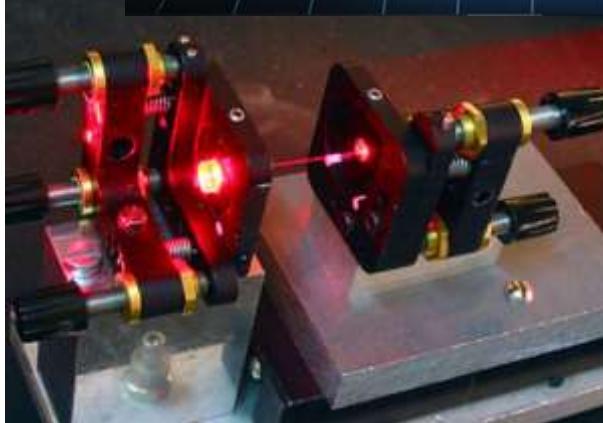
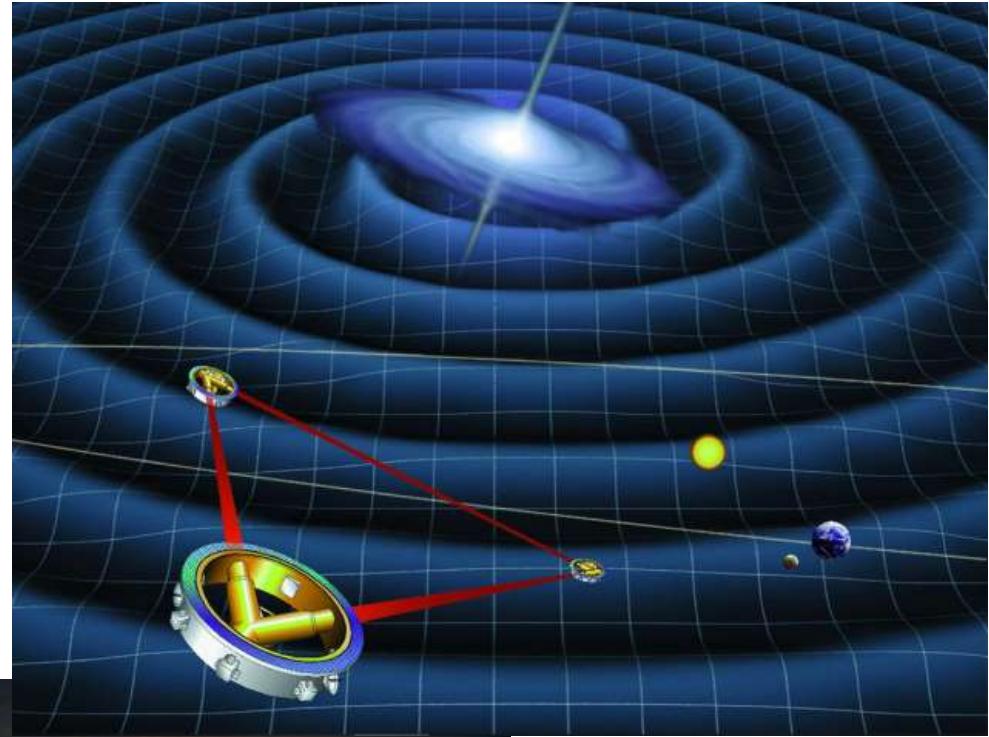


