

УДК 523.9

Исследования активных ядер галактик в Крымской астрофизической обсерватории

В.И. Проник

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 14 марта 2006 г.

Аннотация. Кратко изложена история открытия активности в ядрах галактик и начала их регулярных спектральных и фотометрических наблюдений в Крымской астрофизической обсерватории. Перечислены основные результаты исследований активных ядер галактик, полученные в КрАО за последние 10 лет.

THE STUDY OF ACTIVE GALACTIC NUCLEI IN CRIMEAN ASTROPHISICAL OBSERVATORY, *by V.I Pronik*. The history of discovery of activity in galactic nuclei and the beginning of their regular spectral and photometric observations at the Crimean astrophysical observatory are briefly described. The main results of active galactic nuclei investigations obtained at the CrAO during the last ten years are given.

Ключевые слова: Активные ядра галактик

1 Введение

Активные ядра галактик и квазары являются самыми яркими объектами во Вселенной. В отличие от сверхновых, которые в максимуме яркости светятся так же ярко, но только в течение недели-двух, активные ядра галактик и квазары способны поддерживать высокую мощность энерговыделения на протяжении миллионов (а то и миллиардов) лет. Как объекты на небе, они известны давно, только назывались по-другому. Первые назывались ядрами Сейфертовских галактик, по имени их первооткрывателя, другие были известны как радиоисточники, которые в оптике представляли собой весьма слабые неправильно переменные звезды. Позже одни из них стали называться лацертидами или объектами типа BL Lacerta, другие получили название квазизвездные радиоисточники или сокращенно “квазары”. Им присваивались номера с индексом 3C, что означает номер в третьем Кембриджском каталоге радиоисточников. Регулярное и целенаправленное исследование квазаров и ядер галактик началось в 1963 году, когда была сформулирована проблема. Заключалась она в объяснении исключительно мощного источника излучения как единого компактного тела, а не как скопления звезд. Свидетельством большой мощности источника является большое расстояние до него при вполне доступной наблюдениям его видимой величине; а свидетельством компактности, т.е. малых размеров источника (или единого тела), является его наблюдаемая переменность с характерным временем переменности недели-месяцы.

Про ядра Сейфертовских галактик было известно, что они очень мощные источники оптического излучения, которые излучают энергии столько же, сколько и вся галактика, состоящая из десятков–сотен миллиардов звезд. Но никто не предполагал, что в ядре галактики светится единое тело: неизвестны были ни малый линейный размер источника излучения, ни его переменность. С квазарами ситуация была обратная: известно было, что они переменны в оптике и поэтому их размеры малы, но неизвестна была их высокая абсолютная светимость (большое расстояние). И только с открытием большого красного смещения квазаров (Шмидт, 1963) стала очевидной проблема колоссального источника энергии, находящегося в квазарах. С открытием переменности излучения Сейфертовских галактик эта же проблема возникла и в отношении активных ядер галактик.

2 Открытие активности в ядрах галактик

2.1 Открытие большого красного смещения

Датой открытия активных ядер галактик можно считать 1963 год, когда Мартин Шмидт (1963) отождествил необычные линии в спектрах двух радиоисточников, квазаров 3C 273 и 3C 48 как линии с чрезвычайно большим красным смещением ($\Delta\lambda = 800\text{\AA}$ и $\Delta\lambda = 1850\text{\AA}$ соответственно), что свидетельствовало о больших космологических расстояниях. Большие расстояния (сотни мегапарсек) и сравнительно яркая видимая звездная величина (13^m и 16^m соответственно) свидетельствовали о чудовищно большом энерговыделении. Этот феномен требовал своего объяснения. А поскольку эмиссионный спектр этих квазаров очень похож на спектр ядер Сейфертовских галактик (и в тех и в других имеется ультрафиолетовый избыток в непрерывном спектре, имеются узкие небулярные линии [OIII] и очень широкие водородные линии), то проблема огромного энерговыделения коснулась заодно и ядер Сейфертовских галактик, которые по мнению И.С. Шкловского можно считать миниквазарами (Шкловский, 1963).

Таким образом, благодаря открытию квазаров как очень далеких и ярких космологических объектов, в поле зрения астрофизиков оказались ядра Сейфертовских галактик – объекты с необычным механизмом генерации энергии, отличным от классического ядерного источника, имеющегося внутри звезд.

2.2 Сейфертовские галактики

Надо сказать, что еще задолго до 1963 года существовало по крайней мере два повода серьезно задуматься над природой ядер галактик. Первым из них была публикация уже упомянутый выше работы Сейферта (1943) про галактики со звездоподобными ядрами. В его первоначальный список вошло шесть галактик с номерами NGC: 1068, 1275, 7469, 4151, 4051 и 3516. В своей работе Сейферт назвал три особенности таких ядер, на которые следовало бы обратить внимание:

1. высокая светимость звездообразного ядра, сравнимая со светимостью остальной части галактики, или со светимостью сверхновой в максимуме блеска;
2. усиленный ультрафиолетовый континуум, который начинается уже с окрестности линии H β ;
3. необычно большие скорости газа в ядре, о чем свидетельствуют широкие линии водорода.

К ним можно добавить и четвертую особенность — большую плотность газа, излучающего широкие водородные линии ($n_e \gg 10^6 \text{ см}^{-3}$). Об этом свидетельствует разница в ширине профилей запрещенных и разрешенных линий. По величине светимости ядра Сейфертовских галактик напоминают сверхновую. Однако это не сверхновая, которая светит от силы две-три недели. Разве что можно предположить о постоянных взрывах сверхновых в большом компактном звездном скоплении, что иногда рассматривается сейчас наряду с другими гипотезами.

Гипотезу о постоянных взрывах сверхновых с характерными для них кривыми блеска легко можно было проверить, проследив в течение нескольких лет за яркостью ядра какой-нибудь галактики (скажем, самой яркой NGC 4151). Однако такое предположение не было сделано, да

и никто не решился бы на проверку весьма сомнительной переменности ядра галактики в силу устоявшегося тогда взгляда на ядро галактики как на скопление горячих звезд внутри гигантской диффузной туманности. А ведь в то время, для того чтобы объявить ядра Сейфертовских галактик принципиально новыми объектами неизвестной природы, с очень мощным механизмом энерговыделения, не хватало именно факта об их переменности. Так или иначе, возможность увидеть в ядрах Сейфертовских галактик космические объекты нового типа была упущена, а работа Сейферта на два десятилетия осталась неостребованной.

