# Техника исследования гравитационных волн

*Лекция 4*

# Гравитационно-волновые детекторы и принципы их работы

Усіпов Н.М., PhD · КазНУ имени аль-Фараби

# Цель и план лекции

## Цель

Изучение принципов действия лазерных интерферометров, устройства и характеристик детекторов LIGO, Virgo и KAGRA, а также особенностей сети детекторов и диаграммы направленности.

1. Введение
2. Принцип действия интерферометра
3. Основные детекторы
4. Отклик детектора и сеть
5. Калибровка и циклы наблюдений
6. Квантовые ограничения и сжатый свет
7. Управление интерферометром
8. Вакуумная система и материалы

# 1 Введение

- Гравитационная волна изменяет расстояние между свободно падающими массами. Задача детектора – измерить эти изменения на уровне порядка $10^{-18}$ м и меньше.
- Интерферометр особенно подходит для этой задачи: деформация от волны является дифференциальной, то есть одно плечо растягивается, а другое одновременно сжимается, а метод обеспечивает широкую полосу частот.

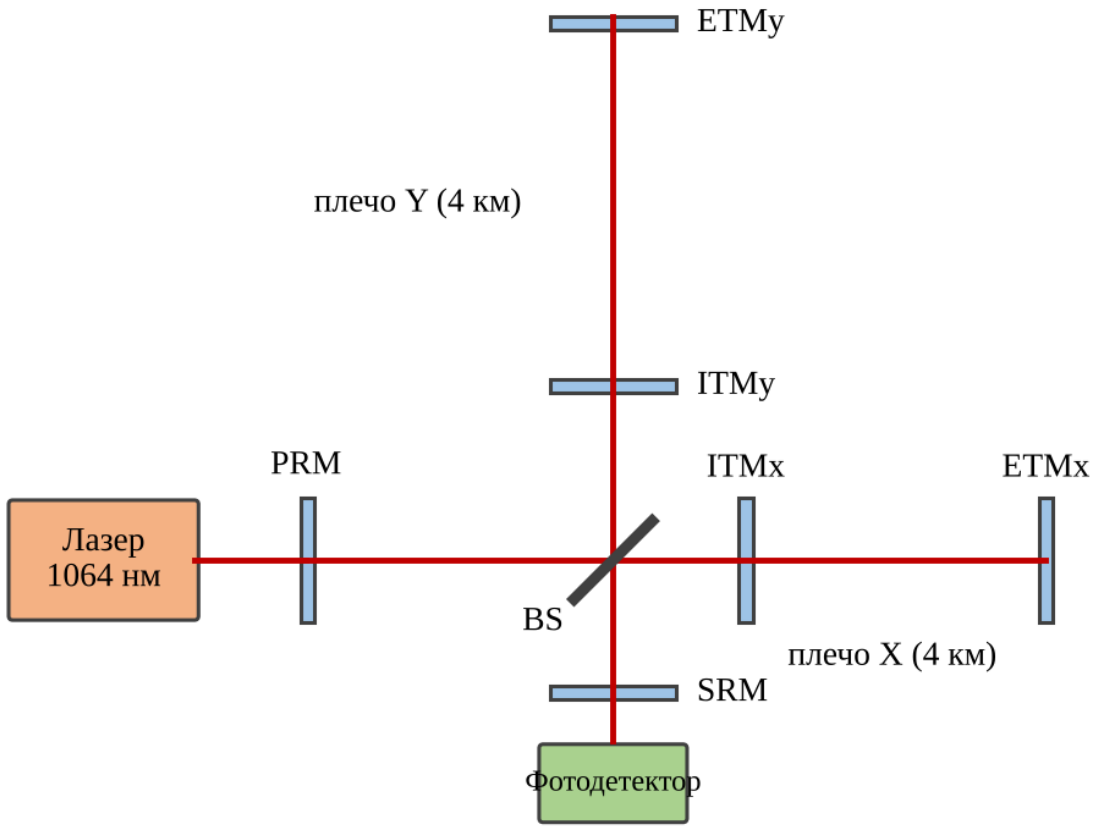
# 2 Принцип действия интерферометра

- Схема интерферометра Майкельсона включает лазер, светоделитель и два перпендикулярных плеча с зеркалами на концах.

$$\Delta\varphi = 4\pi\,\Delta L / \lambda,$$

- что вызывает изменение мощности света на выходе.
- Чувствительность простого интерферометра ограничена длиной плеч, поэтому в современных детекторах применяется ряд усовершенствований.

