

# ОТО эксперимент: сверхновая SN1987A

(К 100-летию Общей теории относительности)

Никитин А. П.

Россия, г. Москва,

тел. 8-919-620-53-81, E-mail: anikitinaaa@mail.ru

## Аннотация

*Общая теория относительности (ОТО), созданная гением А. Эйнштейна с 1907 по 1915 год как геометрическая теория гравитации, развивающая специальную теорию относительности (СТО), вот уже 100 лет не даёт покоя и будоражит умы. С тех пор выполнено много экспериментов, которые с большой точностью подтверждают ОТО.*

*В этой статье мы предлагаем обратить внимание на возможность прямой экспериментальной проверки зависимости скорости света от гравитационного потенциала, о чём А. Эйнштейн писал в 1911 году в своей статье «О влиянии силы тяжести на распространение света» [1, т.1, с.172]. Мы предполагаем, что природа сама поставила этот эксперимент в космических условиях при наличии «тёмной материи», а именно: 23 февраля 1987 года в Большом Магеллановом Облаке вспыхнула удивительная сверхновая звезда SN1987A, свет от которой прилетел на Землю на 2<sup>h</sup> 47<sup>m</sup> позже нейтрино. В статье на основе многочисленных наблюдений и теоретических исследований даётся объяснение этого факта с точки зрения изменения скорости света и нейтрино в зависимости от изменяющегося во времени и места гравитационного потенциала Вселенной.*

Keywords: ОТО, сверхновая SN1987A, свет, фотон, нейтрино, гравитационный потенциал.

## Содержание

1. Введение.
2. Свет и нейтрино в гравитационном поле.
3. Сверхновые звёзды и ОТО.
4. Список литературы.

*«Мне кажется невероятным, чтобы ход какого-нибудь процесса (например, распространения света в пустоте) можно было бы считать независимым от всех остальных процессов в мире»*

А. Эйнштейн [1, т.1, с.319-320]

### 1. Введение

А.Эйнштейн, излагая общую теорию относительности (ОТО), приводит в своих статьях следующие экспериментальные подтверждения ОТО:

- 1.Объяснение аномальной прецессии перигелия Меркурия.

В статье «Объяснение движения перигелия Меркурия в общей теории относительности» 1915 года А. Эйнштейн, выполнив сложные вычисления пришёл к результату: «*Вычисление даёт для планеты Меркурий поворот перигелия на 43" в столетие*» [1, т.1, с.446]

- 2.Искривление лучей света в гравитационном поле.

*«...скорость света в поле тяжести является функцией места..., лучи света, распространяющиеся поперёк поля тяжести, должны искривляться»* [1, т.1, с.172]

- 3.Гравитационное красное смещение, или замедление времени в гравитационном поле.

*«...согласно нашим представлениям, спектральные линии солнечного света должны несколько сместиться по сравнению с соответствующими спектральными линиями земных источников света в сторону красного конца спектра...»* [1, т.1, с.171]

*“У нас нет никаких оснований допускать, что часы находящиеся в точках с различными гравитационными потенциалами, должны рассматриваться как одинаково идущие»* [1,т.1,с.171]

#### 4. Зависимость скорости света от гравитационного потенциала.

Отсюда вытекает следствие фундаментального значения для теории. Если скорость света измерять в различных местах ускоренной системы отсчета  $K'$  в отсутствие гравитационного поля, пользуясь одинаково идущими часами  $U$ , то всюду будет получаться одно и то же значение. Согласно нашему основному допущению, то же самое справедливо для системы  $K$ . Однако отсюда следует, что в местах с различными гравитационными потенциалами при измерении времени мы должны пользоваться по-разному идущими часами. В том месте, которое относительно начала координат обладает гравитационным потенциалом  $\Phi$ , мы должны при измерении времени применять часы, которые при перенесении их в начало координат шли бы в  $\left(1 + \frac{\Phi}{c^2}\right)$  раза медленнее, чем те часы, которыми определяется время в начале координат. Если мы обозначим через  $c_0$  скорость света в начале координат, то скорость света  $c$  в некотором месте с гравитационным потенциалом  $\Phi$  будет равна

$$c = c_0 \left(1 + \frac{\Phi}{c^2}\right). \quad (3)$$

По этой теории, принцип постоянства скорости света справедлив не в той формулировке, в какой он кладется в основу обычной теории относительности.

