Техника исследования гравитационных волн

Лекция 2

Источники гравитационных волн и механизмы их возникновения

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

Цель и план лекции

Цель

Изучение механизмов генерации гравитационного излучения, классификации астрофизических источников и частотных диапазонов наблюдения, а также получение навыка оценок мощности и амплитуды излучения.

1. Введение
2. Механизм излучения
3. Классификация источников
4. Диапазоны частот и методы наблюдения
5. Расчётные оценки
6. Образование двойных систем и частота слияний
7. Мультипольное излучение и его свойства
8. Характеристики непрерывных источников и фона

1 Введение

- Излучать гравитационные волны может любая система с изменяющимся квадрупольным моментом, однако в реальности наблюдаемые сигналы создаются только астрофизическими и космологическими объектами.
- Масса и компактность источника определяют частоту и амплитуду сигнала, поэтому различным источникам соответствуют различные методы наблюдения.

2 Механизм излучения

- Для медленно движущегося источника мощность излучения определяется третьей производной квадрупольного момента без следа:

$$L_{GW} = (G / 5c^5) \langle (d^3Q_{ij}/dt^3) (d^3Q^{ij}/dt^3) \rangle.$$

- Оценка порядка величины для системы с массой M, радиусом R и характерной скоростью v приводит к соотношению:

$$L_{GW} \sim (c^5/G) (r_s/R)^2 (v/c)^6,$$

- где $r_s = 2GM/c^2$ – гравитационный радиус. Величина $c^5/G \approx 3{,}6 \cdot 10^{52}$ Вт огромна.
- Для двойной системы на круговой орбите с угловой частотой ω мощность зависит от комбинации масс, называемой чирп-массой:

2 Механизм излучения (продолжение)

$$L_{GW} = (32/5)(c^5/G)(G\,M_c\,\omega / c^3)^{10/3}.$$

- Излучение уносит энергию и момент импульса, поэтому компоненты сближаются. Частота гравитационной волны равна удвоенной орбитальной частоте.

3 Классификация источников

По форме сигнала и способу поиска источники делят на четыре класса.

Слияния компактных двойных систем (CBC)

Двойные чёрные дыры (BBH), двойные нейтронные звёзды (BNS) и смешанные системы (NSBH).

Непрерывные волны

Вращающиеся нейтронные звёзды, обладающие асимметрией формы. Излучают почти монохроматический сигнал на удвоенной частоте вращения.

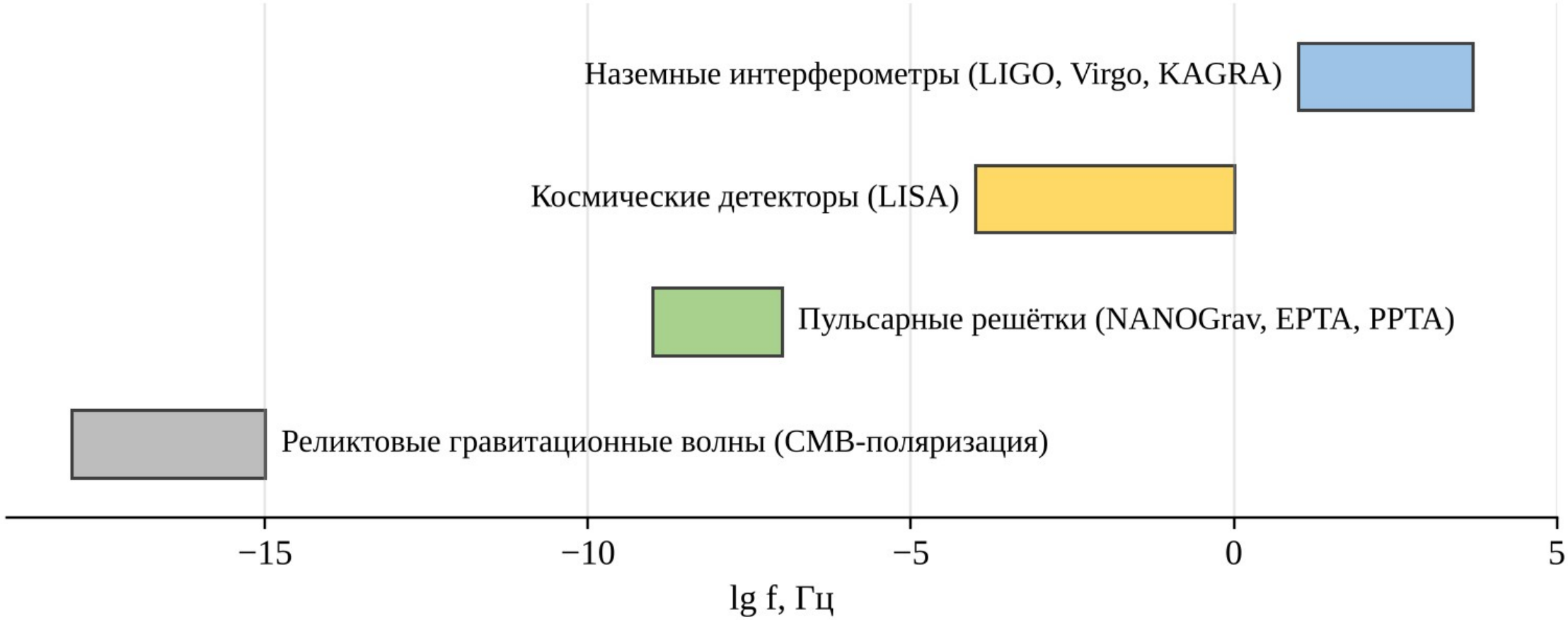
Всплески (burst)

