

Проблемы небесной механики и динамики звездных систем

УДК 524.8

Э.Я.ВИЛЬКОВИСКИЙ¹, Ч.Т.ОМАРОВ¹, Р.ШПУРЦЕМ², М.МАКУКОВ¹, Д.ЮРИН¹, А.ЮСТ²

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ЭВОЛЮЦИИ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

Сформулированы основные свойства модели АЯГ как сложной системы, состоящей из трех основных подсистем: сверхмассивной черной дыры, газового диска и компактного звездного кластера и обсуждаются проблемы перехода от модельных расчетов эволюции системы к реальной эволюции АЯГ.

1. Введение.

Физическая природа активных ядер галактик (АЯГ) далека от полного понимания вследствие их большой удаленности и относительной малости размеров областей энерговыделения; поэтому развитие теории АЯГ остается одной из основных проблем современной астрофизики.

В конце XX века был установлен важный факт связи масс и дисперсии скоростей звезд галактических балджей (сфериодальных подсистем галактик) с массами центральных черных дыр, находящихся не только в центрах активных галактик, но и в центрах практически всех не слишком мелких галактик [1,2].

В последнее время, благодаря работе крупнейших наземных и космических телескопов, появляется много результатов все более точных наблюдений центральной зоны АЯГ [3-6], из которых следует тесная связь явления АЯГ не только с центральной сверхмассивной черной дырой (СМЧД), но также и с окружающим ее компактным массивным звездным кластером, существование которого было постулировано десятилетием раньше в работах [7,8]. Размер центрального звездного кластера порядка размеров шаровых галактических скоплений, но масса его гораздо больше; обычно она примерно на порядок величины превышает массу СМЧД в АЯГ. Все эти данные подтверждают сформулированный ранее в работах [8-11] подход к явлению АЯГ как к сложной физической системе, образованной и функционирующей в результате взаимодействия трех (основных) более простых, физически различных подсистем: СМЧД, окружающего ее компактного звездного кластера (КЗК) и газово-пы-

левой подсистемы (ГС), важной частью которой является аккреционный диск (АД) вокруг черной дыры.

Существующие ранее теории АЯГ основывались на модели дисковой аккреции на СМЧД, рассматривая различные варианты строения аккреционных дисков, степени их замагниченности и темпа акреции [12-14].

Наличие компактной звездной системы, в центре которой находится СМЧД с аккреционным диском, качественно меняет задачу, поскольку требует анализа и расчета взаимодействия звезд с газовым диском и черной дырой. Впервые некоторые аспекты взаимодействия звезд с центральным активным объектом и окружающим ее скоплением газа (в том числе с – АД) рассматривались в работах [15-17]. Вначале взаимодействие звезд с АД исследовалось на примере изучения движения отдельной звезды в газовом диске, что приводило к заключению о быстром уменьшении эксцентриситета орбиты звезды и стремлении угла ее наклона к плоскости диска, после чего эволюция орбиты практически прекращается [18,19]. В работе [11] впервые обращено внимание на то, что звезды в АД не будут стремиться к идеально круговым движениям в плоскости диска, но будут обладать конечной (флуктуирующей) нормальной к диску компонентой скорости вследствие взаимодействия каждой из звезд диска с окружающей звездной системой. Это взаимодействие приводит к непрерывному потоку звезд диска к центру системы. В работах [20-22] были рассчитаны результаты воздействия на динамику отдельных звезд не только газового диска, но и окружающей звездной системы. Было

¹АФИФ АО НЦКИТ, ²ARI Heidelberg University

показано также, что предположение о присутствии КЗК в АЯГ позволяет построить и непротиворечивую теорию истечения вещества АЯГ [9,10].

2. Особенность использования метода «n-body simulation» с учетом воздействия диссипативных сил на динамику звезд.

Методы моделирования динамики звездных систем имеют большую историю [23] и в настоящее время развились в особую область компьютерной физики и астрономии, получившие общее название «n-body simulation» (моделирование динамики системы n тел). Эта область включает в себя работы множества конкурирующих и взаимодействующих между собой научных коллективов (в США, Германии, Японии, Англии и др. – практически во всех развитых странах), разрабатывающих системы компьютерных программ и методик для моделирования разного рода задач. Технической базой метода служат быстро растущие возможности современных компьютеров, а также использование некоторых специальных технических средств (GRAPES), специально разрабатываемых и изготавливаемых для этих целей.