Лекция 17. Интерференционные приборы и современная наука



Глава VII. Интерференционные методы в современном эксперименте

Интерференционные приборы

o.p.x.: $l_1 n_1 - l_2 n_2 = m \lambda_0$

Рефрактометры

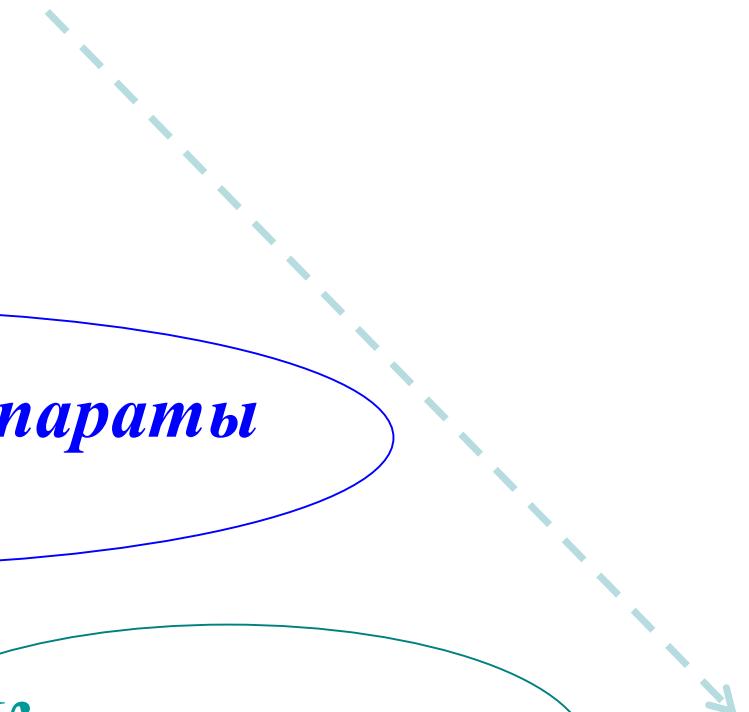
$\Delta n - ?$

Спектральные аппараты

$\lambda - ?$

Компараторы

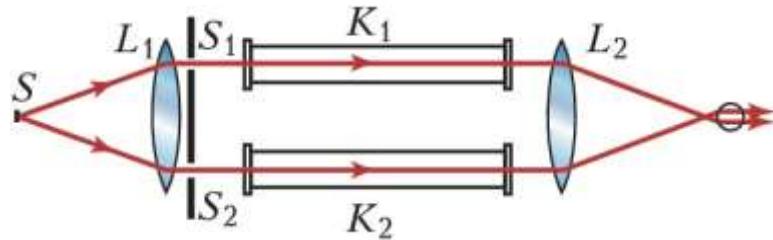
$\Delta l - ?$



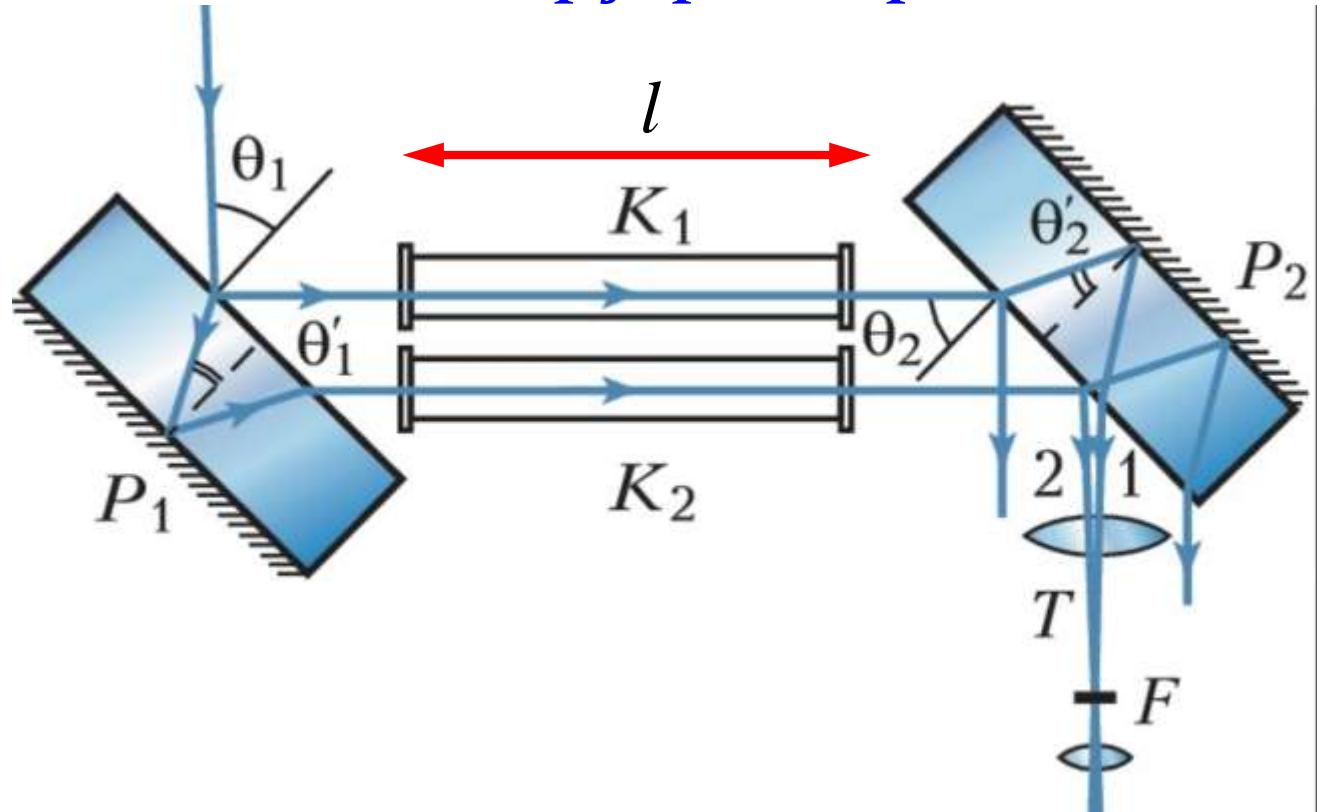
§1. Интерференционные рефрактометры

(определение n)

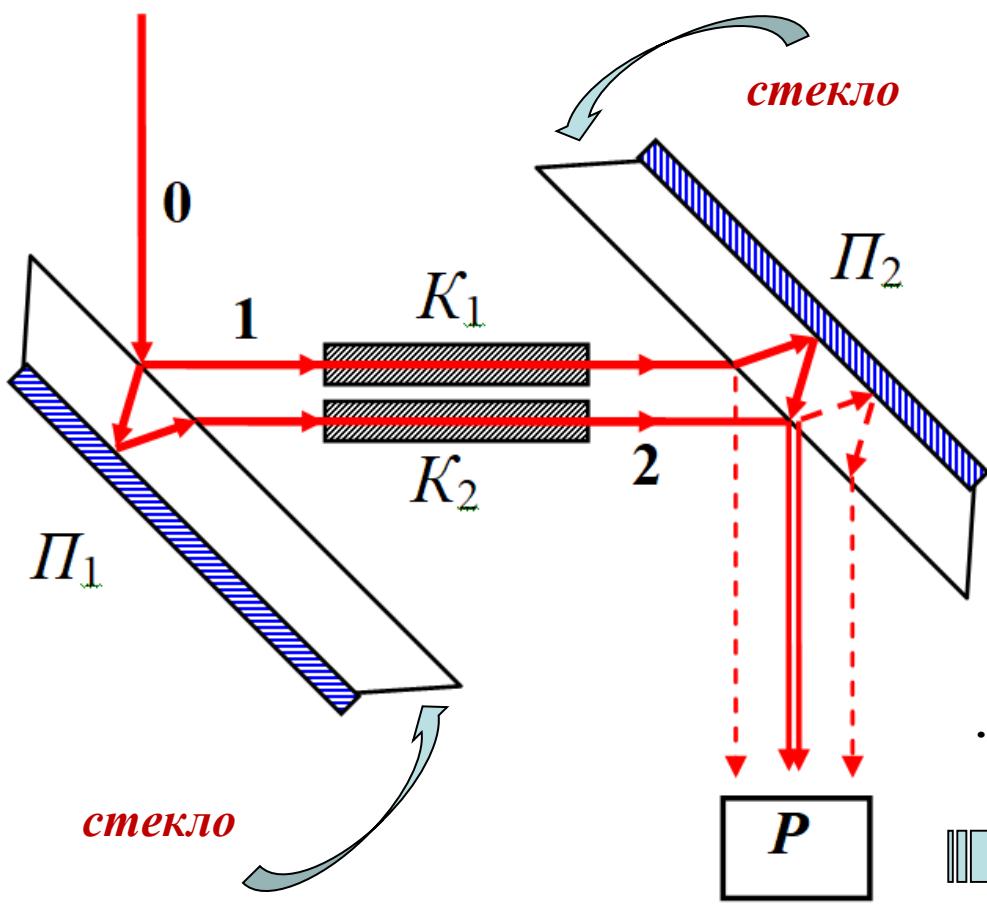
Интерферометр-рефрактометр Рэлея



Интерферометр Жамена



Интерференционный рефрактометр Жамена



Пример: $l = 5 \text{ см}$

Точность определения Δn
(смещение до 0,1 инт. полосы)

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

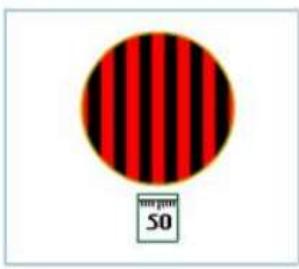
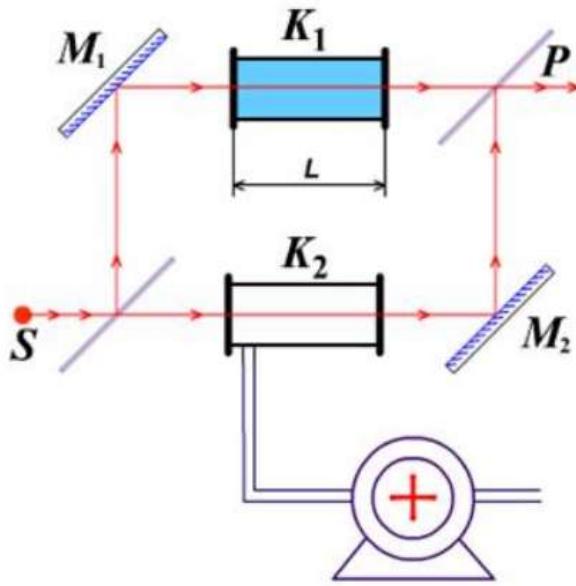
$$\begin{aligned} \Delta n^{\min} &= \frac{\Delta^{\min}}{l} = \frac{0,1 \cdot \lambda}{l} = \\ &= \frac{0,1 \cdot 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 10^{-6} \end{aligned}$$

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

$\rightarrow \sim 10^{-3} \%$ по концентрации !!