2.3 Радиогалактики

Другим поводом задуматься над природой ядер галактик было открытие радиоизлучения галактик. В 50-х годах прошлого столетия началось бурное развитие радиоастрономии. Наряду с мощными радиоисточниками галактического происхождения — остатками сверхновых — были открыты очень сильные внегалактические радиоисточники, отождествляемые с другими галактиками. Назывались такие радиоисточники по имени созвездия, в котором они находились, с добавлением буквы А, что означает самый яркий радиоисточник в данном созвездии. Так были открыты радиоисточники Персей А (NGC 1275), Дева А (NGC 4486), Центавр А (NGC 5128) и Лебедь А, отождествляемый со слабой галактикой $\sim 17^m$ (Бааде и Минковский, 1954; Болтон и Клерк, 1960; Вейд, 1959; Минковский, 1957). Самый мощный радиоисточник Лебедь А состоит из двух радиообластей, удаленных друг от друга на четверть градуса. В оптике наблюдается слабый объект, имеющий вид очень тесной двойной галактики, расположенной между радиооблаками.

Спектральное исследование радиоисточника Персей А привело Рудольфа Минковского (1955) к открытию на фоне галактики NGC 1275 следов другой галактики, проектирующейся на NGC 1275 и движущейся к ней, т.е. падающей на нее со скоростью 3000 км/сек. В итоге появилась гипотеза Р. Минковского о лобовом столкновении двух галактик как о механизме генерации радиоизлучения. В этой гипотезе предполагалось, что газовые составляющие каждой из галактик нагреваются в момент соударения, упруго отскакивают друг от друга и образуют две отдельные радиообласти. Звездные составляющие галактик сливаются в одну гигантскую галактику. Считалось, что так образовались все двойные радиоисточники типа Лебедь А. В радиоисточнике Персей А соударение галактик происходит по лучу зрения, поэтому радиооблака проектируются друг на друга, образуя одно радиооблако. Обнаруженное Минковским столкновение двух галактик в Персее-А было основным и очень важным подтверждением его гипотезы. Сама гипотеза — чисто качественная, феноменологическая (ее детально никто не просчитывал), тем не менее она была вполне обоснованной и твердо занимала свои позиции в астрономии.

Примерно в это же время В.А. Амбарцумян собрал множество наблюдаемых особенностей галактик, таких как: прямолинейные цепочки слабых карликовых галактик, расположенных, как правило, вблизи гигантской галактики; газовые джеты, в том числе плазменная струя в радиоисточнике Дева-А; двойные радиоисточники — пары областей радиоизлучения равноудаленных по обе стороны от оптической галактики и т.п., и высказал гипотезу, что все эти явления связаны с активными процессами, протекающими в ядрах галактик. Так появилась гипотеза Амбарцумяна об активности ядер галактик. Под словом “активность” подразумевались процессы, которые длятся миллионы лет.

Во время одиннадцатой Сольвейской конференции в Брюсселе, на которой Амбарцумян излагал свою гипотезу, между Минковским и Амбарцумяном завязалась полемика (см. книгу Амбарцумяна “Проблемы эволюции Вселенной”, 1968). Гипотеза Амбарцумяна, точнее та ее часть, которая касалась радиоизлучения галактик, базировалась на очевидном факте: джет или выброс релятивистской плазмы в радиоисточнике Дева-А (NGC 4486) определенно связан с ядром галактики. В то же время главным аргументом гипотезы Минковского было наблюдаемое столкновение двух галактик в NGC 1275. Однако позже именно радиогалактика NGC 1275 из главной опоры гипотезы Минковского превратилось в основное доказательство справедливости гипотезы Амбарцумяна, когда с увеличением размеров и качества радиоантенн выяснилось, что на сантиметровых волнах 80% радиоизлучения NGC 1275 приходится на область ядра размером

меньше 10 угловых секунд. Спустя некоторое время, в ядре NGC 1275 на сантиметровых волнах произошла вспышка в радио, после чего радиоспектр менялся на протяжении месяца: по мере высвечивания релятивистских электронов, радиоизлучение перемещалось в сторону длинных волн.

Однако несмотря на то, что гипотеза Амбарцумяна имела блестящее подтверждение в радиоисточнике Персей А и Дева А, в целом она не была принята, поскольку в ней под словом “активность” подразумевалась не только генерация энергии, но и рождение вещества из сверхплотной дозвездной материи. Под словом “энергия” Амбарцумян подразумевал потоки релятивистских электронов, в чем он был абсолютно прав, но кроме них, согласно его гипотезе, из ядра выбрасывалось новое вещество, из которого потом образовывались цепочки карликовых галактик. Только поэтому гипотеза, в том виде как ее сформулировал Амбарцумян, не была принята. Заслуга Амбарцумяна состояла в том, что причину радиоизлучения галактик он упорно видел в их ядрах, несмотря на то, что проблема транспортировки энергии от ядра галактики в источнике Лебедь А до радиооблаков, находящихся на огромных расстояниях (десятки килопарсек) от родительской галактики, была очень далека от решения.¹

Несостоятельность гипотезы Минковского о лобовом столкновении галактик как о источнике радиоизлучения всех радиогалактик, в свое время подробно изложил И.С. Шкловский в своей работе о радиогалактиках (Шкловский, 1960). Он охотно поддержал ту часть гипотезы Амбарцумяна, которая объясняла радиоизлучение галактик как результат выброса из ядра облаков релятивистской плазмы. Согласно Шкловскому, направление выбросов должно быть близко к оси вращения галактики. В то же время обнаруженное Р. Минковским соударение двух галактик является наблюдательным фактом и, вероятно, объясняется тем, что гигантская галактика NGC 1275 является центром большого скопления галактик в созвездии Персея. Поэтому падение на нее других галактик не является чем-то неожиданным.

