

Э.Я. ВИЛЬКОВИСКИЙ

## ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АКТИВНОСТИ ЯДЕР ГАЛАКТИК

### 1. Введение.

Проблема активности галактических ядер (АЯГ) занимает одно из ведущих мест среди наиболее важных проблем современной науки. Она заявила о себе в самом начале космической эры и с тех пор привлекает к себе неослабевающий интерес, находясь на переднем крае исследований физики и астрономии. Целью настоящего обзора является обсуждение некоторых вопросов физики АЯГ и проблемы построения и расчёта детальных численных моделей структуры и эволюции АЯГ с учётом результатов, получаемых с помощью космических телескопов нового поколения.

История исследования АЯГ может быть разбита на три основных этапа. Первый период от работы К. Сейфера до работы М. Шмидта (1942–1963гг) когда были открыты первые признаки активности нескольких галактик и радиогалактик. Решающую роль для понимания явления сыграло определение значительного красного смещения  $z=0,158$  кавзара 3C 273 М.Шмидтом и определение больших красных смещений ( $z>1$ ) нескольких других квазаров, что привело к пониманию необычности их энергетики и физики. Хотя верный путь физической интерпретации был предложен Я.Б. Зельдовичем [1] и Е.Салпетером [2] уже в 1964г, потребовался длительный период (1963–1993гг) накопления данных и роста разновидностей проявлений активности, который уже вселял сомнения в единой физике различных АЯГ, и благополучно завершился лишь доказательством справедливости «унифицирующих» моделей. Второй этап может быть соотнесён с развитием унифицированных моделей АЯГ, позволивших вновь обрести физическое единство в пёстром многообразии различных проявлений активности (Антонуччи 1991 [3], Урри и Падовани 1993 [4]). Третий этап, набирающий силу в настоящее время, связан с попытками физики осмыслить огромное количество новых данных, поступающих с различных космических и наземных телескопов во всех диапазонах спектра. Для интерпретации и понимания физической сущности спектральных свойств АЯГ необходимо

развитие сложных компьютерных моделей, соответствующих по детальности и информативности расчётов огромной информационной ёмкости новых наблюдений. Эти модели должны включать в себя расчёты динамики звёздной и газовой подсистем АЯГ, а также расчёты их взаимодействия между собой и с полем излучения, с учётом всей сложности процессов взаимодействия вещества и излучения. В настоящем обзоре мы затронем лишь некоторые узловые аспекты проблемы развития таких моделей.

### 2. Унифицированная модель АЯГ и её основные свойства.

Основная часть электромагнитного излучения АЯГ образуется в аккреционном диске (АД) вокруг черной дыры, а также в окружающих газовых облаках и струях плазмы. Энергия излучения распределена по очень широкому диапазону длин волн – от радиоволн до жесткого рентгеновского излучения. В XXI веке начали работать крупные орбитальные телескопы нового поколения (CHANDRA, XMM-Newton, INTEGRAL, SPITZER и др.), позволившие наблюдать с высоким спектральным и пространственным разрешением спектры АЯГ в ультрафиолетовой, рентгеновской и инфракрасной областях спектра.

Единое понимание (унификация) физики АЯГ разных типов основано на идеи вращательной симметрии их основных структур, и, как следствие, на зависимости наблюдаемых спектральных свойств от угла между осью симметрии и лучом зрения наблюдателя. Асимметрия в радиодиапазоне связана с приполярными релятивистскими струями плазмы (джетами), которые достаточно развиты лишь в 10% активных ядер, и мы их здесь рассматривать не будем. Унификация во всех других диапазонах спектра достигается предположением о существовании «поглощающего тора» (ПТ), пропускающего излучение основной доли энергии АЯГ лишь в некотором конусе вблизи оси симметрии, но значительно

поглощающее излучение вблизи плоскости симметрии тора. Проблема состоит в том, что хотя АЯГ спасает единство физики разных типов АЯГ, его строение и свойства далеки от понимания. Формально поглощающий тор достаточно хорошо моделируется компактным (десятки парсек) кольцом газа и пыли вокруг аккреционного диска [5]. Отношение высоты тора к его внутреннему радиусу должно быть достаточно большим ( $\sim 1$ ), поскольку по статистике доля АЯГ без признаков поглощения (АЯГ1) по отношению к доле объектов с сильным поглощением (АЯГ2) больше единицы.