Компьютерные программы для решения задач методами n-body simulations обычно используют специальную безразмерную систему единиц, в которой, как правило, величины гравитационной постоянной G (в законе тяготения Ньютона), суммарной массы звезд системы M и характерного размера системы (например, радиус сферы, включающей половину массы звездной системы R) принимаются равными единице. Реальное число звезд в звездных системах (шаровые скопления, галактики), как правило, значительно превышает число частиц системы при численных расчетах, но расчеты в безразмерных единицах позволяют сравнивать эволюцию систем с различными числами частиц.

Добавление центральной массы СМЧД и диссипативных сил (как в нашем случае) вносит дополнительные проблемы. При переходе от системы реальных звезд (число звезд в звездном кластере $N \sim 10^8$) к системе условных частиц ($n \sim 10^4$) компьютерной модели, следует установить правила такого перехода с учетом соотношения воздействий на эволюцию системы упругих (гравитационные) и неупругих (диссипативные) процессов.

Далее для определенности будем считать, что число звезд в моделируемой нами звездной системе $N = 10^8$, все звезды одинаковы и обладают параметрами Солнца ($R_s = 7 \cdot 10^{10}$ см, $M_s = 2 \cdot 10^{33}$ г), суммарная начальная масса звезд $M = 10^8 M_s$, характерный размер системы (радиус половины массы), $R = 1$ пк = $3 \cdot 10^{18}$ см.

Сила трения, действующая на звезду, движущуюся в разреженном газе равна

$$F = Q p r_s^2 c V^2 \quad (1)$$

где r_s – радиус звезды, c – плотность газа, V – скорость звезды.

Коэффициент Q характеризует особенности взаимодействия звезды с газовой средой; здесь мы будем для простоты полагать его близким к единице.

Средняя потеря энергии звезды при пересечении диска с толщиной H составит

$$\Delta E \approx Q_D p r_s^2 c V^2 H \sim Q_D p r_s^2 c_{sr} R V^2, \quad (2)$$

где $Q_D = Qq$, коэффициент $q = q_h h$ характеризует массу, (выраженную в долях массы звездной системы), размер и форму диска (с учетом $H = hR$), а также усредненные параметры орбит звезд, так, чтобы средняя величина $c_{sr} = M/R^3$.

Таким образом, величина ΔE характеризует среднюю потерю энергии звезды за один период обращения ее в системе за счет работы силы трения при движении звезды в газовой среде системы.

Средняя кинетическая энергия звезды в равновесной звездной системе равна

$$E_k \sim m_s V^2 / 2 \sim GM/R, \quad (3)$$

где G – гравитационная постоянная, M – суммарная масса системы, R – ее характерный размер, V – среднеквадратичная скорость звезды.

Характерное время диссипации средней энергии звезды вследствие пересечения ею врачающегося вокруг СМЧД газового диска можно оценить с помощью выражения, характеризующего потерю энергии за одно пересечение по отношению к средней энергии звезды E_k

$$\frac{\Delta E}{E_k} \approx Q p r_s^2 c V^2 q H / E_k \approx \\ \approx Q_D p r_s^2 (M/R^2) (GM/R) / (m_s (GM/R)). \quad (4)$$

При полной массе $M \gg M_{BH}$, квадрат средней скорости звезд (GM/R), входящий как в числитель, так и в знаменатель отношения, сокращается, так что вместо отношений энергий мы

переходим к отношению масс – массы, «выметаемой» звездой за один период, к массе звезды. Заметим, что это отношение то же, как и отношение «средней» силы трения звезды о газ к характерной величине силы в скоплении звезд – принимая за последнюю силу притяжения звезды к центру скопления (равную центробежной силе при круговом движении). При типичных значениях $Q_D \sim 1$, $r_s = R_\odot$, $m_s = M_\odot$, $M = 10^8 M_\odot$, $R = 1$ пк получим для всех перечисленных отношений величину порядка 10^{-7} , так что характерное время диссилиативной эволюции системы

$$T \sim 10^7 T_{\text{орб}}, \quad (5)$$

где при указанных выше характерных значениях параметров средний орбитальный период $T_{\text{орб}} \sim (R^3/GM)^{1/2} \sim 1.3 \cdot 10^3$ лет.

Заметим, что в соответствующем безразмерном выражении для силы трения, действующей на «частицу» в модели «n-body simulation» (число частиц модели $n \ll N_s$), удобно для сохранения полной массы и размера системы каждую частицу считать состоящей из $k = N_s/n \sim 10^8/n$ обычных звезд, во столько же (k) раз увеличив ее поперечное сечение:

$$\frac{F_D}{F_G} \approx Q_D p k r_s^2 c_{\text{sr}} V^2 / (\text{km}_s (V^2/R)) = \\ Q_{\text{Drag}} (M/R^3) / (\text{km}_s / R), \quad (6)$$

где $Q_{\text{Drag}} = Q_D p k r_s^2$.

