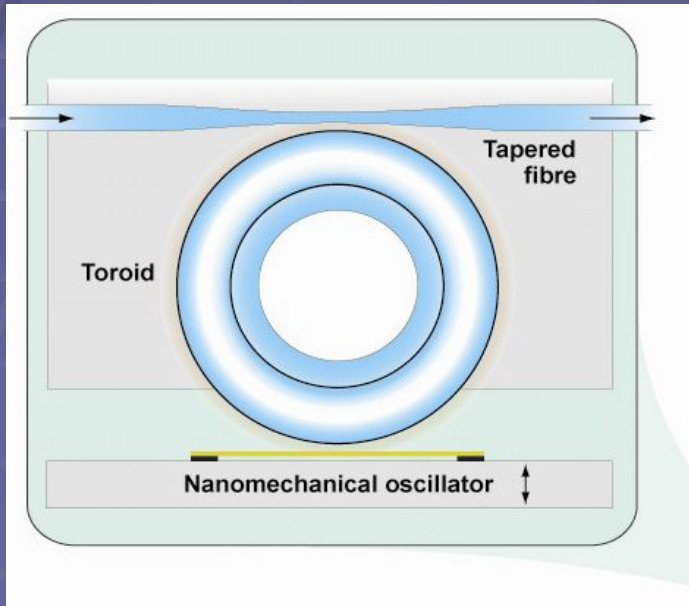
Спектр гребенки микрорезонатора (расстояние 83 ГГц) на эшелете спектрометра 30

Измерение механических смещений на квантовом уровне



Резонанс зависит от положения струны:
Броуновское движение
Переносится в оптический спектр:

$$\delta\omega = \frac{\partial\omega}{\partial x}(x_0) \delta x$$



Чувствительность:
 $0.25 \text{ фм/Гц}^{1/2}$