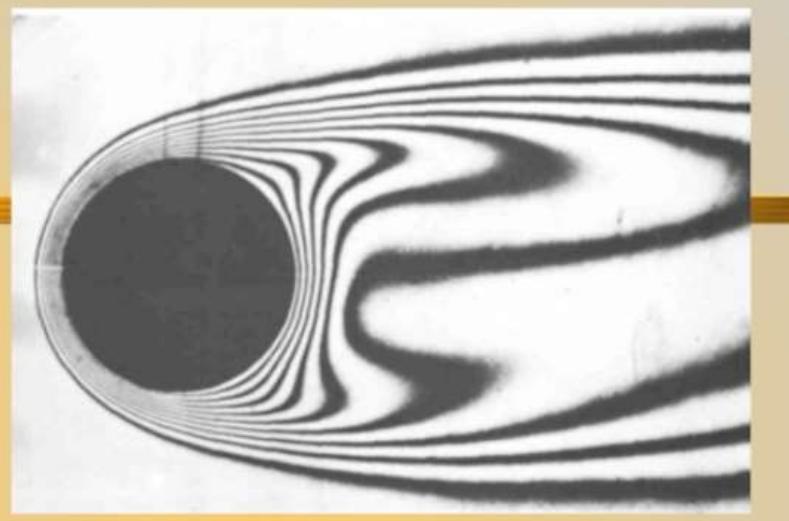
содержание сахарозы (по весу)	0,000 %	1,000 %	2,000 %	3,000 %
показатель преломления	1,33299	1,33443	1,33588	1,33733

Интерферометр-рефрактометр Маха - Цендера



Идея та же:

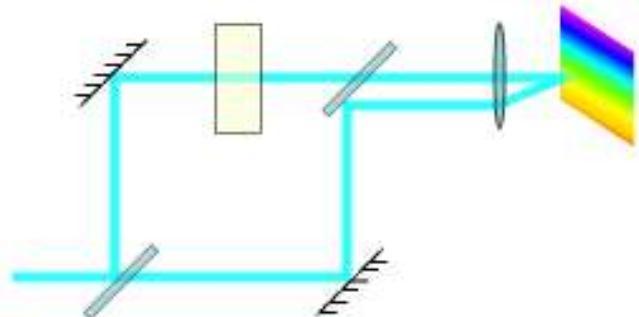
$$\Delta = (n_1 - n_2) \cdot l \quad \Rightarrow \\ \text{смещение полос}$$



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

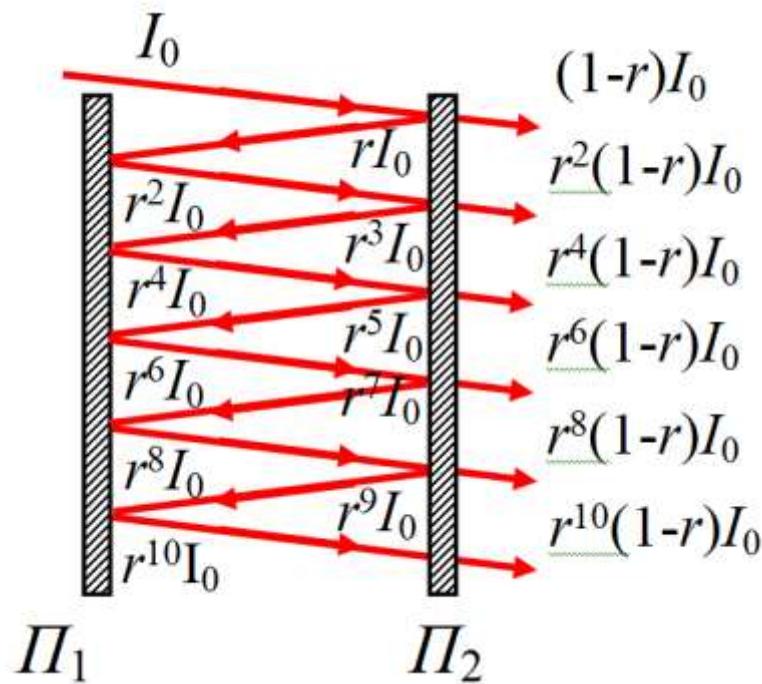
Гидро- аэродинамика

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

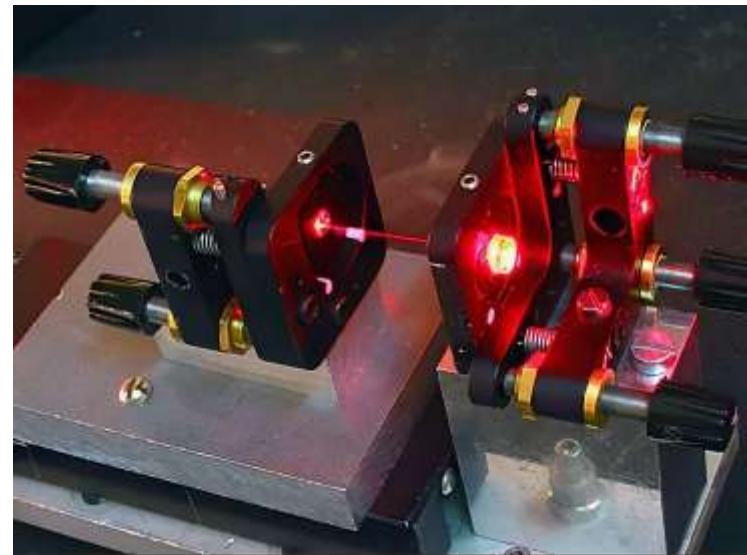
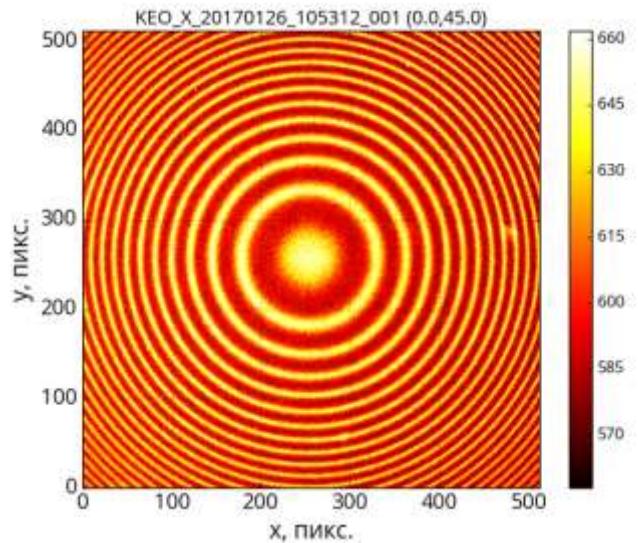


§2. Интерферционные спектральные приборы

Спектральный аппарат Фабри – Перо:
анализ тонкой структуры спектров

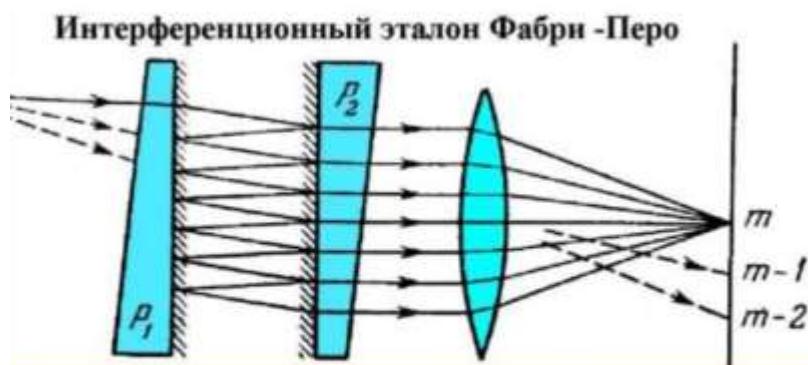


$$\left. \begin{array}{l} N \sim 10 \div 100 \\ m = 2h/\lambda \sim 10^5 \end{array} \right\} R = mN$$

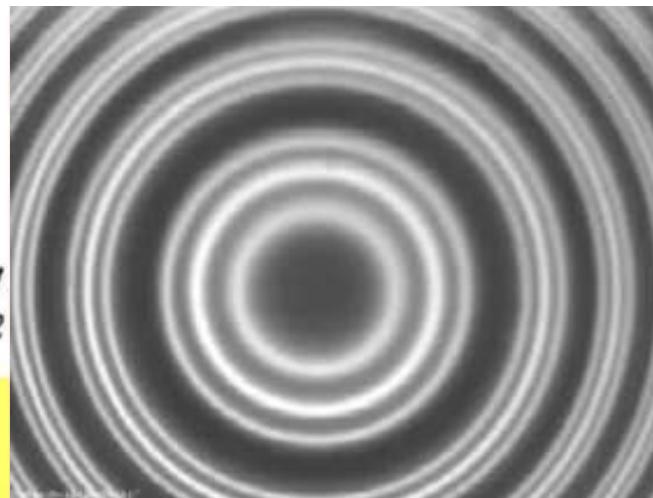


Спектральный аппарат Фабри – Перо

(сверхтонкая структура спектральных линий)



Отражение света от двух параллельных плоскостей приводит к образованию локализованных в бесконечности интерференционных полос равного наклона.



