Э.Я. ВИЛЬКОВИСКИЙ[1], Ч.Т. ОМАРОВ[1],
Р. ШПУРЦЕМ[2], М. МАКУКОВ[1], Д. ЮРИН[1], А. ЮСТ[2]

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИССИПАТИВНЫХ СИЛ НА ЭВОЛЮЦИЮ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

Выполнены численные расчеты многокомпонентных моделей эволюции активных ядер галактик методом «n-body simulation» с учетом диссипативных сил при различных количествах имитирующих звезды частиц в системе и обсуждаются проблемы перехода от модельных расчетов эволюции системы к реальной эволюции АЯГ.

1. Введение.

Многочисленные данные наблюдений последних лет свидетельствуют о том, что активные ядра галактик (АЯГ) представляют собой сложные физические системы, состоящие их трех более простых физически различных подсистем: сверхмассивной черной дыры (СМЧД), окружающего ее компактного звездного кластера (КЗК) и газово-пылевой подсистемы (ГС), важной частью которой является аккреционный диск (АД) вокруг черной дыры. Кроме того, активные ядра галактик по определению находятся в центрах галактических ядер, и само явление активности связано с взаимодействием галактик в близких парах или скоплениях галактик.

Такой многокомпонентный состав и влияние многих факторов определяет сложность теоретического описания динамики вещества АЯГ, необходимого для понимания физики активности галактических ядер. В настоящее время наиболее адекватным подходом к исследованию динамики и эволюции вещества АЯГ становится разработка и расчеты сложных многокомпонентных численных моделей. Быстрый рост возможностей современных компьютеров (рост объемов данных и скорости выполнения операций) делают расчеты численных моделей наиболее перспективным методом познания физической природы АЯГ, соответствующим огромной информативности современных средств наблюдения, в том числе растущим потокам данных, получаемых в различных спектральных диапазонах на космических телескопах.

В настоящей работе мы рассмотрим первые результаты расчетов совместной эволюции трех основных подсистем активного ядра – сверхмассивной черной дыры (СМЧД), аккреционного диска (АД) и компактного звездного кластера (КЗК). Основу модели составляет расчет совместной динамики и эволюции всех компонент системы на базе методики «n-body simulation», включающей расчеты как гравитационного вза-

[1]АФИФ АО НЦКИТ, [2]ARI Heidelberg University

имодействия отдельных звезд компактного звездного кластера между собой и со СМЧД, так и диссипативные взаимодействия звезд с газовой средой аккреционного диска, и приливные разрушения звезд в окрестности СМЧД.

В Казахстане первый специализированный компьютерный кластер для расчетов «n-body simulation» был создан в 2008 г. на основе совместного казахстанско-германского проекта «STARDISK» [1], объединившего усилия групп Гайдельбергского университета и Астрофизического института им. В.Г.Фесенкова. Настоящая работа представляет результаты первого этапа исследований проблемы эволюции и физики АЯГ с помощью этого счетного кластера.

2. Уравнения движения, начальные условия и расчеты моделей.

Для выполнения расчетов эволюции системы, состоящей из компактного звездного кластера (КЗК), СМЧД и АД, необходимо иметь уравнения движения каждой из подсистем, а также начальное распределение образующего их вещества. В отличие от работ, трактующих диск как бесконечно тонкое образование с заданной поверхностной плотностью, мы здесь и в дальнейшем будем рассматривать пространственное распределение газа в диске, и рассчитывать силы трения, действующие на звезду в каждой точке ее траектории.