*«Если мы обозначим через  $c_0$  скорость света в начале координат, то скорость света  $c$  в некотором месте с гравитационным потенциалом  $\Phi$  будет равна*

$$c = c_0 \left(1 + \frac{\Phi}{c^2}\right) \quad [1, \text{т.1, с.172}].$$

где  $\Phi$  — (отрицательная) разность гравитационных потенциалов между поверхностью Солнца и поверхностью Земли.

[1, т.1, с.171]

*«...я придерживаюсь мнения, что принцип постоянства скорости света можно сохранить до тех пор, пока мы ограничиваемся пространственно-временными областями с постоянным гравитационным потенциалом. По-моему, здесь лежит граница применимости не принципа относительности, а принципа постоянства скорости света и тем самым нашей теперешней теории относительности» (статья А.Эйнштейна 1912г. «Относительность и гравитация. Ответ на замечание М. Абрагама» [1, т.1, с.219].*

В своей статье 1917г. «О специальной и общей теории относительности» А.Эйнштейн писал, что «закон постоянства скорости света в пустоте, представляющий собой одну из основных предпосылок СТО, не может претендовать на неограниченную применимость...; ее результаты применимы лишь до тех пор, пока можно не учитывать влияние гравитационного поля на физические явления (например, световые)» [1, с.568].

С времён А. Эйнштейна выполнено много экспериментов, которые с большой точностью подтверждают ОТО, но мы предлагаем обратить внимание на п.4. из этого перечня, и предполагаем, что природа сама поставила этот эксперимент, а именно: 23 февраля 1987 года в местной группе галактик в Большом Магеллановом Облаке на расстоянии  $R=50$  кпк ( $163,0 \cdot 10^3$  св. лет =  $5,1439 \cdot 10^{12}$  s =  $T$ ) на месте голубого сверхгиганта Sanduleak-1 В31 вспыхнула удивительная сверхновая звезда SN1987A, хронология открытия которой следующая:

В  $2^{\text{h}} 52^{\text{m}} 36,79^{\text{s}}$  ( $10357$  s от  $0^{\text{h}} 00^{\text{m}} 00^{\text{s}}$ ) ( $23.124$  UT [3, с.726]) «...23.124 февраля Всемирного времени был обнаружен сигнал на Монбланской нейтринной обсерватории. Сигнал состоял из 5 импульсов выше энергетического порога  $7$  МэВ за промежуток  $7$  s. Это согласуется и по энергии, и по продолжительности с предсказаниями стандартных моделей относительно

коллапса железного ядра на расстоянии 50кпк. Вероятность случайного совпадения с вспышкой SN1987A равна единице на  $10^4$  лет» (телекс К.Кастаньоли из Турина) [3, с.726] В Римской группе на детекторе гравитационных волн на 1,4s раньше Монбланской группы был обнаружен гравитационный сигнал-движение 2300–килограммового стержня. [3, с.727] «Во время 2:52:35,4 UT были зарегистрированы также импульсы на двух гравитационных антеннах (в Риме и Мэриленде)» [5]

В 7<sup>h</sup> 35<sup>m</sup> (23.316 UT [3, с.726]) (через 16943s после нейтринных вспышек под горой Монблан и за  $\sim 3^h = 10800s$  до первого обнаружения на фотопластинке) нейтринные обсерватории Kamiokande II, IMB и Баксан зарегистрировали вспышки нейтрино, длившиеся около 13 секунд. «Промежуток энергий был от порога в 7,5 до 36 МэВ» [3, с.727] Это был первый случай регистрации нейтрино от вспышки сверхновой. По современным представлениям, энергия нейтрино составляет около 99% общей энергии, выделяемой при вспышке. По оценкам при вспышке сверхновой SN1987A выделилось порядка  $10^{58}$  нейтрино с общей энергией  $10^{46}$  Дж.

