



Стратегия наблюдательного поиска кротовых нор в астрофизических системах

Моисеев Ю.А., Сажина О.С.

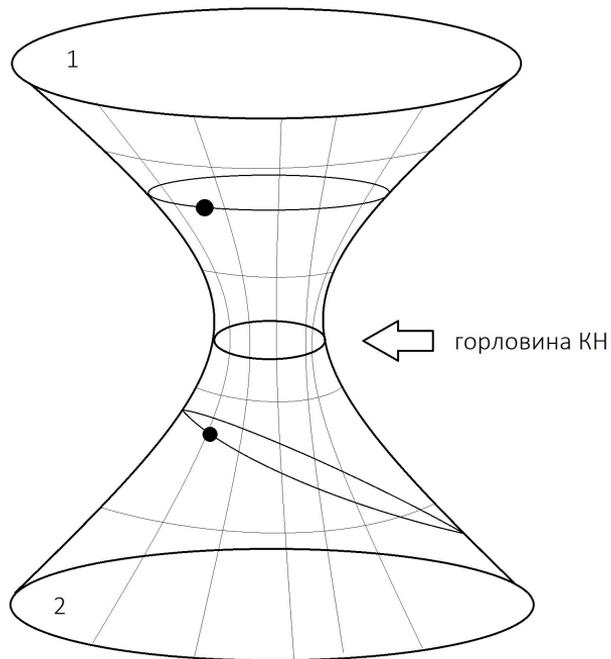
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Россия, Москва

Летняя школа Фонда «БАЗИС» — 2025

**«Актуальные вопросы современной теоретической
астрофизики»**

15.07.2025

1. Введение



В работе Moiseev Iu. A., Sazhina O.S. JETP, 2025, vol. 167, no. 2 был проведен анализ возможности обнаружения проходимых кротовых нор (КН) методами наблюдательной астрономии путем обнаружения дополнительного возмущающего ускорения компонента астрофизической системы. В рассматриваемой модели

- проходима КН соединяет две копии шварцшильдовского пространства
- в двух областях пространства 1 и 2 на орбите вокруг КН обращаются звезды
- движение звезды на стороне 1 будет отличаться от шварцшильдовского из-за воздействия звезды на стороне 2

Поиск КН и их возможное отождествление с ЧД и СМЧД (в том числе, в центре нашей Галактики) является актуальной астрофизической задачей.

В рассмотренной модели существенным преимуществом является независимость эффекта от конкретного выбора метрики проходимой КН. Наличие возмущающего воздействия обеспечивается самим фактом проходимости КН.

2. Оценки возмущающего ускорения

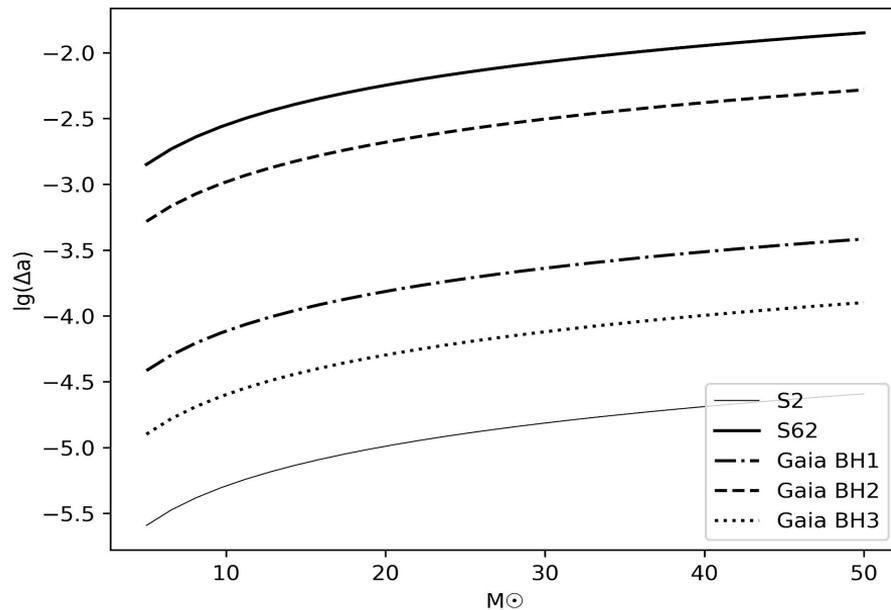
$$h_{tt}^1(r_1) = \frac{2b_{tt}}{r_1}, \quad h_{rr}^1(r_1) = \frac{2b_{rr}r_1}{(r_1 - r_g)^2};$$