Уравнения движения для *i*-той звезды системы имеют вид

$$\vec{a}^{*}_{i} = (\vec{F}_{i}^{\text{КЗК}} + \vec{F}_{i}^{СМЧД} + \vec{F}_{i}^{АД})/m_i, \qquad (1)$$

где $\vec{F}_i^{КЗК} = -\sum_{ij\neq} \frac{Gm_i m_j \vec{r}_{ij}}{r_{ij}^3}$ – суммарная сила взаимодействия с остальными звездами системы, $\vec{r}_{ij} = \vec{r}_i - \vec{r}_j$, $\vec{F}_i^{СМЧД} = -\frac{Gm_{*i}M_{BH}\vec{r}_i}{r_i^3}$ – сила притяжения к центральной ЧД, $\vec{F}_i^{АД} = -Q_{Drag}\rho|V_{rel}|\vec{V}_{rel}$ – сила трения при движении звезды в газовой среде диска с плотностью с.

Начальные условия задачи формируются следующим образом: распределение звезд задается посредством случайного выбора координат внутри распределения Пламмера [2]

$$M(r) = m_0 [1 + (r/a)^2]^{-5/2}, \qquad (2)$$

описывающего равновесное распределение массы в звездной системе при отсутствии черной дыры.

В начальной фазе расчета, за время порядка нескольких «времен пересечения» в звездном кластере, в системе с центральной СМЧД устанавливается квазиравновесное распределение с учетом диффузии звезд внутрь сферы влияния СМЧД и разрушения их при попадании внутрь сферы с радиусом приливного разрушения вблизи ЧД. Звезды, попавшие внутрь этой сферы, «изымаются» из КЗК и их масса присоединяется к массе СМЧД.

Такой подход позволяет проследить дальнейшую квазиравновесную эволюцию КЗК с учетом парных взаимодействий звезд, их взаимодействий с ЧД и АД. Вместе с тем, в настоящей работе мы введем и некоторые существенные упрощения задачи, для оценки роли воздействия на эволюцию системы ее отдельных параметров. Для начала, мы будем интересоваться совместной эволюцией лишь КЗК и СМЧД, считая АД «неизменной» подсистемой. Заметим, что такая постановка задачи не является самосогласованной, поскольку мы будем принимать в расчет передачу момента вращения от АД к КЗК, но считать массу и момент самого АД неизменными. Физической моделью, оправдывающей расчеты модели такого ряда, может служить непрерывный приток вещества с заданным удельным моментом в АД от соседней галактики, который поддерживает массу, момент и форму АД в практически неизменном состоянии в ходе расчета модели. Проблемы эволюции АД мы рассмотрим в последующих работах; на данном этапе мы сосредоточим внимание на расчетах эволюции КЗК и СМЧД, считая параметры аккреционного диска неизменными.

Второе упрощение состоит в том, что мы вначале исключим гравитационное воздействие диска, интересуясь лишь диссипативными силами трения при движении звезд внутри диска. Для того чтобы рассмотреть лишь влияние диссипативных процессов в диске без влияния несферичности потенциала поля тяготения диска на динамику звезд, мы выбираем отношение масс звездной системы, СМЧД и диска в виде 1: 0.1: 0.01. Это позволяет на первом этапе пренебречь влиянием несферичности потенциала диска на динамику звезд. В дальнейшем мы проведем соответствующие расчеты с учетом несферичности потенциала диска. Что касается конкретного выбора величины силы трения при движении звезд в

