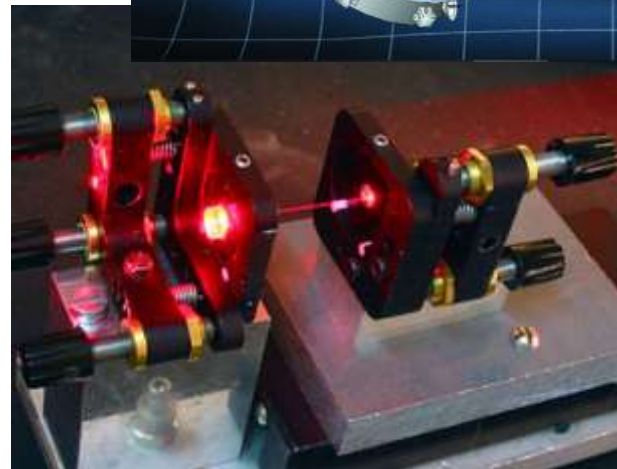
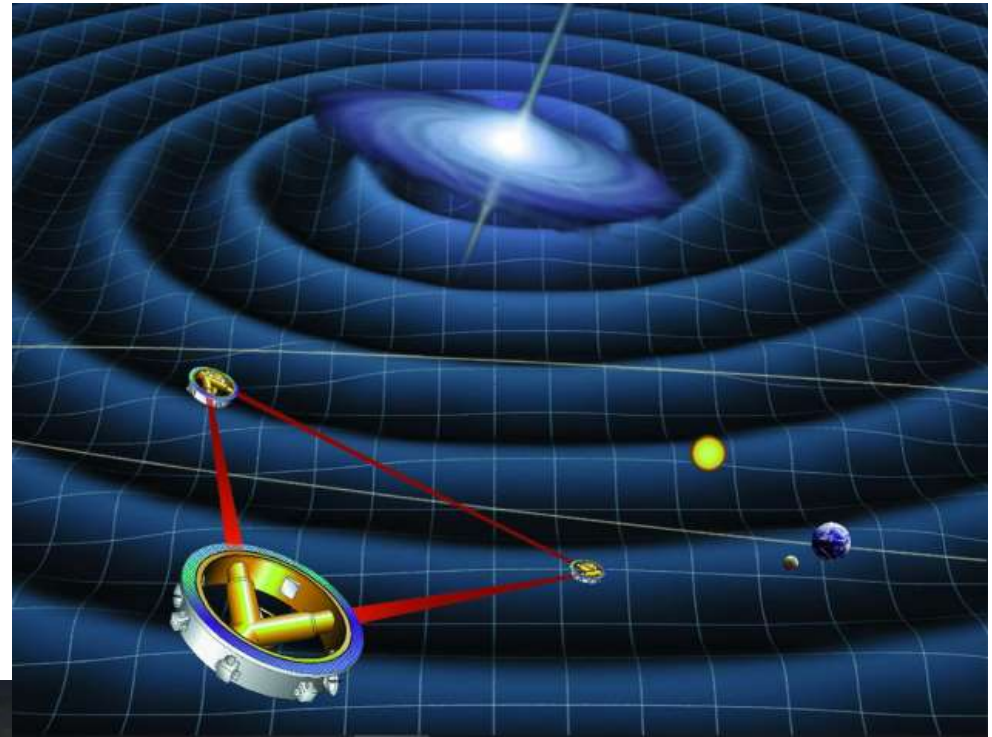