В этом случае, переходя к безразмерным величинам $r_s^2/R^2 = 5.4 \cdot 10^{-16}$; $M/m_s = 10^8$, получим

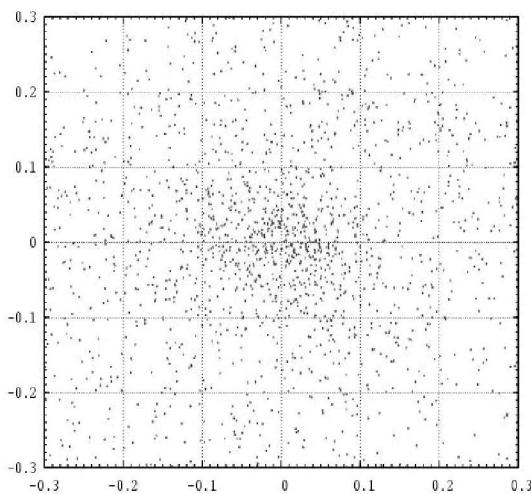


Рис. 1. Вид центральной части звездной системы в начальный момент (слева) и спустя 700 «времен пересечения» системы

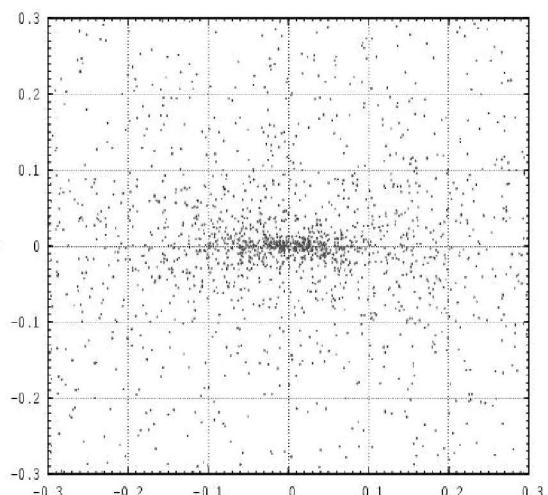
$$Q_{\text{Drag}} = Q_D p * 5.4 * 10^{-8} \approx 1.7 * 10^{-7} Q_D. \quad (7)$$

Важно иметь в виду, что все ранее полученные соотношения основаны на допущении малости массы СМЧД по отношению к массе окружающего ее компактного звездного скопления и, соответственно, малости «радиуса влияния» ЧД в звездной системе. Однако, начало каждого цикла активности может проходить в различных условиях – так, реальные АЯГ в фазе своей максимальной активности, а также ядра галактик, содержащие в центре СМЧД достаточно большой массы ($M > 10^8 M_\odot$), заведомо будут обладать повышенным отношением массы ЧД к массе звездного кластера, что способно существенно изменить природу эволюции в конкретном цикле активности АЯГ.

3. Уравнения движения и основные параметры подсистем АЯГ в нашей модели.

Соотношение характерных времен для АЯГ – динамического (орбитального) T_{dyn} , времени диссилиации T_{diss} и времени релаксации T_{rel} в виде соотношения $T_{\text{dyn}} \ll T_{\text{diss}} \ll T_{\text{rel}}$, характеризует соотношение времен в реальной звездной системе, входящей в качестве одной из основных подсистем в АЯГ.

Для более полного понимания роли различных процессов в эволюции АЯГ, необходимо в начальной серии «методологических» работ рассмотреть эволюционное поведение системы при различных соотношениях масс входящих в них подсистем.



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 поверхностью плотностью, мы 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 включают в себя взаимодействия с каждой из остальных звезд, с СМЧД и с аккреционным диском:

$$\vec{a}^* = (\vec{F}_i^{K3K} + \vec{F}_i^{CMCD} + \vec{F}_i^{AD}) / m_i, \quad (8)$$

где $\vec{F}_i^{K3K} = -\sum_{i \neq j} \frac{Gm_i m_j \vec{r}_{ij}}{r_{ij}^3}$, $\vec{F}_i^{CMCD} = -\frac{Gm_j M_{BH} \vec{r}_i}{r_i^3}$,

$\vec{F}_i^{AD} = -Q_D \pi r_s^2 \rho |V_{rel}| \vec{V}_{rel}$, $\vec{r}_{ij} = \vec{r}_i - \vec{r}_j$, \vec{a}^* – ускорение звезды.

Численные расчеты такой модели позволяют исследовать эволюцию АЯГ с учетом взаимодействия всех трех указанных выше подсистем.