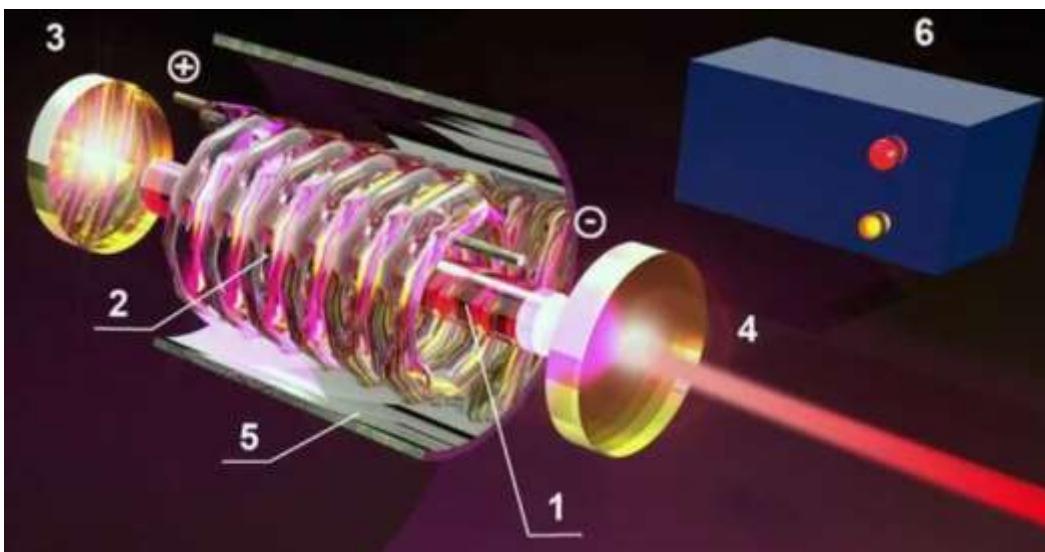
Расщепление спектральных линий при наблюдении эффекта Зеемана

$$R = mN !$$



НО.

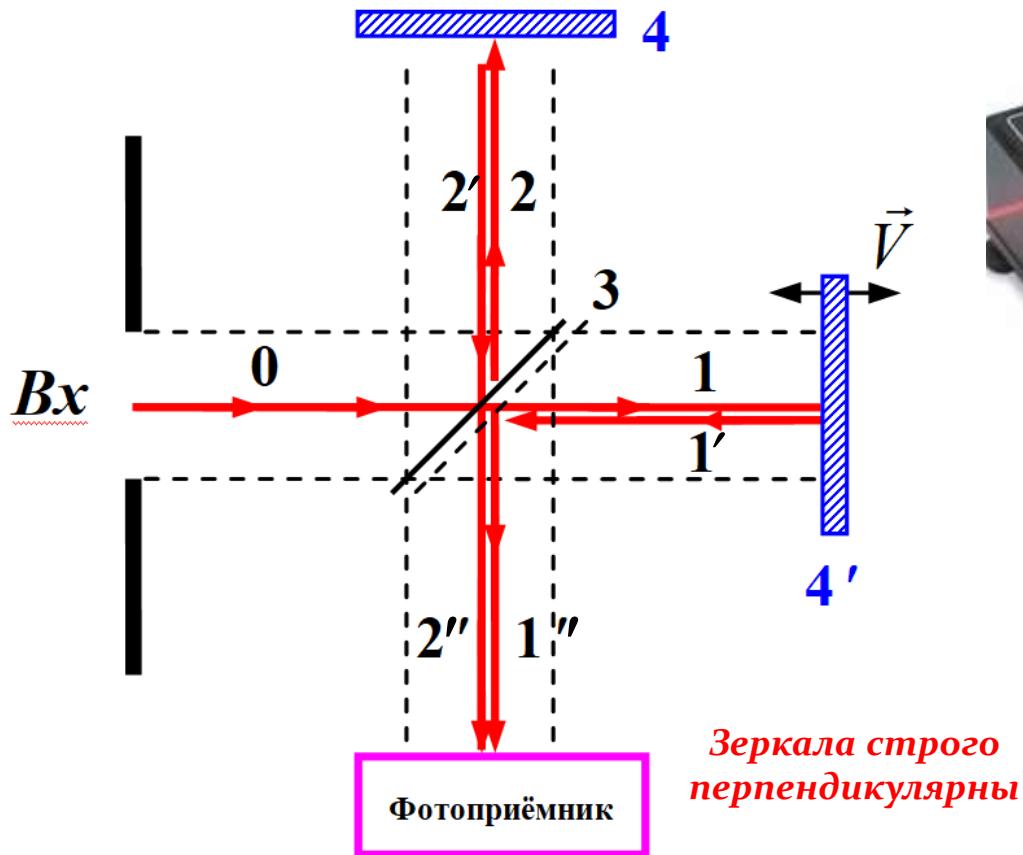
Также и резонатор Фабри – Перо, и ...



... ”эталон Фабри – Перо”
⇒ компараторы



Интерферометр Майкельсона



Зеркала НЕ строго
перпендикулярны



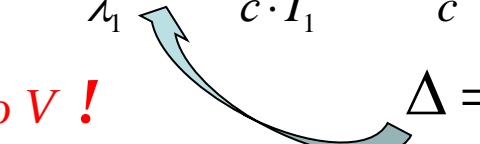
Принцип Фурье-спектроскопии

a) Одна компонента в спектре источника (ω) 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 !



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

б) Две компоненты в спектре источника (ω_1 и ω_2):

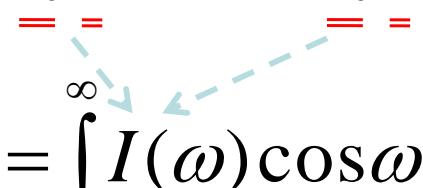
$$\tilde{I}(\tau) = I_{01} \cdot \cos \omega_1 \tau + I_{02} \cdot \cos \omega_2 \tau$$

в) Общий случай:

(сплошной спектр \equiv “компонент много”)

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

(её записывает прибор)


