П.И. Дядина

Особенности гибридной метрической-Палатини гравитации в компактных двойных системах

Сессия-конференция «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященная 70-летию В.А.Рубакова

21.02.2025

Гибридная метрическая-Палатини гравитация

$$S = \frac{1}{2k^2}\int d^4x\sqrt{-g}\left[R + f(\Re)\right] + S_m,$$

- g – определитель метрики
- R – скаляр Риччи
- $\Re$ – кривизна Палатини
- S_m – стандартное действие материи
- $k^2=8\pi G/c^4$
- G – гравитационная постоянная
- c – скорость света

T. Harko et al., Phys. Rev. D 85, 084016 (2012)

Скалярно-тензорное представление

$$S = \frac{1}{2k^2}\int d^4x\sqrt{-g}\left[(1+\phi)R + \frac{3}{2\phi}\partial_\mu\phi\partial^\mu\phi - V(\phi)\right] + S_m,$$

ϕ – скалярное поле,

$V(\phi)$ – скалярный потенциал.

S. Capozziello et al., Universe 1 (2015) 2, 199-238

Уравнения поля

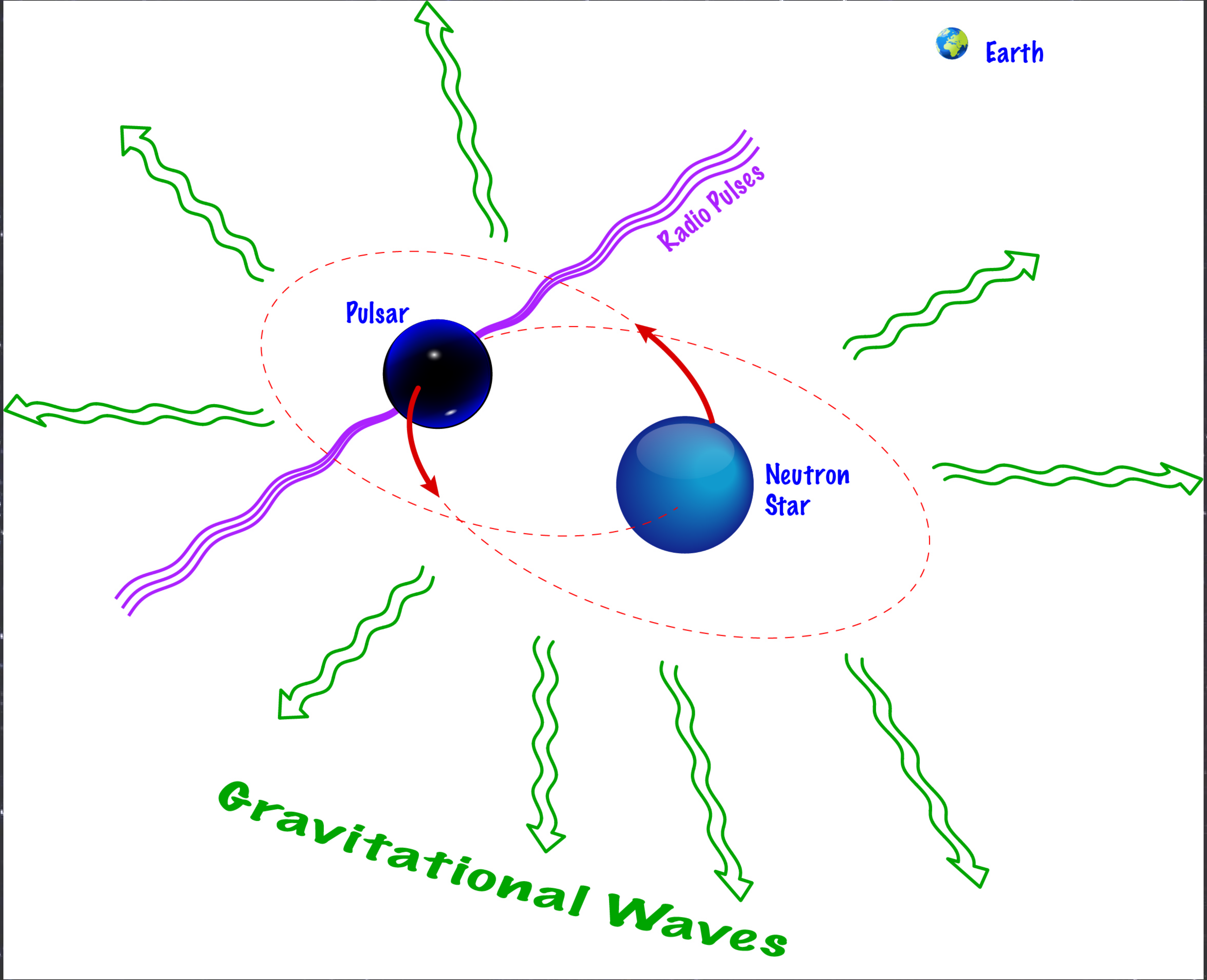
$$R_{\mu\nu} = \frac{1}{1+\phi}\Big(k^2(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T)$$

