Взгляд на Активные Ядра Галактик из Прошлого и Настоящего

А.П. Маршер[1] и С.Г. Эрштадт[1,2]

[1] *Институт астрофизических исследований, Бостонский университет, 725 Commonwealth Ave., Boston, MA, 02215, USA;* [2] *Астрономический институт им. В.В. Соболева, Санкт-Петербургский государственный университет, 198504 Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский просп. 28, Российская Федерация*

Мы попытались представить современный взгляд на активные ядра галактик и обсудить основные успехи, достигнутые в исследованиях активных ядер за последнее десятилетие, уделяя особое внимание радиогалактикам и квазарам, обладающим релятивистскими джетами, которые представляют один из самых возбуждающих феноменов в космосе.

1. Введение

Активные ядра галактик (AGN) являются самыми долго живущими энергетическими явлениями во Вселенной. Предполагается, что огромная энергия, излучаемая AGN, рождается в результате аккреции на сверхмассивные черные дыры ($M_{BH} \sim 10^{8\pm2} M_\odot$), находящиеся в центрах подстилающих галактик. Угловой момент аккрецирующего газа уплощает его в дифференциально вращающийся диск, окружающий черную дыру. Во многих из этих объектов потоки намагниченной ультрарелятивистской плазмы выбрасываются со скоростью близкой к скорости света вдоль оси вращения диска. В наиболее обсуждаемой модели этого выдающегося явления магнитные поля, опутывающие аккреционный диск и/или эргосферу черной дыры, выталкивают поток энергии, который фокусируется и

[1] marscher@bu.edu

ускоряется вдоль полюсов, формируя джеты, наблюдаемые на парсековых и килопарсековых расстояниях от центральной машины (Мейер и др., Бегелман 1995, Лавлейс и др. 1991, Блэндфорд и Пайн 1982, Блэндфорд и Знайек 1977). Ударные волны и турбулентность плазмы ускоряют отдельные электроны до ультрарелятивистских энергий. Эти электроны, движущиеся в магнитных полях, производят синхротронное излучение в радио, инфракрасном, оптическом и в некоторых объектах в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Они также рассеивают фотоны, рождающиеся внутри и вне джета, до рентгеновских и гамма энергий. Как в случае всех теоретических моделей, вышеуказанный механизм формирования джета и ускорения частиц должен рассматриваться предварительным до тех пор, пока он ни будет подтвержден наблюдениями.

В последнее десятилетие значительный прогресс достигнут в наблюдательной астрофизике активных ядер галактик благодаря работе космических обсерваторий, исследующих Вселенную на разных длинах волн: Хаббловский космический телескоп (HST), Спитцер космический телескоп (SST), Чандра рентгеновская обсерватория (Chandra), рентгеновская многозеркальная миссия (XMM), Росси рентгеновский исследователь (RXTE), экспериментальный телескоп гамма энергий (EGRET), телескоп высоких энергий INTEGRAL, Свифт обсерватория гамма энергий (Swift), благодаря высокой разрешающей способности радиоинтерферометрических систем: VLA, VLBA, EVN, MERLIN и VSOP, и благодаря крупным обзорам неба, таким как SDSS и 2MASS. Эти наблюдения привели к значительным успехам в нашем понимании физики активных ядер галактик после многих лет скорее догадок, чем понимания.

2. Унифицированная схема активных ядер галактик

Рис. 1 представляет унифицированную схему, которая на сегодняшний день является основной моделью AGN и объясняет все наблюдаемое разнообразие активных ядер галактик геометрией системы. Согласно унифицированной схеме в центре AGN находится массивная черная дыра (BH), окруженная аккреционным диском. Джеты ультрарелятивистской плазмы выбрасываются перпендикулярно к плоскости диска. На субпарсековых расстояниях от центра располагаются достаточно плотные облака газа ($N_e \sim 10^{10\pm1}$см$^{-3}$, BLR), дающие широкие эмиссионные линии в спектрах AGN, в то время как узкие

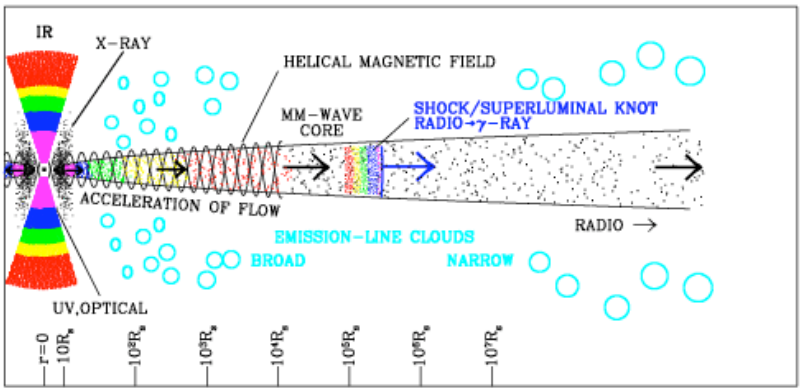

Рис. 1. Схема основных свойств AGN согласно наблюдениям и современным моделям. Точка в центре диска обозначает черную дыру. Система симметрична относительно диска, так что на рисунке представлена только одна половина системы. Внизу отмечен логарифмический масштаб системы, зависящий от массы черной дыры, где R_* - радиус Шварцшильда.

эмиссионные линии рождаются в более разреженных областях ($N_e \sim 10^{4\pm2}$см$^{-3}$, NLR), находящихся на килопарсековых расстояниях от черной дыры. За пределами аккреционного диска имеется молекулярный торус, содержащий пыль и дающий значительный вклад в ИК-излучение многих AGN.

Определение масс черных дыр представляет сложную наблюдательную и теоретическую задачу. Наиболее надежно M_{BH} измерены на основе динамики вблизи черной дыры. На настоящий момент существуют только два случая, когда данный метод был применен для AGN, используя собственные движения мазеров вблизи черных дыр галактик NGC 4258 ($M_{BH} = 1.7 \times 10^7\ M_\odot$, Мийоши и др. 1995) и NGC 1068 ($M_{BH} = 4.2 \times 10^7\ M_\odot$, Гринхилл и др. 1997). Остальные известные массы черных дыр в AGN оценены косвенными путями, используя следующие методы:

(1) *Дисперсия скоростей звезд в балджах.* В ближайших галактиках существует тесная связь между центральной черной дырой и кинематикой балджа, а именно $M_{BH} \propto \sigma^4$, где σ - дисперсия скоростей звезд в балдже(например, Тремейн и др. 2002). Подстилающие галактики в AGN, по-видимому,

очень подобны нормальным галактикам, что соответствует унифицированной схеме и предполагает, что AGN являются транзитной фазой нормальных галактик (Кавальери и Падовани 1989). Этот метод позволил определить массы черных дыр нескольких десятков AGN на красных смещениях z≤0.1 (Ву и Юрри 2002). В частности, спектральные наблюдения с Хаббловским телескопом разрешили движение газа и звёзд внутри ядра радиогалактики M87, что дало оценку массы черной дыры, $M_{BH} = 3 - 4 \times 10^9 M_\odot$.