$$h_{tt}^2(r_2) = h_{tt}(r_2) + \frac{2a_{tt}}{r_2}, \quad h_{rr}^2(r_2) = h_{rr}(r_2) + \frac{2a_{rr}r_2}{(r_2 - r_g)^2},$$

$$b_{tt} = -a_{tt} = \mu \frac{R}{A}, \quad b_{rr} = -a_{rr} = \mu \frac{R}{A}.$$

$$a \approx -\mu \frac{R}{A} \cdot \frac{1}{r_1^2},$$

$$\Delta a = \mu \left(\frac{R}{r_p} - \frac{R}{r_a} \right) \cdot \frac{1}{r_1^2}$$



	S2	S62	Gaia BH3	Gaia BH2	Gaia BH1
r_p , au	121.3727	17.7619	4.5276	2.3808	1.4685
e	0.8839	0.976	0.72	0.52	0.45
Δa_{max} , mas/yr ²	$0.308 \cdot 10^{-2}$	0.118	$0.352 \cdot 10^{-2}$	0.101	0.024
d, kpc	7.9	7.9	0.59	1.16	0.48

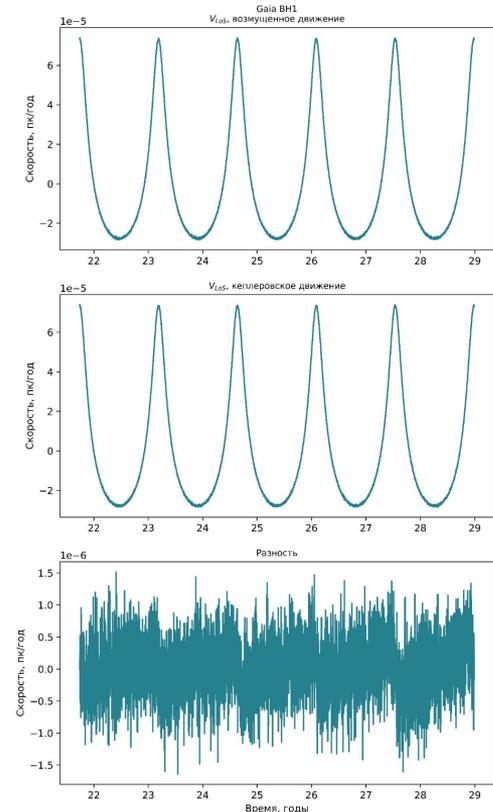
3. Влияние возмущающего воздействия на лучевую скорость

В построенной модели при численном интегрировании уравнений движения звезды в перицентре ее орбиты добавляется импульсное воздействие постоянного возмущающего ускорения Δa , что приводит изменению периода обращения звезды и, как следствие, смещению ожидаемого положения максимума (а также минимума) ее лучевой скорости.

