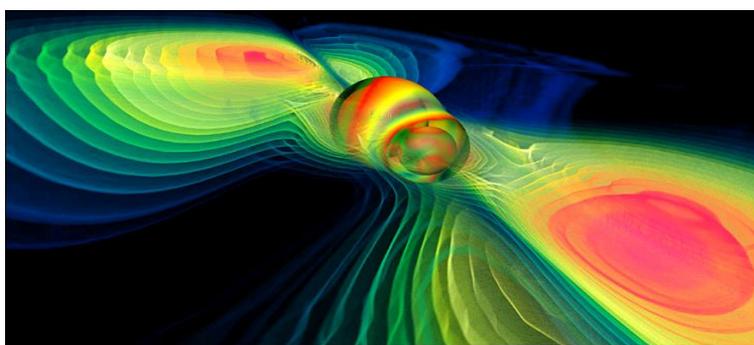


3.5. Гравитационные волны и черные дыры

3.5.1. Гравитационные волны в рамках ОТО

Общая теория относительности А. Эйнштейна предсказывает возможность существования искажений вакуумной протяженности, носящих волновой характер (см. рис. 3.5.1).



<http://www.sai.msu.ru/>

Рис.3.5.1. Иллюстрация волновых возмущений вакуумной протяженности в рамках представлений ОТО

Такие возмущения окружающего нас пространства в современной физике принято называть гравитационными волнами.

Изложим основные доводы ОТО в пользу возможности существования гравитационных волн, ссылаясь на [4, 17, 23].

Пусть невозмущенная 4-мерная протяженность описывается метрикой пространства Минковского с сигнатурой (+ ---)

$$ds^{(-)2} = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = \eta_{ij}^{(-)} d\xi^i d\xi^j, \quad (3.5.1)$$

где

$$\eta_{ij}^{(-)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (3.5.2)$$

Слабое возмущение такой протяженности в рамках ОТО задается метрикой вида

$$ds_g^{(-)2} = g_{ij}^{(-)} dx_i dx_j, \quad (3.5.3)$$

где

$$g_{ij}^{(-)} = \eta_{ij}^{(-)} + h_{ij}^{(-)}. \quad (3.5.4)$$

Симметричный тензор $h_{ij}^{(-)}$ рассматривается как тензорное поле на фоне плоской 4-мерной метрической протяженности, при этом все операции поднятия и опускания тензорных индексов осуществляются с помощью невозмущенного метрического тензора $\eta_{ij}^{(-)}$.

При определенном выборе системы отсчета (т. е. при определенной калибровке, аналогичной лоренцовой калибровке в электродинамике) на $h_{ij}^{(-)}$ налагаются дополнительные условия:

$$\frac{\partial h_i'^{j(-)}}{\partial x^j} = 0, \quad (3.5.5)$$

где $h_i'^{j(-)} = h_i^{j(-)} - 1/2 \delta_i^j h^{(-)}$, $h^{(-)} = h_i^{i(-)} = \eta^{ij(-)} h_{ij}^{(-)}$, δ_i^j – символ Кронекера (по совпадающим верхнему и нижнему индексам производится суммирование).

В этой калибровке вакуумное уравнение Эйнштейна (3.1.40) сводится к волновому уравнению для $h_{ij}^{(-)}$:

$$R_{ij} \approx \left(\nabla - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{ij}^{(-)} = 0. \quad (3.5.6)$$

В малой области рассматриваемой 4-мерной протяженности волновое возмущение можно считать плоской волной. Если в качестве оси x выбрать направление распространения волны, то подходящим выбором системы отсчета можно обратить в нуль все компоненты $h_{ij}^{(-)}$, кроме компонент

$$h_{22}^{(-)} = -h_{33}^{(-)} \equiv h_+^{(-)} \quad \text{и} \quad h_{32}^{(-)} = h_{23}^{(-)} \equiv h_x^{(-)}. \quad (3.5.7)$$

Такое волновое возмущение является поперечной волной. Поляризация этой волны в плоскости yz определяется следующим тензором второго ранга [23]:

$$h_{ab}^{(-)} = \begin{pmatrix} h_+^{(-)} & h_x^{(-)} \\ h_x^{(-)} & -h_+^{(-)} \end{pmatrix} = 0, \quad a, b = 2, 3. \quad (3.5.8)$$

Компоненты $h_+^{(-)}$ и $h_x^{(-)}$ описывают две независимые поляризации плоского волнового возмущения, которые отличаются друг от друга поворотом на угол $\pi/4$ (рис. 3.5.2).