В 9<sup>h</sup> 22<sup>m</sup> [23.390UT] (через 6420s после нейтринной вспышки в Kamiokande II, IMB и Баксан) – «Еще раньше (Feb. 23.390UT) А. Джонс не заметил какого-либо объекта с помощью своего поискового телескопа» [4, с.563] - «верхняя оценка блеска по наблюдению А. Джонса (A. Jones) в 9<sup>h</sup> 22<sup>m</sup> и открытие радиоизлучения SN1987A» [4, с.564]

В 10<sup>h</sup> 24<sup>m</sup> [23.433UT] (через 2<sup>h</sup> 47<sup>m</sup> = 10020s после нейтринной вспышки в Kamiokande II, IMB и Баксан) Supernova SN1987A достигает звёздной величины 6,0, а

В 10<sup>h</sup> 41<sup>m</sup> [23.445UT] (через 11160s после нейтринной вспышки в Kamiokande II, IMB и Баксан) Supernova SN1987A достигает звёздной величины 6,2– Дж. Джеррад и Р.Х. Мак-Нот обнаружили Supernova SN1987A на фотоплёнках. [3, с.726]

Энергии нейтрино, зарегистрированные от Supernova 1987A, составили: 5,8–7,8 МэВ в LSD, 20-40 МэВ в IMB, 7,5-35,4 МэВ в KAMIOKANDE II и массы электронных нейтрино, измеренные от SN1987A, составили от  $m_{\nu_e} < 6eV$  до  $m_{\nu_e} < 30eV$ .

На основе вышеприведённой фактической информации можно констатировать, что зарегистрированная разница между нейтринными вспышками в 7<sup>h</sup> 35<sup>m</sup> (23.316 UT) и последующей оптической фотонной вспышкой в 10<sup>h</sup> 24<sup>m</sup> [23.433UT], (когда SN1987A достигла звёздной величины 6,0), составила 2<sup>h</sup> 47<sup>m</sup> (10020s).

## 2. Свет и нейтрино в гравитационном поле

Первые нейтринный и гравитационный всплески, зарегистрированные в 2<sup>h</sup> 52<sup>m</sup> 36,79s (10357s) (23.124UT) [3, с.726,727]– это начало процесса гравитационного коллапса звезды Sanduleak-1, когда произошло катастрофическое сжатие железного ядра звезды с обрушением оболочки, «звезда взорвалась внутрь» так, что даже нейтрино не могли покинуть звезду [4,5,6,9]. Через 4<sup>h</sup> 43<sup>m</sup>, когда по Гамову Г.А. (George Gamow) барионная материя звезды в результате колоссального сжатия превратилась в «тёмную энергию» нейтринного излучения, которое в виде обратной ударной волны сообщило оболочке и «спровоцировало» фотонное излучение, и звезда вспыхнула как сверхновая, увеличивая во много раз своё фотонное свечение, так, что нейтринное и фотонное излучение практически одновременно оторвались от поверхности звезды, выбросив в Космос до 99% вещества звезды, но прилетели на Землю с необъяснённой пока разницей между наблюдаемыми нейтринными вспышками в 7<sup>h</sup> 35<sup>m</sup> (23.316 UT) и последующей оптической фотонной вспышкой в 10<sup>h</sup> 24<sup>m</sup> [23.433UT], составившей 2<sup>h</sup> 47<sup>m</sup> (10020s).

