

УДК 524.8

ЗВЕЗДА ИЗ ВАКУУМНОПОДОБНОГО ВЕЩЕСТВА

© 2019 г. И. Д. Новиков^{1,2,3*}, Д. И. Новиков¹

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²The Niels Bohr International Academy, The Niels Bohr Institute, Copenhagen, Denmark

³Российский научный центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

Поступила в редакцию 19.10.2018 г.; после доработки 22.11.2018 г.; принята к публикации 27.11.2018 г.

В рамках общей теории относительности построена модель звезды, состоящей из вакуумноподобного вещества. Проанализированы ее устойчивость и другие физические свойства. Произведено сравнение модели звезды и космологической модели состоящих из одинакового вакуумноподобного вещества с давлением, равным плотности энергии с обратным знаком.

DOI: 10.1134/S0004629919040054

1. ВВЕДЕНИЕ

В целом ряде работ [1, 2, 3, 4] рассматривалась возможность существования объектов получивших название “гравастары”, которые заменяют собой черные дыры. Согласно этой концепции при образовании черной дыры квантовые эффекты приводят к тому, что возникает объект, состоящий из вакуумноподобной материи с уравнением состояния

$$P_v = -\rho_v, \quad \rho_v > 0, \quad (1)$$

где P_v — вакуумное давление, ρ_v — вакуумная плотность массы, $c = 1$. Этот объект окружен тонкими слоями особой материи, связанной с квантовыми фазовыми переходами, придуманными авторами. Эти слои находятся на месте, где должен бы находиться горизонт событий черной дыры.

Главная цель указанных работ заключалась в противопоставлении концепции гравастаров концепции черных дыр. Особенно детально аналогичные вопросы рассмотрены в [5, 6] (см. также приведенные в них ссылки).

В данной работе мы, используя теорию строения звезд, рассмотрим объекты, состоящие из вакуумноподобной материи, размеры которых никак не связаны с размерами черных дыр. Оболочки таких объектов должны быть из материи со специальным уравнением состояния.

Одним из важнейших открытий современной космологии является обнаружение темной энергии, создающей гравитационное отталкивание [7, 8, 9, 10, 11]. Теоретическими предшественниками этого

открытия были предложенный А. Эйнштейном λ -член в уравнениях общей теории относительности [12] и теория инфляции в начале космологического расширения Вселенной [13]. Совокупность наблюдательных данных и их интерпретация [14–17] приводят к выводу, что темная энергия может рассматриваться как вакуумноподобная материя с уравнением состояния (1). Еще одно название такого вещества — “квинтэссенция”.

Неоднократно рассматривалось, какое гравитационное ускорение создается разными распределениями вакуумноподобного вещества [18, 19, 20]. Часто неосторожное обобщение выводов о гравитационном ускорении, создаваемом таким веществом в однородных космологических моделях на общий случай, вело к ошибочным выводам. Такие примеры приведены в работах [19, 20]. Приведем пример подобного неверного вывода. В работе [10] А.Г. Чернин пишет: “...согласно общей теории относительности тяготение определяется не только плотностью среды (как это предполагается в ньютоновской теории), но и ее давлением. При этом эффективная “гравитационная плотность” в общем случае выражается в виде суммы двух слагаемых:

$$\rho_{\text{eff}} = \rho + 3P.”$$

В [19, 20] показано, что это высказывание ошибочно.

В указанных выше работах рассматривались ускорения, которые в рамках общей теории относительности создаются сферически симметричным распределением вещества, но не рассматривалась возможность существования тела, подобного звезде из вакуумноподобного вещества. В настоящей работе демонстрируется существование такой возможности. Если бы было справедливо приведенное

*E-mail: novikov@asc.rssi.ru

выше высказывание об “эффе́ктивной гравитационной плотности”, то существование таких тел было бы невозможно.

2. РАВНОВЕСИЕ ЗВЕЗДЫ ИЗ ВАКУУМНОПОДОБНОГО ВЕЩЕСТВА

Выпишем уравнения гравитационного ускорения и уравнение равновесия звезды в общей теории относительности. Выражение для метрики ds^2 в случае статического сферически симметричного распределения вещества записывается в виде [21]:

$$ds^2 = -e^{2\Phi(r)} dt^2 + h(r) dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi). \quad (2)$$

Уравнение для ускорения:

$$\frac{d\Phi(r)}{dr} = G \frac{m(r) + 4\pi r^3 P(r)}{r[r - 2Gm(r)]}, \quad (3)$$

$$m(r) = 4\pi \int_0^r \rho(x) x^2 dx,$$

где ρ — плотность массы, $P(r)$ — давление. Координатный вектор свободного падения F_r равен [22]:

$$F_r = -\frac{d\Phi}{dr}. \quad (4)$$

Уравнение равновесия звезды:

$$\frac{dP}{dr} = -(P + \rho) \frac{d\Phi}{dr}. \quad (5)$$

Применим теперь эти уравнения для вакуумноподобного вещества с $P_v = -\rho_v$, $\rho_v > 0$. В этом случае уравнение для ускорения запишется в виде

$$\frac{d\Phi}{dr} = -\frac{8\pi}{3} G \frac{r\rho_v}{1 - \frac{8\pi}{3} Gr^2 \rho_v}. \quad (6)$$