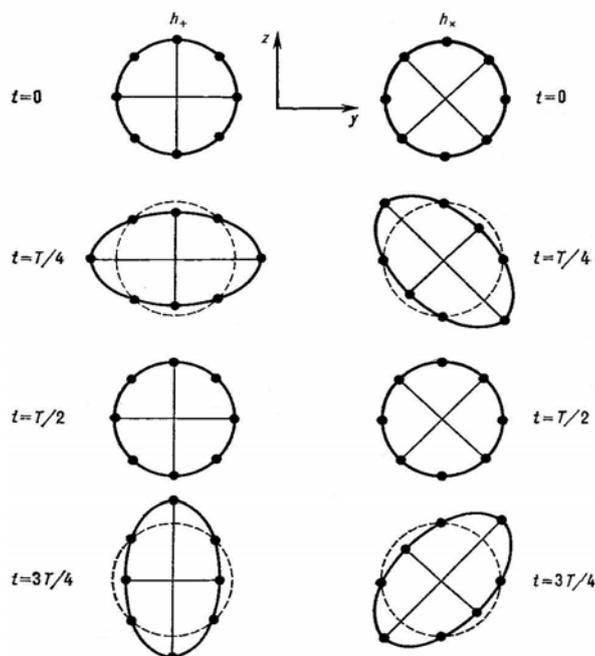


Рис.3.5.2. Смещение пробных точек в поляризованном волновом возмущении вакуумной протяженности. До начала прохождения волны пробные точки располагались на окружности. Каждый рисунок показывает последовательные положения пробных точек через четверть периода плоской волны [23]

Если в отсутствии волнового возмущения квадрат расстояния между соседними пробными точками был равен

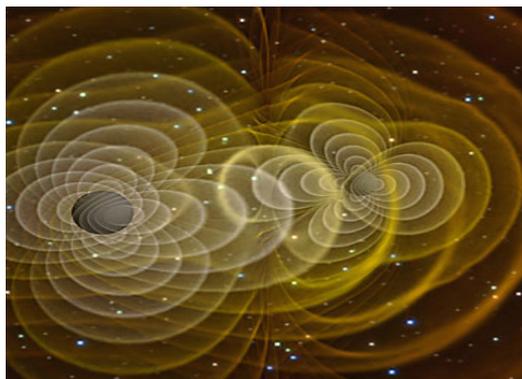
$$dl_0^{(-)2} = -dx^2 - dy^2 - dz^2, \quad (3.5.9)$$

то в волне это расстояние оказывается переменным:

$$dl^{(-)2} = -dx^2 - (1 + h_+^{(-)})dy^2 - (1 - h_+^{(-)})dz^2 - 2h_x^{(-)}dxdy. \quad (3.5.10)$$

В рамках ОТО считается, что источником гравитационных волн являются ускоренные перемещения масс, подобно тому, как ускорение заряженных частиц приводит к излучению электромагнитных колебаний. Казалось бы, перемешивание воздушных масс и океанских течений, пере-

строение коры и вращение недр Планет, звездные и галактические катаклизмы – все это и многое другое должно порождать многочисленные гравитационные волны, подобно тому, как показано на рис. 3.5.3.



<http://imho.net.ua/>

Рис. 3.5.3. Иллюстрация волновых гравитационных возмущений вакуумной протяженности в рамках представлений ОТО

Однако все известные попытки обнаружить гравитационные волны на основании вышеизложенных представлений ОТО так и не увенчались успехом. На рис. 3.5.4 приведена фотография лазерного детектора гравитационных волн, построенного в г. Ливингстон (США, штат Луизиана) в рамках проекта LIGO (Laser Interferometry Gravitational-Wave Observatory).



www.sai.msu.su

Рис. 3.5.4. Лазерный детектор гравитационных волн LIGO в г. Ливингстон (шт. Луизиана)

Другой лазерный детектор сооружен в г. Ханфорде (шт. Вашингтон). Подобные гравитационные интерферометры построены в Италии – VIRGO (Пиза), в Японии – TAMA (Токио), в Германии – GEO (Ганновер).