$$+ \frac{1}{2}g_{\mu\nu}(V(\phi) + \nabla_\alpha\nabla^\alpha\phi) + \nabla_\mu\nabla_\nu\phi - \frac{3}{2\phi}\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi\Big),$$

$$-\nabla_\mu\nabla^\mu\phi + \frac{1}{2\phi}\partial_\mu\phi\partial^\mu\phi + \frac{\phi[2V(\phi) - (1+\phi)V_\phi]}{3} = \frac{\phi k^2}{3}T,$$

$$V_\phi = \frac{dV(\phi)}{d\phi}.$$

S. Capozziello et al., Universe 1 (2015) 2, 199-238


Earth
Radio Pulses
Pulsar
Neutron Star
Gravitational Waves

Линеаризованные уравнения поля

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, \qquad \phi = \phi_0 + \varphi,$$

$$\theta_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}h - \eta_{\mu\nu}\frac{\varphi}{\phi_0 + 1}, \qquad \theta = -h - 4\frac{\varphi}{\phi_0 + 1}.$$

$$\Box\theta_{\mu\nu} = -\frac{2k^2}{\phi_0 + 1}T_{\mu\nu}, \qquad \Box\varphi - m_\phi^2\varphi = k^2 S,$$

где

$$S = -\frac{\phi}{3}[T - 2T_{,\phi}(1+\phi)], \qquad m_\phi^2 = \frac{2V_0 - V_\phi - (1+\phi_0)\phi_0 V_{\phi\phi}}{3}$$

Действие материи

$$S_m = -c^2 \sum_a \int m_a(\phi) d\tau_a,$$

$$m_a(\phi) = m_a(\phi_0)\left[1 + s_a \frac{\varphi}{\phi_0} - \frac{1}{2}\left(\frac{\varphi}{\phi_0}\right)^2 (s_a - s_a^2 - s_a') + O(\varphi^3)\right]$$

$$s_a \equiv \left.\frac{\partial(\ln m_a)}{\partial(\ln \phi)}\right|_{\phi_0}, \quad s_a' \equiv \left.\frac{\partial^2(\ln m_a)}{\partial(\ln \phi)^2}\right|_{\phi_0}.$$

$$s_{WD} \sim 10^{-4}$$

$$s_{NS} \sim 0.2$$

$$s_{BH} \sim 0.5$$

Eardley D. M., 1975, Astrophys. J. Lett., 196, L59
E. Barausse, K. Yagi Phys. Rev. Lett. 115, 211105 (2015)

Тензор энергии-импульса

$$
\begin{aligned}
T^{\mu\nu} = & \quad \sum_a m_a u^\mu u^\nu \left(1 - \frac{h_k^k}{2} - \frac{v_a^2}{2c^2} + s_a \frac{\varphi}{\phi_0}\right) \delta^3(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a(t)), \\
T = & - \quad c^2 \sum_a m_a \left(1 - \frac{h_k^k}{2} - \frac{v_a^2}{2c^2} + s_a \frac{\varphi}{\phi_0}\right) \delta^3(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a(t)), \\
T_{,\phi} = & - \quad c^2 \sum_a \frac{m_a}{\phi_0} \left[s_a \left(1 - \frac{h_k^k}{2} - \frac{v_a^2}{2c^2}\right) - (s_a - s_a^2 - s'_a) \frac{\varphi}{\phi_0} \right] \delta^3(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a(t)).
\end{aligned}
$$

P.I. Dyadina et al., MNRAS 483 (2018) 947.

