

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ, СТРАНСТВУЮЩИЕ В МЛЕЧНОМ ПУТИ

А. А. Запорожец¹, Е. А. Васильев², В. А. Белокуров²

¹*Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, МГУ,*

²*Institute of Astronomy, Cambridge, UK*

Благодаря новым данным о нашей галактике, полученным от Gaia и других обзоров, мы знаем, что Млечный Путь возник в результате слияния двух галактик около 8–11 млрд лет назад. Предполагая, что в центре обеих из них находились сверхмассивные черные дыры, мы моделируем эти системы, чтобы исследовать возможные сценарии эволюции этих черных дыр (ЧД). Оказывается, динамическое трение, являющееся самым сильным сопротивлением при движении черной дыры сквозь среду звезд, всегда меньше гравитационного притяжения к центру на несколько порядков и не является достаточно мощным, чтобы заставить меньшую черную дыру упасть на большую. Этот результат означает, что, возможно, в Млечном Пути есть сверхмассивная черная дыра, которая движется по некоторой стабильной орбите вокруг центра. Следующий интересный шаг — поиск наблюдательных особенностей такой черной дыры для дальнейшего нахождения ее на небе.

WANDERING BLACK HOLES IN MILKY WAY HALO

A. A. Zaporozhets¹, E. A. Vasiliev², V. A. Belokurov²

¹*Sternberg Astronomical Institute, MSU,*

²*Institute of Astronomy, Cambridge, UK*

Thanks to the new data about our galaxy from Gaia and other surveys, we know that Milky Way originated from the merger of two galaxies about 8–11 billion years ago. Assuming that both of them had supermassive black holes in their centre, we model these systems over time to explore what might have happened to said black holes. Turns out that dynamical friction, which is the strongest drag force for the black hole that is moving through the medium of stars, is always smaller than gravitational pull towards the centre by several orders of magnitude and is not powerful enough to make the smaller black hole to fall onto the bigger one. This outcome means that there possibly is an SMBH in the Milky Way that is moving on some stable orbit around the centre. The next interesting step to take would be to look for some observational signatures of such black hole and try to find it on the sky.

Мотивация

Одним из интересных вопросов астрономии является набор массы черными дырами. Есть несколько способов для них увеличить ее: поглощение газа или звезд вокруг себя или слияние с другими черными дырами. Мы исследуем последний из этих вариантов и обсуждаем вероятность слияния двух таких ЧД.

Первый вопрос, который возникает: откуда могут взяться две черные дыры в окрестности друг друга? Одним из возможных ответов будет являться столкновение двух галактик. Если две такие звездные системы сравнимой массы оказываются близко друг к другу, они могут слиться и образовать новую галактику, в которой будут две сверхмассивные черные дыры внутри. Используя численное решение задачи N -тел, мы пытаемся ответить на вопрос, где эти две черные дыры могут оказаться и может ли возникнуть ситуация, при которой они начнут процесс слияния.

К счастью, этот вопрос не полностью теоретический. Благодаря новым обзорам неба (таким, как SDSS и GAIA), мы имеем хорошее представление о типичных скоростях, массах и свойствах объектов внутри Млечного Пути. Используя эти данные, был сделан вывод [1, 2] о том, что Млечный Путь испытал большое слияние 8–11 млрд лет назад. Предок Млечного Пути и объект, названный Gaia-Enceladus, образовали систему, которую мы сейчас называем нашей Галактикой. Предполагая, что внутри Gaia-Enceladus была своя сверхмассивная черная дыра, давайте исследуем ее эволюцию и сделаем предположения, где она может быть сейчас.

Моделирование

Процесс эволюции заключается в следующем:

1. Рассматривается система из двух галактик, каждая из которых есть набор материальных точек, определяемых тремя компонентами скорости, тремя компонентами положения и массой. Далее эти точки интегрируются в рамках задачи N -тел [3]. Внутри этих моделей нет черной дыры как отдельной точки — в каждый момент времени подразумевается, что черная дыра соответствующей галактики находится в центре потенциальной ямы этой галактики. Черные дыры как отдельные точки появятся после разрушения галактик при интегрировании их уравнений движения в стационарном потенциале новой галактики.

Далее эти галактики начинают движение на встречу друг другу с разными углами и поворотами.

2. С движением времени меньшая галактика («галактика-спутник») начинает постепенно терять массу и в конце концов оказывается разрушена. В этот момент черная дыра этой галактики оказывается выброшена в среду новообразовавшейся галактики и начинает путешествовать сама по себе.

После этого у черной дыры есть три возможные судьбы:

- *Она может быть выброшена за пределы системы.* Если черная дыра каким-то образом наберет много кинетической энергии, она может вылететь за пределы галактики и перестать быть связанной с системой.
- *Она может остаться внутри новой галактики где-то в ее рукавах или гало.* Если сила динамического трения [4] окажется недостаточно большой, черная дыра галактики-спутника не сможет упасть на центр за Хабловское время.
- *Она может слиться с черной дырой большей галактики.* Если же черная дыра окажется выброшена после разрушения спутника достаточно близко к центру большей галактики, она может слиться с другой черной дырой.

Важно понимать, что конкретный исход критически зависит от того, где именно окажется черная дыра после разрушения галактики-спутника. К примеру, если черная дыра будет выброшена близко к центру новой галактики, то она окажется в области заведомо большей плотности, в которой больше динамическое трение и, соответственно, больше торможение в результате чего существует гораздо большая вероятность того, что две черные дыры смогут провзаимодействовать.

Задача заключается в определении орбиты черной дыры меньшей галактики после слияния двух галактик.

