

ISSN 1991-346X

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

Х А Б А Р Л А Р Ы

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА
СЕРИЯСЫ**



СЕРИЯ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ



**PHYSICO-MATHEMATICAL
SERIES**

5 (303)

**ҚЫРКҮЙЕК – ҚАЗАН 2015 ж.
СЕНТЯБРЬ – ОКТЯБРЬ 2015 г.
SEPTEMBER – OCTOBER 2015**

1963 ЖЫЛДЫҢ ҚАҢТАР АЙЫНАН ШЫҒА БАСТАҒАН
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1963 ГОДА
PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

ЖЫЛЫНА 6 РЕТ ШЫҒАДЫ
ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД
PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

АЛМАТЫ, ҚР ҰҒА
АЛМАТЫ, НАН РК
ALMATY, NAS RK

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі,

Мұтанов Г. М.

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Әшімов А.А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байғұнчекөв Ж.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Жұмаділдаев А.С.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Мұқашев Б.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Өтелбаев М.О.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Тәкібаев Н.Ж.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Харин С.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Жантаев Ж.Ш.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Косов В.Н.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мұсабаев Т.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Ойнаров Р.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Рамазанов Т.С.** (бас редактордың орынбасары); физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Темірбеков Н.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Өмірбаев У.У.**

Р е д а к ц и я к ең е с і:

Украинаның ҰҒА академигі **И.Н. Вишневский** (Украина); Украинаның ҰҒА академигі **А.М. Ковалев** (Украина); Беларусь Республикасының ҰҒА академигі **А.А. Михалевич** (Беларусь); Әзірбайжан ҰҒА академигі **А. Пашаев** (Әзірбайжан); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **И. Тигиняну** (Молдова); мед. ғ. докторы, проф. **Иозеф Банас** (Польша)

Главный редактор

академик НАН РК

Г. М. Мутанов

Редакционная коллегия:

доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.А. Ашимов**; доктор техн. наук, проф., академик НАН РК **Ж.Ж. Байгунчеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **А.С. Джумадильдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Б.Н. Мукашев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **М.О. Отелбаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Н.Ж. Такибаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **С.Н. Харин**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.Ш. Жантаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **В.Н. Косов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.А. Мусабаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Р. Ойнаров**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Т.С. Рамазанов** (заместитель главного редактора); доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.М. Темирбеков**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **У.У. Умирбаев**

Редакционный совет:

академик НАН Украины **И.Н. Вишневский** (Украина); академик НАН Украины **А.М. Ковалев** (Украина); академик НАН Республики Беларусь **А.А. Михалевич** (Беларусь); академик НАН Азербайджанской Республики **А. Пашаев** (Азербайджан); академик НАН Республики Молдова **И. Тигиняну** (Молдова); д. мед. н., проф. **Иозеф Банас** (Польша)

«Известия НАН РК. Серия физико-математическая». ISSN 1991-346X

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5543-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 300 экземпляров.

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,

www.nauka-nanrk.kz / physics-mathematics.kz

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2015

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75.

Editor in chief

G. M. Mutanov,
academician of NAS RK

Editorial board:

A.A. Ashimov, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **Zh.Zh. Baigunchekov**, dr. eng. sc., prof., academician of NAS RK; **A.S. Dzhumadildayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **T.S. Kalmenov**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **B.N. Mukhashev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.O. Otelbayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **N.Zh. Takibayev**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **S.N. Kharin**, dr. phys-math. sc., prof., academician of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.Sh. Zhantayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **V.N. Kosov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.A. Mussabayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **R. Oinarov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **T.S. Ramazanov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **N.M. Temirbekov**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **U.U. Umirbayev**, dr. phys-math. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

I.N. Vishnievski, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.M. Kovalev**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **A.A. Mikhalevich**, NAS Belarus academician (Belarus); **A. Pashayev**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **I. Tighineanu**, NAS Moldova academician (Moldova); **Joseph Banas**, prof. (Poland).

News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Physical-mathematical series.
ISSN 1991-346X

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of information and archives of the Ministry of culture and information of the Republic of Kazakhstan N 5543-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 300 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,

www.nauka-nanrk.kz / physics-mathematics.kz

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2015

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

Проблемы небесной механики и динамики звездных систем

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 303 (2015), 5 – 12

EFFECT OF ACCRETION DISC PROFILE ON THE DYNAMICS OF ACTIVE GALACTIC NUCLEI

B. T. Shukirgaliyev^{1,2}, T. P. Panamarev^{1,2}, S. G. Abdrakhmanov¹,
M. A. Makukov¹, Ch. T. Omarov¹

¹Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan,

²Astronomisches Rechen-Institut, Universität Heidelberg, Heidelberg, Germany

Key words: active galactic nuclei, stellar dynamics, computational astrophysics, accretion, N-body simulations.

