REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 2224-5227
Volume 5, Number 309 (2016), 87 – 95

[1,2]B.T. Shukirgaliyev, [1,2]T.P. Panamarev, [3]A.Zh. Naurzbaeva, [1,3]M.T. Kalambay, [2,4,5]P.P. Berczik, [2]A. Just, [2,4,6]R. Spurzem, [1]M.A. Makukov, [1]E.Y. Vilkoviskij, [7,1]Ch.T. Omarov

[1] Fesenkov Astrophysical Institute, Kazakhstan;
[2] Astronomisches Rechen-Institut, Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg, Germany;
[3] Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan;
[4] National Astronomical Observatories of China and Key Laboratory for Computational Astrophysics, China;
[5] Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine;
[6] Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics at Peking University, China;
[7] National Center of Space Research and Technology, Kazakhstan
bekdaulet@aphi.kz, mukhagaly@gmail.com

EFFECT OF GAS ACCRETION DISC PROFILE ON ORBITAL PARAMETERS OF THE ACCRETED STARS

Abstract. The results of studies of the effect of the gas disk and its profile on the dynamics of active galactic nuclei are presented. The study was conducted with a numerical model of galactic nucleus based on phiGRAPE+GPU comprising three subsystems – a central supermassive black hole, gaseous accretion disc, and compact stellar cluster. The evolution of the compact stellar cluster is modeled with direct integration (N-body simulation), while the black hole and gaseous disc are represented phenomenologically: the black hole is introduced as an external potential (fixed in space but variable in time due to black hole mass growth), and the gaseous disc is introduced as spatial time-independent density distribution. We examined and compared with each other orbital parameters of accreting stars for model of the galactic nucleus with gas disc of constant and variable thickness, as well as without gas. It was found that in the presence of a gaseous disk almost half of the accreted particles interact strongly with the gas and are captured by the disc before accretion, while more than 85% of particles are affected to some extent by the disc prior to accretion. This suggests that interaction of the stellar cluster with the gas disk in the galactic nucleus might lead to the formation of stellar disk in the central part of the nucleus.

Key words: active galactic nuclei (AGN), supermassive black hole (SMBH), accretion gas disk(AGD), computational astrophysics, N-body simulations

УДК 524.47-54

[1,2]Б.Т. Шукиргалиев, [1,2]Т.П. Панамарев, [3]А.Ж. Наурзбаева, [1,3]М.Т. Қаламбай, [2,4,5]П.П. Берцик, [2]А. Юст, [2,4,6] Р. Шпурцем, [1]М.А. Макуков, [1]Э.Я. Вильковиский, [7,1]Ч.Т. Омаров

[1]Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Казахстан;
[2] Astronomisches Rechen-Institut, Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg, Germany;
[3] Казахский Национальный Университет им. Аль-Фараби, Казахстан;
[4] National Astronomical Observatories of China and Key Laboratory for Computational Astrophysics, China;
[5] Главная Астрономическая Обсерватория, Национальной Академии Наук Украины, Украина;
[6] Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics at Peking University, China;
[7] Национальный центр космических исследовании и технологии, Казахстан

ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ АККРЕЦИОННОГО ГАЗОВОГО ДИСКА НА ОРБИТАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АККРЕЦИРУЕМЫХ ЗВЕЗД

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния газового диска и его профиля на динамику активных ядер галактик. Исследование проводилось на основе реализованной с помощью кода phiGRAPE+GPU численной модели галактического ядра, состоящей из трех подсистем – центральной

сверхмассивной черной дыры, аккреционного газового диска и компактного звездного кластера. Эволюция звездного кластера интегрируется прямым методом (N-body simulations), а черная дыра и газовый диск заданы феноменологически – черная дыра задана в виде внешнего потенциала (неподвижного в пространстве, но изменяемого со временем вследствие роста массы черной дыры), а газовый диск задан в виде пространственного распределения плотности, не зависящего от времени. Рассматривались и сравнивались между собой орбитальные параметры аккрецирующих звезд для моделей ядра галактики с газовым диском постоянной и переменной толщины, а также без диска. Выявлено, что в присутствии газового диска почти половина аккрецированных частиц тесно взаимодействует с газом и захватывается диском перед аккрецией, более 85% частиц до аккреции претерпевает то или иное влияние со стороны диска. Это наводит на мысль, что взаимодействие звездного кластера с газовым диском в галактическом ядре может привести к возникновению звездного аккреционного диска в центральной части ядра.