Джеймс Френсон (James Franson) из University of Maryland в журнале New Journal of Physics опубликовал статью [2], в которой, ссылаясь на наблюдения за сверхновой звездой SN1987A, полагает, что фотоны могут замедляться на пути к Земле, и таким образом отстать от нейтрино, в связи с эффектом вакуумной поляризации.

В этой статье мы обращаем внимание на следующее возможное решение этой проблемы, когда скорость света в соответствии с ОТО является функцией от гравитационного потенциала Вселенной:

В нашем нелокальном мире, в котором нет ничего абсолютного, происходит несколько всеобъемлющих космических процессов, один из которых – образование барионной материи, результатом которого в космическом масштабе является изменение гравитационного потенциала Вселенной во времени, равного в настоящий момент  $\varphi_t=c_t^2$ . Соответственно, вместе с гравитационным потенциалом согласно ОТО должно изменяться и значение скорости света, равное  $c_t=(\varphi_t)^{1/2} \neq const$ . Фундаментальный космический фактор изменения во времени всех процессов во Вселенной согласно современных наблюдений равен постоянной Хаббла (Hubble)  $H_0=2,3655 \cdot 10^{-18}$ .

В соответствии с теорией относительности рассмотрим события взрыва сверхновой звезды Supernova SN1987A и регистрации нейтринной и фотонной вспышек на Земле в покоящейся системе отсчёта, принимая за начало координат пространства-времени сверхновую звезду Supernova SN1987A с направлением оси  $x$  на Землю ( $t=0, x=0, y=0, z=0$ ). В этом случае, принимая начало одновременного нейтринного и фотонного излучения за начало отсчёта времени, в синхронизации часов на SN1987A и на Земле нет необходимости, потому что единственное, что фактически мы можем измерить на Земле — это разницу во времени между «прилётом» на Землю нейтринного и фотонного излучения, которую, естественно, будем измерять по земным часам; тогда событие регистрации фотонов на Земле будет иметь координаты ( $t=T, x=R, y=0, z=0$ ).

Известно, что в настоящее время гравитационный потенциал наблюдаемой барионной материи Вселенной составляет  $\Delta\varphi_c=c^2$ .

Гравитационный потенциал Вселенной в момент взрыва сверхновой SN1987A  $\Delta\varphi_T$ , то есть 163 тыс. лет назад, в галактике Большое Магелланово Облако (Large Magellanic Cloud) (LMC) составлял

$$\Delta\varphi_T = \Delta\varphi_c - \Delta\varphi_c T H_0 = c^2 (1 - T H_0)$$

где  $T=163$  тыс. лет  $=5,1439 \cdot 10^{12}$  s – время, прошедшее по часам на Земле с момента взрыва сверхновой SN1987A,  $H_0$  – постоянная Hubble.

Наш эксперимент прошёл в космических условиях при наличии «тёмной материи», энерго-гравитационный потенциал которой составляет  $\varphi_d = 4\pi/3 \cdot c^2 = 4,18879 \cdot c^2$  (с учётом данных миссии WMAP и космической обсерватории Plank по соотношению барионной и «тёмной материи» во Вселенной)

Космический фактор изменения в 1s секунду гравитационного потенциала барионной материи в Космосе:

$$\gamma_b = \Delta\varphi/\varphi = H_0 = 2,3655 \cdot 10^{-18},$$

где  $\Delta\varphi$  – изменение энергипотенциала в 1s секунду,  $\varphi=c^2$

Космический фактор изменения в 1s энерго-гравитационного потенциала «тёмной материи» в Космосе, определяющего нейтринное излучение, в  $4\pi/3$  раза больше и равен:

$$\gamma_d = \Delta\varphi_d/\varphi_d = 4\pi/3 \cdot H_0 = 9,908583 \cdot 10^{-18},$$