# Лекция 17. Интерференционные приборы и современная наука



# Глава VII. Интерференционные методы в современном эксперименте

## Интерференционные приборы

о.р.х.:  $l_1 n_1 - l_2 n_2 = m \lambda_0$

**Рефрактометры**

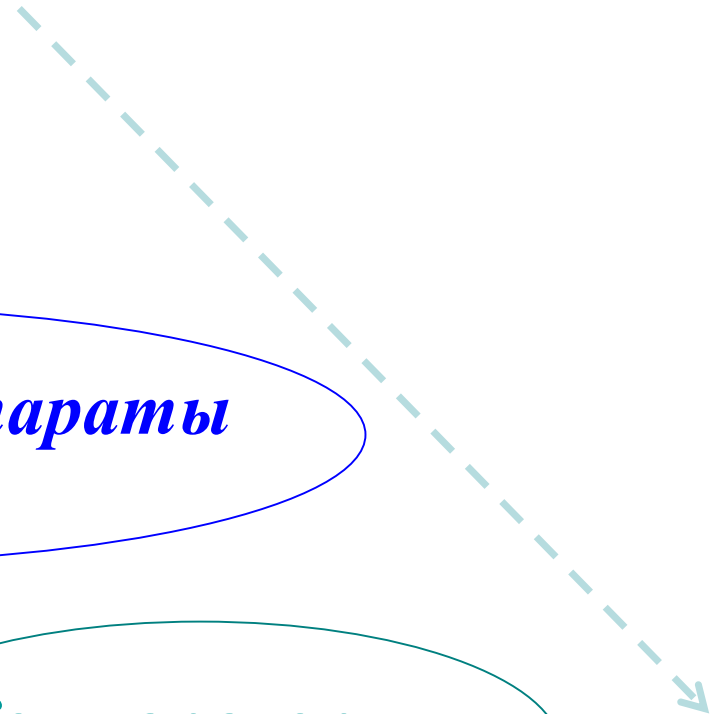
$\Delta n - ?$

**Спектральные аппараты**

$\lambda - ?$

**Компараторы**

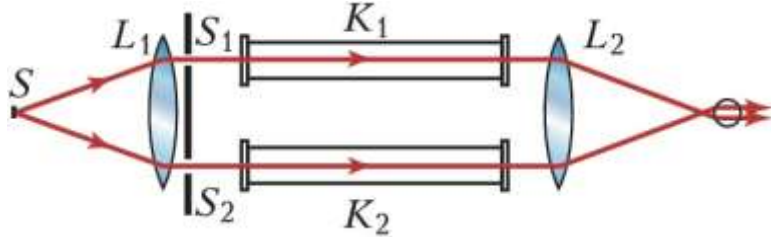
$\Delta l - ?$



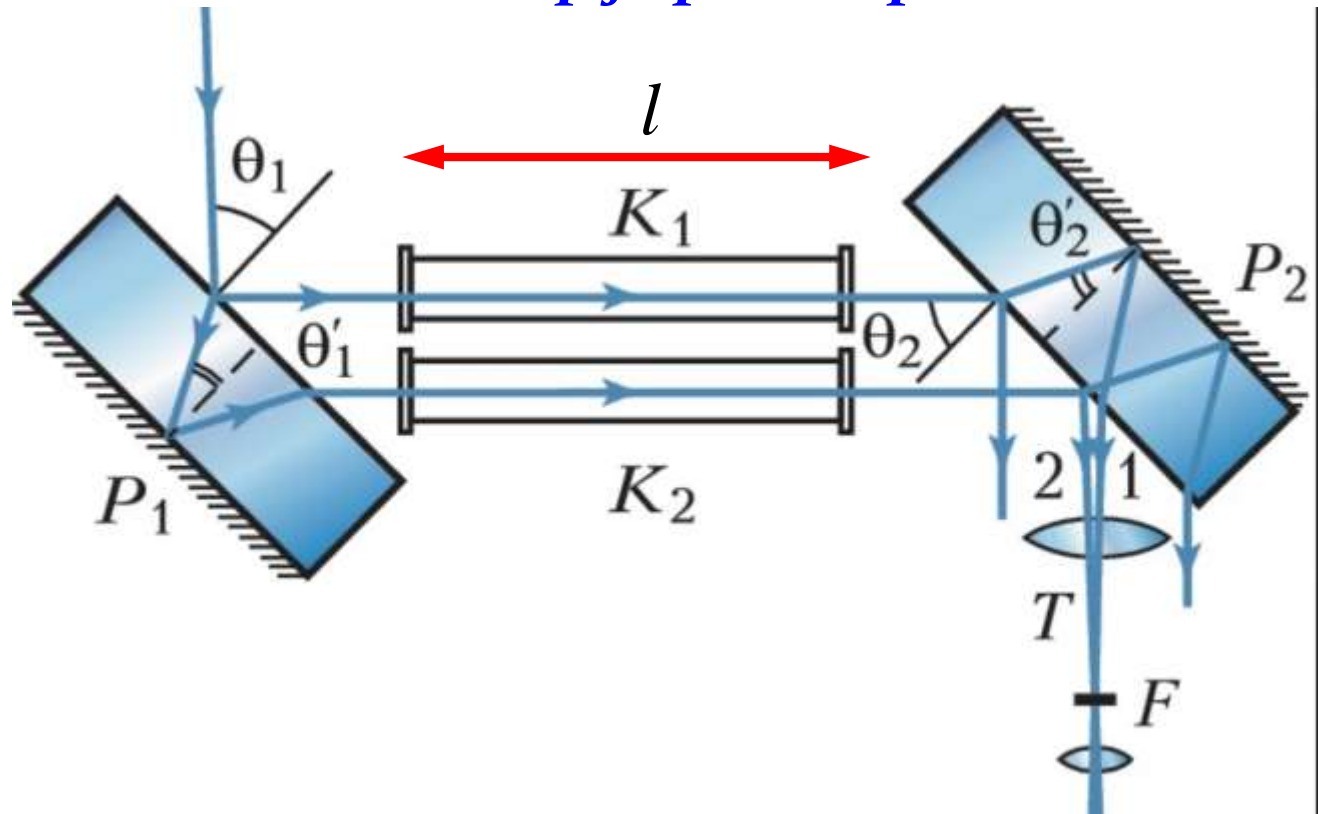
# §1. Интерфенционные рефрактометры

(определение  $n$ )

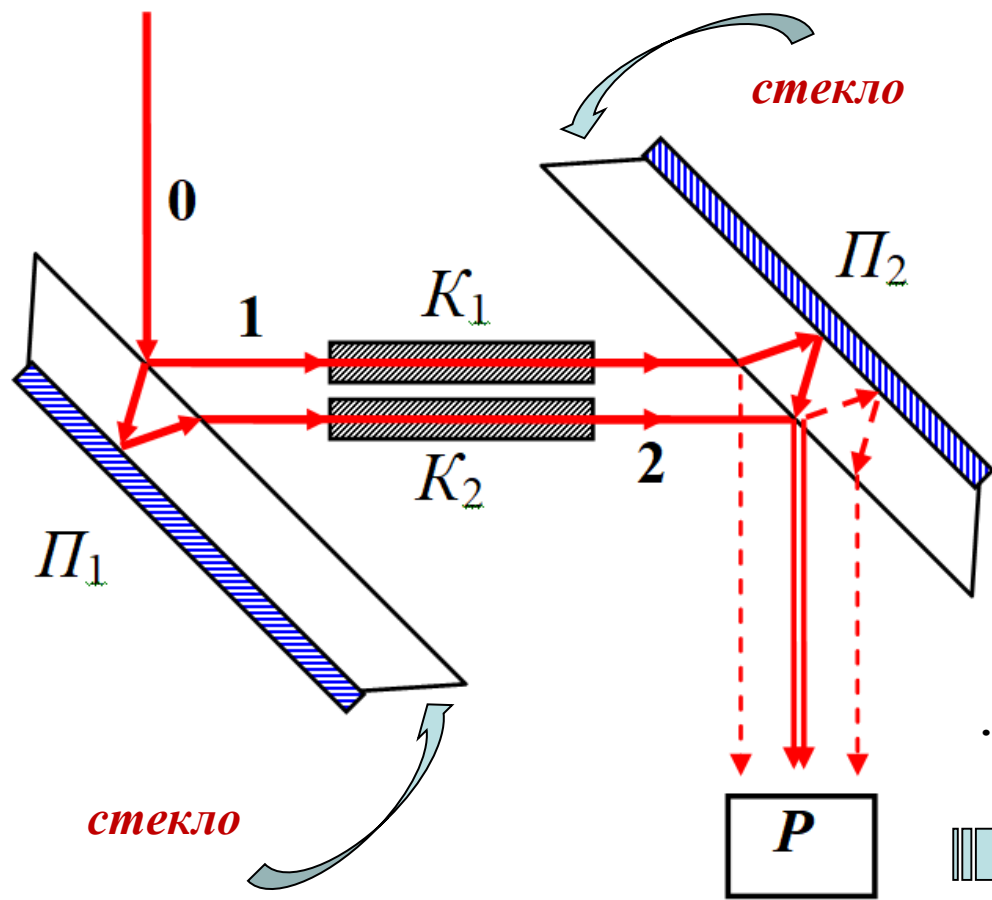
Интерферометр-рефрактометр Рэлея



Интерферометр Жамена



# Интерференционный рефрактометр Жамена



**Пример:**  $l = 5 \text{ см}$

Точность определения  $\Delta n$   
(смещение до 0,1 инт. полосы)

$$\Delta = (n_1 - n_2)l \Rightarrow ?$$

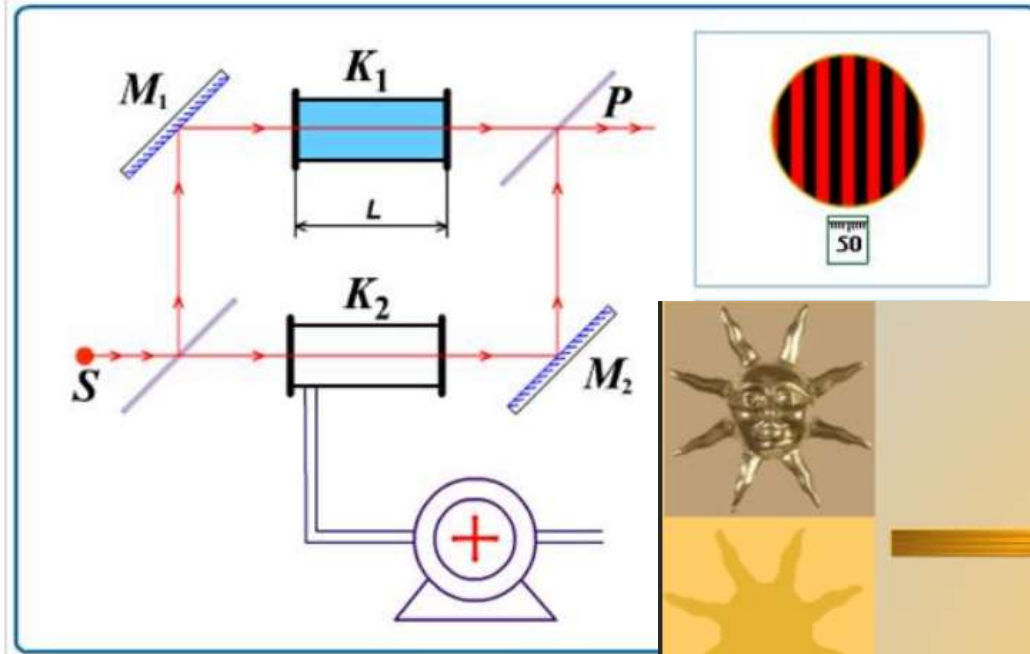
$$\Delta n^{\min} = \frac{\Delta^{\min}}{l} = \frac{0,1 \cdot \lambda}{l} = \frac{0,1 \cdot 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 10^{-6}$$

...а можно и до 7–8 знака после запятой

~  $10^{-3} \%$  по концентрации !!