Уравнения движения

$$\mathbf{a}_a = -\sum_{a\neq b} \frac{\mathcal{G} m_b}{r_{ab}^3} \hat{\mathbf{r}}_{ab},$$

где эффективная гравитационная постоянная

$$\mathcal{G} \quad = \quad \frac{k^2}{8\pi(1+\phi_0)} \left[1 - \frac{\phi_0}{3}(1 + m_\phi r) e^{-m_\phi r} \left(1 - \frac{2s_a}{\phi_0}(\phi_0 + 1)\right)\left(1 - \frac{2s_b}{\phi_0}(\phi_0 + 1)\right)\right].$$

Третий закон Кеплера

$$a^3 (2\pi/P_b)^2 = \mathcal{G} m, \qquad\qquad \frac{\dot{E}}{E} = -\frac{2}{3}\frac{\dot{P}_b}{P_b}.$$

Потери энергии за счет гравитационного излучения

$$
\begin{aligned}
\left\langle \dot{E} \right\rangle = & \quad \left\langle \dot{E}_g^Q \right\rangle + \left\langle \dot{E}_\varphi^D \right\rangle + \left\langle \dot{E}_\varphi^Q \right\rangle + \left\langle \dot{E}_\varphi^{DO} \right\rangle \\
= & - \quad \frac{4k^2\mu^2(\mathcal{G}m)^3}{5\pi(\phi_0+1)r^5}\left[1 - \frac{5\phi_0 r}{288\mathcal{G}m}A_d^2(v_\varphi(\omega))^3\Theta(\omega - m_\varphi)\right. \\
& - \quad \frac{5\phi_0\mu}{144\mathcal{G}m}A_d\bar{A}_d(v_\varphi(\omega))^3\Theta(\omega - m_\varphi) - \frac{\phi_0}{18}A_q^2(v_\varphi(2\omega))^5\Theta(2\omega - m_\varphi) \\
& + \quad \left.\frac{\phi_0}{576}A_dA_o(v_\varphi(\omega))^5\Theta(\omega - m_\varphi)\right].
\end{aligned}
$$

где μ - приведеная масса, $m=m_1+m_2$, R - радиус орбиты,
$v_\phi(\omega)$ - скорость распространения скалярной моды,
$\omega=2\pi/P_b$, P_b - орбитальный период, $\Theta(\omega\text{-}cm_\phi)$ - функция Хевисайда.

$$
\begin{aligned}
A_d &= \frac{2(\phi_0+1)(s_2-s_1)}{\phi_0}, \\
A_q &= 1-\frac{2(\phi_0+1)}{\phi_0}\frac{s_2 m_1+s_1 m_2}{m}, \\
A_o &= \frac{m_1-m_2}{m}-\frac{2(\phi_0+1)}{\phi_0}\frac{s_2 m_1^2-s_1 m_2^2}{m^2}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\bar{A}_d = \quad & - \quad \frac{7}{2(\phi_0+1)}\left(\frac{m_2}{m_1}-\frac{m_1}{m_2}\right)+\frac{7}{\phi_0}\left(\frac{m_2 s_1}{m_1}-\frac{m_1 s_2}{m_2}\right)+\frac{6}{\phi_0}(s_1-s_2) \\
& - \quad \frac{23}{24}\frac{\phi_0}{(\phi_0+1)}\left(\frac{m_2}{m_1}-\frac{m_1}{m_2}\right)-\frac{5}{4}\left(\frac{m_1 s_2}{m_2}-\frac{m_2 s_1}{m_1}\right)-2\left(\frac{m_1 s_1}{m_2}-\frac{m_2 s_2}{m_1}\right) \\
& - \quad \frac{7(\phi_0+1)s_1 s_2}{3\phi_0}\left(\frac{m_2}{m_1}-\frac{m_1}{m_2}\right)-\frac{(s_1+s_2)}{12}\left(\frac{m_2}{m_1}-\frac{m_1}{m_2}\right)-\frac{4(\phi_0+1)}{3\phi_0}\left(\frac{m_2 s_1}{m_1}-\frac{m_1 s_2}{m_2}\right) \\
& - \quad \frac{4(\phi_0+1)(s_1-s_2)}{3\phi_0}-\frac{3(\phi_0+1)}{2\phi_0}\left(\frac{s_2^2 m_1}{m_2}-\frac{s_1^2 m_2}{m_1}\right)-\frac{2(s_1-s_2)}{3} \\
& - \quad \frac{3(\phi_0+1)^2}{\phi_0^2}\left(\frac{s_1^2 s_2 m_2}{m_1}-\frac{s_2^2 s_1 m_1}{m_2}\right)-\frac{8(\phi_0+1)^2}{3\phi_0^2}(s_1^2 s_2-s_2^2 s_1)+\frac{8(\phi_0+1)^2}{3\phi_0^2}(s_1 s_2'-s_2 s_1') \\
& + \quad \frac{4(\phi_0+1)}{3\phi_0}\left(\frac{m_2 s_1'}{m_1}-\frac{m_1 s_2'}{m_2}\right)-\frac{4(\phi_0+1)}{3\phi_0}(s_2^2-s_1^2)+\frac{4(\phi_0+1)}{3\phi_0}(s_1'-s_2') \\
& - \quad \frac{8(\phi_0+1)^2 s_1 s_2}{3\phi_0^2}\left(\frac{m_1}{m_2}-\frac{m_2}{m_1}\right)+\frac{8(\phi_0+1)^2}{3\phi_0^2}\left(\frac{s_1 s_2' m_1}{m_2}-\frac{s_2 s_1' m_2}{m_1}\right).
\end{aligned}
$$