(2) *Реверберационная карта.* Измерение задержки между вариациями AGN непрерывного спектра и флуктуациями эмиссионных линий, излучаемых в областях широких линий, дает оценку радиуса, внутри которого распределяется газ вокруг черной дыры. В предположении вириального движения газа знание радиуса и скорости газа, которая может быть вычислена по ширине линий, позволяет оценить массу черной дыры (см. доклад А.М. Черепащука). В настоящее время с использованием этого метода получены массы черных дыр для 36 AGN (Петерсон и др. 2004), в частности, для наиболее удаленного квазара в данной выборке, 3C 273 (z=0.158), $M_{BH} = (8.9 \pm 1.9)10^8\ M_\odot$ или для радиогалактики 3C 120, $M_{BH} = (5.0 \pm 0.8)10^7\ M_\odot$

(3) *Эмпирическая зависимость между эквивалентной шириной эмиссионных линий и* M_{BH}. Спектральные наблюдения AGN, для которых массы черных дыр определены с помощью реверберационных карт, показывают, что $logM_{BH} = log\mu + a$, где μ зависит от эквивалентной ширины эмиссионной линии и светимости. Наиболее достоверные результаты получены для линий H_β и C_{IV} (Вестергард и Петерсон 2006). Этот метод используется для оценки масс черных дыр в удаленных квазарах (см. например, Лиу и др. 2006).

(4) *Спектр мощности рентгеновских кривых блеска.* Марковиц и Эделсон (2004) и МакХарди и др. (2004) обнаружили, что переменность Сейфертовских галактик типа I в рентгеновском диапазоне описывается спектром мощности степенного типа, испытывающим искривление наклона на чатоте ν_b, зависящей от массы черной дыры и нормы аккреции. Зависимость между M_{BH} и ν_b имеет место в двойных звездных рентгеновских системах, и, по-видимому, найденная зависимость для AGN является продолжением этой связи в область сверхмассивных черных дыр.

Результаты, приведенные выше, косвенно подтверждают, что энергия, излучаемая AGN, питается за счет аккреции на сверхмассивные черные дыры. Унифицированная схема называется унифицированной потому, что объясняет наблюдаемые различия

в свойствах AGN (радиогалактики, радио-сильные квазары, радио-спокойные квазары, Сейфертовские галактики разного типа) расположением системы (см. Рис. 1) по отношению к наблюдателю. Объект классифицируется как блазар (к блазарам относятся радио-сильные квазары с высокой переменностью блеска на различных частотах и объекты типа BL Lac), если он имеет джет, который направлен под углом меньше чем $\sim 15^\circ$ к лучу зрения наблюдателя. В противном случае объект выглядит как радиогалактика или квазар, не отличающийся значительной переменностью. Активная галактика со слабым джетом соответствует Сейфертовской галактикой типа I, когда мы смотрим на объект под углом меньше чем $\sim 45^\circ$ к полюсу аккреционного диска. В этом случае светимость не очень высока, и ядро не засвечивает остальную часть галактики. Если свет от ядра ярче чем свет от подстилающей галактики, тогда объект имеет свойства радио-спокойного квазара, но если луч зрения внутри $\sim 45^\circ$ к экватору аккреционного диска, этот объект классифицируется как Сейфертовская галактика типа II. В последнем случае и в случае радиогалактик широкие эмиссионные линии видны только в рассеянном свете и могут быть обнаружены в ходе спектрально-поляризационных наблюдений, как было показано Антоннучи и Миллер (1985) около двадцати лет назад. Радиогалактики показывают корреляцию между радио морфологией и светимостью в радио диапазоне, на основании которой Фанарофф и Рилей (1974) разделили радиогалактики на два класса, известные сейчас как FRI и FRII. Фанарофф и Рилей измерили отношение расстояния между районами высокой яркости (горячими пятнами) на противоположных сторонах от центрального источника к общему размеру радиогалактики, определяемому по самой низкой радио изофоте, для радиогалактик в 3C каталоге, и нашли, что радиогалактики, имеющие это отношение больше чем 0.5 (FRII), обладают более высокой радио светимостью по сравнению с радиогалактиками, для которых отношение меньше чем 0.5 (FRI). В настоящее время отличия между классами обнаружены и в других диапазонах.

3. Сверхсветовые скорости движения в джетах

Блазары составляют особенно интересный подкласс активных галактик. Они показывают переменность блеска на различных длинах волн от радио до гамма частот и на временных масштабах от часов до десятков лет, обнаруживают высокую и переменную

поляризацию излучения, имеют выдающиеся радио джеты, в которых наблюдаются сверхсветовые движения. Хотя большинство джетов блазаров - односторонние на радио картах, реально, джет - двухсторонний, но релятивистское движение усиливает излучение вперед и ослабляет излучение, удаляющееся от наблюдателя, так что удаляющаяся сторона становится слишком слабой для обнаружения. Блазары образуют самый многочисленный класс объектов, отождествленных с источниками гамма излучения (Хартманн и др. 1999). Недавние наблюдения в рентгеновском и ИК диапазонах (Маршалл и др. 2005, Учияма и др. 2005) указавают на то, что джет должен быть ярким вдоль всего электромагнитного спектра.

Сверхсветовое движение в джете является просто иллюзией и возникает в результате реального движения со скоростью близкой к скорости света (релятивистское движение) под малым углом к лучу зрения. В системе отсчета наблюдателя скорость, перпендикулярная к лучу зрения (видимая скорость), определяется следующим образом:

$$\beta_{app} = \frac{\beta \sin\Theta}{1 - \beta\cos\Theta}, \tag{1}$$

где β - реальная скорость движения в джете в единицах скорости света, c, которая определяет Лоренц фактор потока, $\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, и Θ - угол к лучу зрения наблюдателя (Θ=0 соответствует движению прямо на наблюдателя, Θ=π соответствует движению от наблюдателя). Очевидно, что для фиксированного значения β, уравнение (1) имеет максимум $\beta_{app}^{max} = \sqrt{\Gamma^2 - 1}$, когда $\Theta = \sin^{-1}(1/\Gamma)$, и этот максимум превышает 1 (видимая скорость больше скорости света), если $\Gamma > \sqrt{2}$ или $\beta > 0.71c$. Наблюдаемая видимая скорость в джете накладывает нижний предел на Лоренц фактор потока, $\Gamma \geq \beta_{app}$. Интервалы времени в системе отсчета наблюдателя короче чем в системе плазмы джета (t'): t=t'/δ, где δ=$\Gamma^{-1}(1 - \beta\cos\Theta)^{-1}$ - Допплер фактор, который отвечает за усиление излучения. Если излучение имеет степенной закон распределения плотности потока (синхротронное излучение) $S'_\nu = S_\circ \nu^{-\alpha}$, то наблюдатель будет измерять плотность потока: $S_\nu = S_\circ \nu^{-\alpha}\delta^{\alpha+3}$. Это усиление называется Допплеровским усилением.

Прекрасный пример видимого сверхсветового движения в джете показан на Рис. 2, где представлена последовательность изображений радиогалактики 3C 111 (z=0.048) , полученных с VLBA на 43 ГГц в период с марта 1998 г. по апрель 2001 г. Наблюдения с VLBA на 43 ГГц позволяют достичь углового разрешения

$\sim$0.1 миллисекунды дуги, что в случае 3C 111 соответствует линейным размерам $\sim$0.08 пс для космологических параметров $H_\circ = 70$км сек$^{-1}$ Мпс$^{-1}$, Ω_m=0.3 и Ω_λ=0.7 (эти космологические параметры будут использываться нами и в дальнейшем). Согласно Эрштадт и др. (2005) узел яркости (компонент) на восточном конце джета двигается относительно ядра, которое предполагается неподвижным, со скоростью (6.0$\pm$0.2)c. Это означает, что реальная скорость движения плазмы не меньше чем 0.986c.