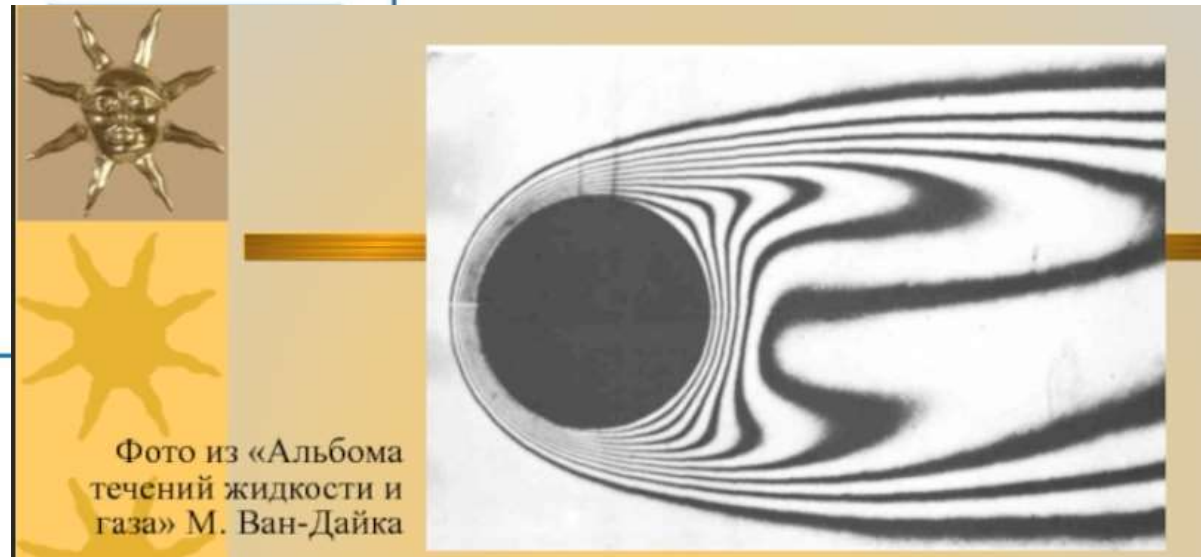
содержание сахарозы (по весу)	0,000 %	1,000 %	2,000 %	3,000 %
показатель преломления	1,33299	1,33443	1,33588	1,33733

# Интерферометр-рефрактометр Маха - Цендера



Идея та же:

$$\Delta = (n_1 - n_2) \cdot l \Rightarrow \text{смещение полос}$$



Нагретый медный цилиндр в ламинарном потоке воздуха: интерференционные полосы - изотермы

*Гидро-аэродинамика*

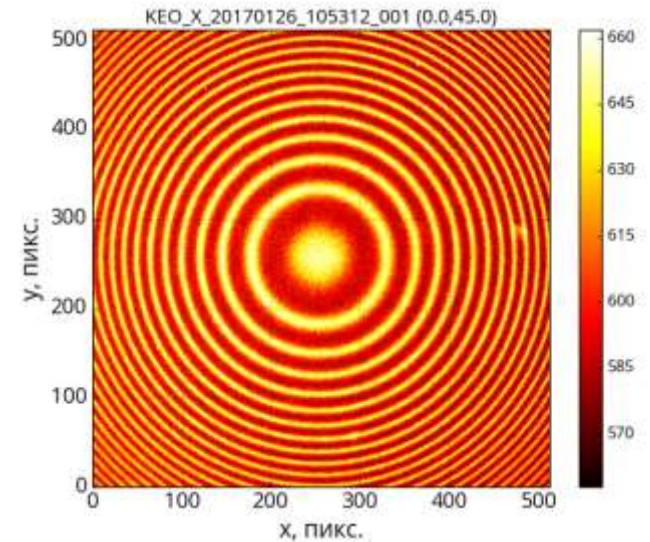
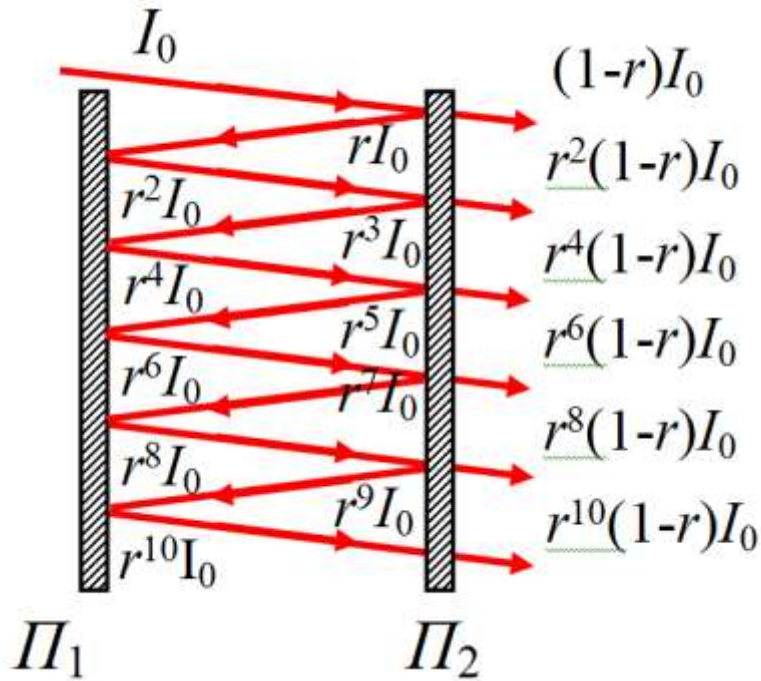
Изучение распределения показателя преломления (плотности/температуры) в газовых потоках



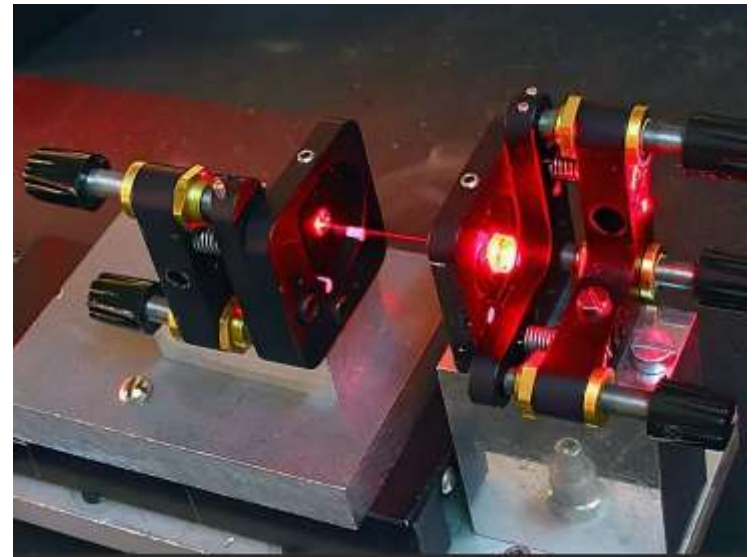
## §2. Интерференционные спектральные приборы

Спектральный аппарат Фабри – Перо:

анализ тонкой структуры спектров

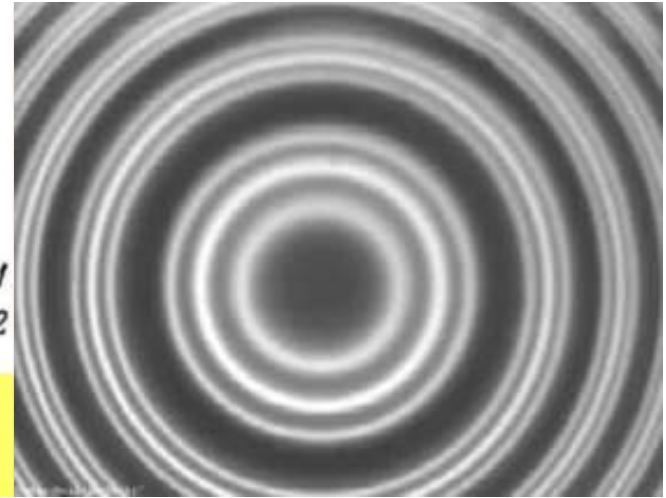
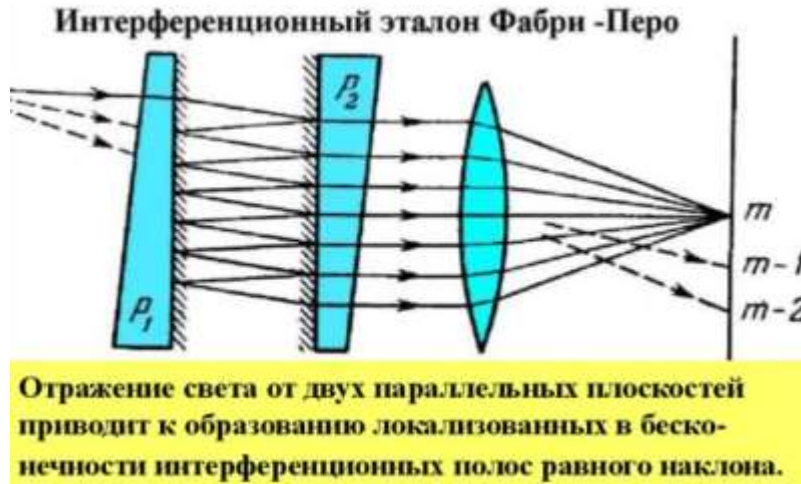


$$\left. \begin{array}{l} N \sim 10 \div 100 \\ m = 2h/\lambda \sim 10^5 \end{array} \right\} R = mN$$