Принципиальное отличие нашей модели с учетом парного взаимодействия звезд от выполненных ранее расчетов эволюции звездных орбит, пересекающих аккреционный диск [18,19] состоит в том, что орбиты звезд не укладываются в плоскости диска, а сохраняют определенное «рассеяние» над этой плоскостью из-за взаимодействия с остальными звездами системы.

5. Заключение

В работе сформулированы основные свойства 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 звездную 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.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Kormendy J., Richstone D., The Search For Supermassive Black Holes In Galactic Nuclei//Ann. Rev. Astron. Astroph., 1995. V.33. P.581
2. Magorrian T., Tremaine S., Richstone D., The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers//AJ, 1998. V.115. P.2285
3. Boker T., Properties of Nuclear star clusters// Journal of Physics: Conference Series 131, 2008
4. Van der Marel R.P., Rossa J., Ho L.C., Nuclear Star Clusters (Nuclei) in Spirals // in “Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies” Proceedings IAU Symposium 2007, No. 241. A. Vazdekis and R. Peletier, eds., P.312
5. Coté P., et al., The ACS Virgo Cluster Survey VIII. The Nuclei of Early-Type Galaxies//ApJS, 2006. V.165. P.57
6. Rossa J., v-d. Marel R. P., Boeker T., Gerssen J., Ho L. C., et al. //AGN star clusters//AJ, 2006, V.132. P.1074
7. Вильковиский Э.Я., Диаграмма время-светимость для АЯГ//Известия РАН 1998. Т.62. №9. С.1721
8. Vilkoviskij, E.Y., Karpova, O.G., The radio loud/quiet dichotomy// Astron. Lett. 1996. V.22, P.148
9. Vilkoviskij, E.Y., Efimov, S.N., Karpova, O.G., Pavlova, L.A. //The interacting subsystems theory of AGN//MNRAS, 1999. V.309. P.80
10. Vilkoviskij E.Y., //Dissipative capture of stars, Pis'ma Astron Jh. 1983. V. 9. P. 405
11. Vilkoviskij E.Y. and Czerny B. The role of the central stellar cluster//A&A 2002. V.387, P.804
12. Novikov I., Thorne K.S., Astrophysics of Black Holes //1973, in Blho. Conf, 343 N.
13. Shakura N.I., Sunyaev R.A., Black holes in binary systems. Observational appearance // A&A 1973 24, 337
14. Ostriker J.P., Viscous drag on an accretion disk due to an embedded stellar system//ApJ 1983. V.273. P. 99
15. Vilkoviskij E. Y., Interactions of stars with CMO// Astronomy Lett. 1975. 1. N7. 8
16. Vilkoviskij E.Y. and Bekbosarov N., Stars interacting with the accretion disk // Izv. AN Kaz. 1981. V.4. P.10
17. Vilkoviskij E. Y., Dissipative interaction of stars with central objects // Astronomy Lett. 1983. V. 9. N7. P. 405
18. Karas V., and Vokrohlicky D., A Star Orbiting around a Supermassive BH // MNRAS 1993. V.265. P. 365
19. Rauch K.P., Collisional Stellar Dynamics around Massive Black Holes in Active Galactic Nuclei// ApJ 1999. V.514. P. 725
20. Omarov Ch., Spurzem R., Vilkoviskij E., // ASP Conf. Series, 2004. V916, p.178
21. Omarov Ch.O., Spurzem R., Vilkoviskij E.Y. The Compact Stellar Cluster Evolution in AGN with Disk Crossings and Stellar Collisions// The XXVI GA IAU meeting. 2006. Symp 238. Prague. Aug 14-25
22. Вильковиский Э.Я. Структура и динамика вещества в АЯГ, Известия НАН РК, Серия физико-математическая. 2008, №4.

23. *Hut P. Dense stellar systems as laboratories for fundamental phisics//2006, astro-ph/0601232v1, 11 Jan*

Резюме

Ғаламдардың активті ядроларының үш (аса көлемді қара құрдым, газдық дөңгелек пен тұтас жұлдызық кластер) кіші жүйесінен тұратын құрделі жүйе ретінде моделінің негізгі қасиеттері тұжырымдарды және осы жүйесінің эволюциясының моделдердің есептеуінен нақты эволюциясына көшуін мәселелері талқыланады.

Summary

Main properties of AGN model are formulated considering it as a complex system built up of three main subsystems: supermassive black hole, gaseous disc and compact stellar cluster. We describe numerical runs employing N-body simulation method for different particle numbers and discuss problems associated with transition from model runs to the evolution of real AGN.

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

Поступила 20 апреля 2009 г.