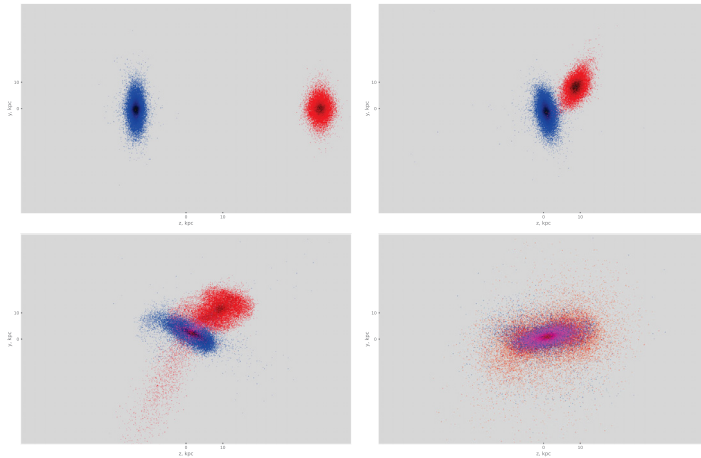


Рис. 1. Пример эволюции модели со временем. Синим цветом обозначена галактика-хост, красным — галактика-спутник

Численное моделирование происходит с двумя моделями спиральных галактик. Модель меньшей галактики содержит 200 тыс. частиц, модель большей — 400 тыс. Частицы галактик построены при помощи программного пакета *Agama*. Внутренняя часть каждой модели — это диск спиральной галактики, вокруг него есть сферический слой частиц темной материи, используемых для учета «скрытой» массы.

Само моделирование проводилось при помощи решения задачи N -тел усовершенствованным алгоритмом Барнса — Хута *FalCON* [3], решающим каждый шаг по времени за количество операций $O(N \log N)$, где N — число частиц модели.

После разрушения галактик проводилось численное решение уравнений движения одной точки в стационарном потенциале при помощи модуля *Scipy* языка программирования *Python*.

Результаты

Пример эволюции одной из моделей со временем представлен на рис. 1.

Существует достаточно большое количество различных степеней свободы при столкновении двух галактик: повороты галактики-спутника и галактики-хоста, расстояние между ними и направление начальной скорости галактики-спутника. Но не все из них одинаково влияют на конечную орбиту черной дыры после разрушения спутника. Как видно на рис. 2, главным фактором, влияющим на положение черной дыры, является направление начальной скорости (обозначено цветом точки). Остальные факторы вторичны.

Похоже, что даже для небольших орбит динамическое трение всегда на несколько порядков меньше гравитационного притяжения к центру галактики. Как видно на рис. 2, единственная черная дыра, у которой есть шансы упасть в центр новой галактики, — это та, которая имеет нереалистичную массу в 10^8 масс Солнца. Аналогичные графики для черных дыр реальной массы являются полностью белыми.

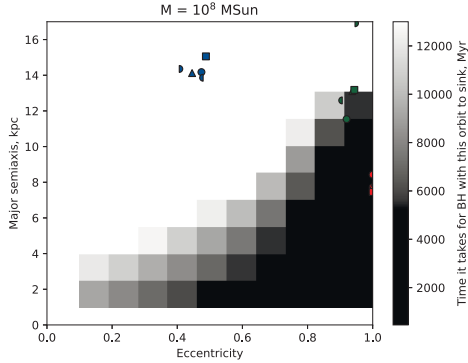


Рис. 2. Эксцентриситет черной дыры галактики-спутника по отношению к его большой полуоси.

Цвет точки обозначает направление вектора скорости (синий — полностью тангенциальная; красный — полностью радиальная; зеленый — наполовину радиальная, наполовину тангенциальная). Форма обозначает поворот галактики-спутника вокруг радиальной оси (круг — в плоскости хоста; треугольник — 45° ; квадрат — 90°). Стиль заполнения обозначает поворот хоста вокруг оси, перпендикулярной радиальной (полная форма — в той же плоскости; правая половина — 45° ; левая половина — 90°). Оттенки серого — это время, необходимое черной дыре-спутнику на заданной орбите, чтобы упасть в центр новой галактики. Белый цвет означает, что на это требуется времени больше, чем 13 млрд лет

Заключение

Исходя из исследования можно сделать вывод, что с высокой вероятностью внутри Млечного Пути до сих пор находится черная дыра от столкновения со звездной системой Gaia-Enceladus. Есть некоторое количество факторов, неучтенных в работе, которые могли бы увеличить динамическое трение: наличие скопления звезд вокруг черной дыры галактики-спутника, ее попадание в заведомо более плотную область (в диск или перемычку новой галактики). И хотя это немаловажные факторы, они имеют второй порядок значимости и вряд ли способны изменить результат.

Учитывая, что типичные расстояния от центра галактики до черной дыры — это около 8–10 кпк, возникает интересный вопрос: насколько эта черная дыра может быть близка к Солнцу и можем ли мы ее увидеть? Для этого необходимо исследовать возможные наблюдательные особенности такой системы, что и планируется сделать в дальнейшем.

Библиографические ссылки

- [1] *V. Belokurov, D. Erkal, N.W. Evans et al.* Co-formation of the disc and the stellar halo // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 478. — P. 611–619.
- [2] *Helmi A. Koppelman H., Babusiaux C.* Streams, Substructures, and the Early History of the Milky Way // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 58. — P. 205–256.
- [3] *W. Dehnen.* A Very Fast and Momentum-conserving Tree Code // *Astron. J.* — 2000. — Vol. 536. — P. L39–L42.
- [4] *Chandrasekhar S.* Dynamical Friction. I. General Considerations: the Coefficient of Dynamical Friction // *Astron. J.* — 1943. — Vol. 97. — P. 255–262.