



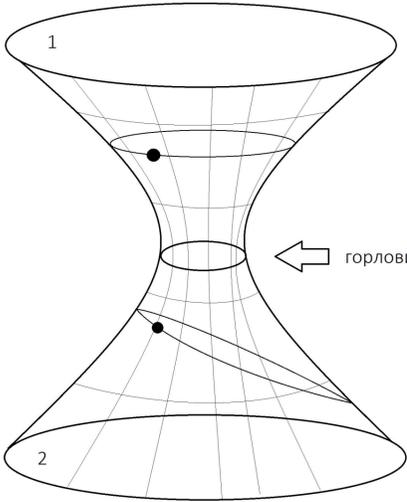
Стратегия наблюдательного поиска кротовых нор в астрофизических системах

Моисеев Ю.А., Сажина О.С.

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



1. Введение



В работе Moiseev Yu. 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

- проходимая 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. Влияние возмущающего воздействия на лучевую скорость

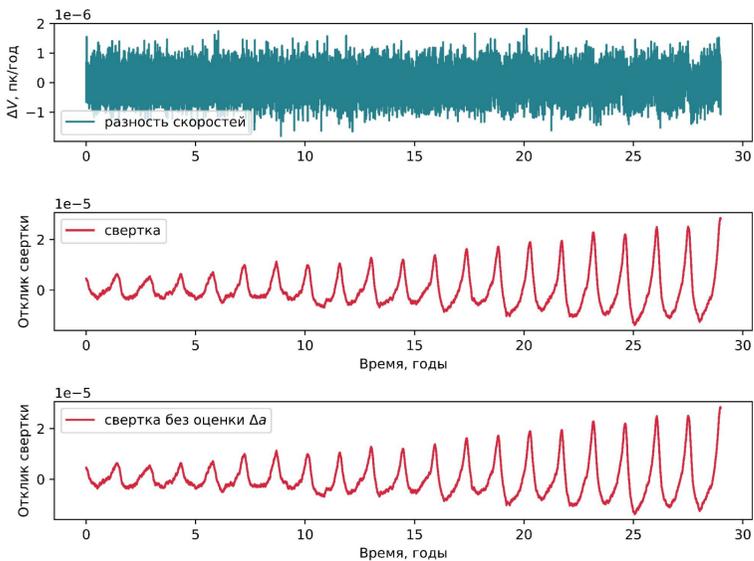
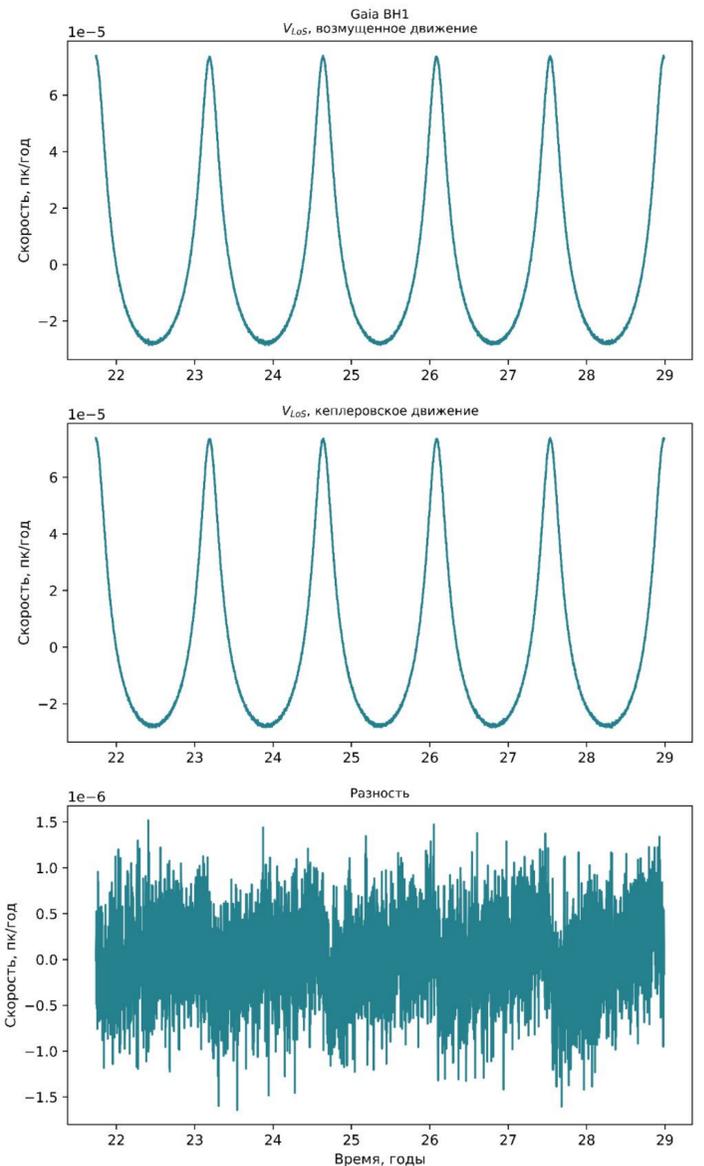
В настоящей работе исследовалось воздействие импульсов возмущающего ускорения от объекта на стороне 2 на лучевую скорость звезды на стороне 1 и возможность обнаружения этого возмущения.

В построенной модели при численном интегрировании уравнений движения звезды в перицентре ее орбиты добавляется импульсное воздействие постоянного возмущающего ускорения Δa , что приводит к 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.



3. Выделение возмущения путем свертки сигнала с шаблоном

Рассмотренный выше сценарий фиксирует регулярное перицентрическое воздействие постоянного возмущающего ускорения на фоне шума наблюдений. При этом импульсный характер воздействия формирует специфичную возмущающую сигнатуру. В связи с этим эффективным оказался метод поиска возмущения путем свертки разностного сигнала с теоретическим шаблоном.

Алгоритм построения шаблона:

- Задание начальных условий (начальные координаты, скорости, масса КН, углы i, Ω , *величина возмущения Δa)
 - Если явное значение дополнительного ускорения Δa не задано, используется малое фиксированное значение порядка 10^{-10} см/с² – этого достаточно для формирования характерной формы сигнала.
- Численное интегрирование уравнений движения → преобразование в лучевую скорость V_{LoS}
- Выделение сигнального отклика (разность V_{LoS} с возмущением и без)
- Сглаживание шаблона полиномом Чебышева и нормировка

Результатом является 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 показан на рисунке слева.

4. 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 правых панелях представлены карты эффективности наблюдательной программы в зависимости от количества измерений и длительности наблюдений для системы Gaia BH1 и усреднение 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.

5. Заключение

Предложенная стратегия поиска КН через анализ возмущений лучевой скорости позволяет эффективно выявлять сигнал в протяженных (8-12 лет) наблюдательных кампаниях с умеренной частотой измерений.