3 Начало регулярных наблюдений активных ядер галактик

Как уже было сказано выше, с открытием квазаров резко возрос интерес к активным ядрам Сейфертовских галактик. Спектральные наблюдения их были начаты зимой в 1963 году Э.А. Дибам и В.И. Проником на самодельных светосильных спектрографах, сначала в касегреновском фокусе 1.25 м телескопа ГАИШ (ЗТЭ), а потом – в прямом фокусе 2.6 м телескопа КрАО (ЗТШ). Были определены физические условия в газе, который излучает запрещенные линии, и обнаружена стратификация излучения на зоны, связанная с пространственной неоднородностью температуры, плотности и ионизации. Первоначально рассматривались 3 зоны: [OII], [OIII] и H β . Все зоны принимались сферически симметричными, самая внешняя – [OII], самая внутренняя – H β . Считалось, что плотность газа и скорость движения растут к центру ядра. Наиболее высокая плотность приписывалась области свечения водородных линий $n_e \geq 10^8 \text{ см}^{-3}$. Она должна быть существенно выше плотности, найденной по линиям [OIII], которая равнялась $n_e \geq 10^6 \text{ см}^{-3}$. Об этом свидетельствует большая разница в ширине узкого профиля [OIII] и широкого профиля H β . Линии [OII] и [SII] дали значение плотности $n_e \approx 10^3 \text{ см}^{-3}$.

Чрезвычайно большая разница в ширине разрешенных и запрещенных линий и полное отсутствие крыльев яркой линии [OIII] $\lambda 5007\text{Å}$ были восприняты как свидетельство того, что плотность газа в области свечения водородных линий намного больше чем 10^8 см^{-3} и близка к $10^{10} \div 10^{12} \text{ см}^{-3}$. В связи с этим была предложена двухзонная модель активных ядер, в которой существует зона низкой плотности и малых скоростей газа – зона свечения узких запрещенных линий, и зона, состоящая из плотных газовых облаков, обладающих большими скоростями. Эта зона считается ответственной за излучение широких водородных линий. Такое деление активного ядра на две зоны: зону низкой плотности – узких линий и зону высокой плотности – широких линий сохранилось по сей день и является общепринятым.

¹ Согласно современной модели активности ядра галактики, транспортировка энергии из ядра в радиообласти осуществляется в виде релятивистских электронов, движущихся по очень узким каналам в противоположных направлениях от ядра вдоль оси вращения Керровской черной дыры.

Отсутствие методов определения плотности газа при $n_e \geq 10^6 \text{ см}^{-3}$ не позволяет сказать что-либо о границе между этими зонами – она плавная или резкая. Сейчас, когда спектральное разрешение линий и качество спектров высоки, такая информация следует из профилей линии $H\beta$. Соответствующий профилю линии [OIII] узкий центральный компонент линии $H\beta$ всегда наложен на плоский широкий профиль, что свидетельствует о резкой границе между зонами плотного и разреженного газа. Неясно было, что представляет собой газ высокой плотности. Считалось, что это сгустки или облака газа, систематически выбрасываемые из ядра по аналогии с релятивистским газом, ответственным за радиоизлучение. Неожиданно малой оказалась масса плотного газа (несколько масс Солнца) и его эффективный размер $\sim 10^{16} \text{ см}$ (0.003 пс). Каких-либо существенных изменений в интенсивностях или профилях линий по сравнению с опубликованными Сейфертом в 1943 году, не было замечено. Результаты работы Э.А. Дибая и В.И. Проника были доложены в Праге во время МАС и на конференции по активным ядрам галактик в Бюракане весной 1966 года.

3.1 Открытие фотометрической и спектральной переменности ядер галактик

Бюраканская конференция 1966 года сыграла решающую роль в исследовании активных ядер. Во время конференции пулковский астроном А.Н. Дейч (1966) впервые высказался вслух о переменности ядра в галактике NGC 5548. И хотя его информация осталась за рамками обсуждения (слишком маловероятный факт, чтобы его обсуждать!), многие участники конференции, чтобы убедиться в этом лично, во второй половине 1966 года начали фотоэлектрические наблюдения яркости ядер Сейфертовских галактик (Лютый, 1972; Пенстон и др., 1971; Вокулёр и Вокулёр 1972; Пахольчик, 1971; Барнес, 1969; см. обзорную статью Лютого и Проника (1975)). Фотоэлектрический мониторинг избранных активных ядер галактик, начатый В.М. Лютым в 1967 году, продолжается им до сих пор.

В 1967 году Андрия и Соффрин (1968) инициировали дискуссию о спектральной переменности ядра NGC 3516, которая длилась несколько лет, пока в 1971 году Андерсон (1971) не опубликовал в высшей степени странный асимметричный профиль линии $H\alpha$ для другой галактики NGC 5548. Столь радикальное изменение ранее симметричного профиля линии $H\alpha$ (интенсивность красной половины профиля уменьшилось в два раза) сняло всякое недоверие, теперь уже и к спектральной переменности.

В начале 1969 г. Андерсон и Крафт (1969) обратили внимание на абсорбционные детали вблизи максимума в голубой части профиля линии $H\beta$ в спектре NGC 4151. Аналогичные детали имелись и на профиле линии $He I 3889\text{Å}$. Детали были интерпретированы как свидетельства газовых потоков, истекающих из ядра галактики. Годом позже эти же детали, только более выразительные, наблюдали Кромвель и Вейнман (1970); они назвали их короткоживущими с характерным временем жизни около одного года. В то же время, появление абсорбционных линий, характерных для звезд, в спектре ядра было вызвано уменьшением яркости континуума ядра.

В начале 1970-х годов Хачикян и Видман, фотографируя на 5 м телескопе спектры галактик Маркаряна, обнаружили, что большинство из них являются Сейфертовскими галактиками. Так были открыты около двух десятков новых Сейфертовских галактик. Тогда же (Хачикян и Видман, 1972) ввели классификацию Сейфертовских галактик по двум типам: Sy 1 и Sy 2, которые отличались большой шириной водородных линий в Sy 1 и, как следствие, отношением интенсивностей [OIII]/ $H\beta$. Особый интерес стали представлять галактики первого типа – Sy 1, в которых ширина $H\alpha$ и $H\beta$ линий достигала 10000 км/сек.

Позже, пока в литературе велась дискуссия о том имеет ли такое деление Сейфертовских галактик на 2 типа какую-либо физическую основу, связано ли оно с основными параметрами галактики, выяснилось, что галактики типа Sy 1 временами могут переходить в тип Sy 2, когда широкие крылья водородных линий полностью исчезают. Отсюда следует, что ширина водородных линий не может быть связана с параметрами галактики. В настоящее время к классу Sy 2 нами принято относить ядра галактик с так называемым логарифмическим профилем линии $H\beta$, когда линия представляет собой острый и высокий пик плавно переходящий в широкие слабые крылья.