Уравнение равновесия:

$$\frac{dP_v}{dr} = -\frac{d\rho_v}{dr} = -(P_v + \rho_v) \frac{d\Phi}{dr} = 0. \quad (7)$$

Модель звезды, как и в случае обычного вещества, начинает строиться из центра. То есть задаются плотность и давление в центре ρ_c и P_c , после чего путем решения уравнения равновесия находится распределение плотности и давления как функция радиуса. Здесь, однако, градиенты ρ_v и P_v равны нулю, т.е. решением является $P_v = -\rho_v = P_c = -\rho_c = const$. Значение постоянной может быть любым. Хотя внутри звезды есть гравитационное ускорение, согласно уравнению (7) это никак не влияет на P_v и ρ_v . Это уникальная особенность вакуумноподобного состояния.

Выражения для метрики имеют вид:

$$h(r) = \left(1 - \frac{8}{3}\pi Gr^2 \rho\right)^{-1}, \quad (8)$$

а $e^{2\Phi(r)}$ находится интегрированием (6). Построение модели звезды можно продолжить вплоть до значений $r = R$, обращающих h в бесконечность:

$$R = r = \sqrt{\frac{1}{\frac{8}{3}\pi G\rho_v}}. \quad (9)$$

Это наибольший размер звезды из вакуумноподобного вещества с плотностью ρ_v . Однако интегрирование можно прекратить при любом $r < R$. При этом отдельно необходимо рассматривать границу звезды. При классическом подходе к вопросу на границе вакуумноподобной звезды давление от $P_v = -\rho_v$ должно непрерывным образом понижаться по модулю до нуля. Так как физика переходного слоя не фиксирована, то такой переход всегда можно осуществить. При этом производная $dP/d\rho$ может быть отрицательной.

3. УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛИ

Мы рассмотрим только физику основной массы вакуумноподобной звезды, то есть вакуумноподобного вещества. Так как мы не определяем физику граничного переходного слоя, то исключаем его из анализа устойчивости. Как отмечено выше, вещество с $P = -\rho$, $\rho > 0$ никак не реагирует на внешние воздействия. Запишем уравнение для изменения энергии E в объеме V при изменении объема:

$$dE = -PdV. \quad (10)$$

Учитывая, что $E = \epsilon V$, где ϵ — плотность энергии, равная ρ (напомним, что мы всегда полагаем $c = 1$), имеем:

$$d(V\epsilon) = Vd\epsilon + \epsilon dV = -PdV, \quad (11)$$

откуда немедленно следует:

$$Vd\epsilon = -(P + \epsilon)dV. \quad (12)$$

А с учетом уравнения состояния $P = -\epsilon$ получаем:

$$d\epsilon = d\rho_v = 0. \quad (13)$$

Таким образом, возмущение объема звезды не ведет к изменению давления и плотности, а значит уравнение равновесия (8) будет по-прежнему выполняться. Сказанное означает, что основная масса звезды из вакуумноподобной материи с $P_v = -\rho_v$ находится в состоянии безразличного равновесия.

4. ЗВЕЗДА С $PV = -\rho V$, $\rho V > 0$ И КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ С ТЕМ ЖЕ УРАВНЕНИЕМ СОСТОЯНИЯ

Выше мы рассмотрели возможность построения статичной модели звезды из вакуумноподобного вещества. С другой стороны, известно существование однородной космологической модели с веществом, имеющем то же уравнение состояния. Эта модель имеет плоское трехмерное пространство сопутствующей системы отсчета и находится в состоянии экспоненциального расширения под действием сил гравитационного отталкивания [17]:

$$ds^2 = dt^2 - e^{2t/t_0} \times \quad (14)$$

$$\times [dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi)].$$

Вдобавок к выражению (13) подчеркнем, что давление и плотность инвариантны относительно лоренцевых преобразований [22], они одинаковы во всех системах отсчета, двигающихся друг относительно друга. Как совместить статическое решение (7, 8) с динамическим решением (14)?

Дело в том, что оба эти решения описывают одну и ту же реальность в разных системах отсчета. Для наглядного пояснения этого рассмотрим центральную часть шара (7), (8), достаточно малую, чтобы можно было использовать ньютоновскую теорию: $2GM(r) \ll r$. Тогда (4) переписывается в виде:

$$F_r = \frac{8}{3}\pi G\rho_v r. \quad (15)$$

Введем теперь новую систему отсчета, состоящую из пробных частиц, свободно движущихся в поле ускорений (15):

$$\frac{d^2r}{dt^2} = F_r. \quad (16)$$

Решение этого уравнения дает:

$$r = \exp(8/3\pi G\rho_v t). \quad (17)$$

Это решение описывает расширяющуюся систему отсчета, соответствующую (14) для точного решения. Из-за инвариантных свойств вакуумноподобного вещества давление и плотность не меняются при переходе от одной системы отсчета к другой. Отметим, что система отсчета (14) по отношению к системе отсчета (7) аналогична системе отсчета Леметра к системе отсчета Шварцшильда в задаче о метрике черной дыры. В обоих случаях динамические системы отсчета свободно движутся в поле гравитационных сил статической системы отсчета.