Ключевые слова: активные ядра галактик (АЯГ), сверхмассивная черная дыра (СМЧД), аккреционный газовый диск (АГД), вычислительная астрофизика, задача N тел.

Физическая природа активных ядер галактик (АЯГ) и в наши дни далека от полного понимания, поэтому развитие теории АЯГ до сих пор остается одной из актуальнейших проблем астрофизики. Согласно современным представлениям, активность ядер галактик объясняется аккрецией вещества на сверхмассивные (до нескольких триллионов масс Солнца) черные дыры, находящиеся, по-видимому, в центрах всех галактик [1]. Высвобождаемая в ходе этой аккреции гравитационная энергия и является тем источником, который лежит в основе чрезвычайно мощного излучения, наблюдаемого из АЯГ.

Активное ядро галактики можно рассматривать как состоящее из трех подсистем: центральной сверхмассивной черной дыры (СМЧД), аккреционного газового диска (АГД), формирующегося из-за сохранения момента импульса аккрецируемого вещества, и компактного сферически-симметричного звездного кластера [2].

В предыдущих работах [3-6] с помощью численного моделирования нами было исследовано взаимодействие звездного кластера с аккреционным диском и его влияние на динамику и эволюцию активных ядер галактик. Действительно, диссипативное воздействие со стороны газового диска приводит к потере энергии звездами в центральной части кластера и, при определенных условиях, к аккреции некоторых звезд на черную дыру.

В этих исследованиях мы использовали две феноменологические модели газового диска. В первой газовый диск имел кеплеровское вращение, постоянную высоту и задавался в виде неизменного во времени распределения плотности :

$$\rho(R,z)=\frac{2-\alpha}{2\pi\sqrt{2\pi}}\frac{M_d}{hR_d^3}\left(\frac{R}{R_d}\right)^{-\alpha}exp\left[-\beta_s\left(\frac{R}{R_d}\right)^s\right]\exp\left(-\frac{z^2}{2h^2R_d^2}\right), \quad (1)$$

где $\alpha=3/4$ (соответствует внешней границе диска по модели Новикова-Торна [6]), $R^2=x^2+y^2$, R_d - радиус диска, $\beta_s=\left[\Gamma\left(1+\frac{2-\alpha}{s}\right)\right]$ ($\Gamma(x)$ - гамма-функция, s было взято равным 4, тогда $\beta_s=0.70$), M_d - масса диска, h определяет полутолщину диска: $h_z=hR_d$.

Вторая, более реалистичная модель газового диска являлась модификацией первой модели с введением линейного возрастания полутолщины диска на внутреннем участке. Эта модификация была основана на физических свойствах внутреннего аккреционного диска, которые описываются приближением Шакуры-Сюняева [8].

$$h_z=hR_d\left(\frac{R}{R_{crit}}\right). \quad (2)$$

Точка перехода от линейной полутолщины к постоянной определялась, приравнивая выражения для скорости звука в случае самогравитации диска, $c_s^2=4\pi Gh_z\Sigma$, и в случае ее отсутствия $c_s^2=2h_z^2GM_{bh}R^{-3}$. Тогда $R_{crit}=0.0257314$ в безразмерной системе единиц N-body [8], которую мы используем везде в дальнейшем.

Свойства аккреционного диска были зафиксированы приведенной массой μ_d с аналитическим распределением плотности согласно уравнению (1) со значениями параметров $\alpha = 3/4$ и $s = 4$ и $h = 10^{-3}$. Подразумевалось кеплеровское вращение диска в потенциале сверхмассивной черной дыры, пренебрегая гравитационным воздействием диска и градиентами давления внутри диска [3]. Подробнее о моделях газового диска - в [5].