Рис. 3.5.5. Итальянский детектор гравитационных волн VIRGO с плечами длиной 3 км. Сооружался с 1996-го и введен в строй в 2003 году

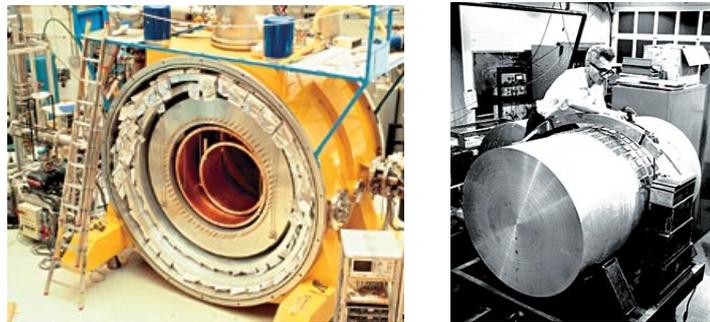


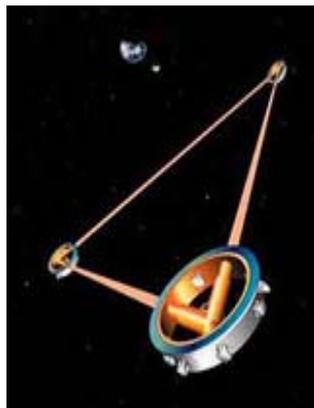
Рис. 3.5.6. Резонансный детектор AURIGA и детектор гравитационных волн Дж. Вебера

Резонансные детекторы гравитационных волн (см. рис. 3.5.6) созданы в Италии AURIGA (Падуа), в Швейцарии EXPLORER (ЦЕРН, Женева), в Италии NAUTILUS (Рим), в США ALLEGRO (Батон Руж, шт. Луизиана).

Однако, несмотря на большие усилия, ни одна из вышеперечисленных экспериментальных установок пока так и не привела к надежной регистрации гравитационных волн.

Отсутствие положительных результатов специалисты объясняют тем, что теоретически ожидаемая интенсивность гравитационных сигналов находится ниже порога чувствительности существующих детекторов.

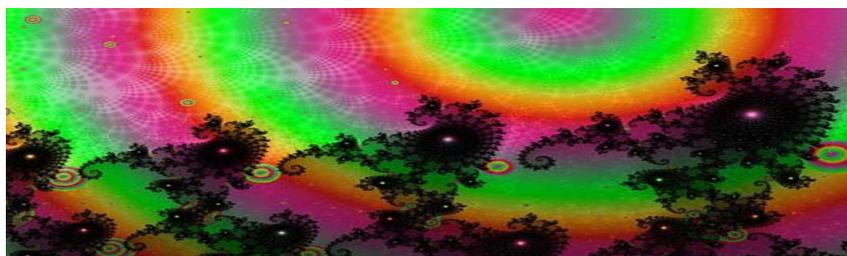
В связи с этим возлагается надежда на разрабатываемый ныне космический проект LISA (Laser Interferometer Space Antenna), который будет включать созвездие из трех искусственных спутников, разнесенных друг от друга на расстояние около 5 миллионов километров. Образуя равносторонний треугольник, эти спутники будут двигаться вокруг Солнца вслед за Землей, отставая от нее примерно на 20 градусов (около 50 миллионов километров). На каждом спутнике будет по два лазера и по два 30-сантиметровых телескопа для слежения за партнерами. Предполагается, что LISA сможет регистрировать низкочастотные гравитационные волны: от 1 Гц до сотысячной доли герца – это меньше одного колебания в сутки. Запуск проекта LISA планируется на 2013 – 2015 гг.



<http://www.scitech.ac.uk/>
Космический лазерный
интерферометр LISA

Приведет ли проект LISA к обнаружению гравитационных волн в том варианте, который предсказывает ОТО? Алсигна полагает, что не приведет! Потому что ОТО рассматривает только одну из 16 возможных квадратичных форм вида (3.5.1) с сигнатурой (+ ---), а это приводит к заведомо ущербному одностороннему рассмотрению.

По мнению Алсигны для того, чтобы построить более корректные модельные представления о структуре гравитационных волн, необходимо учитывать суперпозицию всех 16-ти типов 4-метрик (3.1.10) с сигнатурами (3.1.24). В самом простейшем случае такой подход приводит к двухстороннему рассмотрению, учитывающему как минимум две метрики с взаимно противоположными сигнатурами, например (+ ---) и (- +++).



www.fractopolis.com