Abstract. Employing parallel computing technologies, we investigate a numerical model of active galactic nuclei. The model under consideration is implemented on the basis of the phiGRAPE+GPU code and comprises 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. Apart from gravitational interaction with other stars, for each star we compute also the gravitational action from the black hole and dissipative action from the gaseous disc. The latter leads to the loss of energy by stars and, under certain conditions, to the accretion of some stars onto the black hole. Particular attention in this paper is paid to the study of the effect of the gaseous disc on the evolution of the entire system. In particular, comparing two accretion disc models with differing profiles, we analyze their effect on the process of stellar accretion, on orbital parameters of stars, and on global dynamical characteristics of the system.

УДК 524.47-54

ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ АККРЕЦИОННОГО ДИСКА НА ДИНАМИКУ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

Б. Т. Шукиргалиев^{1,2}, Т. П. Панамарев^{1,2}, С. Г. Абдрахманов¹,
М. А. Макуков¹, Ч. Т. Омаров¹

¹Астрофизический институт им. В. Г. Фесенкова, Алматы Казахстан,

²Astronomisches Rechen-Institut, Universität Heidelberg, Heidelberg, Germany

Ключевые слова: Активные ядра галактик, звездная динамика, вычислительная астрофизика, аккреция, задача N тел.

Аннотация. Используя технологии параллельного вычисления, мы проводим исследование численной модели активных ядер галактик. Рассматриваемая модель, реализованная на основе кода phiGRAPE+GPU, состоит 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. Кроме гравитационного взаимодействия с другими звездами, для каждой звезды рассчитывается также гравитационное воздействие со стороны черной дыры и диссипативное воздействие со стороны газового диска. Последнее приводит к потере энергии звездами в центральной части кластера и, при определенных условиях, к аккреции некоторых звезд на черную дыру. Особое внимание в данной работе уделено изучению влияния газового диска на эволюцию всей системы. В частности, сравнивая две модели аккреционного диска с отличающимися профилями, мы анализируем их влияние на процесс аккреции звезд, на их орбитальные параметры, и на глобальные динамические характеристики системы.

Феномен активных ядер галактик (АЯГ) остается одной из актуальнейших проблем в астрофизике [1-3]. Согласно доминирующей модели, этот феномен объясняется аккрецией вещества на сверхмассивную черную дыру в центрах галактик (по современным данным, сверхмассивные черные дыры массой от нескольких миллиардов до нескольких триллионов масс Солнца находятся в центрах большинства, если не всех, галактик, и являются, по всей видимости, неотъемлемой частью их эволюции [4]). В процессе аккреции потенциальная и кинетическая энергия вещества эффективно перерабатывается в энергию излучения, что и может объяснить стабильное и очень мощное излучение из весьма малой области, наблюдаемое в АЯГ. Так как момент импульса аккрецируемого вещества при этом сохраняется, то оно образует диск, и вся рассматриваемая система становится осесимметричной.

Вместе с тем, в центральных областях галактик вокруг центральной черной дыры практически всегда имеются сферически-симметричные компактные звездные кластеры [5]. В предыдущих работах мы исследовали, используя численное моделирование и простую феноменологическую модель газового диска, влияние этого звездного кластера на динамику и эволюцию активных ядер [6, 7]. В частности, было обнаружено, что диссипативное взаимодействие звезд кластера с газом может значительно увеличить темп аккреции, так как звезды передают часть энергии газу, их орбиты укладываются в аккреционный диск, и в итоге они также аккрецируются на центральную черную дыру [6]. Однако, чтобы оценить влияние аккреционного диска на орбитальные и фазовые характеристики звезд, необходимо исследовать более реалистичную модель диска. В этом и заключается цель данной работы.

Исследуемая модель АЯГ включает в себя три подсистемы: компактный звездный кластер (КЗК), аккреционный диск (АД), и центральная сверхмассивная черная дыра (СМЧД). Кластер моделируется прямым интегрированием взаимодействия отдельных звезд друг с другом (N-body simulations), а также с газовым диском и черной дырой. Газовый диск задается феноменологически, в виде заданного и низменного во времени распределения плотности, и имеет кеплеровское вращение. Черная дыра также задана феноменологически в виде ньютоновского потенциала. 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 мы используем код phiGRAPE+GPU [8], который использует технологии параллельного вычисления (GPGPU и MPI). В этот код нами добавлен модуль, описывающий диссипативное взаимодействие звезд с газом. Эволюция системы начинается с состояния, задаваемого моделью Пламмера. Во всех запусках число звезд в системе составляет 32 тысячи. Более подробное описание численной модели может быть найдено в [6, 7].