Как высоки могут быть скорости движения в джете? На настоящий момент квазар PKS 1510-089 имеет самую высокую измеренную видимую скорость, β_{app}=(46 $\pm$ 4)c (Эрштадт и др. 2005). Ряд других блазаров также показывают очень высокие скорости, например, 0235+164, 1406-076 (31$\pm$6c, 30$\pm$9c, соответственно, Пайнер и др. 2006). Такие высокие скорости в джетах представляют проблему для теоретических моделей. В лидирующей в данное время модели (Мейер и др. 2000, МасКинней 2006) магнитное поле внутри эргосферы чёрной дыры, закрученное диффиренциальным вращением эргосферы, формирует поток Пойнтинга, выбрасываемый в джет, где происходит обмен энергии Пойнтингова потока на кинетическую энергию частиц, однако, для получения Лоренц фактора $\sim$45 джет должен быть почти пустым при своем формировании.

Эрштадт и др. (2001a) нашли, что блазары, которые EGRET отождествил как гамма-источники, показывают более высокие видимые скорости в джетах, чем общий класс компактных радио объектов, не являющихся источниками гамма излучения. Их вывод был подтвержден результатами VLBA обзора на 2 см (Келлерманн и др. 2004). Это предполагает, что гамма излучение фокусируется и усиливается также как и радио излучение и, наиболее вероятно, рождается в джете через механизм обратного комптоновского рассеяния, где фотоны низких энергий (синхротронные фотоны джета или фотоны извне) энергетизируются релятивистскими электронами джета до высоких энергий ($\sim$300 ГеВ).

Как далеко от центральной машины джет может оставаться релятивистским? Высокая чувствительность и хорошее разрешение ($\sim$0.5") рентгеновского телескопа *Chandra* привели к уверенному обнаружению рентгеновских джетов в квазарах (например, Шварц и др. 2000), которые, по-видимому, являются типичным свойством FRII населения (10 обнаружений из 17 объектов в выборке Сэмбруна и др. 2004, 12 обнаружений из 20 объектов в выборке Маршалл и др. 2005). Подобная же статистика имеет место для оптических джетов, наблюдавшихся с Хаббловским телескопом (Сэмбруна и др. 2004). Эти джеты простираются

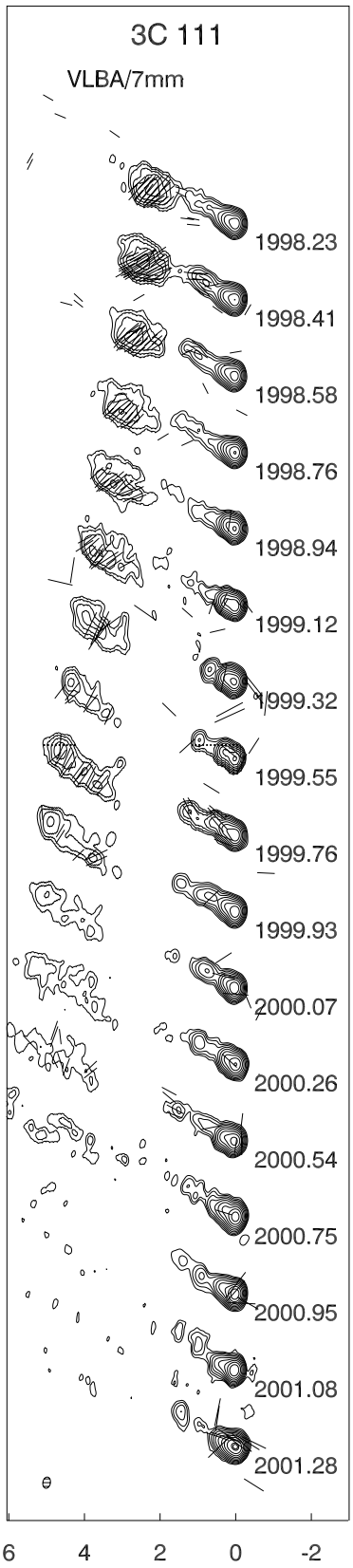

Рис. 2. Радио карты 3C 111 на 43ГГц. Линейные сегменты внутри контуров показывают направление поляризации, ядро джета расположено на западном конце джета и предполагается стационарным, эллипс в нижнем левом углу указывает размер лепестка направленности синтезированного луча, beam=0.30×0.20(мсек дуги)^2. Пик яркости - 2.96 Ян/beam.

на расстояния сотни килопарсек от центрального источника. Большинство рентгеновских джетов имеют структуру, которая близко совпадает с морфологией радио джета на килопарсековых масштабах, хотя отношение рентгеновского потока к радио потоку и оптического потока к радио потоку уменьшается с расстоянием от ядра. Обе группы авторов пришли к выводу, что наиболее вероятным механизмом для производства рентгеновского излучения в джете является обратное комптоновское рассеяние на фотонах космического реликтового фона (IC/CMB - модель). В этом случае джет должен оставаться релятивистским на килопарсековых масштабах. Однако, для некоторых близких объектов (например, M87) синхротронный механизм с небольшим Допплеровским усилением является более оправданным (Харрис и др. 2006) .

Мы наблюдали квазар 0827+243 (z = 0.939) с *Chandra* на 0.2-8 кеВ и с VLA на 5 и 15 ГГц (Эрштадт и Маршер 2004). На Рис. 3 (*верхняя панель*) представлены радио и рентгеновское изображения квазара. Направление рентгеновского джета полностью совпадает с направлением радио джета на парсековых масштабах, изображние на миллисекундных масштабах построено по данным VLBA (Рис. 3, *нижняя панель*; 0827+243 входил в нашу выборку EGRET-обнаруженных блазаров, Эрштадт и др. 2001a), в то время как килопарсековый радио джет начинается на конце рентгеновского джета и показывает искривление по отношению к рентгеновскому джету (и, следовательно, парсековому джету) $\sim 90^\circ$. Архив Хаббловского телескопа содержит изображение квазара в фильтре F702W, что позволило оценить верхний предел потока на оптическое излучение в джете и построить спектральные распределения энергии для компонентов джета от радио до рентгеновских частот. Распределения показали, что полученные плотности потоков не могут быть произведены синхротронным механизмом излучения в случае единственного ансамбля релятивистских электронов, в то временя как IC/CMB- модель дает хорошее согласие (см. Табл. 1) с оценкой Лоренц фактора в джете, сделанной по наблюдениям видимой скорости ($\Gamma \sim 22$, Эрштадт и др. 2001a; $\Gamma \sim 26$, Пайнер и др. 2006).

Таблица 1 показывает, что джет сохраняет Лоренц фактор, наблюдаемый в парсековом джете, до расстояния $\sim 5''$ от ядра, что соответствует $\sim$180кпс (с учетом угла к лучу зрения). Однако, замедление джета все же имеет место и наблюдается в области его искривления. Наиболее вероятно, что эти явления (замедление и искривление джета) взаимосвязаны и обусловлены