Характерной особенностью ядер Sy 2 является исчезающе малая амплитуда переменности в оптике ($\sim 2-5\%$) в отличие от Sy 1, в которых амплитуда переменности может увеличиваться в несколько раз.

Примерно в это же время Хачикян и Видман (1971) сообщили о появлении в спектре галактики Маркарян 6 в голубом крыле линии $H\beta$ не наблюдающегося ранее дополнительного максимума. Они считали, что появление максимума связано с выбросом из ядра новой порции газа. Однако спектральный мониторинг галактики Маркарян 6, предпринятый в КрАО Проником и Чуваевым, показал корреляцию между интегральным потоком $H\beta$ и континуумом. Поэтому авторы пришли к выводу, что появление максимума в голубом крыле линии $H\beta$ в спектре галактики Mrk 6 связано с повышенным состоянием яркости континуума (в том числе и Лаймановского) центрального ионизирующего источника (Проник, Чуваев, 1972). Все последующие наблюдения Mrk 6 подтверждают данный вывод: положение детали в профиле не меняется, меняется только его яркость. В работе Проника и Чуваева впервые была предложена калибровка всех спектров данной галактики по линиям [OIII], полагая поток в этих линиях постоянным.

В 70-х годах И.И. Проник выполнила фотографические наблюдения спектров активных галактик в прямом фокусе 2.6 м телескопа. Ею были обнаружены изменения относительных интенсивностей разрешенных и запрещенных линий в NGC 1275, NGC 7469 и NGC 3227 (Проник И.И., 1974; 1975; 1976). Впервые наблюдалось изменение Бальмеровского декремента с характерным временем 20 дней (Проник И.И., 1975). На большом материале, включающем не только Сейфертовские, но и нормальные галактики, было показано, что эквивалентная ширина линии $H\beta$ в ядрах галактик разных морфологических типов зависит только от цвета ядра (U-B), а не от морфологического типа.

Изменение потока в линии $H\alpha$ и в континууме трех наиболее ярких галактик (NGC 1068, 4151 и 3516) наблюдали А.М. Черепашук и В.М. Люты́й (1973) с интерференционным клиновидным фильтром. Наибольшее изменение потока (до 1^m в течение года) наблюдалось в фильтре U у ядра NGC 4151. Считая, что самые быстрые изменения (10 дней) ограничиваются временем рекомбинации, они оценили плотность газа $n_e > 10^7 \text{ см}^{-3}$, а по величине запаздывания потока в линии относительно потока в континууме определили размер излучающей области $\sim 10^{17} \text{ см}$.

В 1972 г. на дифракционном спектрографе телескопа ЗТШ с электронно-оптическим усилителем света К.К. Чуваев начал долговременный спектральный мониторинг избранных ядер галактик. В его программу входило около 20 объектов. Частота наблюдений каждого из объектов – две-три даты в месяц. Чаще других наблюдались галактики NGC 7469, 5548, 4151 и 1275. Для каждой из них в ночь получалось от 2 до 6 спектров в каждой из двух областей $H\alpha$ и $H\beta$. Результаты долговременного мониторинга – эквивалентные ширины линий $H\beta$, [OIII] и профили линии $H\beta$ – опубликованы в работах К.К. Чуваева (Чуваев, 1980; 1985; 1990). Наибольший интерес представляет полное исчезновение широкого компонента линии $H\beta$ в NGC 4151 и в NGC 7469, наблюдавшееся К.К. Чуваевым в 1983 и 1988 гг. соответственно. За 20 лет наблюдений К.К. Чуваевым создан архив, содержащий более тысячи спектров, сфотографированных на фотопленке.

4 Спектральные наблюдения с ПЗС приемником

С 1988 года регистрация спектров активных ядер велась с помощью ПЗС-камеры. С этой целью для кассегреневского фокуса телескопа ЗТШ был изготовлен спектрограф со светосильной зеркальной камерой (концентрическая система Попова-Боуэна) с внешним фокусом. Вскоре выяснилось, что спектрограф неудачен по причине сильного гнутия, вызванного большим весом одного из зеркал камеры, и ПЗС-приемник был перенесен на спектрограф в фокусе Нэсмита вместо электронно-оптического усилителя. К этому времени преимущества ПЗС приемника перед электронным усилителем стали очевидными. Высокая (фотоэлектрическая) точность регистрации света и автоматическая запись спектра с ее последующей обработкой на РС дала возможность вести мониторинг любой плотности, даже в течение всей ночи, если это необходимо.

Из долгосрочных мониторингов, наиболее интенсивные велись для небольшого числа (15 объектов) избранных галактик, из которых впоследствии образовалась группа объектов наивысшего

приоритета. К таким объектам относятся NGC 4151, NGC 5548, NGC 7469, Arp 102 B, 3C 390.3, Mrk 6. Накопившаяся база данных к настоящему времени содержит более 3000 спектров. Кроме упомянутых шести объектов, в базе данных имеются также спектры других галактик: NGC 4051, NGC 3516, NGC 7603, NGC 3227, Mrk 335, Mrk 509, Mrk 504, Ark 120, 3C 120.

Начиная с 1992 года, Крымская обсерватория участвует в международном мониторинге активных ядер галактик под названием AGN Watch (Главный координатор проекта — Б. Петерсон). Основная цель мониторинга — эхокартирование, определение массы черной дыры и размеров BLR-области (области широких линий). Размеры BLR-области определялись по запаздыванию потока в линиях относительно потока в континууме. Основные результаты международного мониторинга опубликованы в журнале *Astrophysical Journal* в серии работ: “Steps Towards Determination of the Size and Structure of the Broad Line Region in Active Galactic Nuclei”.

В настоящее время регистрация спектров ведется на ПЗС-камере Princeton Instrument Spec-10:100B/XTE американской фирмы ROPER SCIENTIFIC с электронным охлаждением до -100° . Размер детектора 26.8×2 мм², общее число пикселей 1340×100 , размер 1 пикселя 20×20 микрон. Темновой ток составляет 1 электрон на пиксель за 20 минут экспозиции, квантовая эффективность 95% в максимуме чувствительности при $\lambda = 5550 \text{ \AA}$, шумы считывания 3 электрона, выигрыш или усиление — 3 раза. Спектральная матрица приобретена на средства Американского Фонда Гражданских Исследований и Развития (CRDF).