# Спектральный аппарат Фабри – Перо

(сверхтонкая структура  
спектральных линий)

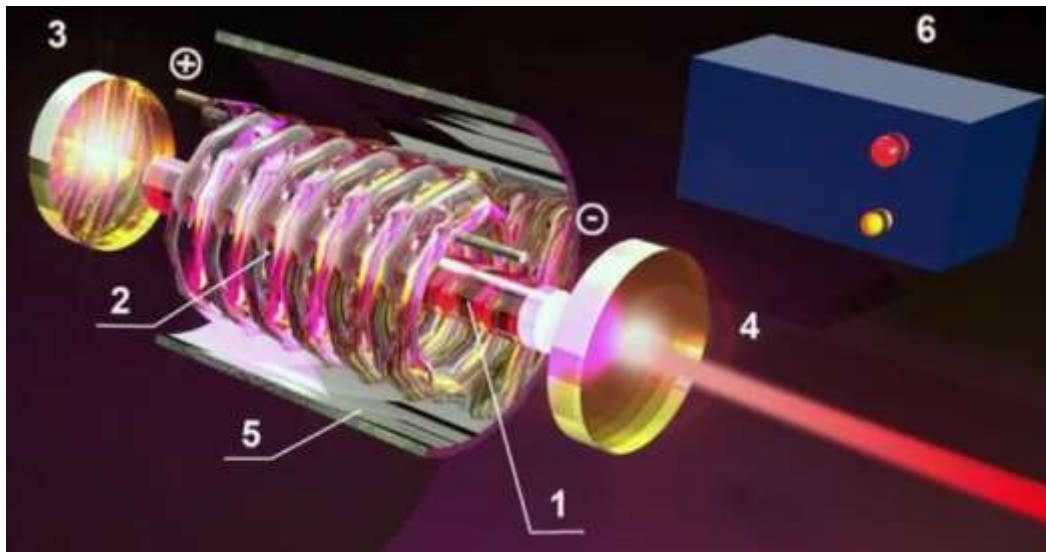


Расщепление спектральных линий при наблюдении эффекта Зеемана

$$R = mN !$$

НО.

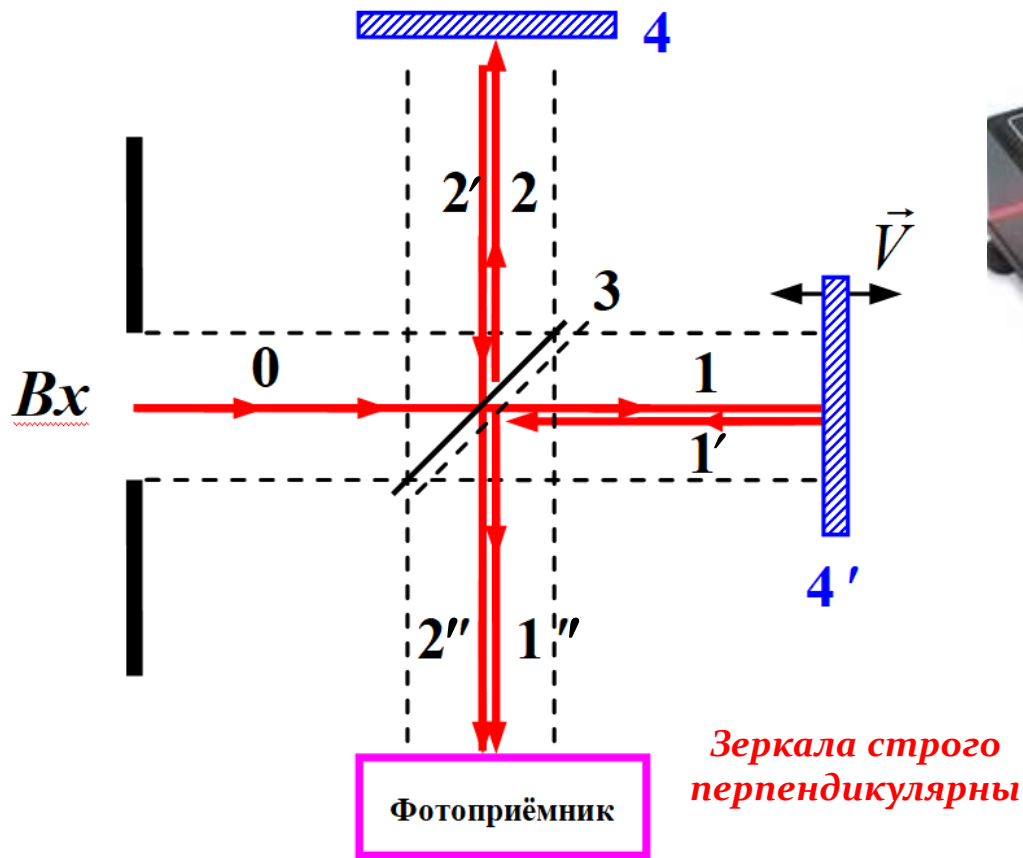
Также и резонатор Фабри – Перо, и ...



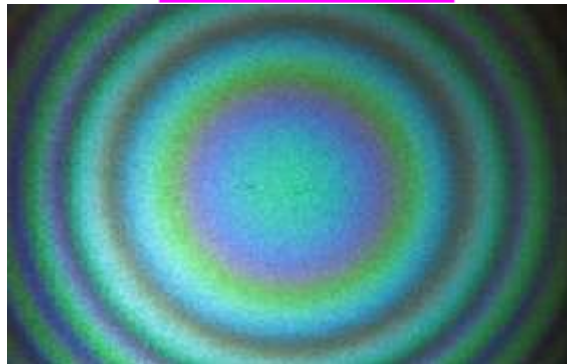
...”эталон Фабри – Перо”  
⇒ компараторы



# Интерферометр Майкельсона



Зеркала НЕ строго перпендикулярны





# Принцип Фурье-спектроскопии

а) Одна компонента в спектре источника ( $\omega$ ) с интенсивностью  $I_{01}$ :

$$I_1(t) = I_{01} \cdot (1 + \cos \delta) , \text{ где } \delta = \frac{2\pi}{\lambda_1} \cdot \Delta = \frac{2\pi}{c \cdot T_1} \cdot \Delta = \frac{\omega_1}{c} \cdot \Delta = \frac{\omega_1}{c} \cdot 2Vt$$

(“пульсации интенсивности” с периодом  $2\pi/\Omega$ )

Зеркало “4” движется со скоростью  $V$  !

$$\Delta = 2Vt$$

переменная составляющая:

$$\tilde{I}_1(\tau) = I_{01} \cdot \cos \omega_1 \tau , \quad \text{где } \tau = \frac{2V}{c} t$$

б) Две компоненты в спектре источника ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ):

$$\tilde{I}(\tau) = I_{01} \cdot \cos \omega_1 \tau + I_{02} \cdot \cos \omega_2 \tau$$

в) Общий случай:

(сплошной спектр  $\equiv$  “компонент много”)

”Интерферограмма”

(её записывает прибор)

$$F(\tau) = \int_0^{\infty} I(\omega) \cos \omega \tau d\omega$$

обратное Фурье-преобразование для спектра

Спектр:

(рассчитывает компьютер)