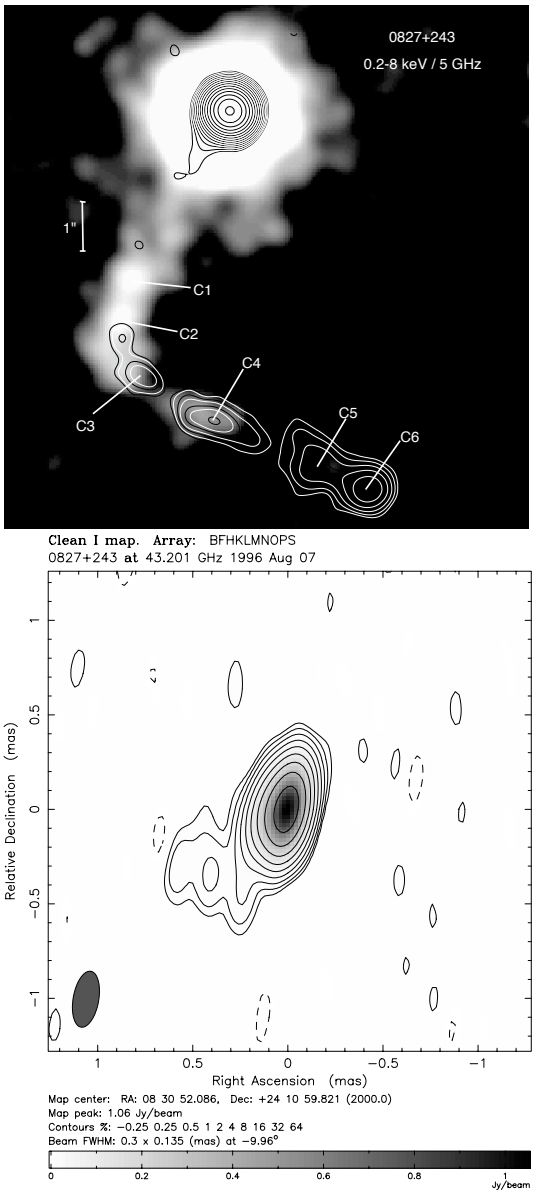

Рис. 3. *Верхняя панель:* ASIC-S3 Chandra изображние квазара 0827+243 на 0.2-8 кеВ с наложенными радио контурами (5ГГц). *Нижняя панель:* VLBA изображние квазара 0827+243 на 43ГГц.

Таблица 1. Физические параметры джета квазара 0827+243 для IC/CMB - модели

Knot[a]	$R('')$[b]	α	B (μG)[c]	δ	Γ	Θ
C1	4.1	0.4	2	24	24	2.4
C2	4.9	0.4	2	24	24	2.4
C3	5.8	1.5	70	4.6	2.5	4.8
C4	6.2	1.1	60	3.3	1.8	4.8
C5	7.4	1.1	100	2.3	1.4	4.8
C6	8.1	0.8	100	2.3	1.4	4.8

[a]Обозначение узла яркости в соответствии с Рис. 3 (*верхняя панель*)

[b]Расстояние узла яркости от ядра джета

[c]Сила магнитного поля в данном месте джета

взаимодействием джета с межгалактической средой. Это находится в соответствии с недавними результатами, что джеты могут трансформировать значительную энергию на большие расстояния и играть важную роль в регулировании температуры и морфологии структуры Вселенной на больших масштабах (МакНамара и др. 2005). Какую энергию джеты трансформируют в окружающую среду - во многом зависит от того, какие частицы населяют джет.

4. Состав джета

В настоящий момент рассматриваются две возможности для состава плазмы в джете: протон - электрон пары (p^+ - e^-, нормальная плазма) или позитрон - электрон пары (e^+ - e^-, пара-плазма), и пока результаты исследований противоречат друг другу. Согласно Целотти и Фабиан (1993) джеты должны быть тяжелыми (нормальная плазма). Используя VLBI измерения размера джета и спектральную информацию в оптическом диапазоне для большой выборки объектов, авторы оценили кинетическую энергию и число излучающих частиц в джетах на парсековых масштабах. Если кинетическия энергия в протяженные структуры доставляется из компактного ядра парсекового джета, знание светимости объектов позволяет сделать ограничения на состав джетов и распределение энергии излучающих частиц, которые показали, что джет должен состоять преимущественно из протонов и электронов. С другой стороны, Кайно и Такахара (2004) исследовали выборку FRII объектов с горячими пятнами

в радио лопастях. Они оценили массу покоя и плотность энергии для суммы тепловых и нетепловых частиц в горячих пятнах. Авторы рассчитали число и спектральные распределения энергии нетепловых электронов, преполагая различный состав джетов и синхротрон-самокомптоновскую модель (SSC), в которой релятивистские электроны рассеивают низко энергичные синхротронные фотоны джета до высоких энергий. Они сравнили наблюдаемые распределения энергии в спектрах горячих пятен с распределениями, полученными при расчетах. Их результаты показали, что наилучшее совпадение между наблюдаемыми и теоретическими распределениями имеет место, если джет состоит из пара-плазмы.

Мы попытались применить другой метод для выяснения состава джета (Маршер и др. 2007). Наиболее прямой метод обнаружить доминирующее присутствие пара-плазмы в джете - обнаружить эмиссионную линию, возникающую в результате e^+ - e^- аннигиляции. В лабораторной системе эта линия должна наблюдаться на энергии 511 кеВ. К сожалению, внутри джета релятивистское движение уменьшает поперечное сечение аннигиляции, что должно значительно расширять линию и делать ее трудно отличимой от континуума. Ситуация меняется, если плазма джета перемешивается с тепловым газом окружающей среды, что можно ожидать, когда джет ударяется в облако газа. Это должно привести к аннигиляции позитронов джета с электронами облака и излучению узкой эмиссионной линии. Ряд наблюдательных факторов (поглощение и Фарадеевское вращение в джете) указывают на то, что такое взаимодействие наблюдается в радиогалактике 3C 120 (Гомец и др. 2000). Мы оценили плотность суммарного числа e^+ - e^- населения в ядре и компактных узлах яркости 3C 120 (z=0.033), используя измерения плотности потока и углового размера ядра и компонент джета на VLBI картах на 86 ГГц (см. Рис. 4, *верхняя панель*) и предполагая, что джет состоит из чистой пара-плазмы, $n(e^+ - e^-)$=$2\times10^7\gamma_{min}^{-1.5}$см$^{-3}$, где γ_{min} - минимальный Лоренц фактор релятивистских электронов. Это дает нижний предел плотности потока в линии аннигиляции $F_{511} \geq 1 \times 10^{-4} f x \gamma_{min}^{-1.5}$ фот см$^{-2}$сек$^{-1}$, где f - фактор заполнения джета и x - часть позитронов в джете, перемешивающихся с межгалактической средой. Мы предположили, что γ_{min}=1, f=1, и x=0.9, хотя эти оценки являются достаточно спорными. Для наблюдения эмиссионной линии использовался спектрометр *SPI*, установленный на борту INTEGRAL. Спектр 3C 120, полученный с экспозицией 500ксек, показан на Рис. 4 (*нижняя панель*). Линии аннигиляции не наблюдается. Если плотность потока в линии