Рассмотрим подробнее модель аккреционного диска. Возьмем за основу трехмерный, осесимметричный стационарный диск, который характеризуется дифференциальным вращением с локальной угловой скоростью. Радиальный профиль поверхностной плотности задан в виде

$$\Sigma(R) = \Sigma_d \left(\frac{R}{R_d} \right)^{-\alpha}, \quad (1)$$

где $\alpha = 3/4$, $R^2 = x^2 + y^2$, R_d - радиус диска и Σ_d - значение поверхностной плотности при $R = R_d$. Значение $\alpha = 3/4$ соответствует внешней границе диска по модели Новикова-Торна [9]. Масса диска равна

$$M_d = 2\pi \int_0^{R_d} \Sigma(R) R dR = \frac{2\pi}{2-\alpha} \Sigma_d R_d^2. \quad (2)$$

Для численного интегрирования уравнений движения сила, действующая на частицу должна быть гладкой и непрерывной функцией, поэтому необходимо ввести экспоненциальный множитель, который будет обеспечивать гладкое (но достаточно быстрое) уменьшение значения плотности диска при приближении к его границам [6]

$$\Sigma(R) = \Sigma_d \left(\frac{R}{R_d} \right)^{-\alpha} \exp \left[-\beta_s \left(\frac{R}{R_d} \right)^s \right]. \quad (3)$$

Для того чтобы полученное выражение соответствовало уравнению (2), выберем $\beta_s = \left[\Gamma \left(1 + \frac{2-\alpha}{s} \right) \right]$, где $\Gamma(x)$ - гамма-функция. Возьмем $s = 4$, тогда $\beta_s = 0.70$ для $\alpha = 3/4$. В этом случае поверхностная плотность при $R = R_d$ равна $\Sigma(R_d) = 0.49 \Sigma_d$ [6].

Для численного моделирования описанной модели выберем изотермический профиль плотности, заданный следующим выражением:

$$\rho_g(R, z) = \frac{\Sigma(R)}{\sqrt{2\pi} h_z} \exp \left(-\frac{z^2}{2h_z^2} \right). \quad (4)$$

В наших предыдущих работах [6, 7] мы использовали модель аккреционного диска с постоянной полутолщиной:

$$h_z = h R_d. \quad (5)$$

Если зависимость (5) подставить в выражение (4), то получим выражение для плотности диска с постоянной высотой:

$$\rho(R, z) = \frac{2-\alpha}{2\pi\sqrt{2\pi}} \frac{M_d}{h R_d^3} \left(\frac{R}{R_d} \right)^{-\alpha} \exp \left[-\beta_s \left(\frac{R}{R_d} \right)^s \right] \exp \left(-\frac{z^2}{2h^2 R_d^2} \right). \quad (6)$$

В этой работе мы рассмотрим новую модель, которая представляет из себя модификацию первой модели с введением линейного возрастания функции полутолщины диска на внутреннем участке. Эта модификация основана на физических свойствах внутреннего аккреционного диска, которые описываются приближением Шакуры-Сюняева [10].

$$h_z = h R_d \left(\frac{R}{R_{crit}} \right). \quad (7)$$

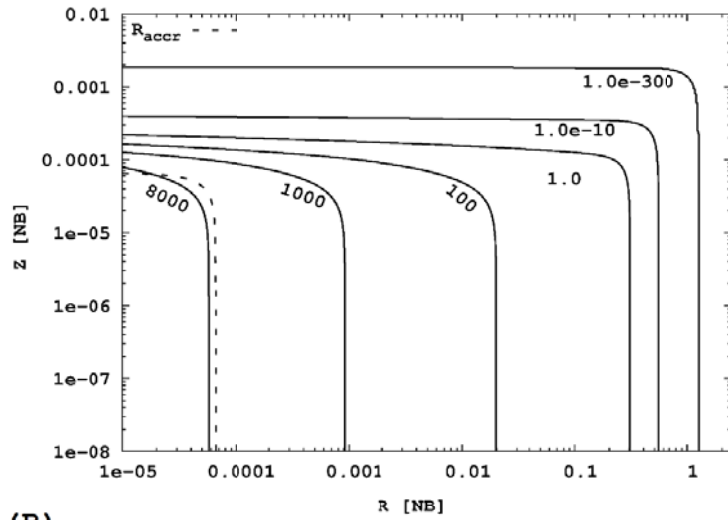
Точку перехода от линейной полутолщины к постоянной можно определить, приравняв выражения для скорости звука в случае самогравитации диска, $c_s^2 = 4\pi G h_z \Sigma$, и в случае ее отсутствия $c_s^2 = 2h_z^2 G M_{bh} R^{-3}$. Тогда получим, что $R_{crit} = 0.0257314$ в безразмерной системе единиц N-body [11], которую мы используем везде в дальнейшем.