где  $\Delta\varphi_d$  – изменение энергипотенциала «тёмной материи» в 1s секунду,  $\varphi_d = 4\pi/3 \cdot c^2 = 4,18879 \cdot c^2$  – энергетический потенциал «тёмной материи»

$$\Delta t_f = T(H_0)^{1/2} = 5,1439 \cdot 10^{12} \cdot 1,5380 \cdot 10^{-9} = 7,9114 \cdot 10^3 \text{ s} = 7911 \text{ s.}$$

$$\Delta t_n = T(4\pi/3 H_0)^{1/2} = 5,1439 \cdot 10^{12} \cdot 3,1478 \cdot 10^{-9} = 16,1919 \cdot 10^3 \text{ s} = 16192 \text{ s,}$$

где  $T=5,1439 \cdot 10^{12}$  s – время, прошедшее по часам на Земле

Учтём по пути фотонов и нейтрино дополнительные к гравитационному потенциалу Вселенной гравитационные потенциалы нашей Галактики Млечный Путь (Milky Way galaxy) и LMC galaxy (БМО), а потенциалы галактики Small Magellanic Cloud (SMC) (ММО), Солнца, Луны, Земли не будем учитывать как незначительные второго и третьего порядков. Энерго-гравитационный потенциал на орбите Солнца в нашей Galaxy равен

$$V^2 = (2,2 \cdot 10^5)^2 = 4,84 \cdot 10^{10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} = \Delta\varphi_G.,$$

где  $V=220$  km/s — скорость Земли в составе Солнечной системы вокруг центра галактики

Гравитационный потенциал барионной материи в центре galaxy LMC равен (влияние galaxy SMC не будем учитывать)

$$\Delta\varphi_{LMC}=GM/R=6,67384 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{40}/4,63 \cdot 10^{19}=2,883 \cdot 10^{10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}.$$

Вероятность того, что Supernova 1987A взорвалась в центре LMC galaxy мала; поэтому оценочно примем  $\sim 50\% \sim 1/2$  от  $\Delta\varphi_{LMC}$ :

$$\Delta\varphi_{LMC}=2,883 \cdot 10^{10} \cdot 0,5=1,4415 \cdot 10^{10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}, \text{ тогда}$$

$$\Delta\varphi_G - \Delta\varphi_{LMC}=4,84 \cdot 10^{10} - 1,4415 \cdot 10^{10}=3,3985 \cdot 10^{10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$$

*Hubble factor* для изменения разницы гравитационных потенциалов между нашей Галактикой и LMC равен

$$\gamma_{bG}=\Delta\varphi_G - \Delta\varphi_{LMC}/c^2 T=3,3985 \cdot 10^{10}/8,9876 \cdot 10^{16} \cdot 5,1439 \cdot 10^{12}=0,0736 \cdot 10^{-18}$$

$$(\gamma_{bG})^{1/2}=0,2713 \cdot 10^{-9}$$

$$(\gamma_{dG})^{1/2}=0,2713 \cdot 10^{-9} \cdot 2,0466=0,5553 \cdot 10^{-9}$$

$$\Delta t_{rG}=T(\gamma_{bG})^{1/2}=5,1439 \cdot 10^{12} \cdot 0,2713 \cdot 10^{-9}=1396 \text{ s.}$$

$$\Delta t_{nG}=T(\gamma_{dG})^{1/2}=2856 \text{ s}$$

Теоретическая расчётная разница во времени между прилётом нейтрино и фотонами на Землю от Supernova 1987A, в предположении изменения скоростей фотонов и нейтрино как функции гравитационных потенциалов барионной и «тёмной» материи во Вселенной, составит

$$\Delta t=(\Delta t_n+\Delta t_{nG}) - (\Delta t_f+\Delta t_{rG})=(16192\text{s}+2856\text{s}) - (7911\text{s}+1396\text{s})=19048 - 9307\text{s}=9741\text{s}=2^{\text{h}} 42^{\text{m}}.$$

Фактическая разница между наблюдаемыми нейтринными вспышками в  $7^{\text{h}}35^{\text{m}}$  ( $23.316 \text{ UT}$ ) и последующей оптической фотонной вспышкой в  $10^{\text{h}}24^{\text{m}}$  [ $23.433 \text{ UT}$ ] составила  $2^{\text{h}}47^{\text{m}}$  ( $10020\text{s}$ ) (расхождение теории с экспериментом  $\sim 3\%$ ), что с большой точностью подтверждает ОТО.

