

**XXI Международная астрономическая олимпиада**
XXI International Astronomy Olympiad

Болгария, Пампорово-Смолян

5 – 13. X. 2016

Pamporovo-Smolyan, Bulgaria

Язык
language **Русский****Только для перевода.****Задачи практического тура**

β-6. Обнаружение гравитационных волн. В 1916 году, через год после окончательной формулировки уравнений общей теории относительности, Альберт Эйнштейн предсказал существование гравитационных волн. По аналогии с электромагнитными волнами, которые излучаются из-за ускорения электрических зарядов, гравитационные волны излучаются благодаря ускорению масс. По аналогии с электромагнетизмом, если неподвижное тело внезапно начнёт движение, гравитационная сила, с которой оно воздействует на *пробные* массы, изменится. Тем не менее, такое изменение произойдёт не моментально. Информация о том, что данное тело движется будет распространяться со скоростью света в виде гравитационных волн. Когда гравитационная волна достигнет пробных масс, те начнут ускоряться из-за изменения сил гравитации. Тело, движение которого периодические, будет создавать периодические гравитационные волны, и те могут ускорять окружающие пробные массы также периодически.

14 сентября 2015 года два детектора лазерного интерферометра гравитационно-волновой обсерватории (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO) зарегистрировали событие совпадения гравитационного сигнала GW150914, как показано на Рис. 1. Это было первое прямое обнаружение гравитационных волн и первое прямое наблюдение системы двух чёрных дыр, сливающихся в одну чёрную дыру. Было определено, что расстояние до двойной системы сливающихся чёрных дыр лежит в интервале между 250 Мпк и 600 Мпк, а начальные массы двух чёрных дыр до их слияния – $36 \pm 4 M_{\odot}$ и $28 \pm 4 M_{\odot}$ соответственно. После слияния они образовали одну чёрную дыру массой $62 \pm 4 M_{\odot}$. Остальная масса была высвобождена в виде энергии гравитационных волн, равной по вычислениям $3,0 \pm 0,5 M_{\odot} c^2$, ($M_{\odot} = 2,0 \times 10^{30}$ кг – масса Солнца, $c = 3,0 \times 10^8$ м/с – скорость света в вакууме). Согласно вычислениям пиковая мощность гравитационного излучения в несколько раз превосходила 10^{49} Вт, что более чем в десять раз превосходит суммарную мощность света, излучаемого всеми звёздами наблюдаемой Вселенной.

Из-за приливных сил гравитационные волны вызывает относительные смещения (ΔL) пробных масс, которые пропорциональны расстоянию (L) между этими пробными массами. Физики определяют амплитуду гравитационных волн с помощью безразмерной величины h , которая определяется как

$$h = \Delta L/L$$

и обычно называется безразмерной деформацией гравитационной волны. Эта величина отложена на графике по вертикальной оси.

**XXI Международная астрономическая олимпиада**
XXI International Astronomy Olympiad

Болгария, Пампорово-Смолян 5 – 13. X. 2016 Pamporovo-Smolyan, Bulgaria

язык language	<u>Русский</u>
------------------	-----------------------

Рис1. Гравитационно-волновое событие GW150914, обнаруженное двумя детекторами LIGO. По вертикальной оси показана амплитуда гравитационной волны (деформация h). Чёрные дыры проходят через следующие стадии слияния (их изображения расположены по горизонтальной оси примерно в соответствии с соответствующими временами):

- (1) *по спирали*, когда обе черные дыры постепенно приближаются друг к другу,
- (2) *слияние*, когда чёрные дыры сливаются,
- (3) *конечная стадия*, когда новообразованная чёрная дыра сначала слегка осциллирует, прежде чем успокоиться.

В рамках классической ньютоновской механики выполните следующие задания:

- 6.1.** Используя данные массы обоих чёрных дыр по данным LIGO, приведённым выше, вычислите их радиусы горизонтов до слияния. Оцените погрешность вычисления этих радиусов.
- 6.2.** По данным Рис.1., измеряя полученный сигнал гравитационной волны, найдите орбитальный период системы из двух чёрных дыр в момент слияния.
- 6.3.** Используйте **только** информацию, которую можно получить из Рис.1, оцените полную начальную массу системы из двух чёрных дыр. **Нельзя** использовать ни один из приведенных выше результатов LIGO.
- 6.4.** Выведите формулу для энергии выделенной в виде гравитационных волн до момента слияния в виде функции зависимости только от начальных масс двух чёрных дыр (M_1 and M_2). Используя результат, полученный в 6.3., вычислите полную энергию, излучённую в виде гравитационных волн, считая, что $M_1 = M_2$.
- 6.5.** Найдите среднюю мощность P излучения гравитационных волн в течение последних 0.10 с до слияния.
- 6.6.** Как и в большинстве случаев поток гравитационной волны пропорционален квадрату амплитуды волны. Амплитуда (деформация) в непосредственной близости от двух сливающихся чёрных дыр составляет примерно $h = (v/c)^2$, где v есть скорость вращения черных дыр. Оцените расстояние до сливающихся чёрных дыр, обнаруженных LIGO.
- 6.7.** Эксперимент LISA нацелен на измерение гравитационных волн от сталкивающихся сверхмассивных чёрных с большим космологическим красным смещением. Оцените, какой должна быть чувствительность LISA в единицах безразмерной деформации.