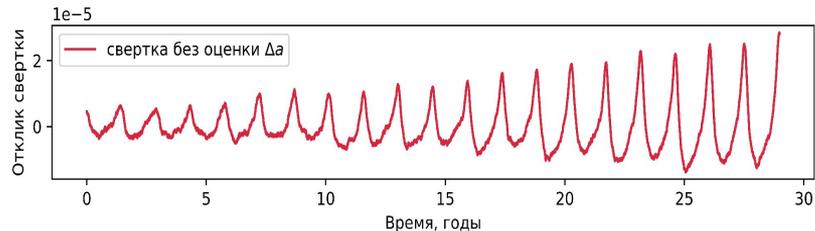
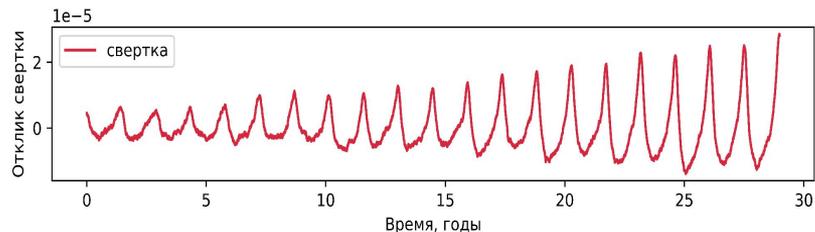
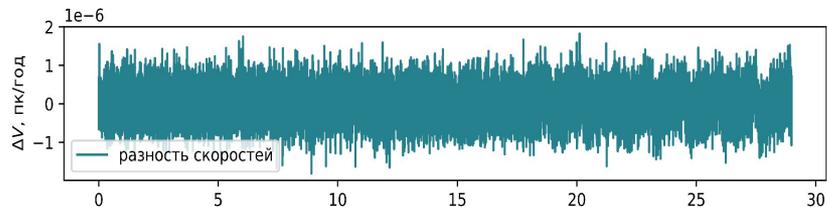
При моделировании рассматривались широкие системы **Gaia BH1**, **BH2** и **BH3**, содержащие ЧД как кандидаты в КН. К модельным наблюдениям лучевой скорости примешивался случайный шум с амплитудой 100–300 м/с (см. рис. справа с результатом моделирования для системы Gaia BH1).

Поиск такого возмущения путем прямого сравнения ожидаемого возмущенного движения с модельным кеплеровским, однако, неэффективен – ожидаемое время “накопления” возмущения превышает 15 лет в самых оптимистичных сценариях.

Основной причиной невозможности выделить изменение лучевой скорости относительно ожидаемого кеплеровского значения являются потенциальные ошибки наблюдений – даже самый оптимистичный фон из ошибок измерения порядка ± 0.5 км/с полностью скрывает искомое возмущение.



4. Выделение возмущения путем свертки сигнала с шаблоном



Импульсный характер воздействия формирует специфичную возмущающую сигнатуру. В связи с этим эффективным оказался метод поиска возмущения путем свертки разностного сигнала с теоретическим шаблоном.

- Задание начальных условий (начальные координаты, скорости, масса КН, углы i , Ω , *величина возмущения Δa)
- Численное интегрирование уравнений движения \rightarrow преобразование в лучевую скорость V_{LoS}
- Выделение сигнального отклика (разность V_{LoS} с возмущением и без)
- Сглаживание шаблона полиномом Чебышева и нормировка

дают нормированный безразмерный шаблон, отражающий характерную форму сигнала, возникающего в результате слабого гравитационного возмущения, потенциально вызванного телом на другой стороне проходимой КН. Результат свертки зашумленной разности скоростей при возмущенном и при кеплеровском движении с построенным шаблоном для системы Gaia BH1 приведен на рисунке.

5. Оценка различимости эффекта

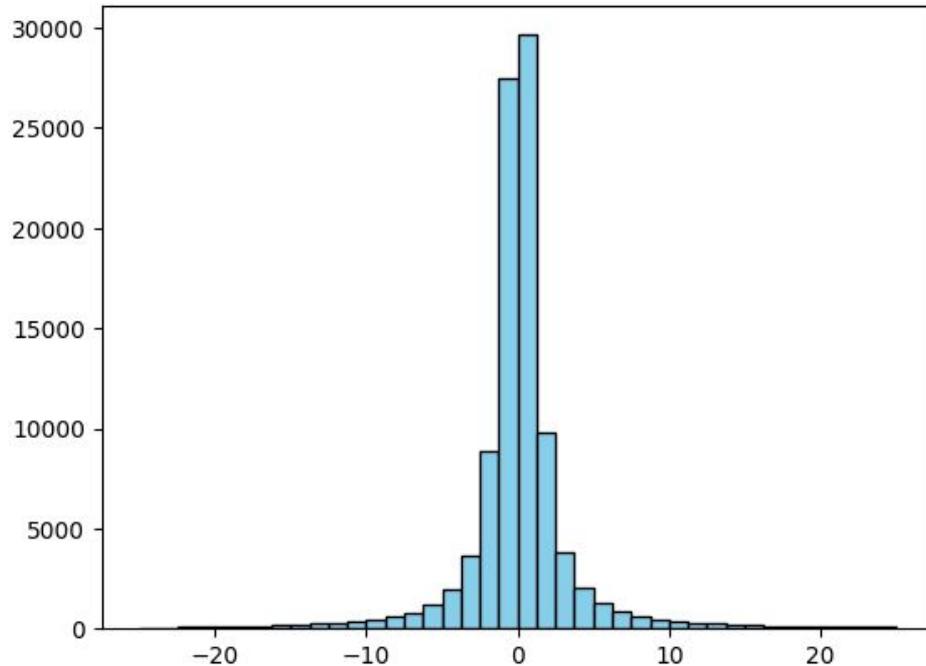
Характерной метрикой, определяющей фактическую различимость эффекта является рост амплитуды отклика свертки между периодами.