Свойства аккреционного диска зафиксированы приведенной массой μ_d с аналитическим распределением плотности согласно уравнению (6) со значениями параметров $\alpha = 3/4$ и $s = 4$ и $h = 10^{-3}$. Подразумевается кеплеровское вращение диска в потенциале СМЧД, пренебрегая гравитационным воздействием диска и градиентами давления внутри диска [6]. На рисунке 1 приведено сравнение профилей плотности старой и новой моделей диска.

Результаты

Чтобы убедиться, что новая модель диска не меняет глобальную динамику системы и, таким образом, не противоречит полученным нами ранее результатам, мы сравнили темп роста черной дыры за счет аккреции звезд (рисунок 2). Как видно, эволюция массы черной дыры в течение двух

(А)



(В)

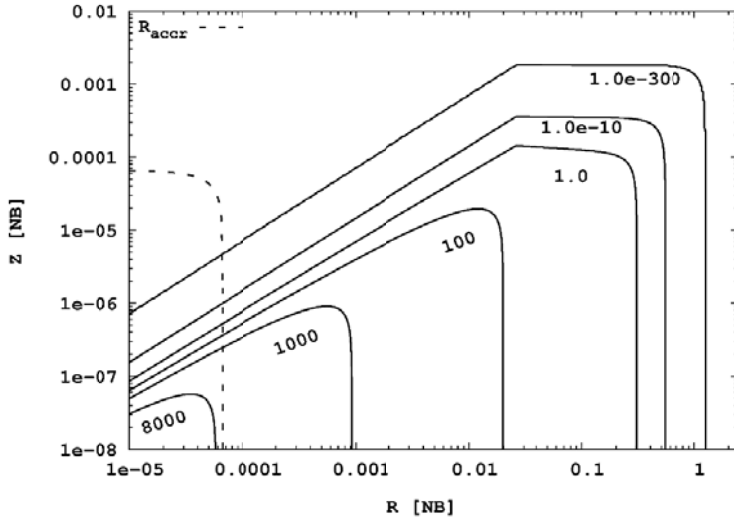


Рисунок 1 –
 Профиль плотности аккреционного диска. (А).
 Модель с постоянной толщиной, использовавшаяся в предыдущих работах. (В).
 Усовершенствованная модель с переменной толщиной.
 На обоих графиках по горизонтальной оси обозначен радиус (расстояние от центра в плоскости XY, т.е. в плоскости диска), по вертикальной оси – расстояние по оси Z, в безразмерной N-body системе единиц. На графиках показаны контуры постоянной плотности, а также значение плотности на этих контурах (также в системе N-body). Пунктирной линией обозначен радиус аккреции

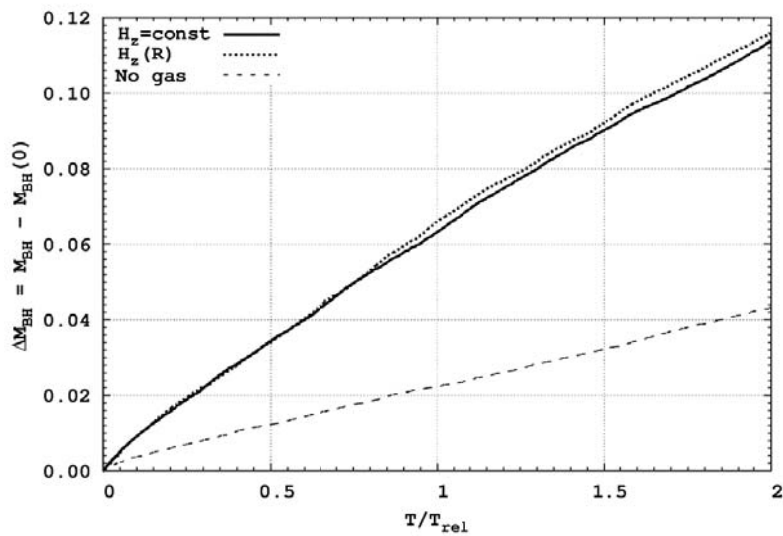


Рисунок 2 – Прирост массы черной дыры как функция времени для трех модельных запусков – со старой моделью диска (сплошная линия), с новой моделью (точечная линия), и контрольный запуск без газового диска (пунктир). Масса указана в безразмерной системе N-body единиц, время указано в единицах времени релаксации системы

времен релаксации идентична для обеих моделей диска. На том же графике показан контрольный запуск без газового диска. В этом случае рост массы черной дыры обусловлен лишь захватом тех звезд, которые оказались вблизи СМЧД в результате случайного пролета.