# 2 Принцип действия интерферометра (продолжение)




*Упрощённая схема интерферометра с резонаторами Фабри–Перо в плечах*

# 2 Принцип действия интерферометра (продолжение)

### Резонаторы Фабри–Перо в плечах

Дополнительные зеркала ITM образуют резонатор. Свет совершает множество проходов, что увеличивает эффективную длину плеч.

### Рециркуляция мощности

Зеркало PRM возвращает свет, идущий обратно к лазеру, увеличивая циркулирующую мощность.

### Рециркуляция сигнала

Зеркало SRM позволяет управлять полосой и частотным откликом детектора.

### Сжатый свет

Введение в выходной порт сжатого вакуума снижает квантовый шум. Эта технология применялась в третьем цикле наблюдений.

### Сейсмическая изоляция и подвес

Многоступенчатые маятниковые подвесы изолируют зеркала массой 40 кг от колебаний грунта.

# 3 Основные детекторы

### LIGO (США)

Два интерферометра с длиной плеч 4 км, расположенные в Хэнфорде и Ливингстоне на расстоянии примерно 3000 км друг от друга.

### Virgo (Италия)

Длина плеч 3 км. Подключение Virgo улучшило точность локализации источников, особенно с момента наблюдения GW170814 и GW170817.

### KAGRA (Япония)

Подземный детектор с плечами 3 км и криогенными сапфировыми зеркалами. Это снижает сейсмические и тепловые шумы.

### GEO600 (Германия)

Детектор с плечами 600 м, важный в качестве полигона для разработки новых технологий.

*Планируются детекторы третьего поколения: Einstein Telescope в Европе и Cosmic Explorer в США, а также космический проект LISA. Их ожидаемая чувствительность позволит наблюдать слияния на космологических расстояниях.*

# 4 Отклик детектора и сеть

- Сигнал детектора представляет собой линейную комбинацию двух поляризаций:

$$h(t) = F_+(\theta, \varphi, \psi)\, h_+(t) + F_\times(\theta, \varphi, \psi)\, h_\times(t),$$

- где F – диаграмма направленности, зависящая от направления на источник и угла поляризации ψ:

$$F_+ = \tfrac{1}{2}(1 + \cos^2\theta)\cos 2\varphi \cos 2\psi - \cos\theta \sin 2\varphi \sin 2\psi,$$

$$F_\times = \tfrac{1}{2}(1 + \cos^2\theta)\cos 2\varphi \sin 2\psi + \cos\theta \sin 2\varphi \cos 2\psi.$$

# 4 Отклик детектора и сеть (продолжение)

- Отклик максимален для источников, расположенных над или под плоскостью детектора, и равен нулю в определённых направлениях.
- локализацию источников по разности времени прибытия сигнала (триангуляцию);
- определение поляризаций и уточнение расстояния;
- подтверждение сигнала и подавление случайных шумовых событий;
- увеличение суммарного времени наблюдения.

# 4 Диаграмма направленности и параметры резонатора

Листинг 4.1.

```
import numpy as np

def fplus(th, ph, psi):
    return (0.5 * (1 + np.cos(th)**2) * np.cos(2 * ph) * np.cos(2 * psi)
            - np.cos(th) * np.sin(2 * ph) * np.sin(2 * psi))

def fcross(th, ph, psi):
    return (0.5 * (1 + np.cos(th)**2) * np.cos(2 * ph) * np.sin(2 * psi)
            + np.cos(th) * np.sin(2 * ph) * np.cos(2 * psi))

rng = np.random.default_rng(1)
n = 1_000_000
th = np.arccos(rng.uniform(-1, 1, n))
ph, psi = rng.uniform(0, 2 * np.pi, (2, n))
F2 = fplus(th, ph, psi)**2 + fcross(th, ph, psi)**2

print(f"F+ над детектором: {fplus(0, 0, 0):.2f}")
print(f"<F+^2 + Fx^2> по небу: {F2.mean():.3f} (теория 2/5)")
print(f"Доля неба с F^2 < 0.1: {(F2 < 0.1).mean():.2f}")
```

# 4 Диаграмма направленности и параметры резонатора (продолжение)

Листинг 4.1.

```
finesse, L = 450.0, 4000.0
N = 2 * finesse / np.pi
print(f"Проходов в резонаторе: {N:.0f}")
print(f"Эффективная длина плеча: {N * L / 1e3:.0f} км")
```

# 4 Результат: Диаграмма направленности и параметры резонатора

```
F+ над детектором: 1.00
<F+^2 + Fx^2> по небу: 0.400 (теория 2/5)
Доля неба с F^2 < 0.1: 0.11
Проходов в резонаторе: 286
Эффективная длина плеча: 1146 км
```

Среднее значение $F^2$ равно 2/5, поэтому для произвольно ориентированного источника эффективная амплитуда заметно меньше, чем при оптимальном расположении.