обратное Фурье-преобразование для спектра

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

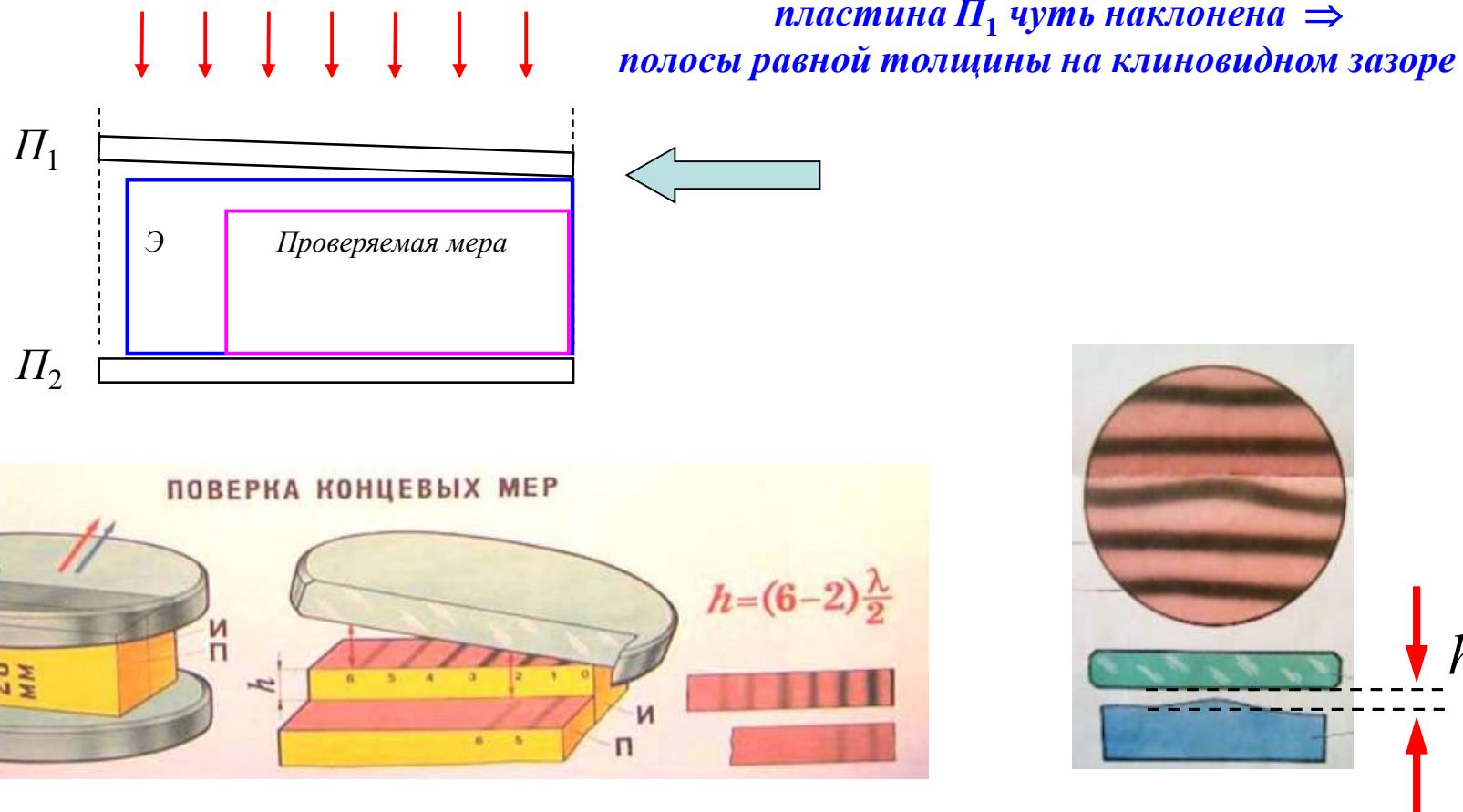
(рассчитывает компьютер)

!!

прямое Фурье-преобразование \Rightarrow СПЕКТР

3. Интерференционные компараторы

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



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

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

!!

Фундаментальные научные эксперименты

Опыты Майкельсона - Морли



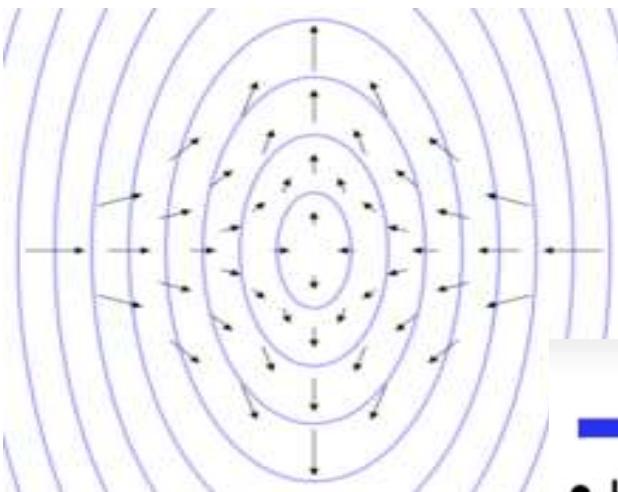
СТО

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

... Гравитационные волны и их детектирование

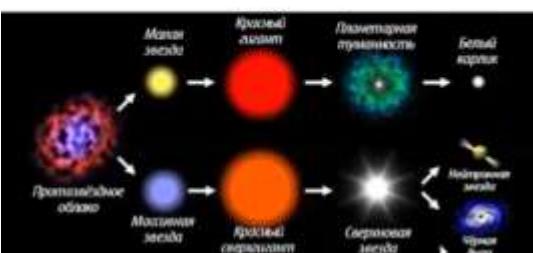
1916 г. ОТО А. Эйнштейна ⇒

Существование волн кривизны пространства



Источники гравитационных волн во вселенной

Эволюция звезд



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

Сливающиеся двойные системы



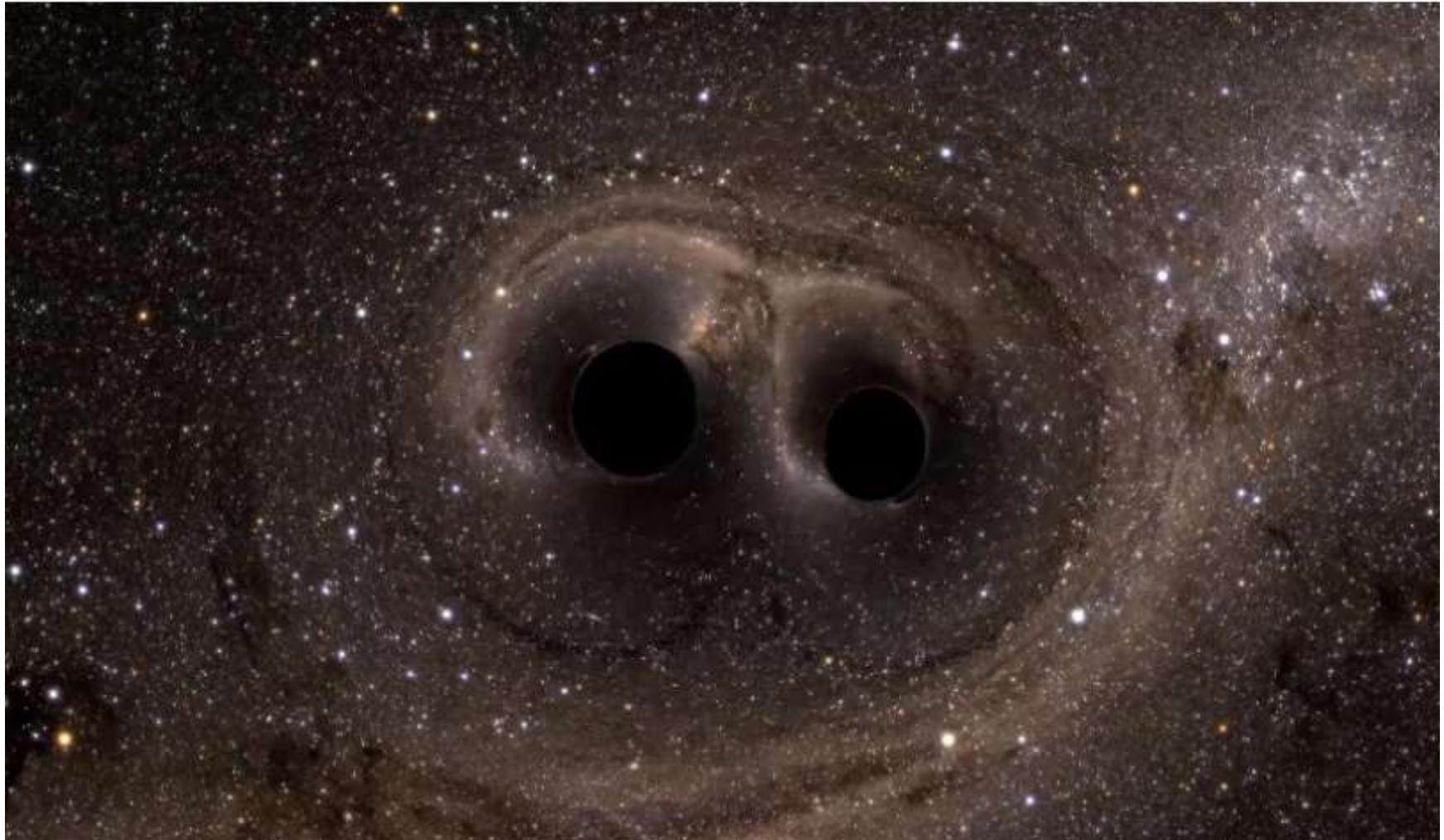
- 1. Две нейтронных звезды
- 2. Нейтронная звезда и черная дыра
- 3. Две черных дыры