4.1 Основные результаты спектрального мониторинга

К основным результатам спектрального мониторинга следует отнести:

1. обнаружение связи потока в линии $H\beta$ и в континууме, запаздывание потока в линии относительно потока в континууме, нахождение передаточной функции между световой кривой в линии и в континууме, оценка размеров области излучения широких линий;
2. изучение эволюции формы профиля широких водородных линий, создание двухкомпонентной модели профиля широких линий, обнаружение признаков наличия в ядре вращательного движения газа, создание кинематической модели области излучающей широкие водородные линии.

Связь потока в линии и в континууме

Уже первые спектральные наблюдения активных ядер галактик, выполненные в разное время, показали наличие прямой зависимости между яркостью широких линий и яркостью континуума, что свидетельствовало о применимости к ядрам галактик фотоионизационной модели. Более плотные ряды спектральных наблюдений показали, что строгая линейная связь между потоком в линиях и в континууме сохраняется недолго — год-два, после чего на диаграмме “поток в линии — поток в континууме” начинается новая зависимость, которая отличается от предыдущей как наклоном, так и положением на диаграмме. Переход от одной последовательности к другой занимает от нескольких дней до нескольких месяцев. Динамическая эволюция как механизм связи “линия–континуум” отпадает (мало времени). Действующим механизмом является нарушение связи между оптическим континуумом и ультрафиолетовым ($\lambda < 912 \text{ \AA}$). Нарушение связи возникает с началом каждой новой вспышки, температура которой отличается от температуры предыдущей вспышки. Чем продолжительнее вспышка, тем длиннее линейная корреляция. Делаем вывод, что линейные последовательности на плоскости “линия–континуум” являются результатом суперпозиции вспышек разной длительности и разной температуры.

Неравномерное распределение газовых облаков в объеме вокруг источника ионизирующего излучения приводит к сложной форме отклика в линии, какой бы короткой ни была вспышка в континууме (ср. долгое эхо в горах от выстрела). Форма светового эхо, его длина и изменение интенсивности со временем называется передаточной функцией. Если такая функция определена из наблюдений верно, то световая кривая в континууме, свернутая с такой передаточной функцией,

дает световую кривую в линии в деталях повторяющую наблюдаемую кривую потока в линии. Простой эмпирический метод нахождения из наблюдений передаточной функции предложен С.Г. Сергеевым (Сергеев и др., 2000). Для семи-восьми значений времени запаздывания в пределах от 0 до 300–500 дней оптимизируется интенсивность эхо (в относительных единицах) до тех пор, пока свернутая кривая континуума не будет наилучшим образом повторять световую кривую в линии.

Полученная таким образом передаточная функция для ядра 3С 390.3 свидетельствует о наличии плотного газа на расстояниях до 300 световых дней от центрального источника, а для ядра галактики NGC 4151 – на расстояниях до 600 световых дней. Таким образом, истинный размер области образования широких линий можно получить только из передаточной функции, найденной по результатам долговременного мониторинга, продолжающегося не менее 10 лет.

Эволюция формы профиля широких водородных линий и кинематика плотного газа

К настоящему времени только для четырех галактик сделан полный анализ формы профиля широких линий и прослежена эволюция профиля со временем. Это галактики: NGC 4151, Ayr 102 В, 3С 390.3 и NGC 5548. Характерной особенностью профиля линии $H\beta$ для всех четырех галактик является наличие компонента с двугорбым профилем. В галактике Ayr 102 В наблюдаемый профиль почти целиком состоит из двугорбого компонента, в то время как в галактике NGC 4151 двугорбый компонент удалось выделить только благодаря тому, что он не коррелирует с континуумом (Сергеев и др., 2000; 2001). В профиле $H\beta$ ядра галактики 3С 390.3 двугорбый компонент подвержен сильным изменениям, а в последние 5–6 лет в профиле произошли невероятные изменения: центральный широкий компонент и красный бугор двугорбого компонента полностью исчезли. В результате чего линия $H\beta$ теперь состоит из мощного широкого компонента, смещенного в синюю сторону на $3000 \div 4000$ км/сек, в красном крыле которого наблюдается неменяющаяся слабая узкая центральная компонента. Такая трансформация профиля пока не имеет объяснения, но уже сейчас ясно, что объяснение будет иметь решающую роль в понимании кинематики плотного газа.

Надежное свидетельство вращательного движения газа наблюдалось нами в ядре галактики Ayr 102 В. В этой галактике наблюдаемая форма линии $H\alpha$ практически не меняется, хотя небольшие изменения в интегральном потоке имеются. Это дает возможность определить среднюю форму профиля, нормированного по среднему потоку. Разность между каждым наблюдаемым профилем и средним указывает на наличие в наблюдаемых профилях избытка потока (по сравнению со средним профилем). Появляется, как правило, такой избыток в красном крыле и со временем движется по профилю в сторону синего крыла. Наблюдаемая повторяемость картины позволяет оценить период вращения газовых облаков. Наблюдаемая картина и легко моделируется системой облаков, вращающихся примерно в одной плоскости по Кеплеровским орбитам вокруг массивной черной дыры. Любопытно, что наблюдения показывают движение деталей по профилю только от красного крыла в сторону синего. Это свидетельствует о том, что облака непрозрачны: мы наблюдаем излучение в линии только на стороне обращенной к центральному источнику. Расчет модели вращательного движения облаков в Ayr 102 В приведен в работе Сергеева и других (2000). В такой модели избыток потока в линии на заданном участке профиля возникает из-за случайной группировки облаков на соответствующем участке орбиты. Такая группировка может совершить несколько оборотов вокруг черной дыры прежде чем разрушится, что подтверждается наблюдениями. Модель предварительна и многое в ней еще неясно.

Признаки вращения газа наблюдаются также в эволюционной картине изменения формы профиля $H\beta$ в ядрах галактик NGC 4151, NGC 5548 и Mrk 6, хотя и не так отчетливо, как в Ayr 102 В. Причина, вероятно, в том, что в этих трех галактиках профиль $H\beta$ существенно меняет свою форму со временем, из-за чего само понятие “средняя форма профиля” теряет смысл. Тем не менее, отклонение наблюдаемых профилей от такого среднего профиля также дрейфует по профилю. Не исключено, что дрейф детали связан с перемещением газа в пространстве. В галактике Mrk 6 наблюдается перемещение избытка яркости по профилю к центру линии как со стороны красного крыла, так и со стороны синего.

