

Экспериментальные проверки расширенных теорий гравитации

К. А. Ранну*

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга,
Россия, 119991, Москва, Университетский проспект, д. 13

П. И. Дядина†

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра астрофизики и звездной астрономии.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
(Статья поступила 11.06.2013; подписана в печать 27.09.2013)

Одним из путей экспериментальной проверки теорий гравитации и наложения дополнительных ограничений на значения их параметров является использование параметризованного постньютоновского формализма. В настоящей работе с его помощью была исследована модель Гаусса–Бонне со скалярным полем. В качестве альтернативы геометрическому подходу к расширению ОТО был рассмотрен сценарий с дополнительными измерениями, а именно модель Рэндалл–Сандрума II.

PACS: 95.30.Sf, 11.10.Ef, 95.10.Ce, 11.25.Wx, 04.50.Kd

УДК: 521.19, 523-1/-8, 524.882

Ключевые слова: гравитация, ППН, Гаусс–Бонне, Рэндалл–Сандрум, черные дыры.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены возможности экспериментальной проверки и селекции расширенных теорий гравитации с помощью параметризованного постньютоновского формализма. В связи с возникновением проблем космологической постоянной, темной материи и ускоренного расширения Вселенной необходимость модификации Общей Теории Относительности (ОТО) не вызывает сомнений. В течение почти всего XX века создавались различные теории гравитации, так что неизбежно встал вопрос об их экспериментальной проверке. Параметризованный постньютоновский формализм был создан для сравнения метрических моделей гравитации друг с другом и с экспериментом. Метрические теории требуют, чтобы материя и негравитационные поля не зависели от возможных далекодействующих полей тяготения, которые лишь помогают создавать кривизну пространства-времени, связанную с метрикой [1]. Эти поля могут создаваться материей и совместно с ней могут влиять на метрику, но непосредственно взаимодействовать с материей они не могут. Материя реагирует только на метрику. Соответственно метрика и уравнения движения материи являются первичными теоретическими категориями, и одна метрическая теория отличается от другой только тем характерным способом, каким материя и, возможно, другие поля тяготения воздействуют на пространство-время.

1. ПАРАМЕТРИЗОВАННЫЙ ПОСТНЬЮТОНОВСКИЙ ФОРМАЛИЗМ

Параметризованный постньютоновский формализм требует выполнения следующих условий [1]:

- приближение слабого поля;
- асимптотически плоское пространство;
- малые скорости движения материи, которое подчиняется гидродинамическим уравнениям для идеальной жидкости.

В рамках ППН-формализма метрика представляется в виде суммы плоской метрики Минковского $\eta_{\mu\nu}$ и поправок:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}. \quad (1)$$

В первом постньютоновском пределе эти поправки имеют следующий порядок по скорости движения материи:

$$h_{00} \sim O(2) + O(4), \quad h_{0j} \sim O(3), \quad h_{ij} \sim O(2). \quad (2)$$

Они учитывают такие возможные эффекты, как кривизна пространства, нелинейность закона суперпозиции для гравитационного взаимодействия, нарушение законов сохранения и наличие привелигированного положения или системы отсчета. Метрика приводится к некоему стандартному виду, и все вышеупомянутые эффекты отображаются с помощью десяти постньютоновских параметров, значения которых установлены экспериментально с достаточно хорошей точностью (Табл. 1). Во-втором постньютоновском пределе поправки имеют следующие порядки:

$$h_{00} \sim O(6), \quad h_{0j} \sim O(5), \quad h_{ij} \sim O(4) \quad (3)$$

и описывают эффекты при излучении гравитационных волн [2, 3].

*E-mail: rannu@xray.sai.msu.ru

†E-mail: guldur.anwo@gmail.com

Таблица 1: Постньютоновские параметры

ППН-параметр	Физический смысл в ОТО	Значение в ОТО	Экспериментальное значение	Эффекты
γ	кривизна пространства, создаваемая единицей массы покоя	1	$1 + 2.3 \times 10^{-5}$	задержка и отклонение света
β	степень нелинейности закона суперпозиции для гравитации	1	$1 + 1.1 \times 10^{-4}$	эффект Нордтведта, смещение перигелия
ξ	наличие эффектов привилегированного положения	0	1×10^{-3}	приливы Земли
α_1	наличие эффектов	0	1×10^{-4}	круговая поляризация
α_2	привилегированной	0	4×10^{-7}	прецессия оси
α_3	системы отсчета	0	4×10^{-20}	самоускорение
ς_1	нарушение закона	0	2×10^{-2}	—
ς_2	сохранения	0	4×10^{-5}	ускорение двойного пульсара
ς_3	полного импульса	0	1×10^{-8}	Зй закон Ньютона
ς_3		0	6×10^{-3}	—