В качестве статистики было решено использовать отношение тренда роста к такому же наклону, определенному по случайному набору точек.

Для определения критерия оценки результата было сгенерировано 2×10^7 случайных сигналов фиксированной длины, по которым определялось отношение наклонов.

Распределение такой случайной величины, узкая центральная часть которого приведена на рисунке, имеет достаточно широкие крылья, поэтому в дальнейшем в качестве критерия достоверности использовалась устойчивая оценка стандартного отклонения σ , основанная на медианном абсолютном отклонении этого распределения

$$\sigma_{\text{robust}} \approx 1.4826 * \text{MAD}$$

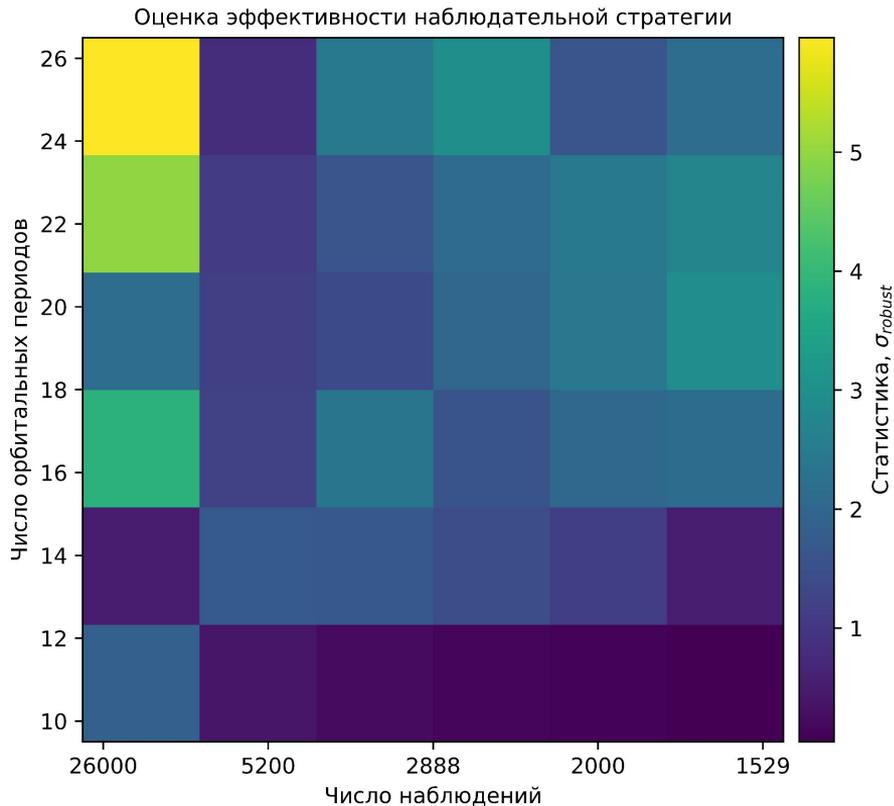


6. Стратегия поиска КН

В рамках разработанной модели системы и метода поиска периодических возмущений лучевой скорости проведен анализ оптимальной продолжительности и заполнения наблюдательной программы.

Учитывая ограниченное число подходящих реальных систем, дополнительно смоделировано 50 синтетических систем "КН + звезда + возмущающий объект". На правой панели представлена усредненная карта эффективности наблюдательной программы в зависимости от количества измерений и длительности наблюдений для синтетических систем.

Глобальный характер свертки приводит к естественному преобладанию эффективности обнаружения при использовании более протяженных наблюдательных рядов, при этом количество отдельных наблюдений может оставаться относительно небольшим без существенного снижения эффективности детектирования.



Спасибо за внимание