Далее, мы исследовали влияние аккреционного диска на динамические характеристики звездного кластера, в частности – на его суммарный угловой момент (рисунок 3). Как видно из рисунка, в запусках с газом звезды в центральной части кластера закручиваются диском в сторону его вращения, и центральная симметрия в этой области кластера нарушается – она становится также осесимметричной. При этом средний эффект старой и новой модели диска одинаков. Как видно, в целом влияние этих двух моделей диска на глобальные динамические характеристики системы практически неотличимо.

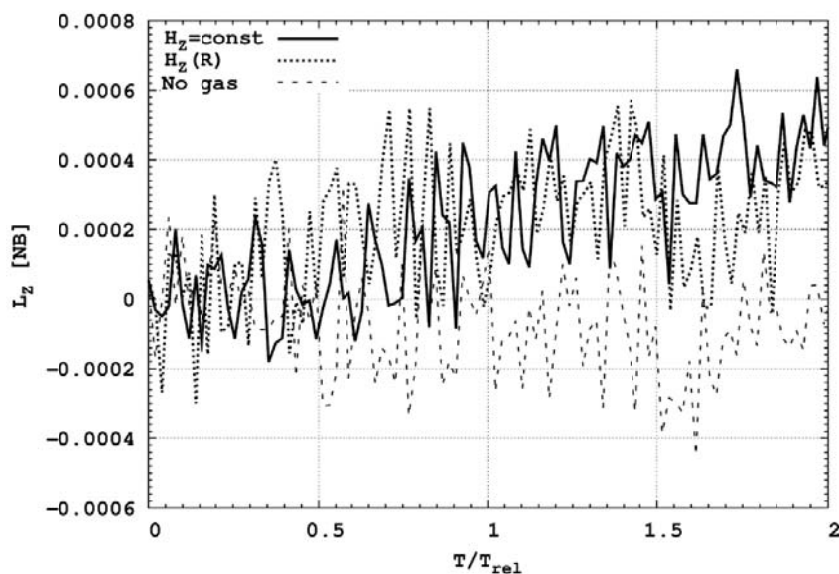


Рисунок 3 – Суммарная Z-компонента момента импульса центральной части звездного кластера внутри радиуса влияния черной дыры. Сплошная линия – запуск с первой моделью, точечная линия – с новой моделью, пунктир – запуск без газа

Отличие между этими моделями проявляется при анализе процесса аккреции звезд. Так, на рисунке 4 показаны орбитальные характеристики звезд в момент их аккреции (в течение всей модельной эволюции), а именно эксцентриситет и косинус угла наклона орбиты к плоскости аккреционного диска. Звезды, аккрецирующиеся при $e \approx 1$, то есть на орбитах, близких к гиперболическим, попадают в область захвата черной дыры в результате случайных пролетов (см. пунктирная линия на рисунке 2). Здесь нас интересуют звезды, которые аккрецируются благодаря воздействию газового диска, то есть звезды с малыми значениями эксцентриситета. В случае первой модели, звезды, которые аккрецируются при вращении в противоположную относительно диска сторону ($\cos(i) < 0$), могут обладать любыми значениями угла наклона и любыми значениями эксцентриситета (хотя у большинства звезд в момент аккреции орбита близка к круговой, $e \approx 0$). Звезды же, которые аккрецируются при вращении в одну с диском сторону, образуют на диаграмме тесную группу с почти круговыми орбитами, лежащими практически в плоскости диска. Напротив, в новой модели диска и со- и против-вращающиеся звезды аккрецируются при любых углах наклона орбиты.

На рисунке 5 показан момент импульса, переданный аккрецированными звездами черной дыре. Здесь также наблюдается существенное отличие двух моделей диска: в новой модели момент импульса передается черной дыре в большем количестве.