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАСШИРЕНИЮ ОТО

Весьма распространенным методом расширения ОТО является так называемый геометрический подход, который реализуется в гравитации Лавлока и, например, в моделях $f(R)$ -гравитации. Гравитация Лавлока хорошо воспроизводит физику на малых расстояниях (ньютоновский предел), но не решает проблем темной материи, темной энергии и космологической постоянной [4]. В теориях, которые описывают эти явления (R^α , $\ln R$), нет предела слабого поля [5–9].

Целью нашей работы является рассмотрение постньютоновской параметризации для гравитации Лавлока второго порядка по кривизне со скалярным полем [11, 12], которая объединяет геометрический подход к расширению ОТО с введением дополнительных полей и является таким образом скалярно-тензорной теорией. Действие в рамках данной модели имеет вид:

$$S = \frac{1}{16\pi} \int d^4x \sqrt{-g} [-R + 2\partial_\mu \phi \partial^\mu \phi + e^{-2\phi} S_{GB}], \quad (4)$$

где $\phi = D/r + \dots$ — скалярное поле, а $S_{GB} = R_{ijkl}R^{ijkl} - 4R_{ij}R^{ij} + R^2$ — член Гаусса–Бонне. Однако в статическом случае влияние скалярного поля нивелируется, и теория вырождается до полностью геометрической. Вклад члена высших порядков по кривизне в параметризованную метрику $h_{\mu\nu} \sim O(8)$. Эта величина лежит за рамками не только первого, но и второго постньютоновского предела, что легко можно видеть, сравнивая данный результат с формулами (2) и (3). Формализм для третьего постньютоновского предела не разработан, поэтому можно с уверенностью сказать, что гравитация Лавлока второго порядка по кривизне не отличима от ОТО эксперимен-

тально. Рассмотрение более высоких порядков по кривизне приведет к более высокому порядку по скорости материи в поправке к плоской метрике $h_{\mu\nu}$. В статическом случае влияние скалярного поля отсутствует в соответствии с теоремой Уиллера об отсутствии скалярных волос у черной дыры, а в динамическом пре-небрежимо мало, как было показано в работе [13].

3. НЕКОМПАКТНЫЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Одним из способов расширения ОТО является рассмотрение дополнительных измерений, в частности, сценарий мира на бране с некомпактным дополнительным. Рассмотрим решение типа «черная дыра» модели Рандалл–Сандрума с одной браной (RSII) [14]. В рамках подхода AdS_5/CFT_4 [15, 16] уравнения поля имеют следующий вид:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G_4 T_{\mu\nu}^{brane} + \epsilon^2 \{16\pi G_4 \langle T_{\mu\nu}^{CFT} [g] \rangle + a_{\mu\nu} [g] + \log \epsilon b_{\mu\nu} [g]\} + O(\epsilon^4 \log \epsilon), \quad (5)$$

где $T_{\mu\nu}^{brane}$ — тензор энергии-импульса материи, локализованной на бране, G_4 — 4-мерная постоянная Ньютона, $T_{\mu\nu}^{CFT} [g]$, $a_{\mu\nu} [g]$, $b_{\mu\nu} [g]$ — тензоры, зависящие только от метрики и скалярной и тензорной кривизн и появляющиеся в результате перехода от пятимерных уравнений поля к эффективным четырехмерным, а ϵ — бесконечно малая величина, характеризующая координату браны по пятому измерению, то есть ее положение в балке. Значение этой координаты должно быть равным нулю, что затрудняет практические расчеты, поэтому и была введена величина ϵ [14].