Неясна природа двугорбого компонента в профиле линии $H\beta$ и его связь с побочными максимумами, возникающими в крыльях линии в моменты минимумов яркости ядра. Похоже, что эти максимумы не меняют своего положения со временем, они могут исчезать, но через некоторое время, в следующие минимумы, вновь появляться на том же месте в профиле (на той же скорости!). Особенно сильная трансформация профиля $H\beta$ наблюдается в NGC 5548. Основной, главный максимум профиля может находиться как в центре линии на нулевой скорости, так и быть смещенным в ту или другую сторону на 2000 км/сек. В минимуме яркости профиль становится широким и имеет три или даже четыре максимума примерно одинаковой интенсивности. Не исключено, что кеплеровское вращение газовых облаков в состоянии объяснить многие особенности профиля водородных линий. Появление и исчезновение деталей в профиле линии $H\beta$ на одних и тех же скоростях является наибольшей проблемой модели, состоящей из газовых облаков, вращающихся по Кеплеровским орбитам.

5 Фотометрический мониторинг АЯГ

Основная задача фотометрии – исследование переменности непрерывного излучения активных ядер галактик с целью установления ее природы. Хотя фотометрия обладает меньшей информативностью, чем спектральные наблюдения, преимуществом ее является высокая точность наблюдений (ошибки $<1\%$) при небольших временах экспозиции (~ 5 минут), а самое главное – для фотометрии не требуются большие телескопы. Это позволяет достичь высокого временного разрешения, что очень важно при наблюдениях быстропеременных объектов с характерным временем переменности в несколько часов.

В 1982–87 гг. был осуществлен мониторинг яркости галактики NGC 1275 на 1.25 м телескопе АЗТ-11 со сканирующим спектрофотометром, работающем в режиме счета фотонов (Проник и др., 1990; 1999). Эффективная длина волны в полосах пропускания определялась положением спектра на выходном окне сканера (ширина окна 80\AA). Полосы центрировались на линии $H\beta(\lambda 4861)$, $N_1 + N_2(5007 + 4959\text{\AA})$ и континуум ($\lambda 5200\text{\AA}$). Мониторинг проводился в течение 35 ночей в период с ноября 1982 по март 1987 г. За период наблюдений было получено по 379 измерений потока в каждой полосе. Все потоки менялись больше, чем в 2 раза. Главный вывод заключается в том, что потоки в $H\beta$ и [OIII] линиях после вычета континуума меняются коррелированно как между собой, так и с континуумом. Исследование переменности методом структурной функции показали, что внутри ночи наблюдались два процесса переменности разного уровня амплитуд: на шкале времени <4 часа – низкий уровень переменности ($SD/F < 3\%$) и на шкале времени меньше 9 часов – высокий уровень переменности ($SD/F > 4 - 7\%$). Здесь SD – стандартное отклонение за ночь и F – среднее значение потока за ночь.

С 1989 по 2000 г. фотометрический мониторинг велся на 1.25 м телескопе в стандартной системе Джонсона UBVRI с диафрагмами размером $20''$ и $15''$. Наблюдения велись одновременно во всех фильтрах. В программу наблюдений входили галактики NGC 1275, 4151, 5548, 7469 и галактика Аракелян 564. Для первых четырех галактик выполнен анализ переменности методом структурной функции. Анализ показал, что характер переменности на шкале времени месяцы–годы и внутри ночи существенно различается, наклон структурной функции разный. Мерой амплитуды переменности в течение ночи является отношение стандартного отклонения к среднему потоку за ночь. На всех временных шкалах (часы и годы) характерными являются фликкер и дробовой шумы. Число ночей, когда наблюдается микропеременность, разное в разные эпохи. Показано также, что для NGC 4151 с поярчанием галактики вклад ультрафиолета в континуум растет и распределение энергии во вспышках, полученное по потокам в фильтрах, становится более плоским $F_\nu \sim \nu^\alpha$, где α принимает значения от -1.8 до -1.2 . Сделан вывод, что экстраординарное увеличение яркости ядра NGC 4151 в 1989–1996 гг. не противоречит модели выброса плазмы с синхротронным свечением (Меркулова и др., 1999, 2001; Проник и др., 1999а, 1999б; Меркулова, 2001, 2002).

В 2001 г. в прямом фокусе 70 см телескопа АЗТ-8 Крымской астрофизической обсерватории был установлен матричный фотометр Ar7p фирмы Apogee Instrument Corporation, купленный на средства Американского Фонда Гражданских Исследований и Развития (CRDF), предназначенного

для стран бывшего Советского Союза. Размеры самого приемника (чипа) 12×12 мм² с общим числом пикселей 512×512 . При фокусе главного зеркала равном 2820 мм, матрица покрывает на небе площадку 15×15 угловых минут.

В конце 2001 г. мы начали интенсивный мониторинг в стандартных фильтрах B, V, R, I системы Джонсона и в фильтре R1, очень близком к фильтру I_c системы Козинса. С декабря 2001 г. по октябрь 2005 года выполнено более 5000 измерений яркости 53 объектов. В программу наблюдений, кроме Сейфертовских галактик, входят также объекты типа BL Lacertae. По ходу выполнения этой работы мы столкнулись с проблемой нехватки звезд сравнения в окрестностях Сейфертовских галактик. По этой причине нами выполнена программа по калибровке звезд сравнения в окрестностях 44 галактик – всего 313 звезд сравнения. Для всех галактик опубликованы карты для отождествления звезд и звездные величины звезд сравнения в фильтрах B, V, R, Rc, Ic. Для большинства звезд сравнения ярче 15^m стандартное уклонение во всех фильтрах не превышает 0.02 m. Точность определения звездных величин звезд сравнения лучше или равна 0.01 звездной величины.