Эти результаты объясняются отличиями в структуре дисков в непосредственной близости от черной дыры. При использовании новой модели диска около 70% всех захваченных СМЧД звезд в момент захвата были очень близки к круговой орбите и находились в плоскости диска. И хотя обе модели диска инициируют одинаковый темп роста центральной СМЧД (рисунок 2), газовый диск с

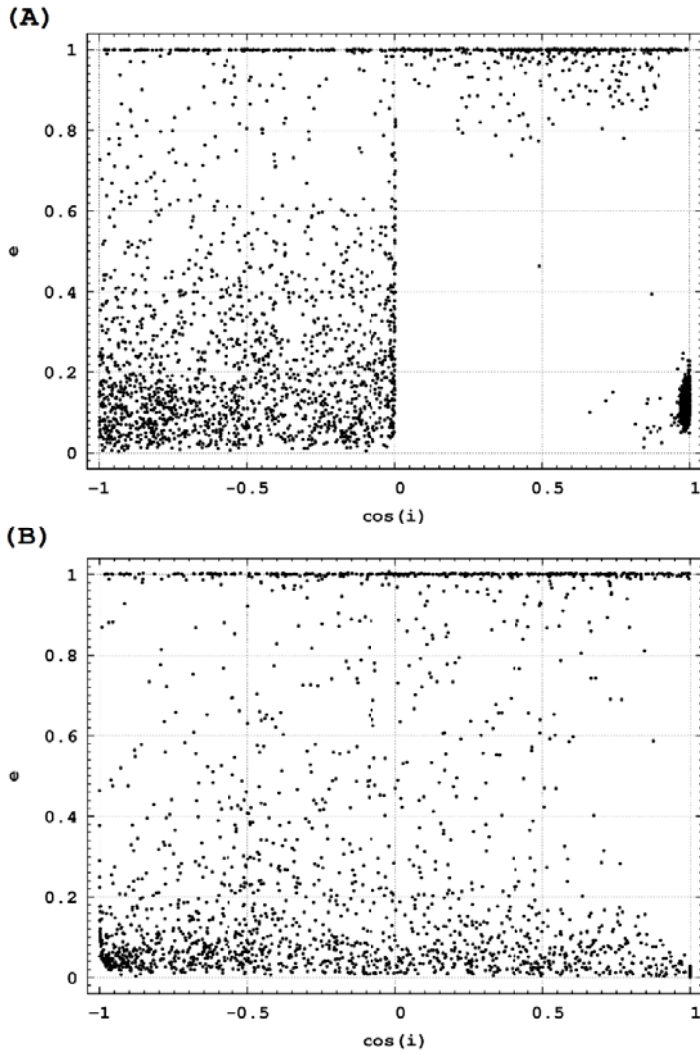


Рисунок 4 –
Орбитальные параметры звезд
в момент их аккреции.
По вертикальной оси – эксцентриситет,
по горизонтальной – косинус угла
наклона орбиты к плоскости диска.
(А). Данные из запуска
с первой моделью диска.
(В). Данные из запуска
со второй моделью диска

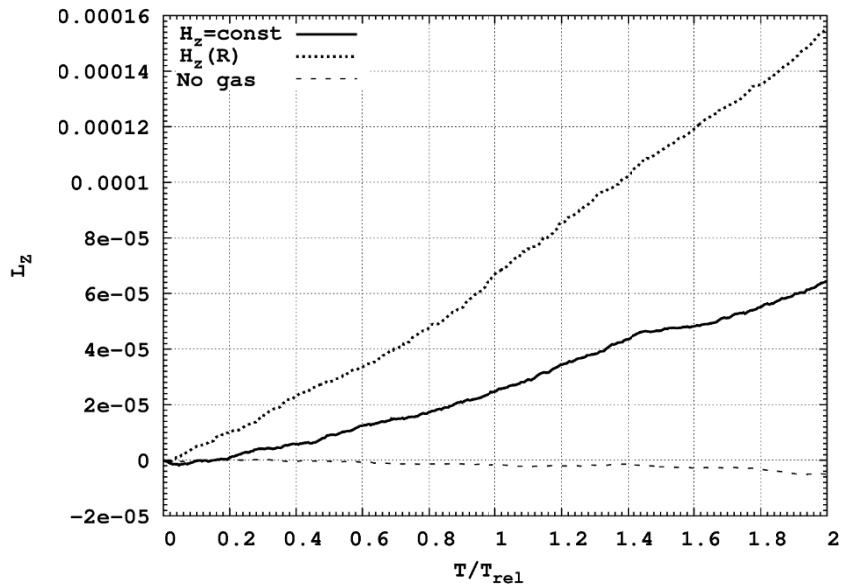


Рисунок 5 – Z-компонента момента импульса, переданная аккрецированными звездами черной дыре,
как функция времени. Обозначения те же, что и на предыдущих графиках