- Всплески излучения



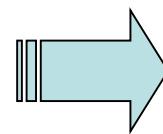
*Гравитационный коллапс за миллиард
световых лет от Земли – слияние чёрных дыр
(обнаружен 14.09.2015 → Нобель 2017 г.)*

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

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

⇒ увеличивать массу,
увеличивать добротность,

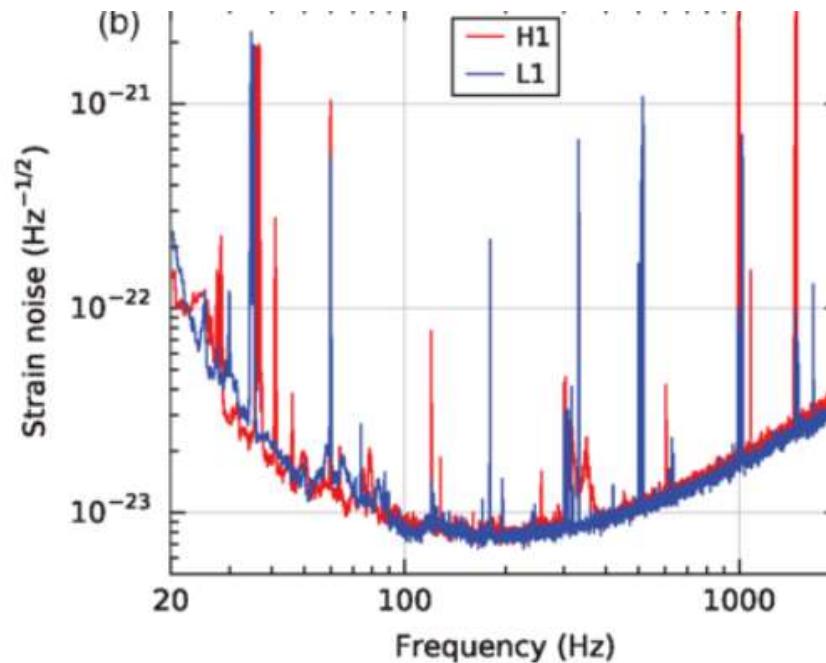
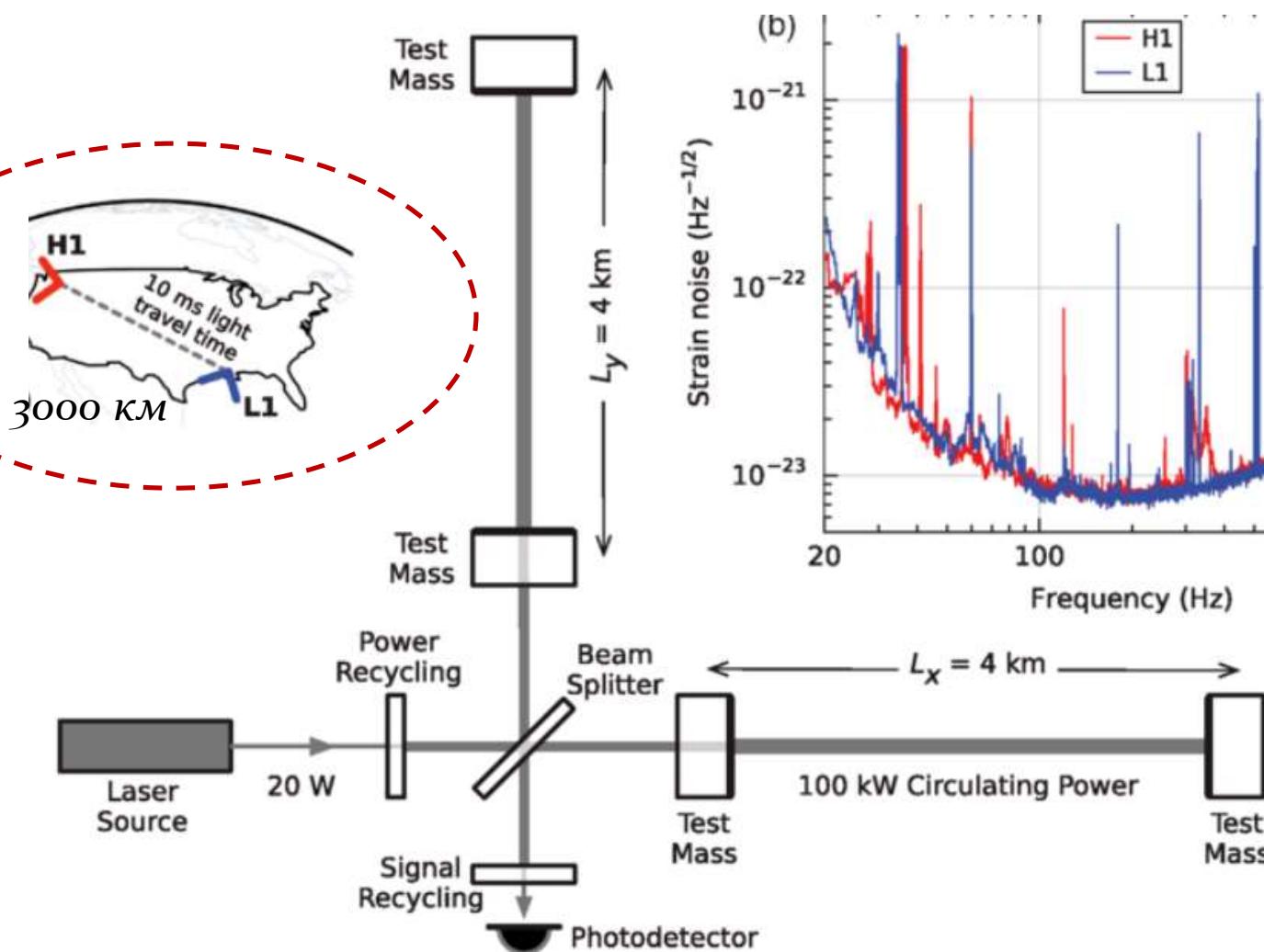
...