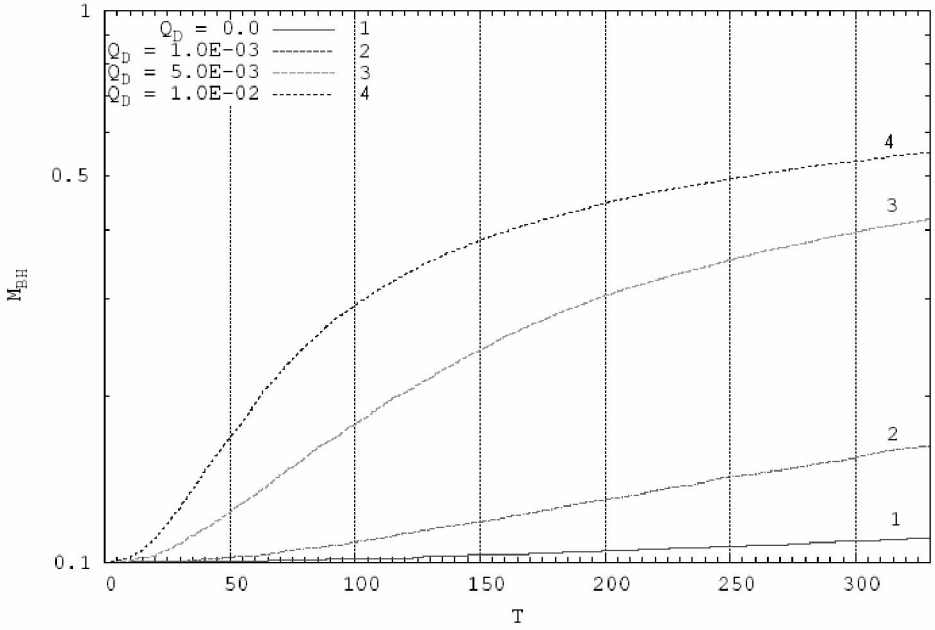

Рис. 1. Эволюция массы черной дыры для различных коэффициентов силы трения звезды в газовом диске

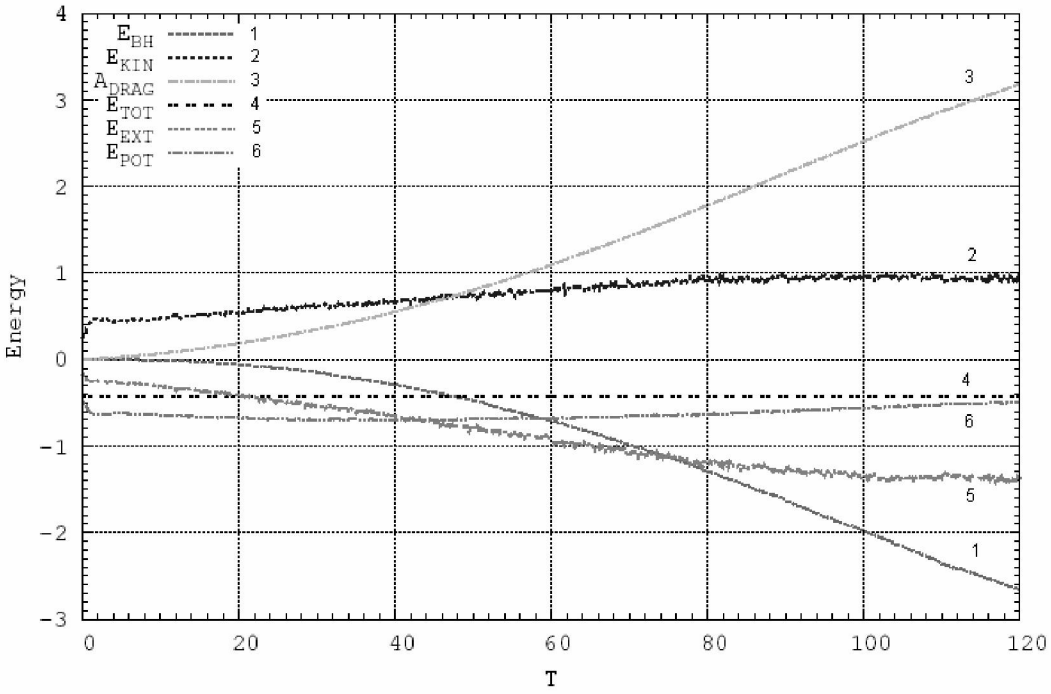

Рис. 2. Поведение компонент энергии системы с N = 10000

диске, то мы будем рассматривать ранее определенную величину Q_{Drag} в определении силы трения при движении звезды в газе как свободный параметр, определяющий диссипативную силу, действующую на звезду со стороны диска.