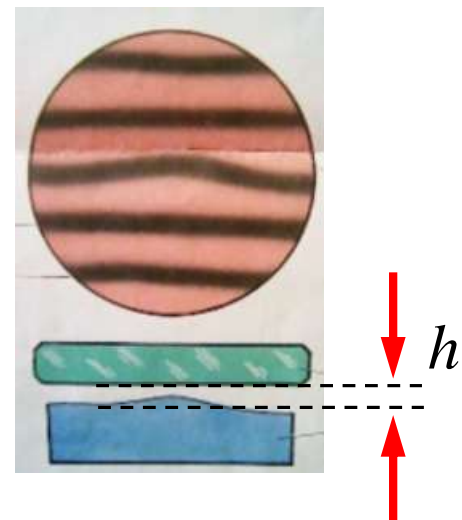
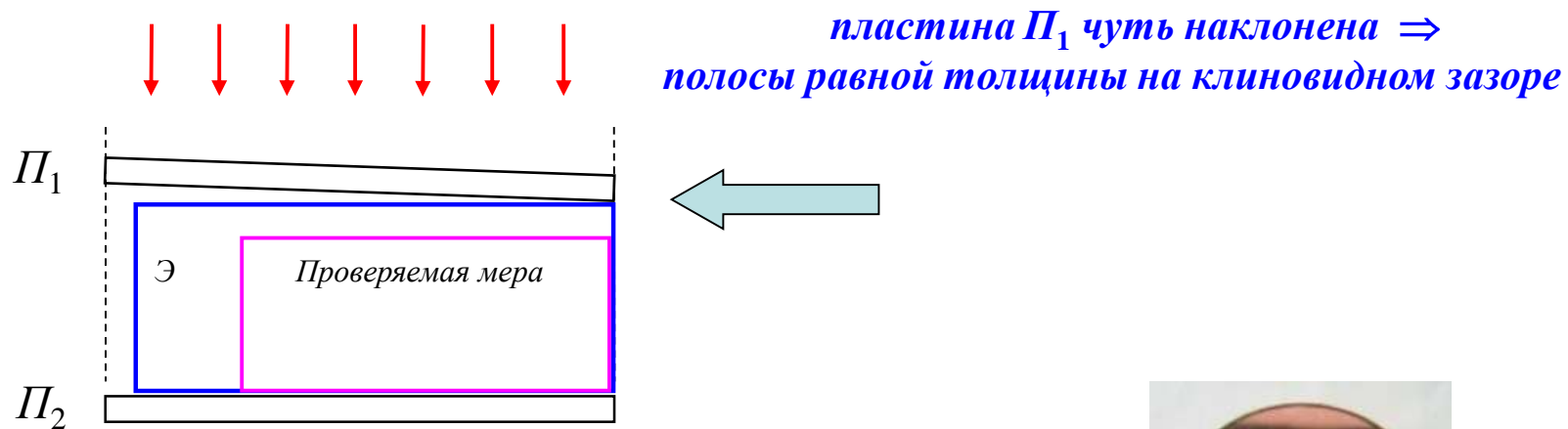
$$I(\omega) = (\pi)^{-1} \int_0^{\infty} F(\tau) \cos \omega \tau d\tau$$

!!

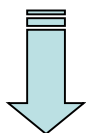
прямое Фурье-преобразование  $\Rightarrow$  СПЕКТР

### 3. Интерференционные компараторы

**Метрология:** калибровка «концевых мер длины», проверка качества поверхностей, ...



Другие варианты реализации компаратора: эталон Фабри – Перо,  
... , интерферометр Майкельсона



... и не только Фурье-спектроскопия ...

**Фундаментальные научные эксперименты** !!

Опыты Майкельсона – Морли



СТО

(1880 – 1887 "самый известный неудачный эксперимент в истории науки")

... **Гравитационные волны и их детектирование**

**1916 г. ОТО А. Эйнштейна  $\Rightarrow$**

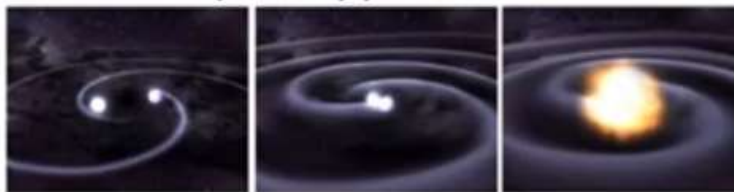
**Существование волн кривизны пространства**

**Источники гравитационных волн во вселенной**

- Непрерывные волны

- Вращающиеся несимметричные нейтронные звезды, в частности пульсары
- Двойные звезды или черные дыры, вращающиеся друг относительно друга

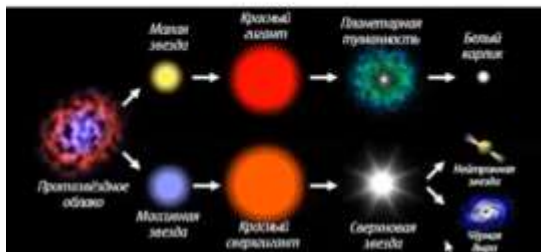
- Сливающиеся двойные системы



1. Две нейтронных звезды
2. Нейтронная звезда и черная дыра
3. Две черных дыры

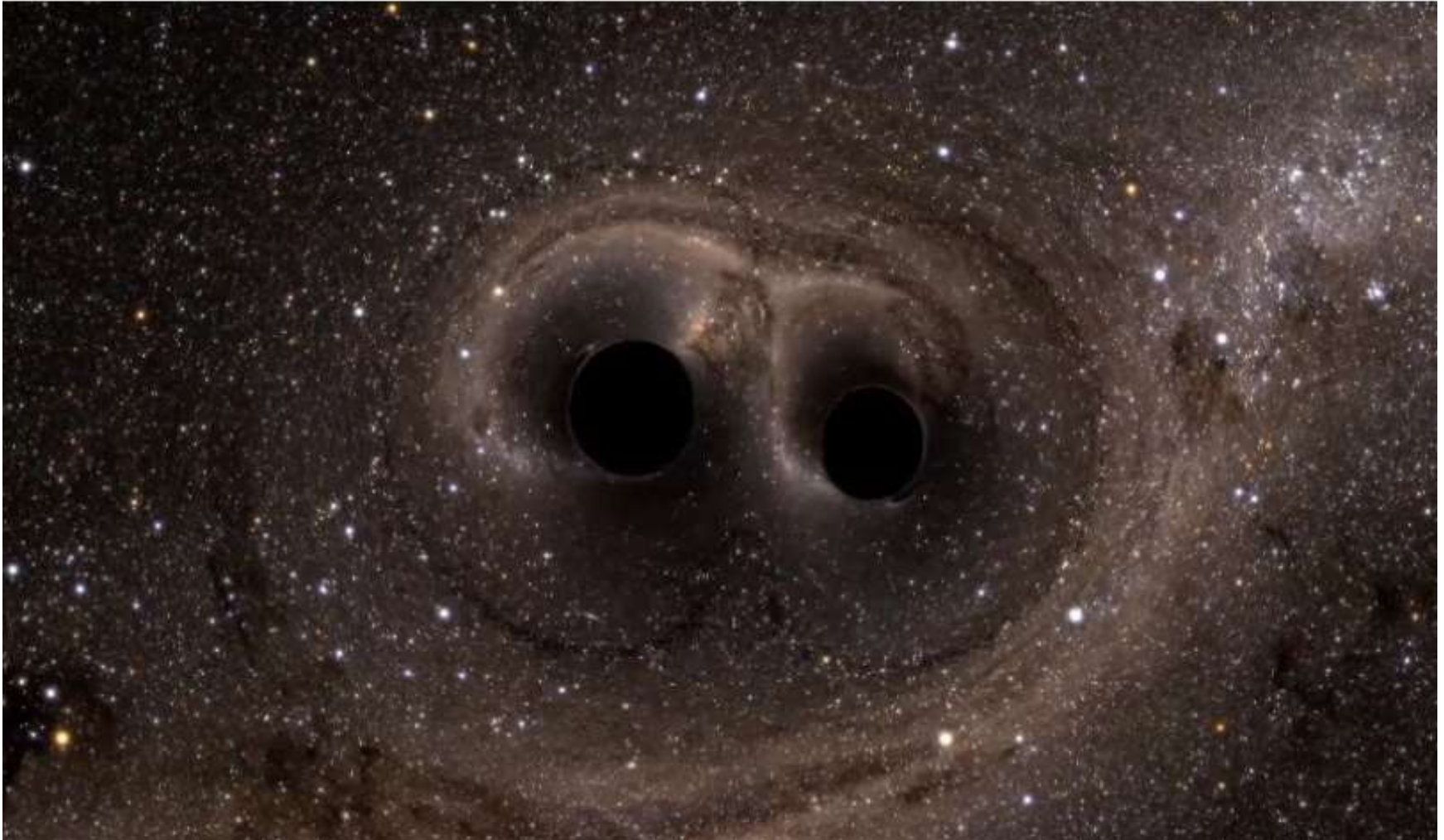
- Всплески излучения

Эволюция звезд



**Гравитационный коллапс за миллиард  
световых лет от Земли – слияние чёрных дыр  
(обнаружен 14.09.2015 → Нобель 2017 г.)**

**“ $29 M_{\odot} + 36 M_{\odot} = 62 M_{\odot}$ ” →  $\sim 3 M_{\odot}$  энергия гравитационных волн !!**





... “Вибратор Герца” ?

