

Впервые эффект так называемого “динамического трения” был рассмотрен Чандрасекаром в его в работе [1]. Он описал движение тяжелой частицы массы  $M$  через бесконечную однородную среду из лёгких невзаимодействующих друг с другом и не сталкивающихся частиц. Динамическое трение может быть качественно понято как появление “хвоста” повышенной плотности за массивным объектом. Этот хвост притягивает к себе движущийся объект и уменьшает его скорость. Полученные при довольно простых предположениях результаты Чандрасекара хорошо описывают трение во многих более общих случаях. Однако было выяснено, что его формула перестаёт работать при описании движения чёрной дыры в ядрах некоторых галактик. Так, в [2] и [3] было обнаружено, что после стадии с трением, описываемым формулой Чандрасекара, начинается стадия, на которой трение намного ниже предсказываемого. Динамическое трение в ядрах с практически постоянной плотностью было исследовано также в работе [4]. Выяснено, что в таких ядрах фазу со сверхчандрасекаровским трением сменяет фаза, в которой трение практически отсутствует.

Мы рассмотрели динамическое трение в галактике, представляющей из себя однородный шар, и решили задачу аналитически в некотором приближении. Невозмущенные траектории как звёзд, так и чёрной дыры являются эллипсами, центр которых совпадает с центром галактики, и все звёзды имеют одинаковый период обращения по орбите, поэтому взаимодействие звезд с чёрной дырой происходит в особом, резонансном режиме. Этот постоянный резонанс одновременно со всеми звёздами является ключевым отличием нашей модели от рассмотренной Чандрасекаром.

В системе отсчёта, связанной с чёрной дырой, положение большой полуоси возмущенных орбит звёзд прецессирует с небольшой, по сравнению с орбитальной, частотой. Небольшая добавка к орбитальной частоте изменяет период обращения звезд по сравнению с периодом обращения чёрной дыры, выводит звёзды из полного резонанса с чёрной дырой. Это решает проблему бесконечно большого трения, которая обсуждается в [4]. Потеря энергии чёрной дыры за счёт взаимодействия со звёздами определяется выражением

$$E(t) = E_0 e^{-C(M/M_G)t^2}, \quad (1)$$

где  $C \approx 2$ ,  $M_G$  – масса галактики. Данная формула описывает сверхчандрасекаровское трение, так как затухание происходит за  $N \sim \sqrt{M_G/M}$  колебаний, а не за  $N \sim M_G/M$ , как в случае

Чандрасекара. Для изучения параметров затухания чёрной дыры и подтверждения аналитических результатов мы провели численные вычисления движения чёрной дыры в рассмотренной системе звёзд. В результате вычислений (рис. 1) было выяснено, что движение чёрной дыры может быть разделено на три фазы. Первая фаза – это быстрое затухание колебаний чёрной дыры в соответствии с (1). Первая фаза заканчивается при достижении чёрной дырой энергии, соразмерной с броуновской. Вторая фаза – это быстрый симметричный рост энергии до некоторого значения в результате взаимодействия с «хвостом», который теперь вместо резонансного затухания приводит к резонансному раскачиванию. Третья фаза – это колебания с практически постоянной амплитудой. Обмен энергией со звёздами теперь происходит в случайном направлении. Таким образом, средний по звёздам обмен энергией прекращается, и появляется состояние равновесия между чёрной дырой и звёздами.

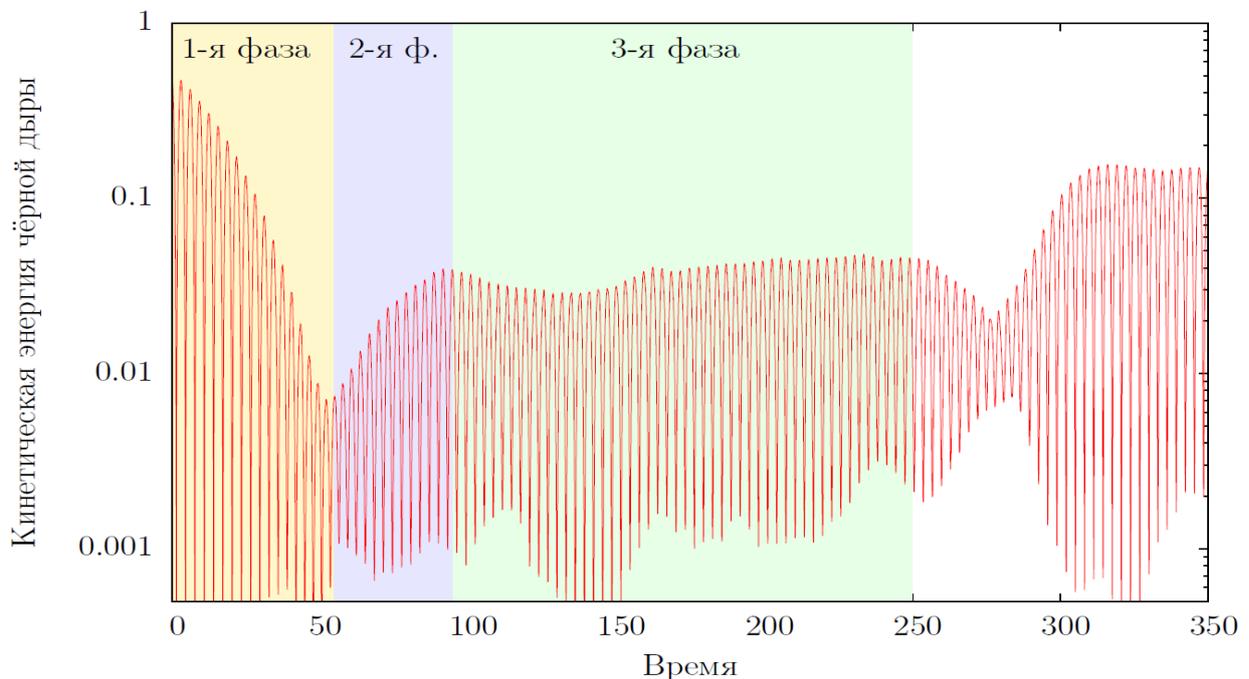


Рис. 1. Эволюция кинетической энергии чёрной дыры для системы с  $M = 1$ ,  $M_G = 10^3$ ,  $m_{\text{звезд}} = 10^{-3}$ .

#### Литература

1. Chandrasekhar, S. Dynamical Friction. I. General Considerations: the Coefficient of Dynamical Friction – *Astrophysical Journal* – 1943 – с. 255.
2. Gualandris, A., & Merritt, D. Ejection of supermassive black holes from galaxy cores – *Astrophysical Journal* – 2008 – с. 708.
3. Inoue, S. Corrective effect of many-body interactions in dynamical friction – *MNRAS* – 2011 – с. 1181.
4. Read, J.I. et al. Dynamical friction in constant density cores: a failure of the Chandrasekhar formula – *MNRAS* – 2006 – с. 1451.