Кратковременные сигналы с плохо предсказуемой формой, например от коллапса ядра сверхновых.

Стохастический фон

Наложение большого числа неразрешимых источников и, возможно, космологическое излучение ранней Вселенной.

4 Диапазоны частот и методы наблюдения



Диапазоны частот и методы наблюдения гравитационных волн

4 Диапазоны частот и методы наблюдения (продолжение)

Наземные интерферометры (около 10 Гц – нескольких кГц)

Слияния объектов звёздных масс, сверхновые, быстро вращающиеся нейтронные звёзды.

Космические интерферометры (0,1 мГц – 1 Гц)

Проект LISA, утверждённый Европейским космическим агентством в 2024 году, предназначен для наблюдения слияний сверхмассивных чёрных дыр и двойных белых карликов.

Пульсарные решётки (нГц)

Измерение вариаций времени прихода импульсов от миллисекундных пульсаров. В 2023 году коллаборации, такие как NANOGrav, представили свидетельства существования низкочастотного фона.

Поляризация реликтового излучения (порядка 10^{-16} Гц)

Первичные гравитационные волны инфляционного происхождения могли бы оставить след в B-модах поляризации реликтового излучения.

5 Расчётные оценки

$$h_0 = 4\pi^2 G I \varepsilon f^2 / (c^4 r).$$

5 Оценка излучения двойного пульсара и нейтронной звезды

Листинг 2.1.

```
import numpy as np

G, c, Ts, kpc = 6.674e-11, 2.998e8, 4.925e-6, 3.086e19

# Пульсар PSR B1913+16: параметры орбиты
Pb = 7.752 * 3600                # период, с
e = 0.617
m1, m2 = 1.44, 1.39              # массы в M_sun
Mc53 = m1 * m2 / (m1 + m2)**(1 / 3)        # Mc^(5/3)
f_e = (1 + 73/24*e**2 + 37/96*e**4) / (1 - e**2)**3.5
Pdot = -192 * np.pi / 5 * (2 * np.pi * Ts / Pb)**(5 / 3) * Mc53 * f_e
print(f"dP/dt расчёт: {Pdot:.2e} (наблюдения: около -2.4e-12)")

# Непрерывная волна: I=1e38 кг·м2, f=200 Гц, r=1 кпк
I, eps, f, r = 1e38, 1e-6, 200.0, 1 * kpc
h0 = 4 * np.pi**2 * G * I * eps * f**2 / (c**4 * r)
print(f"h0 = {h0:.1e}")
```

5 Результат: Оценка излучения двойного пульсара и нейтронной звезды

```
dP/dt расчёт: -2.40e-12 (наблюдения: около -2.4e-12)
h0 = 4.2e-26
```

Рассчитанная скорость изменения периода хорошо согласуется с данными наблюдений.

5 Расчётные оценки (продолжение)

- Выбор метода поиска определяется степенью знания формы сигнала: при известной форме эффективна согласованная фильтрация, а при неизвестной – методы поиска избытка энергии и исследование энтропийных признаков сигнала, рассматриваемые во второй части курса.

6 Образование двойных систем и частота слияний

Двойные компактные объекты могут образовываться разными путями:

Эволюция изолированных двойных

Пара массивных звёзд эволюционирует совместно. На стадии общей оболочки компоненты сближаются, и орбита становится достаточно тесной для слияния за время, меньшее возраста Вселенной.

Динамическое образование

В плотных звёздных скоплениях компактные объекты образуют пары при гравитационных взаимодействиях.

Иерархические слияния

Чёрная дыра, образованная при слиянии, сливается снова. Это один из вероятных каналов формирования объектов, попадающих в разрыв масс парной нестабильности.

Первичные чёрные дыры

Гипотетические объекты, образованные в ранней Вселенной.