*Первая гравитационная антенна Дж. Вебера –  
пробное тело с пьезодатчиками (1967 г.)*



⇒  $\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L} \approx 10^{-16}$

А нужно  $\varepsilon_L \approx 10^{-21}$  ☹

... при  $L \sim 10^3$  м !

$$\langle \Delta x^2 \rangle = \frac{2kT}{m\omega^2} \cdot \frac{2\tau_{\text{изм.}}}{\tau_A}$$

⇒ увеличивать массу,  
увеличивать добротность,

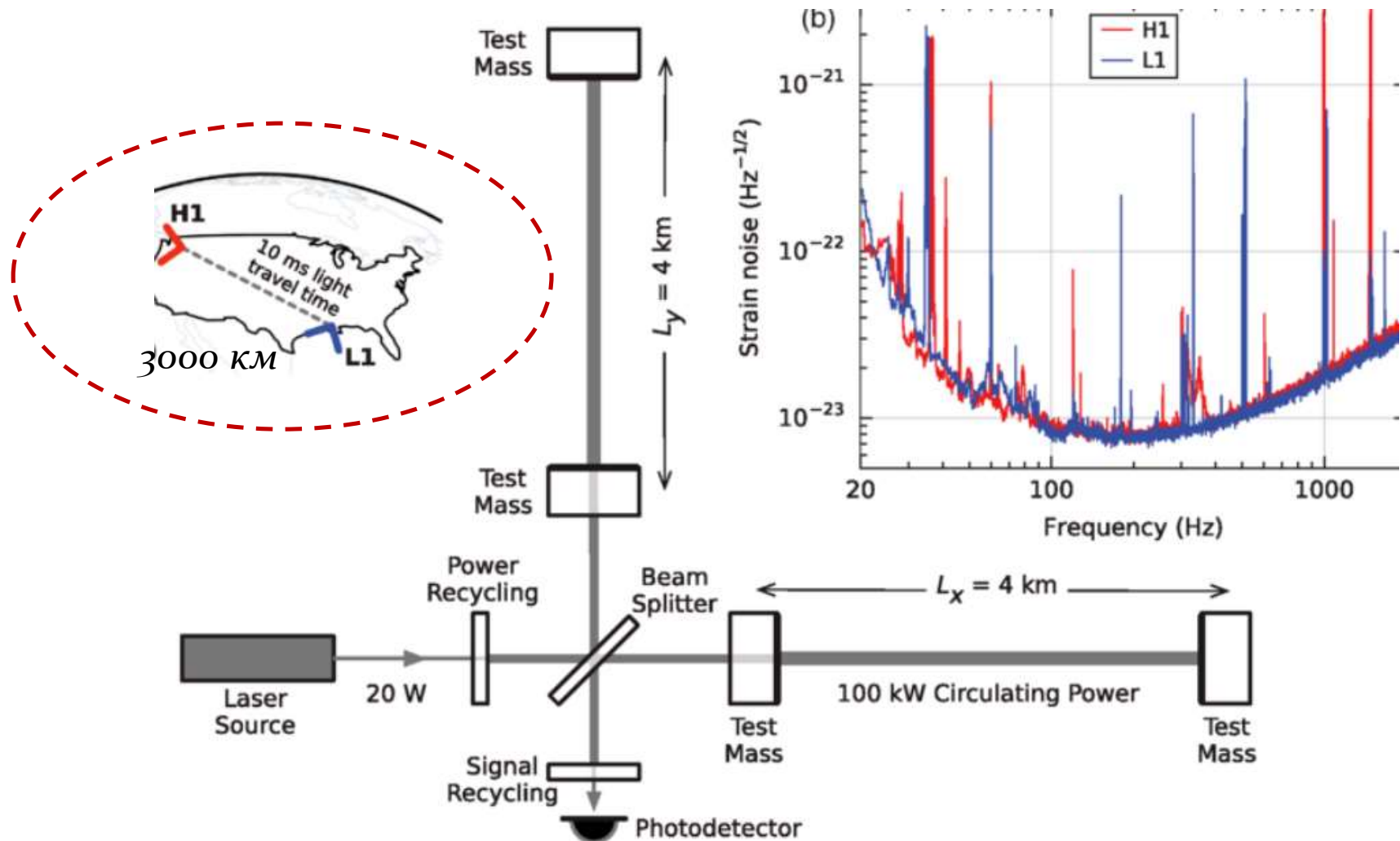
...

# Проект LIGO – “поймаем гравитационные волны” ☺

## Light Interferometer Gravitational-Wave Observatory

(начало – 1992 г., более 1000 учёных всего мира)

(... идея: ЖЭТФ 1962 г.)

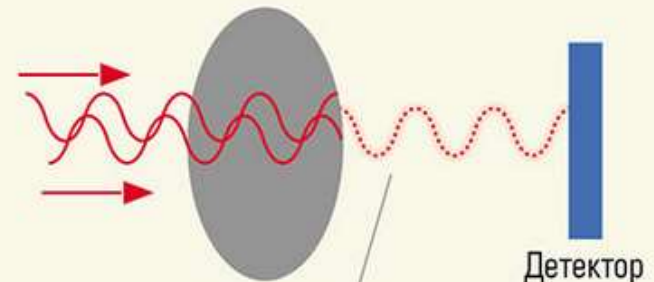
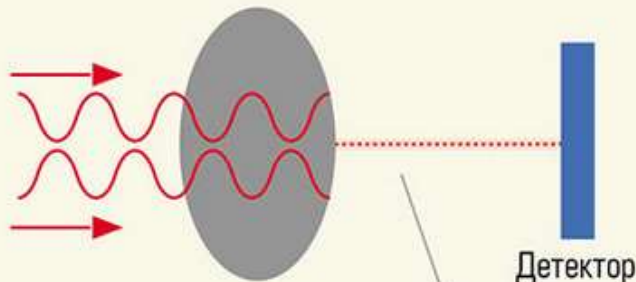
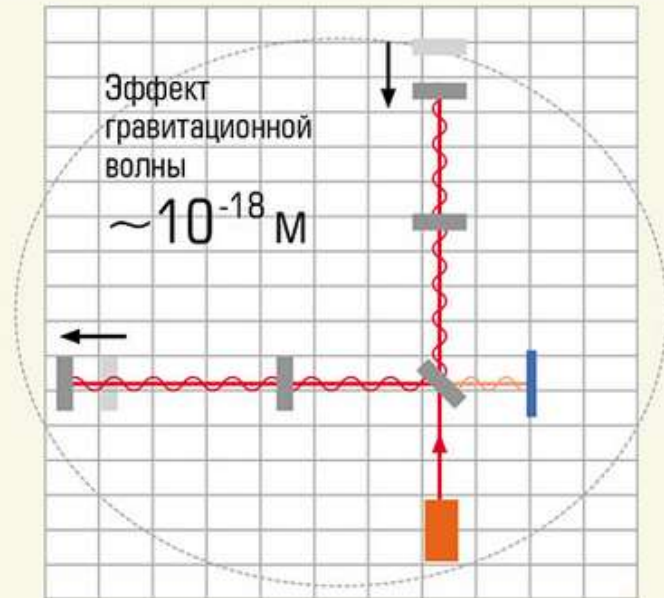


# Упрощённая оптическая схема антенны LIGO

деформация (изменение метрики)  $\Rightarrow$  фазовый сдвиг !