Изменение орбитального периода

$$\begin{aligned}\frac{\dot{P}_b^{th}}{\dot{P}_b^{GR}} = & \frac{\mathcal{G}^{2/3}}{G^{2/3}(\phi_0+1)}\left[1 - \frac{5\phi_0}{288(\mathcal{G}m\omega)^{2/3}}A_d^2(v_\varphi(\omega))^3\Theta(\omega-m_\varphi)\right. \\ - & \frac{5\phi_0\mu}{144\mathcal{G}m}A_d\bar{A}_d(v_\varphi(\omega))^3\Theta(\omega-m_\varphi) - \frac{\phi_0}{18}A_q^2(v_\varphi(2\omega))^5\Theta(2\omega-m_\varphi) \\ + & \left.\frac{\phi_0}{576}A_dA_o(v_\varphi(\omega))^5\Theta(\omega-m_\varphi)\right],\end{aligned}$$

где

$$\dot{P}_b^{GR} = -\frac{192\pi\mu}{5m}\left(\frac{2\pi Gm}{P_b}\right)^{\frac{5}{3}}.$$

$$\left|\frac{\dot{P}_b^{th}}{\dot{P}_b^{GR}} - \frac{\dot{P}_b^{obs}}{\dot{P}_b^{GR}}\right| \leq 2\sigma.$$

Таблица 1: Параметры PSR J0737-3039

Параметр	Физический смысл	Экспериментальное значение
P_b	орбитальный период	0.102251559297 3(10) дней
e	эксцентриситет	0.087777023(61)
$\dot{P}_b^{obs}$	наблюдаемое изменение орбитального периода	$-1.247920(78) \times 10^{-12}$
$\dot{P}_b^{obs}/\dot{P}_b^{GR}$	отношение $\dot{P}_b^{obs}$ и $\dot{P}_b^{GR}$	0.999963(63)
m_1	масса пульсара A	$1.338185(+12/-14)\ m_\odot$
m_2	масса пульсара B	$1.248868(+13/-11)\ m_\odot$
m	полная масса системы	$2.587052(+9/-7)\ m_\odot$

M. Kramer et.al., Physical Review X 11 (2021) .

$m_\varphi \gg \omega$. Ограничения из системы PSR J0737-3039

$$\left|0.999963 - \frac{1}{(\phi_0 + 1)^{5/3}}\right| \leq 0.000126,$$

$$-5.3 \times 10^{-5} < \phi_0 < 10^{-4}.$$

I. Leanizbarrutia, F.S. Lobo and D. Sáez-Gómez, *Crossing SNe ia and BAO observational constraints with local ones in hybrid metric-palatini gravity*, *Physical Review D* **95** (2017) 084046 [1701.08980]:

$$|\phi_0| < 5 \times 10^{-4}.$$

$m_\varphi \ll \omega$. **Ограничения из системы PSR J0737-3039**

Анализ предельного случая $m_\varphi \ll \omega$ **:**

- Рассматривался вклад легкого скалярного поля в динамику системы двойного пульсара.
- Проверялась совместимость различных значений ϕ_0 с наблюдаемым значением изменения орбитального периода.

Результат:

Ни одно значение ϕ_0 не удовлетворяет наблюдательным данным изменения орбитального периода.

Заключение

- Рассмотрена гибридная метрическая-Палатини гравитация в системе двойного пульсара с учетом чувствительностей
- В случае легкого скалярного поля $m_\varphi \ll \omega$ учёт чувствительностей показал, что ни одно значение ϕ_0 не согласуется с наблюдаемым изменением орбитального периода
- В случае массивного скалярного поля $m_\varphi \gg \omega$ найдены ограничения на фоновое значение скалярного поля, улучшены предыдущие результаты, полученные в других работах.

Спасибо
за
внимание!