6 Образование двойных систем и частота слияний (продолжение)

- По массам, спинам и эксцентриситету событий можно различать эти механизмы. Каталоги обнаруженных событий служат основой популяционных исследований: результаты анализа каталога GWTC-3, содержащего 90 кандидатов, позволили оценить распределение масс чёрных дыр и частоту слияний в единице объёма.
- Распределение масс и частота событий важны и для обработки данных: они определяют априорные распределения при поиске сигналов, а также ожидаемое количество событий в заданном объёме пространства.

7 Мультипольное излучение и его свойства

- Дальняя зона источника описывается мультипольным разложением. Для излучения электромагнитных волн основной вклад даёт электрический диполь.
- Сферически симметричный коллапс или пульсация не создаёт гравитационного излучения, поскольку квадрупольный момент при таком движении не меняется.
- Излучение может также передавать импульс: эффект отдачи при асимметричном слиянии, в некоторых случаях придающий конечной чёрной дыре скорость в сотни и даже тысячи километров в секунду.

8 Характеристики непрерывных источников и фона

- Нейтронные звёзды могут излучать при асимметрии, возникающей вследствие деформации коры или магнитного поля.
- Интенсивность стохастического фона описывается относительной плотностью энергии:

$$\Omega_{GW}(f) = (1/\rho_c)\, d\rho_{GW}/d\ln f,$$

- где ρ_c – критическая плотность Вселенной. Для компактных двойных ожидается зависимость $\Omega \propto f^{2/3}$.

9 Источники в разных диапазонах

- Различие масс приводит к различному частотному диапазону: сверхмассивные чёрные дыры с массами от миллионов масс Солнца излучают на частотах порядка миллигерц и ниже.
- События EMRI – это падение компактного объекта звёздной массы на сверхмассивную чёрную дыру.
- Важной астрофизической особенностью является многоканальная астрономия. Слияния нейтронных звёзд дают короткие гамма-всплески и килоновые, а коллапс ядра – нейтринное излучение.

10 Разбор примера

1. Оценим мощность излучения системы 1,4 + 1,4 $M_\odot$ на частоте волны 100 Гц.
2. Чирп-масса равна 1,22 $M_\odot$.
3. Орбитальная угловая частота $\omega = \pi f = 314$ рад/с.
4. Безразмерная комбинация $G\,M_c\,\omega/c^3 = 1{,}22 \cdot 4{,}925\cdot10^{-6} \cdot 314 \approx 1{,}89\cdot10^{-3}$.
5. Её степень 10/3 равна примерно $8{,}3\cdot10^{-10}$.
6. Тогда мощность составляет $L = 6{,}4 \cdot 3{,}63\cdot10^{52} \cdot 8{,}3\cdot10^{-10} \approx 1{,}9\cdot10^{44}$ Вт.
7. Эта величина значительно больше светимости Солнца, равной приблизительно $3{,}8\cdot10^{26}$ Вт.

10 Разбор примера (продолжение)

8 Для сравнения система Земля–Солнце излучает порядка 200 Вт.

11 Вопросы для обсуждения на занятии

Симметрия

Почему идеально сферическая сверхновая не излучает гравитационных волн?

Методы

Какой метод поиска применим к каждому классу источников и почему?

Многоканальность

Какие дополнительные данные дают электромагнитные наблюдения слияния?

Контрольные вопросы

1. Почему лабораторные источники гравитационных волн практически неосуществимы?
2. Какие параметры источника определяют мощность гравитационного излучения?
3. Как связаны частота гравитационной волны и орбитальная частота двойной системы?
4. Назовите четыре класса источников гравитационных волн и их особенности.
5. Какие методы применяются для поиска сигналов с известной и неизвестной формой?
6. Какие диапазоны частот соответствуют наземным и космическим детекторам?
7. Как проверяется формула излучения на примере пульсара Халса–Тейлора?
8. От чего зависит амплитуда непрерывной волны нейтронной звезды?

Список литературы

1. Maggiore M. Gravitational Waves. Volume 2: Astrophysics and Cosmology. – Oxford: Oxford University Press, 2018.
2. Peters P.C., Mathews J. Gravitational radiation from point masses in a Keplerian orbit // Physical Review. – 1963. – Vol. 131. – P. 435–440.
3. Weisberg J.M., Nice D.J., Taylor J.H. Timing measurements of the relativistic binary pulsar PSR B1913+16 // The Astrophysical Journal. – 2010. – Vol. 722. – P. 1030–1034.
4. Amaro-Seoane P., et al. Laser Interferometer Space Antenna. – arXiv:1702.00786, 2017.
5. Agazie G., et al. The NANOGrav 15 yr data set: Evidence for a gravitational-wave background // The Astrophysical Journal Letters. – 2023. – Vol. 951. – Art. L8.
6. Abbott R., et al. GWTC-3: Compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the second part of the third observing run // Physical Review X. – 2023. – Vol. 13. – Art. 041039.