Радиальное распределение плотности газа в аккреционном диске выбрано нами в виде

$$\rho(R, z=0) = \rho_0 \left[R^2 + \left(\frac{0.01}{R} \right)^6 \right]^{-0.375} \exp(-R^4) \qquad (3)$$

3. Результаты расчетов

Для того чтобы изучить влияние аккреционного диска на эволюцию системы, мы рассчитали эволюцию системы КЗК+СМЧД+АД для раз-

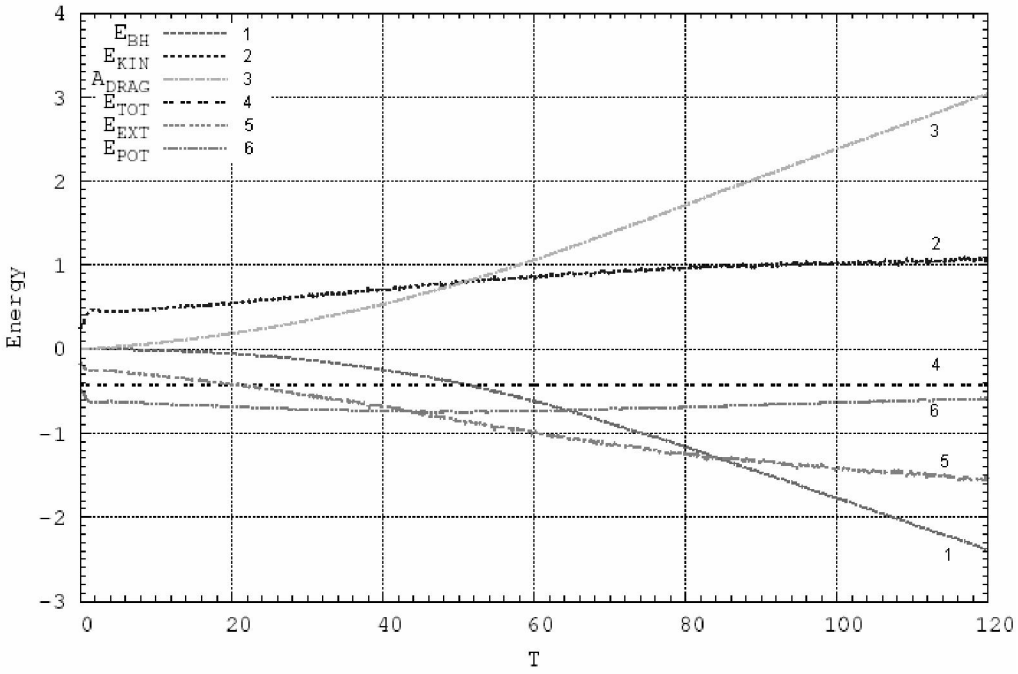

Рис. 3. Поведение компонент энергии системы с $N = 32000$

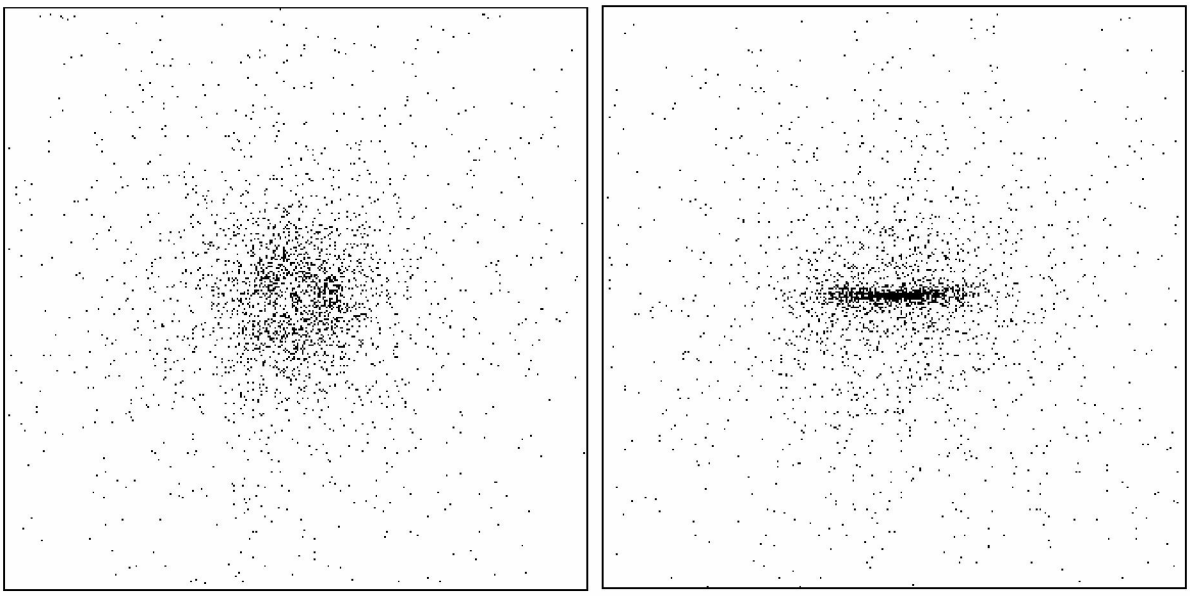

Рис. 4. Пространственное распределение звезд (проекция на плоскость XZ).
Слева – в начальный момент, справа – в момент $T = T_{diss}$

личных коэффициентов трения Q_{Drag} в выражении для силы трения, действующей на звезду, включая случай Q_{Drag} =0, то есть движение звезд без аккреционного диска. Результаты расчета представлены на Рис. 1, на котором показан темп роста массы СМЧД в системе при различных значениях параметра Q_{Drag}, который определяет интенсивность диссипации. В отсутствие АД сечение «захвата» звезды определяется скоростью изменения энергии и моментов звезд вследствие их парных взаимодействий и дрейфа орбит звезд внутрь «конуса потерь», в котором происходит захват звезд в ЧД.

Присутствие АД существенно увеличивает скорость роста массы ЧД в системе, причем эта скорость растет с ростом эффективности работы

диссипативных сил в системе (в данном случае – с ростом коэффициента Q_{Drag}).