Применив ППН-параметризацию и используя экспериментальные данные, можно получить следующие

оценки в планковских единицах:

$$\epsilon^2 \Lambda = -5.8193 \cdot 10^{-81}, \quad (6)$$

$$\Lambda = -6 \rightarrow \epsilon = 9.8483 \cdot 10^{-41} \sim 0. \quad (7)$$

Таким образом, подход, описанный в работе [14], представляется полностью корректным. В экспериментах в Солнечной системе рассмотренная модель хорошо согласуется с ОТО, но дает поправки в метрику, ощутимые уже в постньютоновском пределе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результат рассмотрения первого и второго постньютоновских пределов гравитации высших порядков по кривизне в виде члена Гаусса–Бонне можно обобщить на другие модели гравитации Лавлока и даже на теории $f(R)$, имеющие предел слабого поля. Все эти модели хорошо согласуются с ОТО и с наблюдениями на масштабах Солнечной системы. Более того, они оказываются экспериментально неотличимы от ОТО и друг от друга в пределе слабого поля и пока не решают проблем темной материи и темной энергии. В связи с этим геометрический подход к расширению

ОТО на данный момент представляется недостаточно эффективным и пока не оправдывает возложенных на него надежд, поэтому встает вопрос о поиске новой физики. Однако область принципиально новой физики сужается по результатам ЛНС. В связи с этим теория Рандалл–Сандрума и другие подобные модели с дополнительными измерениями, изначально предназначенные для решения проблем ускоренного расширения Вселенной, космологической постоянной и темной материи, представляются хорошим обобщением Теории Относительности на сверхмалых и сверхбольших масштабах.

Благодарности

Авторы выражают благодарность профессору Д. Бласу за плодотворное обсуждение данной работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям Российской Федерации (государственный контракт 02.740.11.0575).

-
- [1] Уилл. К. Теория и эксперимент в гравитационной физике (1983).
 - [2] Damour T., Esposito-Farese G. *Class. Quantum Grav.* **9**. P. 2093. (1992).
 - [3] Damour T., Esposito-Farese G. *Phys. Rev. D.* **53**. P. 5541. (1996).
 - [4] Esposito-Farese G. *AIP Conference Proceedings.* **736**. P. 35. (2004).
 - [5] Saaidi Kh., Aghamohammadi A. *Astrophys. Space Sci.* **333**. P. 327. (2011).
 - [6] Multamaki T., Vilja I. *Phys. Lett. B.* **659**. P. 843. (2008).
 - [7] Chiba T. *Phys. Lett. B.* **575**. P. 1. (2003).
 - [8] Chiba T., Smith T. L., Erickcek A. L. *Phys. Rev. D.* **75**. P. 12401. (2007).
 - [9] De Felice A., Tsujikawa S. *Living Rev. Relativity.* **13**. P. 3. (2010).
 - [10] Capozziello S., Stabile A., Troisi A. *Phys. Rev. D.* **76**. P. 104019. (2007).
 - [11] Alexeyev S., Pomazanov M. *Phys. Rev. D.* **55**. P. 2110. (1997).
 - [12] Alexeyev S., Barrau A., Rannu K. *Phys. Rev. D.* **79**. P. 067503. (2009).
 - [13] Sotiriou T., Skenderis K., Solodukhin S. *Commun. Math. Phys.* **217**. P. 084007. (2001).
 - [14] Figueras P., Wiseman T. *Phys. Rev. Lett.* **107**. P. 081101. (2011).
 - [15] de Haro S., Barausse E. *Phys. Rev. D.* **75**. P. 595. (2007).
 - [16] de Haro S., Skenderis K., Solodukhin S. *Class. Quantum Grav.* **18**. P. 3171. (2001).

Experimental verification of extended theories of gravity

K. A. Rannu^{1a}, P. I. Dyadina^{2b}

¹*Sternberg State Institute of Astronomy, Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

²*Department of strophysics and Galactic Astronomy, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

E-mail: ^arannu@xray.sai.msu.ru, ^bguldur.anwo@gmail.com

Parameterized post-Newtonian formalism is one of methods for experimental verification of gravity theories and imposing additional limits on their parameters' values. The Gauss-Bonnet model with scalar field is studied using the PPN-formalism in the present work. The scenario with noncompact extra dimensions namely the Randall-Sundrum II model is considered as the alternative to geometrical approach to GR extension.

PACS: 4.50.Kd, 95.30.Sf.

Keywords: gravity, PPN, Gauss-Bonnet, Randall-Sundrum, black holes.

Received 11.06.2013.

Сведения об авторах

1. Ранну Кристина Аллановна — соискатель, ведущий инженер; тел.: (909) 902-53-52, e-mail: rannu@xray.sai.msu.ru.
 2. Дядина Полина Игоревна — студент; тел.: (916) 750-45-21, e-mail: guldur.anwo@gmail.com.
-