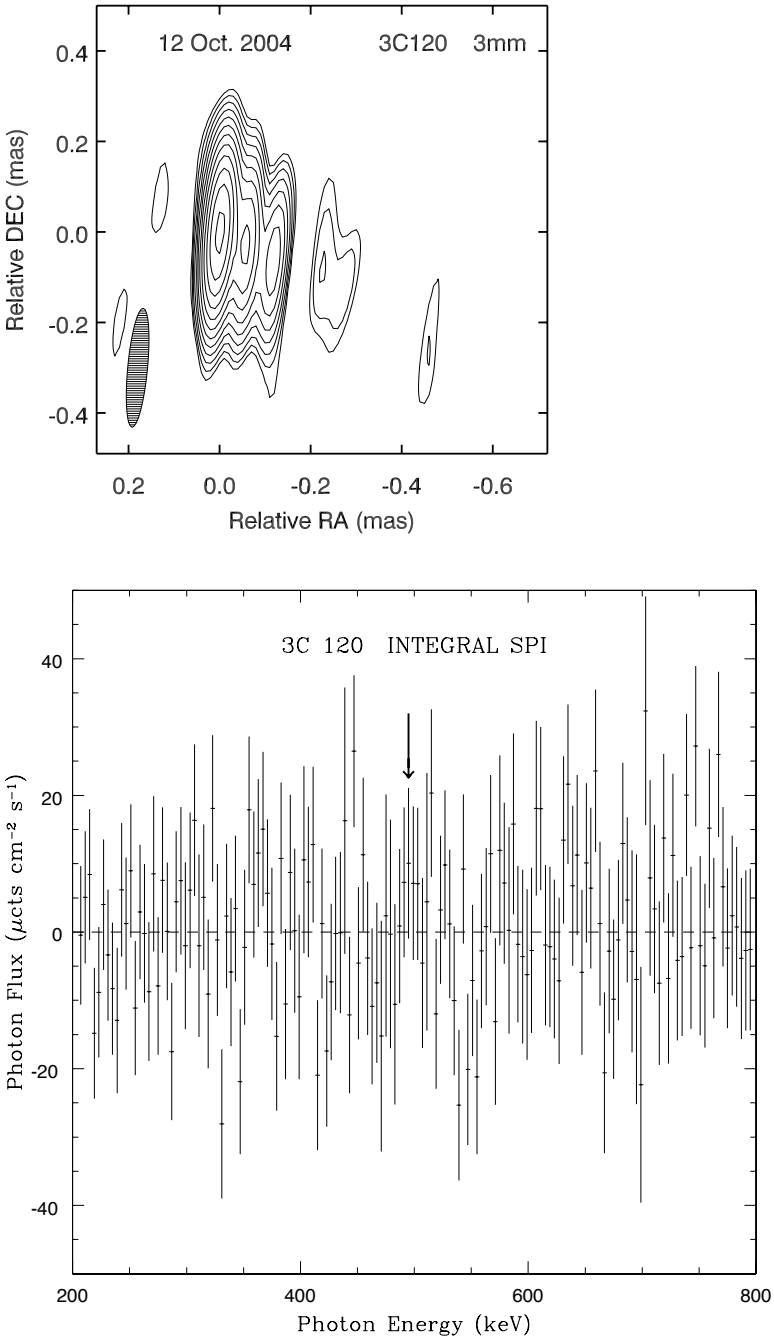

Рис. 4. *Верхняя панель:* VLBI изображение галактики 3C 120 на 86 Ггц. *Нижняя панель:* Спектр 3C 120, полученный с SPI детектором спутника INTEGRAL (стрелка указывает положение, где должна находится линия аннигиляции, сдвинутая согласно красному смещению галактики).

соответствует уровню шума, характеризующего спектр, это дает ограничение на отношение числа позитронов к числу протонов в джете, $n(e^+)/n(p^+) \leq 1/3$, и поддерживает идею, что джеты состоят из нормальной плазмы. Однако, в настоящий момент вопрос состава джета остается открытым, так как все оценки, полученные разными авторами, сильно зависят от параметров, недостаточно известных на сегодняшний день.

5. Переменность блазаров

Переменность блазаров является предметом постоянного внимания наблюдателей и теоретиков. За последние 7 лет широко проводятся кампании интенсивного наблюдения блазаров, находящихся во вспышках. Наблюдения начинаются с первого оповещения о повышенной активности объекта, продолжаются несколько месяцев, пока источник ни вернется в спокойное состояние, охватывают все доступные частоты, включая космические и наземные телескопы, координируемые по всему миру (см., например, Виллата и др. 2000). Это значительно увеличивает количество и качество наблюдательного материала.

В течение последних 10 лет мы проводим многочастотное патрулирование ряда блазаров, являющихся яркими рентгеновскими источниками. Эти наблюдения включают получение нескольких VLBA карт в год на 43 ГГц, 2-3 измерения в неделю с RXTE в диапазоне 2-10кеВ и оптические наблюдения настолько часто, насколько возможно. В оптических наблюдениях значительную помощь нам оказывают астрономы из различных институтов, и в первую очередь наблюдатели астрономического института Санкт-Петербургского университета В.А. Гаген-Торн, В.М. Ларионов, Е.Н. Копацкая, Л.В. Ларионова и их студенты. Рис. 5 показывает рентгеновскую, оптическую и радио кривые блеска квазара 3C 279, построенные по полученным данным. Эти кривые блеска анализировались методом дискретного корреляционного анализа, который показал, что рентгеновские вариации блеска опережают радио флуктуации на 150^{+15}_{-40} дней (Рис. 6, *верхняя панель*), в то время как рентгеновские вспышки запаздывают по сравнению с оптическими вспышками на 16 ± 10 дней (Рис. 6, *нижняя панель*). Отметим также, что флуктуации имеют более сглаженный характер на более низких частотах. Данное поведение хорошо описывается моделью "ударной волны в джет", предложенной Маршер и Гир (1985) и развитой впоследствии Маршер и его студентами (Маршер и Трэвис 1996, Соколов и

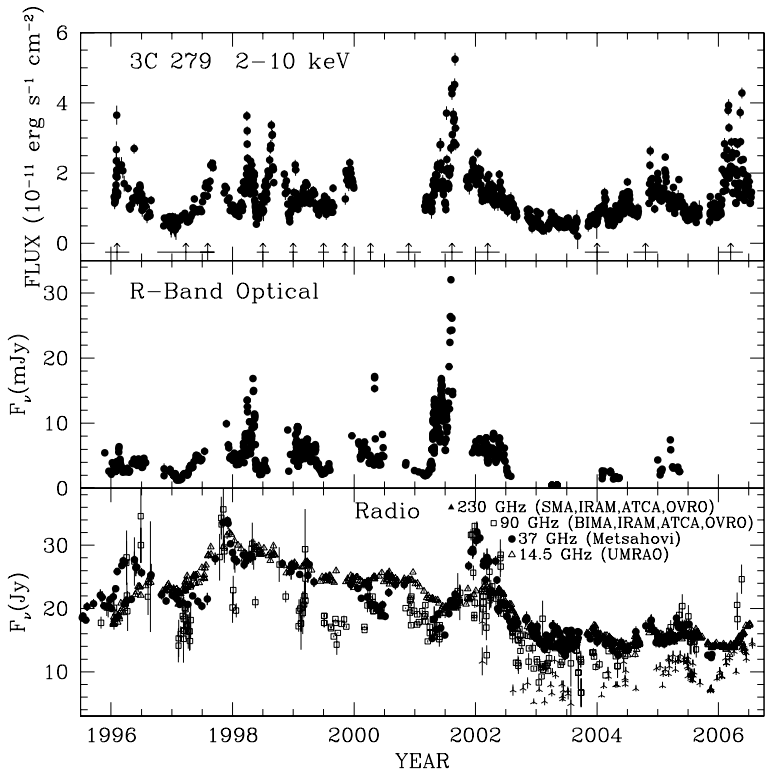

Рис. 5. Рентгеновская, оптическая и радио кривые блеска квазара 3C 279 (стрелки на верхней панели указывают эпохи выбросов сверхсветовых компонент из ядра джета).