Влияние гравитационной волны на плечи интерферометра

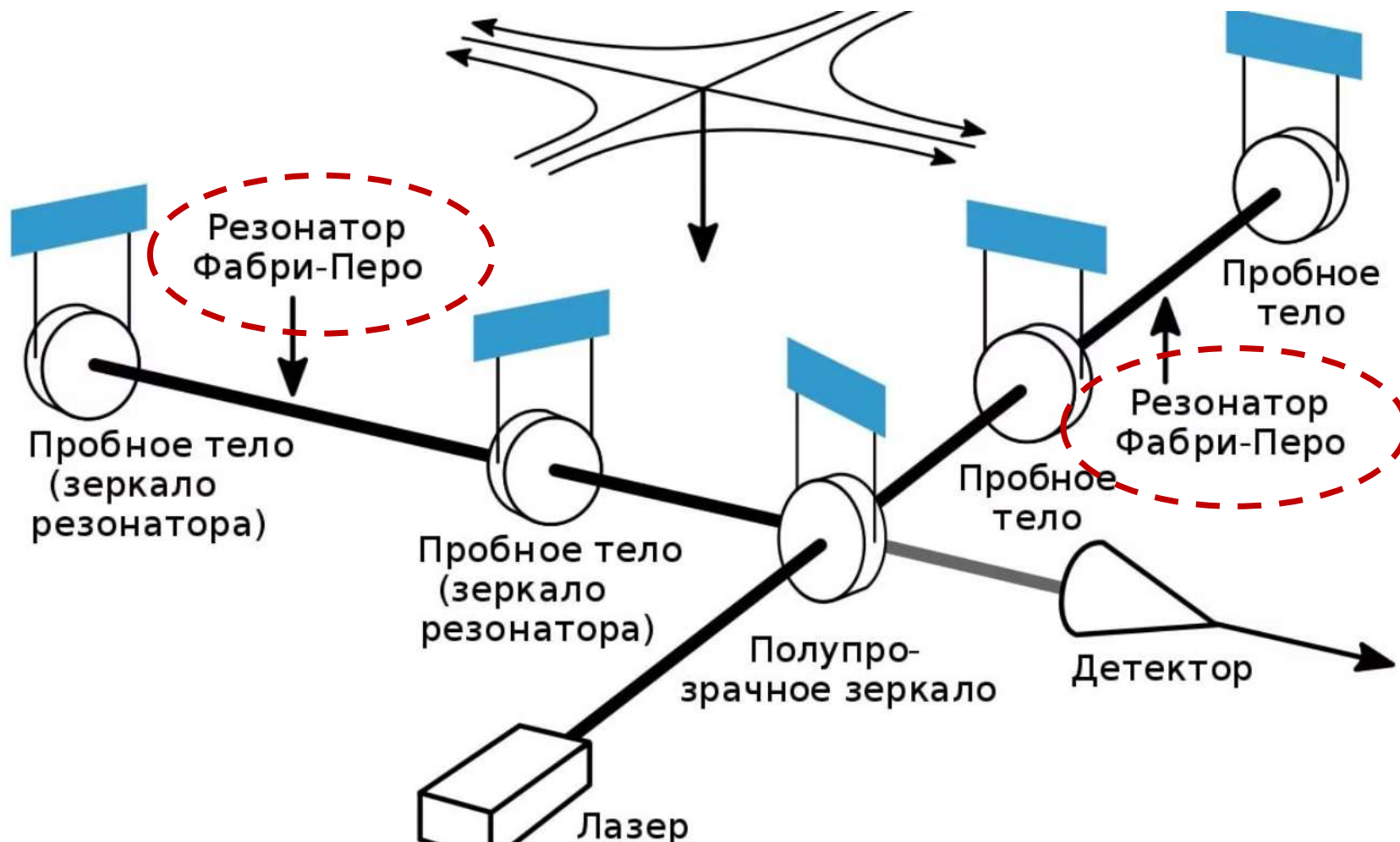
Схема 2



Суммарный сигнал до и после воздействия гравитационной волны

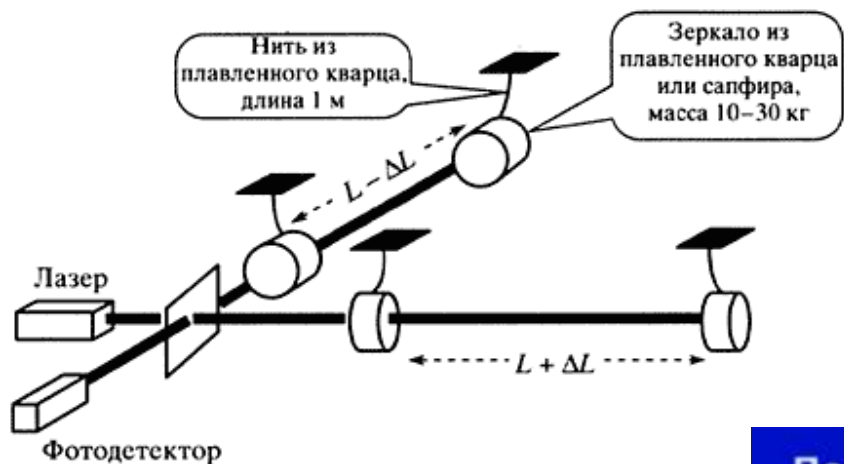
# Принцип устройства гравитационной антенны проекта LIGO

## LIGO Antenna





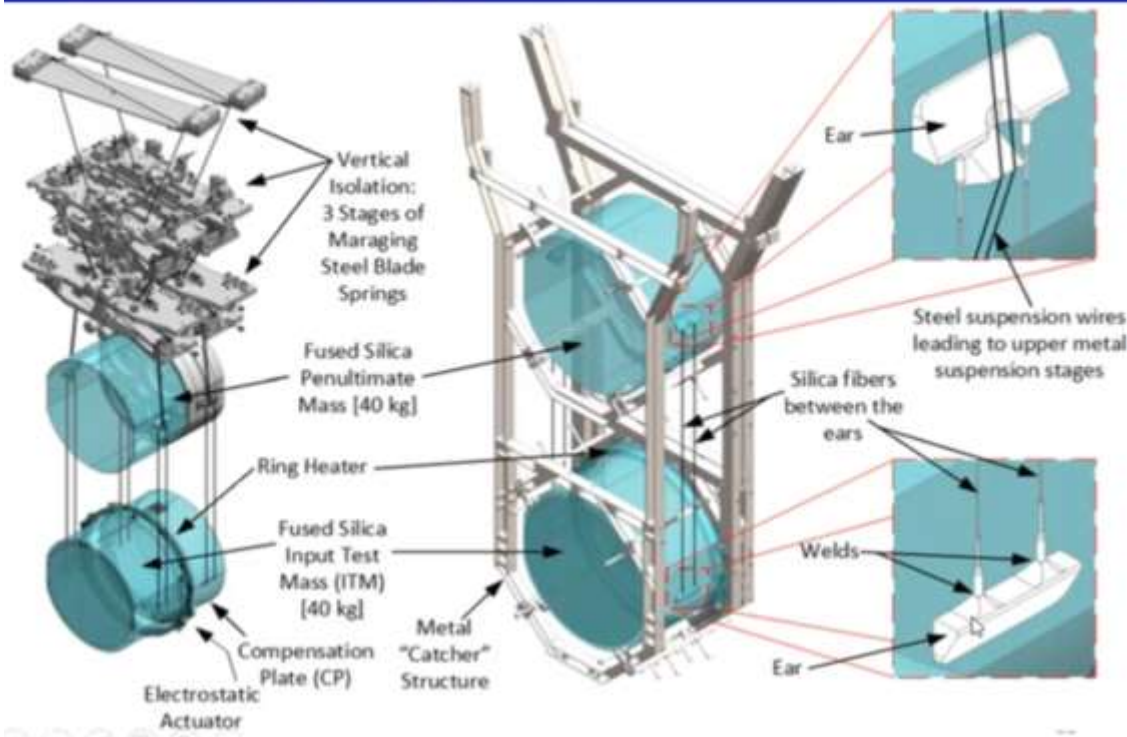
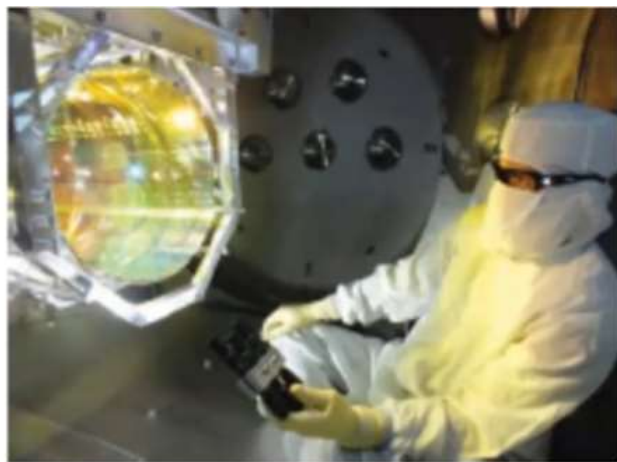
# Упрощённая оптическая схема антенны LIGO