Из конкретных результатов, полученных чисто фотометрическим методом, следует отметить запаздывание потоков в фильтрах V, R, I по сравнению с потоком в фильтре B. Запаздывание растет с увеличением длины волны и составляет от долей суток (0.35) в фильтре V ($\lambda = 5480 \text{ \AA}$) до нескольких дней в других фильтрах, а именно: 2.4 дня в фильтре R ($\lambda = 6950 \text{ \AA}$), 3.3 дня в фильтре R1 ($\lambda = 8160 \text{ \AA}$) и 4.3 дня в фильтре I ($\lambda = 8510 \text{ \AA}$). Все запаздывания (средние по 13 объектам) определены по отношению к потоку в фильтре B ($\lambda = 4330 \text{ \AA}$) методом центроида кросс-корреляционной функции. Запаздывания в фильтрах V и R совпадают с аналогичными запаздываниями, найденными по максимуму кросс-корреляционной функции. Найдено также, что запаздывание τ систематически больше у объектов с большей абсолютной светимостью L: $\tau \sim L^b$, где $b = 0.4-0.5$. Предполагается, что малые запаздывания в V, R, I фильтрах относительно фильтра B связаны с прохождением света от центрального источника до точки на диске и характеризует размер аккреционного диска, излучающего континуум (Сергеев и др., 2005). Предполагается также, что этот центральный источник является рентгеновским и находится не в плоскости диска, а над диском. Модель, в которой оптический континуум есть результат свечения диска, нагретого рентгеном, в настоящее время является общепринятой. Таким образом, делаем вывод, что рентген – первичное излучение, оптика – вторичное. Это подтверждается тем фактом, что всякая вспышка начинается в рентгеновском диапазоне или в далеком ультрафиолете. Наблюдаемые доводы в пользу существования очень мощного точечного рентгеновского источника, расположенного над диском, на его оси вращения, имеются также в работе Вилмса и др. (2001).

Из других результатов фотометрического мониторинга можно отметить свойства оптической переменности галактики Mrk 335 и Akn 564. Анализ проводился методом структурной функции (SF). Кривая SF для Mrk 335 состоит из трех частей: низкого плато (белый шум – ошибка измерения потоков), линейной наклонной части в диапазоне времен от 1 до 1000 суток и верхнего плато на характерных временах >1000 суток. Была рассчитана SF для пуассоновской модели ядра, когда наличие зубьев на световых кривых AGN интерпретируется как наложение независимых вспышек, случайно расположенных по времени, с широким диапазоном амплитуд и временем жизни. Сравнение модельных SF с наблюдаемой позволяет оценить выбор модели. Для Mrk 335 она близка к модели дисковой неустойчивости с наклоном структурной функции равным $b = 0.6-0.7$ и продолжительностью вспышек от 0.2 до 560 суток (Дорошенко и др., 2005).

Наблюдения галактики Akn 564 (Sy 2) показывает систематические долговременные изменения блеска с амплитудой 0.17, 0.16 и 0.15 звездной величины в фильтрах B, V, I соответственно, и кратковременные изменения с амплитудой от 0.05 до 0.1 звездной величины. Изменения яркости с подобной амплитудой являются типичными для сейфертовских галактик второго типа (Sy 2). Заметим, что в это же время амплитуда изменения рентгеновского потока может достигать нескольких сотен процентов. В этом и заключается одна из особенностей сейфертовских галактик второго типа.

6 Заключение

Спектральные наблюдения Сейфертовских галактик, начатые в 1963 году Дибеем и Проником на Южной станции ГАИШ и в Крымской астрофизической обсерватории, первоначально хотя и были целенаправлены, все же имели спорадический характер. Основным достижением этого периода, длившегося несколько лет, является установление наличия в активных ядрах галактик внутренней, малой по размерам зоны (1 пс) очень плотного ионизованного газа ($n_e \gg 10^6 \text{ см}^{-3}$), движущегося со скоростями, достигающими 10000 км/сек. Этот газ был признан ответственным за излучение широких водородных и других разрешенных линий.

С открытием переменности профилей широких линий, наблюдения спектров активных ядер галактик приняли более или менее регулярный характер.

Начиная с 1970 года для некоторых наиболее интересных и ярких объектов на 2.6 м Шайновском телескопе был начат спектральный мониторинг с регистрацией спектров на фотопленку как с применением специальных светосильных камер, так и с применением электронно-оптического усилителя света. Последний мониторинг продлился до 1990 года, со средней частотой наблюдений некоторых объектов 1-2 спектра в месяц. В результате наблюдений определялись относительные интенсивности эквивалентных ширин и профили эмиссионных линий. Из-за невысокой точности фотографических наблюдений результаты носили в основном качественный характер. Тем не менее, обработка фотографических спектров некоторых объектов, полученных 30 лет назад, представляет интерес и сегодня.

С применением в 1988 году ПЗС-приемников, спектрофотометрия активных ядер галактик приняла качественно новый уровень. Появилась возможность участвовать в международных кооперативных программах, в которых Крымская астрофизическая обсерватория по количеству наблюдений находится среди основных обсерваторий мира. Высокая точность получаемых потоков в эмиссионных линиях и континууме и высокая точность наблюдаемых профилей широких водородных линий позволили поставить и частично решить ряд конкретных задач, касающихся кинематики и структуры плотного газа. Так, эволюционное изменение наблюдаемого профиля $H\beta$ со средним профилем, нормализованным по потоку позволило уверенно сказать о наличии вращательного движения газовых облаков в ядре галактики *Агр 102 В*. В пользу вращательного движения газа в некоторых объектах свидетельствует также одинаковое запаздывание “линия-континуум” в красном и синем крыльях линии $H\beta$.

Сложная структура светового эхо от газовых облаков и его длительность во времени позволили сказать, на каких расстояниях от ядра находятся облака плотного газа, т.е. каков размер газового диска, отвечающего за излучение широких линий. Для некоторых объектов световое эхо длится год. Разумеется, такую информацию удалось получить только в результате мониторинга, который длился более десяти лет. Очень плотный фотометрический мониторинг в фильтрах *B, V, R, I* позволил получить размер аккреционного диска, отвечающего за излучение непрерывного спектра, по запаздыванию потоков в фильтрах *V, R, I* относительно потока в фильтре *B*, которое составляет от нескольких десятых долей до нескольких световых суток. Увеличение запаздывания с увеличением длины волны излучения свидетельствует о том, что “возгорание” диска начинается в его внутренней части и распространяется к периферии.

О высоком уровне исследований активных ядер галактик в КраО говорит тот факт, что все они публикуются в ведущих зарубежных журналах.