# 5 Калибровка и циклы наблюдений

- Сигнал на выходе детектора – это фототок. Чтобы получить значения деформации h(t), необходимо учитывать передаточную функцию контура управления.
- Наблюдения ведутся циклами, между которыми проводится модернизация детекторов.
- Основным показателем эффективности детектора является дальность обнаружения BNS – усреднённое по ориентации расстояние, на котором слияние 1,4 + 1,4 $M_{\odot}$ наблюдается при $\rho = 8$.

# 6 Квантовые ограничения и сжатый свет

- Флуктуации вакуума, поступающие через выходной порт интерферометра, определяют квантовый шум.

$$h_{SQL}(f) = (1 / (2\pi f L)) \sqrt{( 8\hbar / m )}.$$

- Предел убывает с ростом массы зеркал и длины плеч. Сжатый свет перераспределяет квантовую неопределённость между амплитудной и фазовой квадратурами.

# 7 Управление интерферометром

- Чтобы детектор работал в точке рабочей настройки, длины всех резонаторов поддерживаются с высокой точностью.
- Гравитационно-волновой сигнал получают методом DC-считывания: интерферометр немного отстраивают от тёмной полосы, чтобы небольшое количество света выходило на фотодетектор и создавало опорное поле.

# 8 Вакуумная система и материалы

- Световые лучи проходят через сверхвысокий вакуум в трубах диаметром около метра, что исключает флуктуации показателя преломления остаточного газа.
- Подвес зеркала в Advanced LIGO является четырёхступенчатым маятником с плавленым кварцем в качестве материала последней ступени.

# 9 Космические и наземные проекты будущего

- Проект LISA включает три космических аппарата, образующих треугольник с длиной плеч примерно 2,5 млн км.

# 10 Разбор примера

1. Определим фазовый сдвиг для изменения длины $\Delta L = 2 \cdot 10^{-18}$ м при $\lambda = 1064$ нм: $\Delta\varphi = 4\pi \cdot 2 \cdot 10^{-18} / 1{,}064 \cdot 10^{-6} \approx 2{,}4 \cdot 10^{-11}$ рад.

2. Умножение на число проходов $N \approx 286$ даёт примерно $6{,}8 \cdot 10^{-9}$ рад.

3. Величина такого порядка должна быть выделена на фоне других источников шума.

4. Оценим точность локализации: при базе с временем пролёта 10 мс и погрешности времени 0,2 мс угловая погрешность составляет порядка 0,2/10 = 0,02 рад ≈ 1,1° для направления, перпендикулярного базе.

# 11 Вопросы для обсуждения на занятии

### Компромисс

Почему увеличение мощности лазера не всегда улучшает чувствительность на всех частотах?

### Размещение

Какие преимущества и недостатки имеет подземное размещение детектора?

### Сеть

Как расположение детекторов на Земле влияет на точность локализации?

# Контрольные вопросы

1. В чём заключается принцип работы лазерного интерферометра как детектора гравитационных волн?
2. Какова роль резонаторов Фабри–Перо?
3. Для чего предназначены рециркуляция мощности и рециркуляция сигнала?
4. Какие меры применяются для уменьшения шумов в детекторах?
5. Сравните детекторы LIGO, Virgo и KAGRA.
6. Что описывает диаграмма направленности детектора?
7. Какие преимущества даёт сеть из нескольких детекторов?
8. Какие проекты детекторов нового поколения разрабатываются в настоящее время?

# Список литературы


1. Aasi J., et al. Advanced LIGO // Classical and Quantum Gravity. – 2015. – Vol. 32. – Art. 074001.
2. Acernese F., et al. Advanced Virgo: a second-generation interferometric gravitational wave detector // Classical and Quantum Gravity. – 2015. – Vol. 32. – Art. 024001.
3. Akutsu T., et al. Overview of KAGRA: Detector design and construction history // Progress of Theoretical and Experimental Physics. – 2021. – Art. 05A101.
4. Saulson P.R. Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors. – 2nd ed. – Singapore: World Scientific, 2017.
5. Buikema A., Cahillane C., Mansell G.L., et al. Sensitivity and performance of the Advanced LIGO detectors in the third observing run // Physical Review D. – 2020. – Vol. 102. – Art. 062003. – DOI: 10.1103/PhysRevD.102.062003.
6. Герценштейн М.Е., Пустовойт В.И. К вопросу об обнаружении гравитационных волн малых частот // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1962. – Т. 43. – С. 605–607.