Проект LIGO – “поймаем гравитационные волны” 😊

Light Interferometer Gravitational-Wave Observatory

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

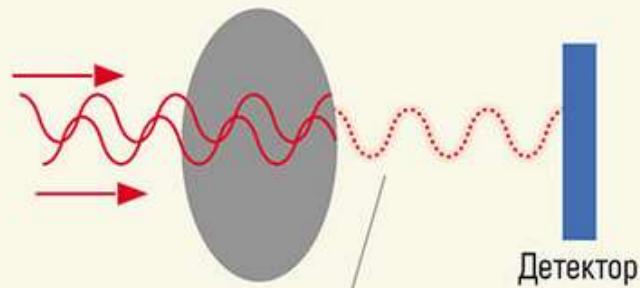
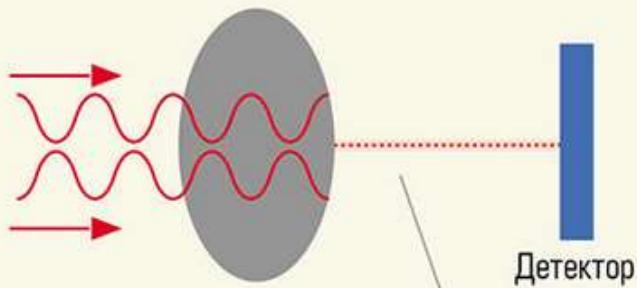
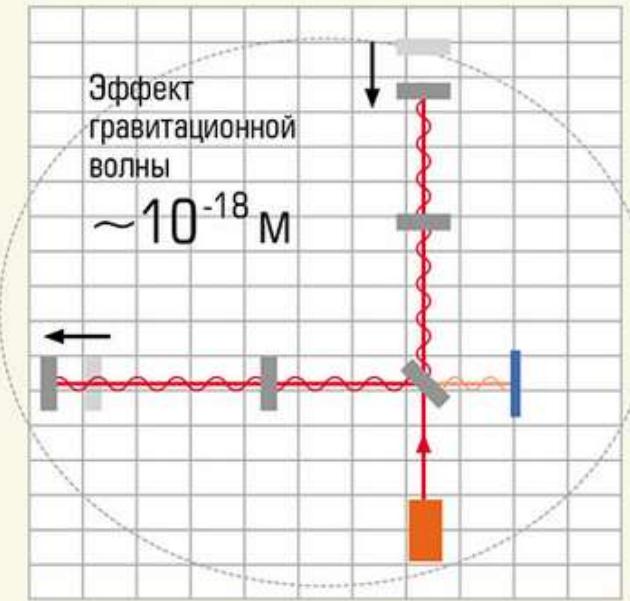
(... идея: ЖЭТФ 1962 г.)



Упрощённая оптическая схема антенны LIGO деформация (изменение метрики) \Rightarrow фазовый сдвиг !

Влияние гравитационной волны на плечи интерферометра

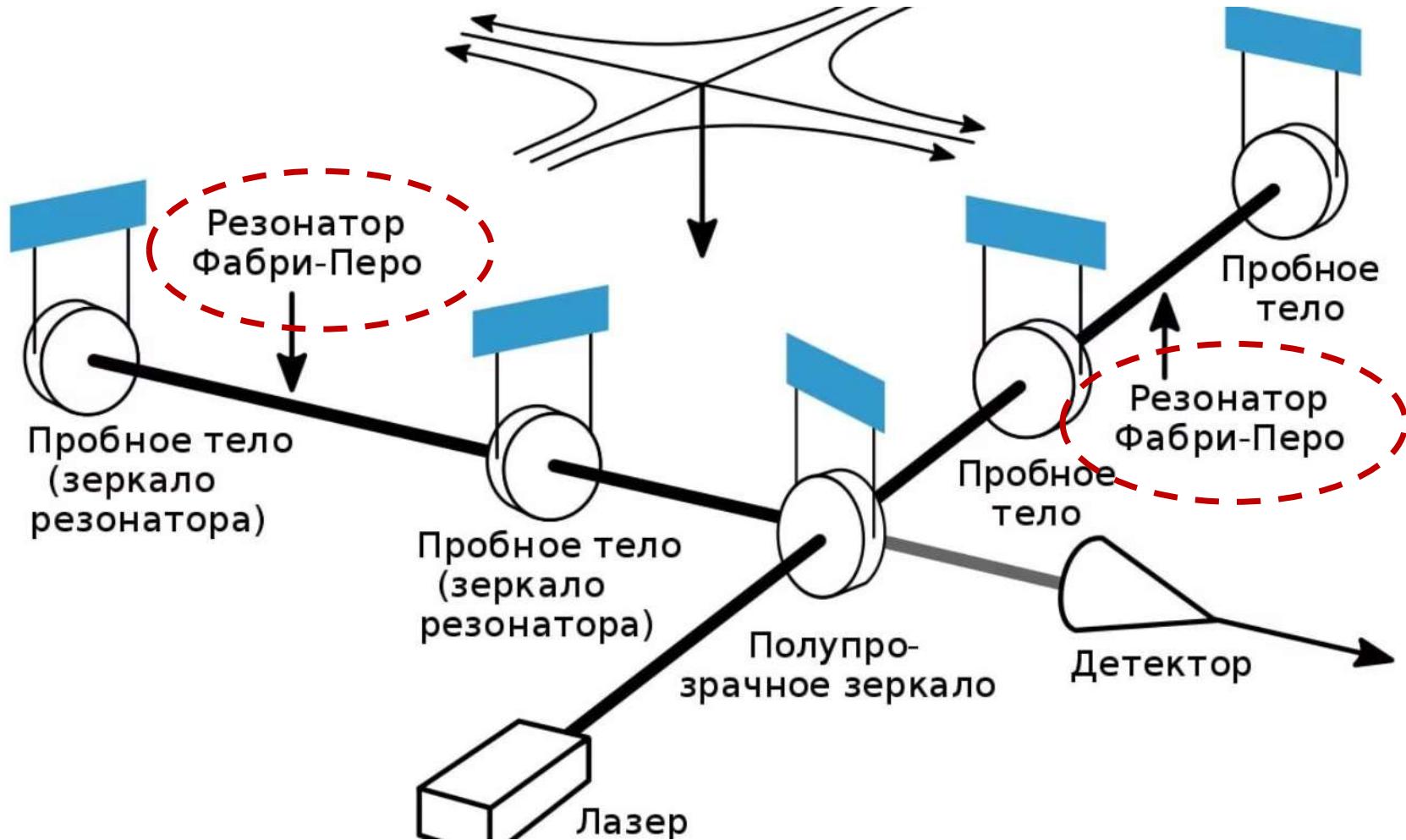
Схема 2



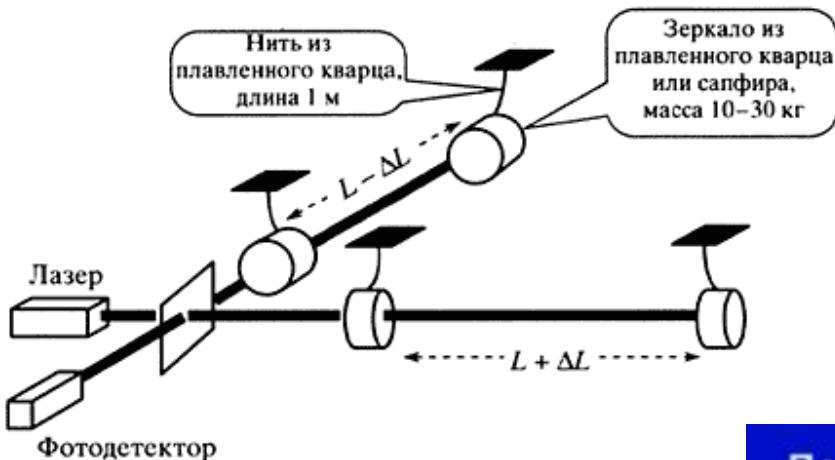
Суммарный сигнал до и после воздействия гравитационной волны