Черная дыра также задавалась феноменологически в виде ньютоновского потенциала. Звездный кластер моделировался прямым интегрированием взаимодействия отдельных звезд друг с другом (N-body simulations), а также с газовым диском и черной дырой. Если звезда попадает в область с радиусом менее R_{accr} (радиус аккреции), то она считается аккрецировавшей – ее масса добавляется к массе черной дыры, а сама звезда удаляется из системы. В качестве исходного кода для численного моделирования применялся код phiGRAPE+GPU [10], который использует технологии параллельного вычисления (CUDA и MPI). В этот код нами был добавлен модуль, описывающий диссипативное взаимодействие звезд с газом. Эволюция системы начинается с состояния, задаваемого моделью Пламмера. Более подробное описание численной модели может быть найдено в [3,4,6].

В [5] было проведено сравнение результатов, полученных при использовании двух моделей газового диска, т.е. исследовалось влияние профиля дсика на процесс аккреции звезд на черную дыру (см. пунктирная линия на Рис. 2). Рассматривались звезды, которые аккрецируют благодаря воздействию газового диска, то есть звезды с малыми значениями эксцентриситета (считалось, что звезды, аккрецирующие при $e \approx 1$, то есть на орбитах, близких к гиперболическим, попадают в область захвата черной дыры в результате случайных пролетов). Было найдено, что в первой модели аккрецирующие при вращении в одну с диском сторону звезды образуют на диаграмме “эксцентриситет - угол наклона орбиты к плоскости диска” тесную группу с почти круговыми орбитами, лежащими практически в плоскости диска, а противовращающиеся звезды обладают любыми значениями угла наклона и эксцентриситета в момент аккреции. В модели же диска с переменной толщиной со- и противовращающиеся звезды аккрецируют при любых углах наклона орбиты, однако около 70% всех захваченных СМЧД звезд в момент захвата были очень близки к круговой орбите и находились в плоскости диска. Кроме того, во второй модели диска момент импульса передается черной дыре в большем количестве, чем в первой.

В настоящей работе представлены результаты дальнейшего исследования влияния газового диска на динамику активных ядер галактик, а именно, обсуждаются орбитальные параметры аккрецирующих звезд, которые были захвачены СМЧД в течение двуз времен релаксации ($t=2t_{rel}$), начиная с начального момента, для трех моделей: со "старым" (с постоянной толщиной) и с "новым" (с переменной толщиной) газовыми дисками, а также без диска. Во всех запусках число звезд в системе составляло 32 тысячи, радиус аккреции принимался равным $0.0003R_d$.

Результаты и обсуждение

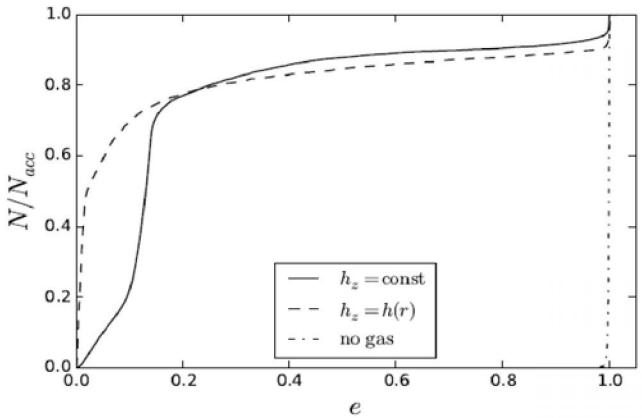

Рисунок 1 - Кумулятивное распределение частиц по эксцентриситетам их орбит в момент аккреции для модели без газового диска (штрихпунктирная линия), модели с диском постоянной толщины (сплошная линия) и модели с диском переменной толщины (пунктирная линия). По оси ординат отложено отношение числа звезд, аккрецировавших с эксцентриситетом, меньшим заданного, к числу всех аккрецировавших звезд