Заметное влияние присутствия диска на скорость роста массы СМЧД в данном случае происходит лишь при сравнительно больших величинах коэффициента Q_{Drag}>.001. Этот результат обусловлен не только сравнительной малостью массы диска, но и росту эффекта парных взаимодействий звезд (малостью характерного времени релаксации энергии звезд при их парных взаимодействиях по сравнению со временем диссипации энергии) в системе с малым числом частиц.

Время диссипации системы мы определяем как время, когда суммарная работа силы диссипации над всеми звездами станет равной первоначальной кинетической энергии системы. Результаты численных расчетов показали, что время диссипации, выраженное в единицах динамического времени (оно порядка времени пересечения системы звездой), почти не зависит от числа частиц в системе. На рис. 2 и 3 представлено изменение всех компонент энергий в наших расчетах для двух систем с числом частиц 10^4 и $3.2*10^4$, соответственно. На этих рисунках E_{KIN} – суммарная кинетическая энергия системы, E_{POT} – потенциальная энергия самогравитации звездного кластера, E_{EXT} – энергия взаимодействия звезд кластера с черной дырой, E_{BH} – энергия, выделяемая при аккреции звезд, A_{DRAG} – суммарная работа сил диссипации, E_{TOT} – сумма всех компонент. На этих графиках время диссипации определяется моментом пересечения кривых для A_{DRAG} и E_{KIN}.