Но откуда берётся это пылевое кольцо, и почему оно не превращается в более тонкий диск? В работе [6] впервые было предложено рассматривать компактный звёздный кластер (КЗК) в качестве составной части АЯГ, позволяющей описать эволюцию АЯГ. В этой работе эволюция АЯГ рассмотрена как последовательность сравнительно коротких эпизодов высокой активности ( $T \sim 10^8$  лет), каждый из которых инициирован событием сильного взаимодействия (слияния или поглощения) соседних галактик в скоплениях и группах галактик. Важным элементом качественной физической модели было предположение об универсальности соотношения массы галактики ( $M_g$ ), содержащей АЯГ, центрального компактного кластера ( $M_{\text{K}} \sim 0,001 M_g$ ), и центральной чёрной дыры с массой  $M_{\text{BH}} \sim 0,1 M_{\text{K}}$ . В том же году (1998) вышла работа [7], положившая начало серии работ, подтвердивших универсальное соотношение массы черной дыры и массы балджа родительской галактики. Но лишь в текущем году появились убедительные свидетельства того, что и масса КЗК пропорциональна массе галактик [8 – 10]. Таким образом, компактный звёздный кластер вместе с поглощающим тором и центральной МЧД действительно образуют единый комплекс, обеспечивающий необычность физических свойств и определяющий эволюцию АЯГ. Отсюда ясно, что подлинная модель АЯГ должна включать в себя расчёты динамики и эволюции всех трёх названных подсистем с учётом их взаимодействия.

### 3. Звёздно-газовая динамика и спектральные свойства АЯГ

Впервые проблема трёх взаимодействующих, физически различных подсистем была сформу-

лирована нами в начале 90х годов. В работах [11, 12] посвященных истечению вещества и расчётом спектров АЯГ было показано, что именно присутствие КЗК позволяет правильно описывать и динамику истечение вещества из АЯГ. Теперь становится ясно, что и образование газово-пылевого тора (образование внутренней его полости) определяется воздействием конических потоков горячего газа вдоль оси вращения КЗК.

Отсюда следует актуальность задачи построения модели КЗК, взаимодействующего с аккреционным диском в центре АЯГ. Сложность такой задачи состоит в том, что взаимодействие звёзд с достаточно плотным газовым аккреционным диском в окрестности массивной чёрной дыры будет сильно влиять на строение и эволюцию КЗК и всего активного ядра. В работе [13] впервые было детально рассмотрено взаимодействие звёзд с аккреционным диском; достаточно подробная полуаналитическая модель эволюции звёздного кластера, взаимодействующего с АД, была построена в работе [14]. Важным результатом этой модели явился вывод о потоке звёзд к центру АЯГ и превращении основной их массы в газ вследствие прямых соударений звёзд. В этой работе была предложена модель естественного возникновения поглощающего тора в результате эволюции центрального скопления газа, пыли и звёзд в АЯГ, обладающего вращательной симметрией и эллипсоидальной формой. Газово-пылевая среда эллипса приобретает форму тора вследствие возникновения конических течений горячего газа вдоль малой оси эллипса, очищающего эти конусы от холодного газа и пыли [14, 15]. На внешней границе конуса горячий газ увлекает холодные газовые облака из поглощающего тора, и при наблюдении вдоль конической поверхности будут заметны признаки истечения вещества в виде широких линий поглощения. Эти объекты мы включаем в унифицированную схему как АЯГ3 (как объекты, промежуточные между АЯГ1 и АЯГ2).

Отсюда следует, что расчёты спектров АЯГ должны производиться раздельно для каждого из трёх типов объектов – в зависимости от угла между лучом зрения и осью симметрии. Здесь возникают достаточно сложные и трудоёмкие задачи численных расчётов переноса ионизующего излучения, фотоионизационного баланса и динамики двухфазной среды (холодные облака в

горячем газе) с учётом сил давления излучения и взаимодействия фаз. Такая модель успешно развивается в АФИФ, начиная с 90-х годов, и позволяет интерпретировать спектры в инфракрасном, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, получаемых на космических телескопах нового поколения.