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

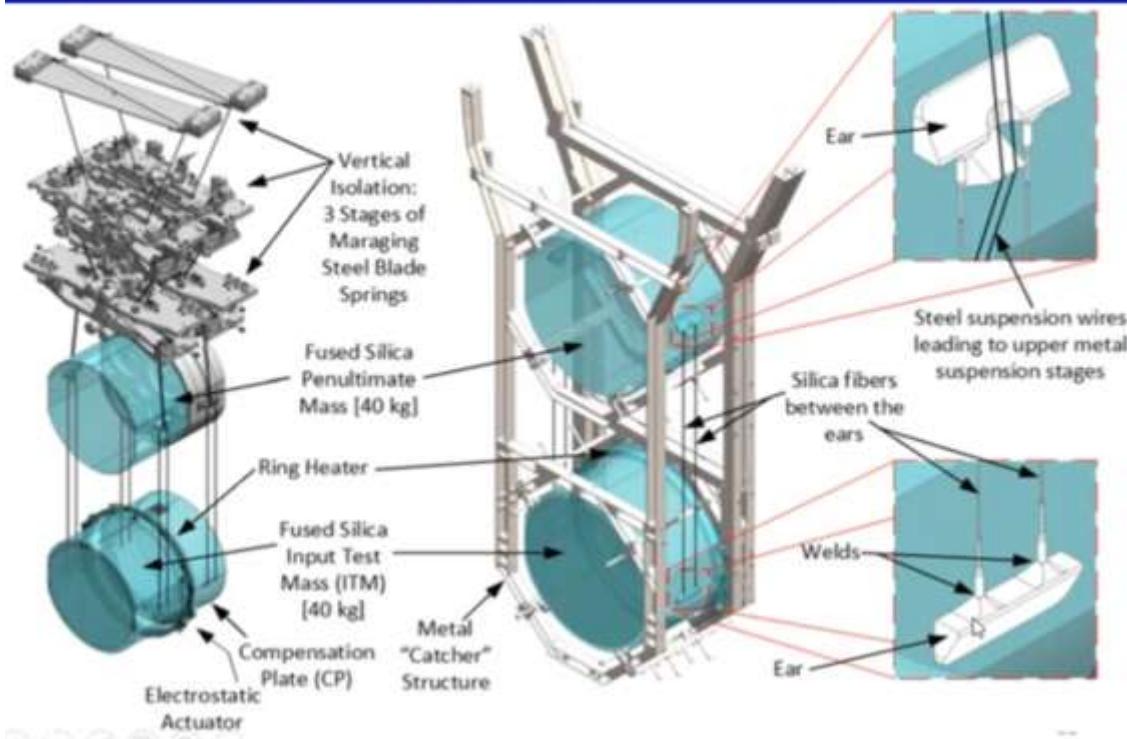
A schematic diagram showing a blue wave bending around a path of 4 km, representing the sensitivity of the detector.



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

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

Подвес кварцевых пробных масс Advanced LIGO



Северный X-рукав интерферометра LIGO (Хэнфорд)



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

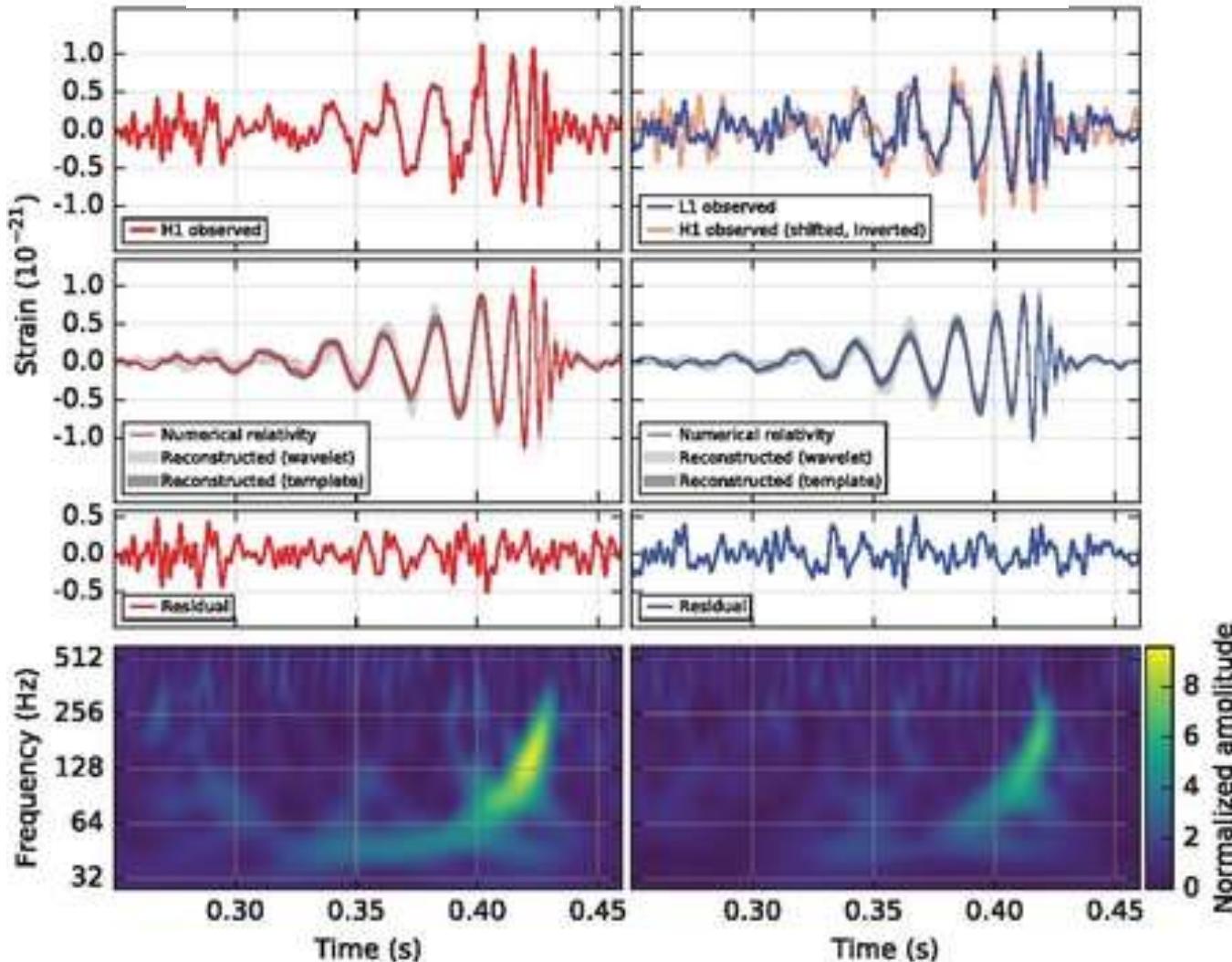


Зарегистрированный сигнал

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” !)*

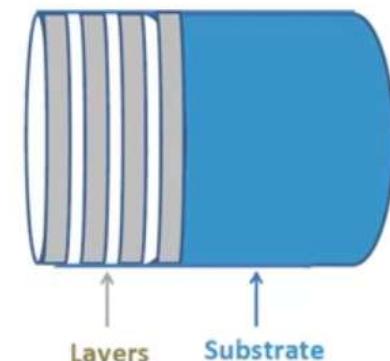
!

Снижение диссипации в отражающих диэлектрических покрытиях пробных масс

Покрытия зеркал состоят из чередующихся четвертьволновых слоев Ta_2O_5 (high index) and SiO_2 (low index)

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

Механические потери (пункт 1) в $Ta_2O_5 \Phi = 3 \times 10^{-4}$ - 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 $\approx 1 \text{ Тбайт/сут}$ (информация о ГВ сигнале – менее 1%)



... 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