После наступления времени диссипации, в пространственном распределении звезд уже заметна асимметрия и образование звездного диска, совпадающего в пространстве с газовым диском. Пример такого распределения при Q_{Drag} = .01 приведен на рис. 4.

На этом рисунке видно принципиальное отличие нашей модели, в которой учтены парные гравитационные взаимодействия звезд, от проводимых ранее расчетов эволюции орбит звезд, пересекающих аккреционный диск [3,4]. При учете только лишь диссипативных сил орбиты звезд стремятся к предельной орбите в плоскости диска, а в нашей модели звезды сохраняют определенное рассеяние над этой плоскостью из-за взаимодействия с остальными звездами системы даже при очень больших значениях параметра Q_{Drag}.

5. Заключение

Таким образом, нами построены основы численной модели для расчетов структуры, динамики и эволюции активных ядер галактик как сложных систем, включающих в себя СМЧД, газовую подсистему (аккреционный диск в данном случае) и заездную подсистему (в данном случае КЗК, состоящий из звезд равных масс). Тестирование упрощенных вариантов модели показывает, что она правильно описывает эволюционные свойства системы и обладает большим потенциалом для дальнейшего совершенствования в направлении приближения ее к реальным свойствам активных ядер галактик.

В дальнейшем предполагается разработать следующие направления развития модели:

- исследовать воздействие гравитационного потенциала диска на динамику и эволюцию КЗК;
- исследовать свойства модели с более близкими к реальности распределениями масс и размеров звезд;
- исследовать более точно (с учетом изменения формы и потери массы звезды) задачу о движение звезд в газе;
- изучить эволюцию модели АЯГ при параллельном расчете динамики и «внутренней» эволюции звезд, включая образование звезд из межзвездной среды, их эволюцию и гибель в результате взрывов сверхновых и т.п.
- изучить влияние звезд галактического балджа;
- исследовать космогонические эффекты и возможность включения в модель эффектов проявления темной материи и темной энергии.

Дальнейшее развитие численной динамической модели эволюции АЯГ совместно с эволюционными моделями звезд и с моделями спектров звезд, аккреционного диска и газовой среды и переноса излучения в ней, позволит создать полную компьютерную модель как «внутренних» (не наблюдаемых прямо) так и «внешних» (пригодных для сравнения с наблюдениями) физических свойств АЯГ.

Работа выполнена в рамках ПФИ, шифр Ф-0351, при поддержке проекта STARDISK, Volkswagen.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вильковиский Э.Я., Омаров Ч.Т., Шпурцем Р.,* Возможности компьютерных расчетов численных моделей эволюции гравитирующих систем.//Известия НАН РК, Серия физико-математическая. 2008, №4, 54

2. *Plummer H.C.* On the problem of distribution in globular star cluster// MNRAS 1911, 71, 460.

3. *Karas V., and Vokrohlicky D.*, A Star Orbiting around a Supermassive BH // MNRAS 1993.V.265.P. 365

4. *Rauch K.P.,* Collisional Stellar Dynamics around Massive Black Holes in Active Galactic Nuclei// ApJ 1999.V.514.P. 725

Резюме

Ғаламдардың активті ядроларының эволюциясының жүйесіндегі жұлдыздарды еліктелген бөлшектердің әртүрлі мөлшерлерімен диссипаттық күштерді есепке алғанда «n-body simulation» әдіспен көпқұраушылы моделдерінің сандық есебі есептеліп шығарылған және осы жүйесінің эволюциясының моделдердің есептеуінен нақты эволюциясына көшуін мәселелері талқыланады.

Summary

Numerical simulations of the many-component models of the AGN evolution with the «n-body simulation» method, taking into account influence of dissipative forces with different amounts of particles which imitate stars of the real system are realized, and some problems of interpretation of the model in terms of the real evolution of AGN are discussed.

Астрофизический институт
им. В.Г.Фесенкова МОН РК
г. Алматы

Поступила 20 апреля 2009 г.