#### 4. Заключение.

Целью нашего краткого обзора была демонстрация как сложности и комплексного характера проблемы моделирования физики АЯГ, так и правильности избранного нами комплексного подхода к конструированию таких моделей в форме взаимосвязанных компьютерных программ, позволяющих описывать как динамику и физические свойства отдельных физических подсистем АЯГ, так и их взаимодействие и совместную эволюцию. Развитие наблюдений, включая новые возможности крупнейших телескопов и космических обсерваторий, подтверждает правильность такого подхода на протяжении последних 10 лет и стимулирует дальнейшее развитие численных моделей.

Задачу моделирования физики АЯГ можно сопоставить с задачей построения моделей внутреннего строения и эволюции звёзд – важнейшей задачи физики и астрономии XX века. Эта аналогия уместна ещё и потому, что полные количества энергии, излученной как звёздами, так и АЯГ за всё время эволюции Вселенной сравнимы по величине. Сложность моделей звёзд определялась проблемами ядерной физики (теперь успешно решенными), и в настоящее время эта эпопея завершается исследованиями эволюции тесных двойных звёзд, включая чёрные дыры звёздных масс в качестве одной из компонент. К нерешенным вопросам можно отнести магнетизм звёзд и «легкое облачко» проблемы солнечных нейтрин. Сложность расчётов физики АЯГ выглядит на первый взгляд ещё более пугающей, поскольку включает в себя моделирование различных физических подсистем (включая и звёзды) и их взаимодействия. Однако эти проблемы могут быть преодолены на пути последовательного совершенствования моделей от простейших к более сложным. Важно, что путь развития таких моделей достаточно хорошо просматривается, и мы имеем хороший задел. Этот задел включает в себя комплексы программ для расчётов динамики, ионизации и спектров космической плазмы, а также продуманную идеологию и базовые чис-

ленные модели для расчёта совместной динамики звёзд и газа в АЯГ.

Конечно, именно необычайно возросшие возможности счётной техники делают реальной постановку такой задачи, однако её решение требует новых подходов не только к теории, но и к организации процесса модельных расчётов. Особенно перспективной является возможность создания современного компьютерного кластера для расчётов моделей АЯГ совместно с Гайдельбергским университетом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я.Б. и Новиков И.Д. Источник энергии квазаров// ДАН СССР, Т.158, С.811-815 (1964)
2. Salpeter E.E. Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects// ApJ, V.140, P.796-780 (1964)
3. Antonucci R. Unified models for AGN and quasars// ARA&A V.31, P.473 (1993)
4. Padovani P., Urry C.M. Unification of radio-galaxies and Quasars// BAAS V.23, P.1344 (1991)
5. Krolik J.H. and Begelman M.C. AGN obscuring tori / /ApJ, V.329, P.702, (1998)
6. Вильковиский Э.Я. Диаграмма время-светимость для АЯГ//Известия РАН, Т.62, №9, С.1721 (1998)
7. Magorrian T., Tremain S., Richstone D. The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers// AJ, V.115, P.2285 (1998)
8. 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 No. 241, 2007, A. Vazdekis and R. Peletier, eds., P.312
9. Cot'e, P., et al., The ACS Virgo Cluster Survey VIII. The Nuclei of Early-Type Galaxies//ApJS, V.165, P.57 (2006)
10. Rossa J., v-d. Marel R. P., Boeker T., Gerssen J., Ho L. C., et al. //AGN star clusters//AJ, V.132, P.1074 (2006)
11. Vilkoviskij, E.Y., Karpova, O.G. The radio loud/quiet dichotomy// Astron. Lett. V.22, P.148 (1996)
12. Vilkoviskij, E.Y., Efimov, S.N., Karpova, O.G., Pavlova, L.A. The interacting subsystems theory of AGN//MNRAS, 309, 80 (1999)
13. Vilkoviskij E.Y. and Bekbosarov N. Stars interacting with the accretion disk//Izv. AN Kaz. V.4, P.10 (1981)
14. Vilkoviskij E.Y. and Czerny B. The role of the central stellar cluster//A&A V.387, P.804 (2002)
15. Vilkoviskij E. Y., Lovelace R. V. E., Pavlova L., Romanova M., Efimov S. Matter outflow from AGN// Ap&SpSci, V.306, P.129-137 (2006)

#### Резюме

Бұл мақалада ғалам ядролары белсенділігінің негізгі принциптері мен кейір жаңа амал-тәсілдері талқыланады.

#### Summary

Main principles and some new approaches to the problem of creation of the numerical models of AGN are briefly discussed.