Литература

- Амбарцумян В.А. // Проблемы эволюции Вселенной. Ереван. Изд. АН Армянской ССР. 1968.
 Андерсон (Anderson R.S.) // *Astrophys. J.* 1971. V. 169. P. 449.
 Андерсон и Крафт (Anderson R.S. and Kraft R.P.) // *Astrophys. J.* 1969. V. 158. P. 859.
 Андрия и Соффрин (Andrillat Y. and Souffrin S.) // *Astrophys. Lett.* 1968. V. 1. P. 111.
 Бааде и Минковский (Baade W. and Minkowski R.) // *Astrophys. J.* 1954. V. 119. P. 206. (P. 215).
 Барнес (Barnes T.G.) // *Astrophys. Lett.* 1969. V. 1. P. 171.

- Болтон и Клерк (Bolton I.G. and Kleark B.G.) // *Publ. Astron. Soc. Pasific.* 1960. V. 72. P. 29.
- Вейд (Wade C.M.) // *Aust. J.Phys.* 1959. V. 12. N 4. P. 471.
- Вилмс и др. (Wilms J., Reynolds C.S., Begelman M.C., Reeves J., Molendi S., Staubert R. and Kendziorra E.) // *MMNRAS.* 2001. V. 328. P. L27.
- Вокулёр и Вокулёр (Vaucouleurs G. de and Vaucouleurs A.de) // *Astrophys. Lett.* 1972. V. 12. P. 1.
- Дейч А.Н. // Симпозиум МАС № 29. Нестационарные явления в галактиках. Бюракан. 1966. С. 130.
- Дибай Э.А. и Проник В.И. // Симпозиум МАС № 29. Нестационарные явления в галактиках. Бюракан. 1966. С. 83.
- Дибай Э.А. и Проник В.И. // *Астрон. журн.* 1967. Т. 44. С. 952.
- Дорошенко В.Т. и др. // *Астрофизика.* 2005а. Т. 48. С. 191.
- Дорошенко В.Т. и др. // *Астрофизика.* 2005в. Т. 48. С. 365.
- Дорошенко и др. (Doroshenko V.T., Sergeev S.G., Merkulova N.I., Sergeeva E.A. Golubinskiy Yu.V.) // *ASP conference series.* 2006. (in press).
- Кромвель и Вейман (Cromwell R., and Weymann R.J.) // *Astrophys. J.* 1970. V. 159. P. 147.
- Лютый В.М. // *Астрон. журн.* 1972. Т. 49. С. 930.
- Лютый, Проник (Lyuty V.M., Pronik V.I) // *Variable Atars and Stellar Evolution*, editors Sherwood and Plaut. 1975. P. 591.
- Мальков и др. (Malkov Yu.F., Pronik V.I., Sergeev S.G.) // *Astron. Asrophys.* 1997. V. 324. P. 904.
- Минковский (Minkowski R.) // *Reprot to the Meeing of the Astron. Soc. Pasadena.* June 21-22. 1955.
- Минковский (Minkowski R.) // *Symposium Radioastronomy.* 1957. P. 112. Cambridge Univer. press.
- Меркулова и др. (Merkulova N.I., Metik L.P., Pronik I.I.) // *Astron. J.* 1999. V. 117. P. 2177.
- Меркулова и др. (Merkulova N.I., Metik L.P., Pronik I.I.) // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 374. P. 770.
- Меркулова (Merkulova N.I.) // *Astron. J.* 2000. V. 119. P. 631.
- Меркулова (Merkulova N.I.) // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 387. P. 40.
- Пахольчик (Pacholczyk A.G.) // *Astrophys. J.* 1971. V. 163. P. 449.
- Пенстон и др. (Penston M.V., Penston M.J. Neugebauer G., Trittin K.P., Becklin E.E., Visvanathan N.) // *MNRAS.* 1971. V. 153. P. 29.
- Проник В.И. и Чуваев К.К. // *Астрофизика.* 1972. Т. 8. С. 187.
- Проник И.И. // *Астрон. журн.* 1974. Т. 51. С. 457 и С. 1205.
- Проник И.И. // *Астрон. журн.* 1975. Т. 52. С. 481.
- Проник И.И. // *Астрон. журн.* 1976. Т. 53. С. 251.
- Проник и др. (Pronik I.I., Merkulova N.I., Metik L.P.) // *Astron.Astrophys.* 1990. V. 171. P. 91.
- Проник и др. (Pronik I.I., Merkulova N.I., Metik L.P.) // *Astron. Astrophys.* 1999а. V. 351. P. 21.
- Проник и др. (Pronik I.I., Merkulova N.I., Metik L.P.) // *Astron. J.* 1999б. V. 117. P. 2141.
- Сейферт (Seyfert C.) // *Astroph. J.* 1943. V. 97. P. 28.
- Сергеев и др. (Sergeev S.G., Pronik V.I., Sergeeva E.A.) // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 356. P. 41.
- Сергеев и др. (Sergeev S.G., Pronik V.I., Sergeeva E.A.) // *Astrophys. J.* 2001. V. 554. P. 245.
- Сергеев и др. (Sergeev S.G. Peterson. B.M., Pronik V.I., Sergeeva E.A. and Zheng W.) // *Astrophys. J.* 2002. V. 576. P. 660.
- Сергеев и Дорошенко (Sergeev S.G. and Doroshenko V.T.) // *ASP conference series.* 2006. (in press).
- Хачикян и Видман (Khachikian E.Ye and Weedman D.W.) // *Astroph. J.* 1974. V. 192. P. 581.
- Хачикян и Видман (Khachikian E.Ye and Weedman D.W.) // *Astroph. J.* 1971. V.164. P.109.
- Черепашук и Лютый (Cheremashuk A.M. and Lyuty V.M.) // *Astrophys. Lett.* 1973. V. 13 P. 165
- Чуваев (Chuvaev K.K.) // *Письма в Астрон. журн.* 1980. Т. 6. С. 323.
- Чуваев (Chuvaev K.K.) // *Письма в Астрон. журн.* 1985. Т. 11. С. 803.
- Чуваев (Chuvaev K.K.) // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1990. Т. 81. С. 138.
- Шкловский И.С. // *Астрон. журн.* 1960. Т. 37. С. 945.
- Шкловский И.С. // *Успехи Физ.наук.* 1962. Т. 77. С. 1.
- Шмидт (Schmidt M.) // *Nature.* 1963. V. 193. P. 1040.