III

### 3. Сверхновые звёзды и ОТО

В августе 2011 года и 3 января 2012 года детекторы нейтринной обсерватории Ice Cube в Антарктиде зафиксировали две частицы с высокой энергией в  $1,0-1,14 \text{ ПэВ}$  – названные «Берт» и «Эрни».

По аналогии с Supernova 1987A, которая вспыхнула на расстоянии  $50 \text{ кпк}$  и разница между прибытием на Землю нейтрино и фотонов составила  $2^{\text{h}} 47^{\text{m}}$ , нами выполнены расчёты для Supernova SN2011fe из galaxy Messier M101 (NGC5457), вспыхнувшей 23 августа 2011 года на расстоянии  $6439 \text{ кпк}$ , нейтрино от которой должны прилететь на  $\sim 15$  суток раньше, что, видимо, и зафиксировали на Ice Cube как нейтринная частица «Берт» в начале августа 2011 года. Зафиксированная 3 января 2012 года нейтринная частица «Эрни» была вестником фотонной вспышки Supernova SN2012aw, наблюдаемой с 16 марта 2012 года на расстоянии  $11650 \text{ кпк}$  в M95 galaxy.

13-14 января 2014 года на IceCube должна быть зафиксирована нейтринная вспышка от Supernova SN2014J из M82 galaxy, что будет служить подтверждением зависимости скорости света от гравитационного потенциала в соответствии с ОТО.

Возможен и следующий наблюдательный космологический эксперимент для подтверждения ОТО: после зарегистрированной нейтринной вспышки через время  $[(4\pi/3-1)H_0]^{1/2} T/c^2$  секунд (+учёт гравитационных потенциалов галактик) должна произойти оптическая фотонная вспышка сверхновой звезды.

### Список литературы

- [1] Эйнштейн А. СНТ, т 1 М.;Наука, 1965.  
 [2] J D Franson. Apparent correction to the speed of light in a gravitational potential. *New Journal of Physics* 16 (2014) 065008, doi: 10.1088/1367-2630/16/6/065008

- [3] Morrison D. R. O. Review of Supernova 1987A: Preprint CERN, 26 January, 1988.  
Моррисон Д.Р.О. Сверхновая 1987А: Обзор. УФН, Том 156, вып. 4, декабрь 1988 г.
- [4] Имшенник В.С., Надёжин Д.К. Сверхновая 1987А в Большом Магеллановом Облаке: наблюдения и теория. УФН, Том 156, вып. 4, декабрь 1988 г.
- [5] О.Г. Рязская. Нейтрино от гравитационных коллапсов звезд: современный статус эксперимента. УФН, Том 176, №10, октябрь 2006г.
- [6] В.А. Рябов. Нейтрино сверхвысоких энергий от астрофизических источников и распадов сверхмассивных частиц. УФН, Том 176, №9, сентябрь 2006г.
- [7] М. Кошиба. Рождение нейтринной астрофизики. (Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2002 г.) УФН, Том 174, №4, апрель 2004г.
- [8] Ф. Райнес. Нейтрино: от полтергейста к частице. (Нобелевская лекция. Стокгольм, 1995г.) УФН, Том 166, №12, декабрь 1996г.
- [9] Имшенник В.С. Ротационный механизм взрыва коллапсирующих сверхновых и двухстадийный нейтринный сигнал от сверхновой 1987А в Большом Магеллановом Облаке. УФН, Том 180, №11, ноябрь 2010г.
- [10] Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam <http://static.arxiv.org/pdf/1109.4897.pdf>