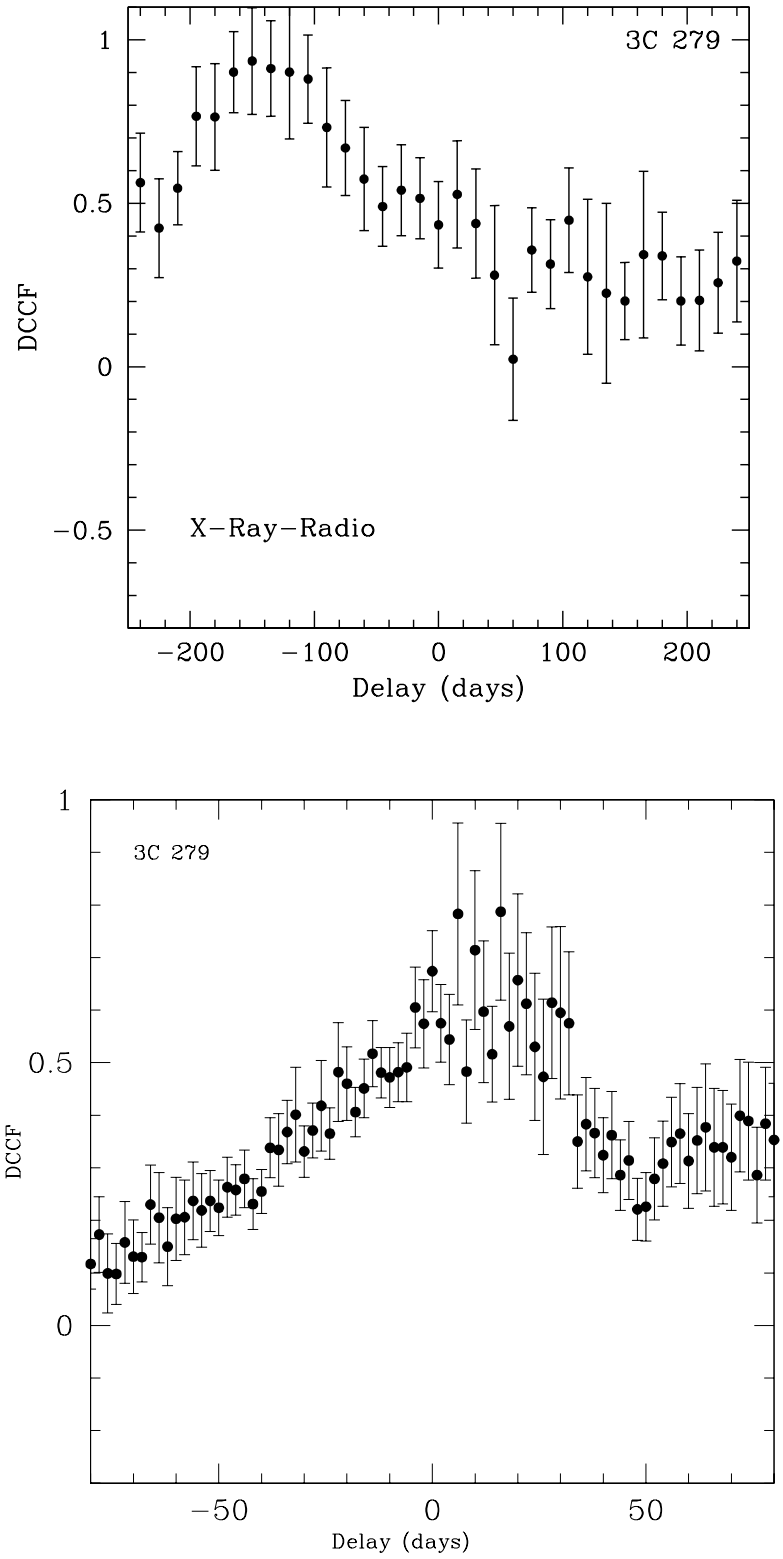

Рис. 6. *Верхняя панель:* Дискретная корреляционная функция между рентгеновской и радио (37 ГГц) кривыми блеска квазара 3C 279. *Нижняя панель:* Дискретная корреляционная функция между рентгеновской и оптической кривыми блеска квазара 3C 279. В обоих случаях отрицательная задержка должна означать лидирование рентгеновских вариаций.

Маршер 2005). Эта модель предполагает, что излучение разных частот рождается в джете, электроны ускоряются только на фронте ударной волны и теряют энергию, удаляясь от фронта. Электроны самых высоких энергий, которые излучают на коротких длинах волн, выживают только вблизи фронта, в то время как более низкие частоты излучаются в большей по объему области. В этом случае переменность на высоких частотах будет больше по амплитуде и быстрее по времени, как и наблюдается в большинстве блазаров. Данная модель хорошо описывает поведение квазара 3C 279 в оптике и на радио частотах. Полученная корреляция между рентгеновской и оптической кривыми блеска указывает на то, что рентгеновское излучение также рождается в джете, но наиболее вероятно в результате SSC-процесса, когда оптические и, возможно, инфракрасные синхротронные фотоны, излученные внутри джета, рассеиваются релятивистскими электронами джета до рентгеновских энергий. Время, необходимое синхротронным фотонам для того чтобы достичь наблюдателя, ограничено только скоростью света, а процесс рассеивания требует дополнительного времени, которое сильно зависит от угла зрения наблюдателя и размера области (Соколов и Маршер 2005), что и определяет задержку рентгеновских вспышек по отношению к оптической переменности.

Корреляция между свойствами радио джета и излучением на более высоких частотах неоднократно отмечалась разными исследователями, например, Бабаджанянц и Белоконь (1986) нашли связь между оптическими вспышками и выбросами радио компонент в джет для нескольких активных ядер и, в частности, для радиогалактики 3C 120 (Белоконь 1987); ассоциация между выбросами сверхсветовых компонент и гамма вспышками, по-видимому, имеет место в целом ряде блазаров (Верле и др. 1994, Эрштадт и др. 2001b). Поляризационные оптические данные показывают, что магнитные поля в областях оптического излучения связаны со структурой радио джета. В индивидуально взятом блазаре направление поляризации оптического излучения изменяется в очень широком интервале углов, и степень поляризации испытывает высокую переменность, например, многочисленные поляризационные данные, полученные на Бюраканской астрофизической станции Санкт-Петербургского государственного университета для BL Lac (Гаген-Торн и др. 1984, Гаген-Торн и др. 1994), показывают, что позиционный угол электрического вектора может принимать любые направления, и степень поляризации меняется от $\sim$1% до $>$20%. Однако, распределение наблюдаемых направлений поляризации имеет

хорошо выраженный максимум в интервале углов между 20° и 30°, и высокие степени поляризации, >15%, наблюдаются преимущественно на позиционном угле ∼25°. Это направление поляризации соответствует направлению радио джета BL Lac на парсековых масштабах. Значительная переменность позиционного угла поляризации и существование преимущественного направления поляризации вдоль джета при высокой степени поляризации хорошо объясняется моделью "ударной волны в джет", если в спокойном состоянии магнитное поле в джете имеет турбулентную структуру, которая упорядочивается на фронте ударной волны.

Важной задачей является локализация оптического излучения в радио джете. Листер и Смит (2000) наблюдали с VLBA на 43 ГГц выборку квазаров с высокой и низкой степенью поляризации в оптическом диапазоне и нашли, что оптическая степень поляризации очень хорошо коррелирует со степенью поляризации в ядре джета. Они пришли к выводу, что области поляризованного излучения в оптике должны быть пространственно связаны с ядром парсекового джета. К подобному же заключению пришли Габузда с соавторами (2006), наблюдавшие выборку объектов типа BL Lac в оптическом диапазоне и с VLBA. Наиболее прямой способ определить, где в радио джете рождается оптическое излучение, - это обнаружить коррелированную переменность в оптике и в структурах джета, что лучше всего должно наблюдаться при сравнении изменений в оптической поляризации с изменениями в изображениях парсековых джетов в поляризованном потоке. Такую программу для десятка блазаров мы проводим в настоящее время в сотрудничестве с Паул Смит (Стьюард обсерватория, США) и наблюдателями астрофизической лаборатории института им. В.В. Соболева. Выявление связей между излучением и морфологией источника на различных частотах дает основной материал для понимания физики объектов, построения и проверки теоретических моделей.