постоянной толщиной захватывает больше противовращающихся звезд, в отличие от диска с переменной толщиной. В прежней модели диска при уменьшении радиуса аккреций плотность газа возрастает, а его толщина остается прежней, при этом диск вращается вокруг центра по кеплеровскому закону. Это приводит к торможению многих звезд с обратным вращением в центральной части диска, включая звезды в почти перпендикулярной к диску плоскости. В случае усовершенствованной модели диска сверхплотный газ находится практически лишь в плоскости экватора около центральной черной дыры, что позволяет многим звездам в центральной части успеть проэволюционировать в сторону вращения диска. Звезды, которые проэволюционировали в положительную сторону вращения по отношению к направлению диска смогли увеличить вклад положительной Z-компоненты вращательного момента в центральное тело.

Таким образом, мы убеждаемся, что полученная феноменологическая модель газового аккреционного диска является физически адекватной, и исследованный профиль плотности может использоваться в будущем также и при моделировании газового диска напрямую методами гидродинамики. В будущем мы планируем усовершенствовать численную модель АЯГ с тем, чтобы учесть дополнительные процессы (столкновения звезд в центральной части, химическая эволюция звезд, учет кратных систем и т.п.) и проводить моделирования один к одному, т.е. с числом звезд, равным таковому в реальных кластерах (порядка миллиона звезд).

Работа выполнена в рамках Программы Целевого Финансирования, код программы – 0073/ПЦФ-14.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Beckmann, V., Shrader, C. Active galactic nuclei. John Wiley & Sons. – 2013. – 374 p.
- [2] Krawczynski H., Treister E. Active galactic nuclei – the physics of individual sources and the cosmic history of formation and evolution // *Front. Phys.* – 2013. – Vol. 8. – P. 609–629.
- [3] Wu X.-B., Wang F., Fan X., Yi W., Zuo W., Bian F., Jiang L., McGreer I.D., Wang R., Yang J., Yang Q., Thompson D., Beletsky Y. An ultraluminous quasar with a twelve-billion-solar-mass black hole at redshift 6.30 // *Nature*. – 2015. – Vol. 518. – P. 512–515.
- [4] Kormendy J., Ho L.C. Coevolution (or not) of supermassive black holes and host galaxies // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 51. – № 1. – P. 511–653.
- [5] Seth, A., Agüeros, M., Lee, D., Basu-Zych, A. The coincidence of nuclear star clusters and active galactic nuclei // *The Astrophysical Journal* – 2008. – Vol. 678. – P. 116–130.
- [6] Just, A., Yurin, D., Makukov, M., Berczik, P., Omarov, Ch., Spurzem, R., Vilkoviskij, E.Y. Enhanced accretion rates of stars on supermassive black holes by star-disk interactions in galactic nuclei // *The Astrophysical Journal*. – 2012. – Vol. 758. – P. 51.
- [7] Vilkoviskij E., Makukov M., Omarov Ch., Panamarev T., Spurzem R., Berczik P., Just A. Numerical simulations of AGN evolution // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. – 2013. – Vol. 28. – P. 151–160.
- [8] Harfst, S., Gualandris, A., Merritt, D., Spurzem, R., Zwart, S. P., Berczik, P. Performance analysis of direct N-body algorithms on special-purpose supercomputers // *New Astronomy*. – 2007. – Vol. 12. – P. 357–377.
- [9] Novikov I. D., Thorne K. S. Astrophysics of black holes // In: *Black holes*. – 1973 – P. 343–450.
- [10] Shakura N.I., Sunyaev R.A. Black holes in binary systems. Observational appearance // *Astronomy and Astrophysics*. – 1973. – Vol. 24. – P. 337–347.
- [11] Aarseth, S. J. Gravitational N-Body Simulations: Tools and Algorithms // Cambridge University Press. – 2003. – 431 p.