$$\Delta L = \varepsilon \cdot L \sim 10^{-16} \text{ см}$$

$\varepsilon = 10^{-21}$       4 км

## Подвес кварцевых пробных масс Advanced LIGO



<https://www.google.ru/search?q=Зеркала+детектора+LIGO>

Потери в зеркальных покрытиях пробных масс: 1 из миллиона падающих фотонов

# Северный X-рукав интерферометра LIGO (Хэнфорд)



*Вакуум в “рукаве” -  
плече интерферометра  
Ø 1,2 м и длиной 4 км  
 $10^{-8}$  мм рт ст*

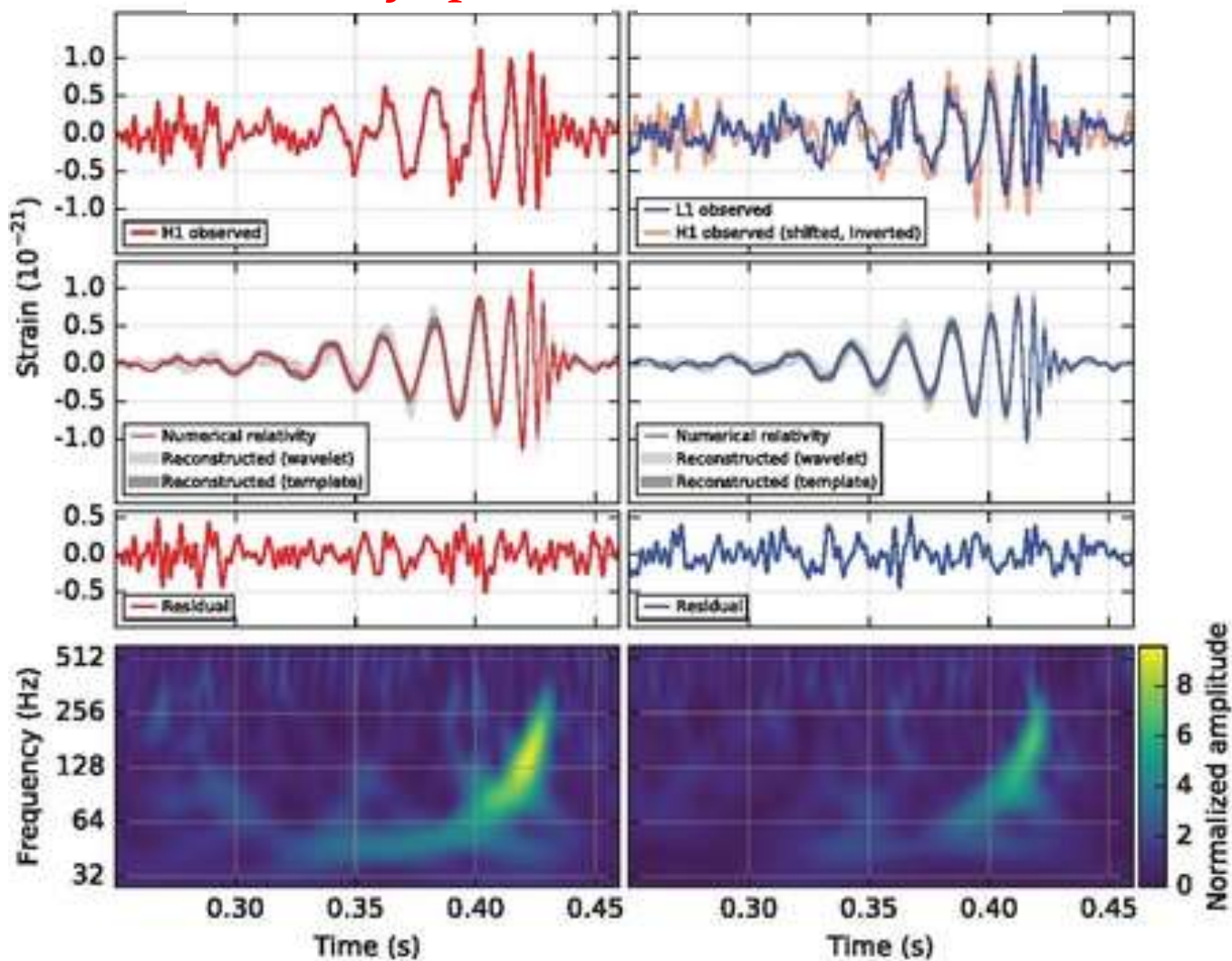




# Зарегистрированный сигнал 14 сентября 2015

Хэнфорд

Ливингстон



1) пробные тела из плавленого кварца – 40 кг;  
подвес на кварцевых нитях, вакуум  $10^{-8}$  мм рт ст  $\Rightarrow$   
 (“добротность” !)

$$\tau_A \approx 5 \text{ лет}$$

!

2) многослойные диэлектрические зеркала ;  
 (“просветление оптики”!)

!

3) длина плеч интерферометра – 4 км;  
 (“дифракционное уширение” пучка  $\Rightarrow$  большие зеркала)

!

4) Интерферометр Фабри-Перо в каждом плече  
 (мощность лазерной «накачки» 70 Вт ... в резонаторах 200 кВт  
 “резонанс” !)

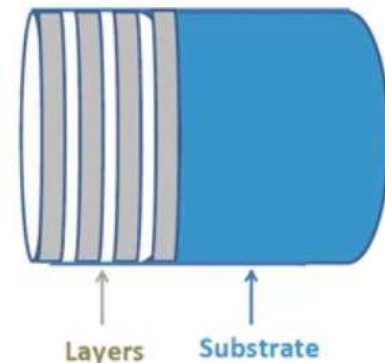
!

### Снижение диссипации в отражающих диэлектрических покрытиях пробных масс

Покрyтия зеркал состоят из чередующихся  
четвертьволновых слоев  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  (high index)  
and  $\text{SiO}_2$  (low index)

- 1) броуновский тепловой шум – потери  $\varphi$
- 2) термоупругий шум  $\Delta T \rightarrow \Delta x (\alpha_T)$
- 3) терморефрактивный шум  $\Delta T \rightarrow \Delta \varphi (\beta_T)$
- 4) фототерморефрактивный шум  $\Delta W_{\text{opt.abs}} \rightarrow \Delta T \rightarrow \Delta x (\alpha_T)$

Механические потери (пункт 1) в  $\text{Ta}_2\text{O}_5$   $\varphi = 3 \times 10^{-4}$  - основной источник шума AdvLIGO в области около 100 Гц





# Обработка сигналов ГВ детекторов

Что приводит к изменению расстояния между пробными массами (имитирует сигнал ГВ):

- Гравитационные волны
- Изменения температуры
- Сейсмические и акустические возмущения
- Флуктуации лазерного излучения
- Тепловой и избыточный шум пробных масс
- Электромагнитные возмущения



✓ Настройку элементов интерферометра обеспечивают более **1000** следящих систем

✓ Датчики внешних возмущений

✓ Объем информации, поступающей от интерферометра  $\approx 1$  Тбайт/сут (информация о ГВ сигнале – **менее 1%**)

Лекция профессора МГУ В.П. Митрофанова «Гравитационные волны и их детектирование:  
<https://yadi.sk/i/wembTkc1009dhQ>

*... перспективы ...*

# **Проект LISA**

*(запуск 2034 г.)*

совместный проект [НАСА](#) и [ЕКА](#),  
который планируется объединить с LIGO  
в исследовании гравитационных волн

*Laser Interferometer Space Antenna*

*Длина плеч -  $L = 5 \cdot 10^6$  м*