6. Связь между аккреционным диском и джетом

Около десяти лет назад Мирабел и Родригез (1994) открыли двойную звёздную систему, GRS 1915+105, являющуюся ярким рентгеновским источником и имеющую некоторые характерные особенности блазара: система содержит в себе черную дыру с массой в $14 M_{\odot}$ и обладает радио джетом, в котором наблюдается сверхсветовое движение с видимой скоростью 2-3c. Авторы

назвали этот объект "микро-квазар". В настоящее время насчитывается несколько десятков микро-квазаров. В микро-квазарах присутствие джета является транзитным явлением и коррелирует с характеристиками рентгеновского излучения. Рентгеновские кривые блеска GRS 1915+105 демонстрируют периоды низкой плотности потока (плато) с жестким спектром на временных масштабах от минут до часов, которые сопровождаются событиями в радио и ИК диапазонах. Продолжительные фазы жесткого рентгеновского излучения совпадают с фазами относительно яркого радио излучения, имеющего плоский спектр, и в эти периоды интерферометрические наблюдения источника показывают присутствие стабильного радио джета. Однако, система имеет продолжительные фазы мягкого рентгеновского излучения, когда радио джет подавлен. При переходе от плато к фазе мягкого рентгена сверхсветовые компоненты выбрасываются в радио джет, причем Лоренц фактор этих компонент значительно выше Лоренц фактора стабильного джета. Эти наблюдательные проявления рассматриваются как убедительные доказательства связи между джетом, выбрасываемым из центрального источника, и аккреционным потоком, питающим черную дыру, и позволяют построить унифицированную модель диск-джет взаимодействия (см. Фендер и Беллони 2004).

Наблюдается ли подобная связь в AGN? В ярко выраженных блазарах излучение джета, по-видимому, сильно доминирует на всех длинах волн. Сейфертовские галактики, которые являются сильными рентгеновскими источниками, как правило, имеют очень слабое радио излучение, так что исследование их радио переменности отягощено значительными шумами. Однако, ряд активных галактик обладают в рентгеновском диапазоне свойствами Сейфертовских галактик и показывают характеристики блазаров на радио частотах. Такие источники являются очень перспективными для поиска диск-джет связи в AGN. К их числу принадлежит радиогалактика 3C 120, относящаяся к FRI населению.

Мы патрулируем 3C 120 с VLBA и RXTE с 1997г., и уже первые годы наблюдений выявили события в радио и рентгеновском диапазонах, указывающие на возможное диск-джет взаимодействие (Маршер и др. 2002). Текущие наблюдения подтверждаю наличие связи между рентгеновскими и радио событиями. Радио джет 3C 120 является достаточно активным, и в среднем 2-3 ярких компонента, хорошо отождествляемых на радио картах, выбрасывают за год, причем зти компоненты имеют подобную видимую скорость $\sim$5c (Рис. 7). Каждому такому

компоненту обычно предшествует падение плотности потока в рентгеновской кривой блеска. Хотя это падение не является столь драматичным как в микро-квазарах и не имеет форму плато, оно длится от нескольких дней до недели, и плотность потока уменьшается в ∼2 раза. Это уменьшение сопровождается слабым, но значимым ужесточением рентгеновского спектра. (Рис. 8, новые данные после 2002г.) Сверхсветовые компоненты из 7 мм ядра джета выбрасываются с задержкой 60±10 дней по отношению к моменту максимального падения рентгеновского блеска. Эта задержка дает оценку расстояния ядра джета от центрального источника ∼0.4 пс, хотя часть задержки может быть обусловлена сдвигом положения ядра на 43 ГГц по отношению к реальному ядру, так как частота завала самопоглощения в радио спектре 3C 120 равна ∼100 ГГц. Если продолжительность фазы низкого рентгеновского потока смасштабировать в соответствии с отношением масс черных дыр в 3C 120 и GRS 1915+105 ($\sim 3 \times 10^6$), то фаза плато в микро-квазаре должна занимать ∼1 сек, что, по крайней мере, на 2 порядка меньше, чем наблюдается. Наиболее вероятно, что масштаб зависит не только от массы центрального источника, но и, например, от нормы аккреции и скорости вращения черной дыры. Мы считаем, что полученные данные убедительно демонстрируют, что фазы излучения системы, состоящей из аккреционного диска и окружающей его короны, имеют прямое воздействие на события, происходящие в радио джете 3C 120, и подобны явлениям, наблюдающимся в микро-квазарах. Связь между оптическими вспышками и выбросами радио компонент, найденная Белоконь (1987), не противоречит данной картине, так как оптические вспышки могут рождаться при входе ударной волны в джет. К сожалению наши оптические данные для 3C 120 не позволяют выполнить подобный анализ.

Радиогалактика 3C 120 не является единственной активной галактикой, демонстрирующей диск-джет связь. В 2004 г. мы начали проводить подобные наблюдения для радиогалактики 3C 111, относящейся к FRII населению, которые показывают такую же связь между рентгеновскими и радио событиями.

7. Заключение

Выдающаяся переменность AGN вдоль всего электромагнитного спектра была и остается одной из основных тем астрофизических исследований. Существует целый ряд причин, которые вызывают эту переменность:

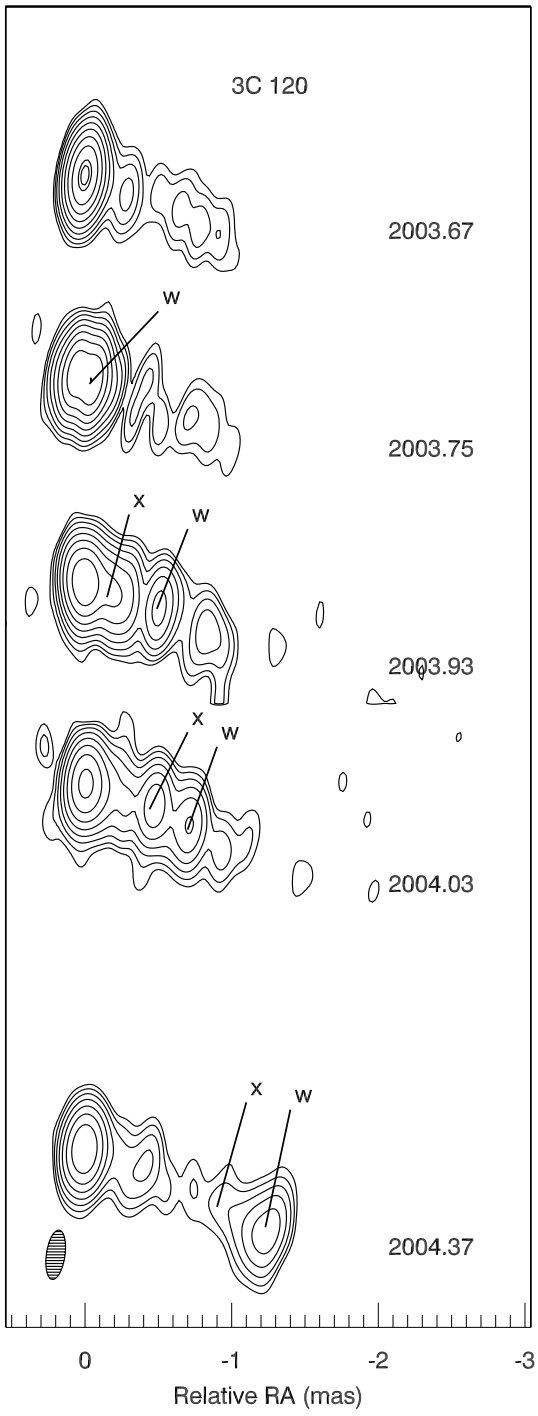

Рис. 7. Радио карты 3C 120 на 43 ГГц., размер лепестка направленности синтезированного луча - beam=0.40×0.15 (мсек дуги)^2, пик яркости - 1.52 Ян/beam.