Существенным отличием между этими двумя ситуациями является то, что в случае черной дыры системы отсчета рассматриваются в пустом пространстве, а в нашем случае системы отсчета рассматриваются в вакуумноподобном веществе.

Указанная аналогия простирается дальше. В задаче о черной дыре статическая система Шварцшильда может быть продолжена внутрь только до гравитационного радиуса $R = 2GM$, в то время как система Леметра свободно продолжается далее до $r = 0$. В нашем случае статическая система отсчета (и модель звезды) простирается от $r = 0$ до $r = R$, см. (9). В то же время система отсчета (14) свободно продолжается далее вплоть до бесконечности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе построена и проанализирована модель звезды из вакуумноподобного вещества. Эта модель продолжает коллекцию необычных реальных и гипотетических объектов, предсказанных в рамках общей теории относительности, таких как черные дыры, нейтронные звезды, кротовые норы, звезды с отрицательной массой [24], звезды из конденсата Бозе-Эйнштейна [25]. Некоторые из этих объектов были открыты в реальной Вселенной. Другие ждут своих исследований. В связи с этим интересно вспомнить отмеченное И.С. Шкловским [26] изречение выдающегося астронома и специалиста в общей теории относительности сэра Артура Эддингтона, сделанное в первой половине прошлого века: “Теория относительности — это красивый, но бесплодный цветок”. Сэр А. Эддингтон имел в виду первые десятилетия после создания общей теории относительности, когда не было сделано связанных с ней существенных открытий в астрофизике¹. Тем поразительнее целый каскад неожиданных теоретических и наблюдательных открытий, сделанных в рамках общей теории относительности в последующее время.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Г.С. Бисноватого-Когана за обсуждения. Работа была поддержана программой Президиума РАН П-28.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Cardoso, E. Franzin, and P. Pani, Phys. Rev. Lett. **116**, 171101 (2016). (Erratum: Phys. Rev. Lett. **117**, 089902 (2016))
2. V. Cardoso, S. Hopper, C. F. B. Macedo, C. Palenzuela, and P. Pani, Phys. Rev. D **94**, S. 084031 (2016).
3. P. O. Mazur and E. Mottola, Proc. Nat. Acad. Sci. **101**, 9545 (2004).
4. M. Visser and D. L. Wiltshire, Class. Quant. Grav. **21**, 1135 (2004).

¹ Не считая знаменитых трех малых эффектов ОТО, предсказанных и подтвержденных.

5. S. Troitsky, *J. Cosmology and Astroparticle Physics* **11**, 027 (2016).
6. T. Tamaki and N. Sakai, *Phys. Rev. D* **81**, 124041 (2010).
7. V. Sahni and A. Starobinsky, *Int. J. Mod. Phys. D* **9**, 373 (2000).
8. P. J. Peebles and B. Ratra, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 559, (2003).
9. S. M. Carrol, in *Measuring and Modeling the Universe*, ed. W. L. Freedman, Cambridge Univ. Press, p. 235 (2004).
10. А. Д. Чернин, *Успехи физ. наук* **178**, 267 (2008).
11. В. Н. Лукаш и В. А. Рубаков, *Успехи физ. наук* **178**, 301 (2008).
12. Ya. B. Zeldovich and I. D. Novikov *The structure and Evolution of the Universe* (Univ. of Chicago Press, 1983).
13. И. Д. Новиков *Как взорвалась Вселенная* (Москва: Наука, 1988).
14. P. J. E. Peebles and B. Ratra, *Astrophys. J.* **325**, L17 (1988).
15. V. A. Rubakov, *Phys. Rev. D* **61**, 061501 (2000).
16. P. J. Steinhardt, L. Wang, and I. Zlatev, *Phys. Rev. D.* **59**, 123504 (1999).
17. M. Sami and A. Toporensky, *Mod. Phys. Lett.* **19**, 1509 (2004).
18. Э. Б. Глинер, *Успехи физ. наук* **172**, 221 (2002).
19. И. Д. Новиков, *Успехи физ. наук* **188**, 773 (2018).
20. И. Д. Новиков, Д. И. Новиков, Н. С. Кардашев, *Астрон. журн.* **95**, 1 (2018).
21. R. M. Wald *General Relativity* (University of Chicago Press, 1984).
22. Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков *Теория тяготения и эволюция звезд* (Москва: Наука, 1971).
23. Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков *Строение и эволюция Вселенной* (Москва: Наука, 1975), с. 135.
24. I. D. Novikov, G. S. Bisnovatiy-Kogan, and D. I. Novikov, *Phys. Rev. D.* **98**, 063528 (2018).
25. D. G. Levkov, A. G. Panin, and I. I. Tkachev, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 151301 (2018).
26. И. С. Шкловский *Звезды* (Москва: Наука, 1975).