REFERENCES

- [1] Beckmann, V., Shrader, C. Active galactic nuclei. John Wiley & Sons, **2013**. P. 374.
- [2] Krawczynski H., Treister E. Active galactic nuclei – the physics of individual sources and the cosmic history of formation and evolution. *Front. Phys.*, **2013**, 8, 609–629.
- [3] Wu X.-B., Wang F., Fan X., Yi W., Zuo W., Bian F., Jiang L., McGreer I.D., Wang R., Yang J., Yang Q., Thompson D., Beletsky Y. An ultraluminous quasar with a twelve-billion-solar-mass black hole at redshift 6.30. *Nature*, **2015**, 518, 512–515.
- [4] Kormendy J., Ho L.C. Coevolution (or not) of supermassive black holes and host galaxies. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **2013**, 51, 511–653.
- [5] Seth, A., Agüeros, M., Lee, D., Basu-Zych, A. The coincidence of nuclear star clusters and active galactic nuclei. *The Astrophysical Journal*, **2008**, 678, 116–130.
- [6] Just, A., Yurin, D., Makukov, M., Berczik, P., Omarov, Ch., Spurzem, R., Vilkoviskij, E.Y. Enhanced accretion rates of stars on supermassive black holes by star-disk interactions in galactic nuclei. *The Astrophysical Journal*, **2012**, 758, 51.
- [7] Vilkoviskij E., Makukov M., Omarov Ch., Panamarev T., Spurzem R., Berczik P., Just A. Numerical simulations of AGN evolution. *Astronomical and Astrophysical Transactions*, **2013**, 28, 151–160.
- [8] Harfst, S., Gualandris, A., Merritt, D., Spurzem, R., Zwart, S. P., Berczik, P. Performance analysis of direct N-body algorithms on special-purpose supercomputers. *New Astronomy*, **2007**, 12, 357–377.
- [9] Novikov I. D., Thorne K. S. Astrophysics of black holes. In: *Black holes*, **1973**, 343–450.

[10] Shakura N.I., Sunyaev R.A. Black holes in binary systems. Observational appearance. *Astronomy and Astrophysics*, 1973, 24, 337-347.

[11] Aarseth, S. J. Gravitational N-Body Simulations: Tools and Algorithms. Cambridge University Press, 2003, P. 431.

АККРЕЦИЯЛЫҚ ДИСК ІШІНІНІҢ БЕЛСЕНДІ ЯДРОЛЫ ГАЛАКТИКАЛАРДЫҢ ДИНАМИКАСЫНА ӘСЕРІ

**Б. Т. Шүкірғалиев^{1,2}, Т. П. Панамарев^{1,2}, С. Г. Абдрахманов¹,
М. А. Мақуков¹, Ч. Т. Омаров¹**

¹В. Г. Фесенков атындағы астрофизикалық институт, Алматы, Қазақстан,

²Astronomisches Rechen-Institut, Universität Heidelberg, Heidelberg, Germany

Тірек сөздер: Ғаламның белсенді ядролары, жұлдыз динамикасы, есептеуіш астрофизика, аккреция, N-дене есебі.

Аннотация. Параллельді есептеу технологияларын пайдалана отырып, біз ғаламның белсенді ядроларының сандық үлгілерінің зерттеулерін жүргіземіз. phiGRAPE+GPU кодының негізінде іске асырылған қарастырылып отырған үлгі үш құраушыдан құралған – орталық аса үлкен массалы қара құрдымнан, аккрециялық газ дискісі және ықшам жұлдыздық кластерден. Жұлдыздық кластер эволюциясы тікелей әдіспен (N-body simulations) интегралданады, ал қара құрдым мен газды диск феноменологиялық түрде берілген – қара құрдым сыртқы (кеңістікте қозғалмайтын, алайда қара құрдым массасының өсуі салдарынан өзгертін) потенциал түрінде, ал газды диск уақыт бойынша өзгермейтін газ тығыздығының кеңістікте таралуымен берілген. Әр жұлдыз үшін басқа жұлдыздармен өзара гравитациялық әсерлесуімен қоса қара құрдымның гравитациялық әсері және газды дисктің диссипативті әсері есептеледі. Соңғысы кластердің орталық аймағындағы жұлдыздардың энергиясын жоғалтуына және белгілі шарттар ішінде кейбірінің аккрециялануына алып келеді. Бұл жұмыста газды дисктің тұтас жүйенің эволюциясына тигізетін әсерін зерттеуге ерекше көңіл бөлінген. Сондай-ақ, профильдерімен ерекшеленетін екі аккрециялық диск үлгілерін салыстыра отырып, олардың жұлдыздар аккрециясына, жұлдыздардың орбиталдық параметрлеріне және жалпы жүйенің динамикалық сипаттарына жасаған әсерлеріне талдау жасалған.

Поступила 15.15.2015 г.

**Publication Ethics and Publication Malpractice
in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

[www:nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)

<http://www.physics-mathematics.kz>

Редактор *М. С. Ахметова*
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 25.09.2015.
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.
11,0 п.л. Тираж 300. Заказ 5.