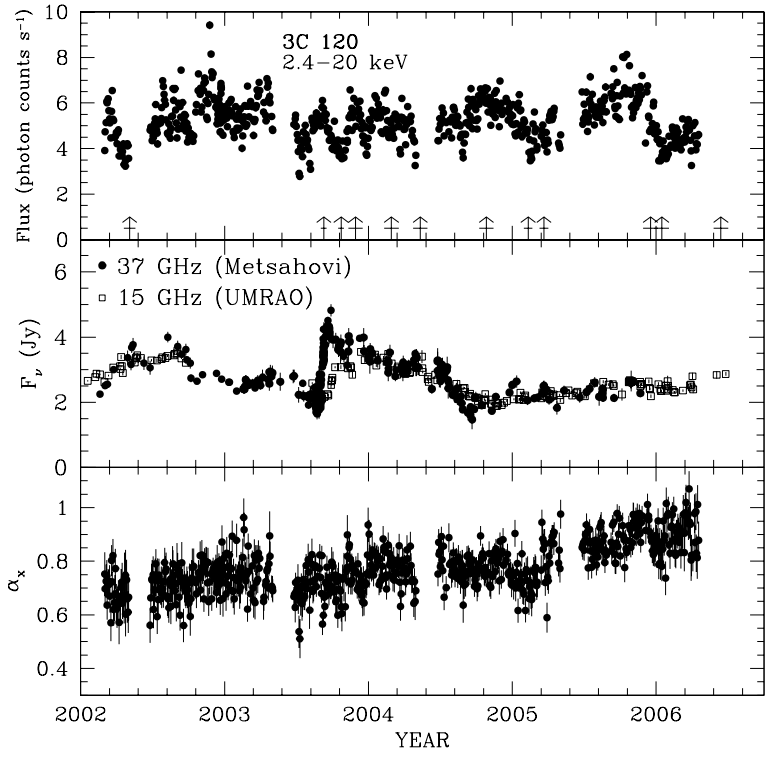

Рис. 8. Рентгеновская и радио кривые блеска 3C 120. Стрелки на рентгеновской кривой блеска указывают эпохи выбросов сверхсветовых компонент из ядра джета. *Нижняя панель* демонстрирует переменность рентгеновского спектрального индекса.

1). Изменения во входящей массе и в выбрасываемом Пойнтинговом потоке, которые модулируют условия в разных частях системы и, в частности, в джете. Это, возможно, - самый интересный процесс, поскольку он относится непосредственно к "сердцу" AGN, аккрецирующей черной дыре.

2). Ударные волны, бегущие вниз по джету. Они представляют отклик потока на возмущения в основание джета, которые могут быть коротко живущими явлениями по отношению к изменениям в п.1.

3). Турбулентность, развивающаяся в аккреционном диске и/или в джете из-за внутренней нестабильности или в результате взаимодействия с окружающей средой.

4). Изменения направления джета, вызванные прецессией или качанием основания джета.

5). Энергетические потери, испытываемые релятивистскими электронами при синхротронном излучении или комптоновском рассеянии, и при охлаждении, вызванном расширением излучающего объема, которые могут потушить или укоротить вспышки, порожденные причинами, указанными в п.п. 2,3.

Знание деталей этих процессов и взаимосвязей между ними позволит нам понять роль, которую активные ядра играют в эволюции Вселенной.

Авторы благодарят организационный комитет за возможность принять участие в конференции, посвященной 125-летию Астрономического института им. В.В. Соболева, и желают коллективу института больших творческих успехов. Работа выполнена при поддержке гранта Национального Научного Фонда США AST-0406865.

Литература

Антонучи, Миллер (R.R.J. Antonucci and J.S. Miller), Astrophys. J., **297**, 621 (1985).

Бабаджанянц М.К., Белоконь Е.Т. , Proceedings of the 121st Symposium of the International Astronomical Union, Byurakan, Armenia, U.S.S.R., June 3-7, 1986, Eds. E.E. Khachikian, K. J. Fricke and J. Melnick, p. 305.

Бегелман (M. C. Begelman) Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **92**, 11442 (1995).

Белоконь Е.Т. , Астрофизика, **27**, 429 (1987).

Блэндфорд, Пайн (R.D. Blandford and D.G. Payne), MNRAS, **199**, 883 (1982).

Блэндфорд, Знайек (R.D. Blandford and R.L. Znajek) , MNRAS , **179**, 433 (1977).

Верле и др. (A.E. Wehrle et al.), Proceedings of the NRAO workshop, Socorro, New Mexico, February 11-12, 1994, Eds. J.A. Zensus and K.I. Kellermann, p.197.

Вестергард, Петерсон (M. Vestergaard and B. Peterson), Astrophys. J., **644**, 133 (2006).

Виллата и др. (M. Villata et al.), Astronomy & Astrophys., **363**, 108 (2000).

Ву, Юрри (J.H. Woo & M.C. Urry) Astrophys. J., **581**, 5 (2002).

Габузда и др. (D.C. Gabuzda et al.), MNRAS , **369**, 1596 (2006).

Гаген-Торн В.А. и др., Астрон. журн., **71**, 717 (1994).

Гаген-Торн В.А. и др., Астрон. журн., **61**, 925 (1984).

Гринхилл и др. (L. J. Greenhill et al.), Astrophys. J., **486**, L15 (1997).

Гомец и др. (J.L. Gómez et al.), Science, **289**, 2317 (2000).

Кавальери, Падовани (A. Cavaliere and P. Padovan), Astrophys. J., **340**, L5 (1989).

Кайно, Такахара (M. Kino & F. Takahara), MNRAS , **349**, 336 (2004).

Келлерманн и др. (K.I. Kellermann et al.), Astrophys. J., **609**, 539 (2004).

Лавлейс и др. (R.V.E. Lovelace et al.), Astrophys. J., **379**, 696 (1991).

Листер, Смит (M.L. Lister and P.S. Smith), Astrophys. J., **541**, 66 (2000).

Лиу и др. (Y. Liu et al.), Astrophys. J., **637**, 669 (2006).

МакКинней (J.C. McKinney), MNRAS , **368**, 1561 (2006).

МакНамара и др. (B.R. McNamara et al.), Nature, **433**, 45 (2005).

МакХарди и др. (I.M. McHardy et al.), MNRAS , **348**, 783 (2004).

Марковиц, Эделсон (A. Markowitz and R. Edelson), Astrophys. J., **617**, 939 (2004).

Маршалл и др. (H.L. Marshall et al.), Astrophys. J. Supp., **156**, 13 (2005).

Маршер и др. (A.P. Marscher et al.), Astrophys. J. submitted (2007)

Маршер и др. (A.P. Marscher et al.), Nature, **417**, 625 (2002)

Маршер, Трэвис (A.P. Marscher and J.P. Travis), Astronomy and Astrophys. Supp.**120**, 537 (1996)

Маршер, Гир (A.P. Marscher and W.K. Gear), Astrophys. J., **298**, 114 (1985)

Мейер и др. (D.L. Meier et al.), Science, **291**, 84 (2000)

Мийоши и др. (M. Miyoshi et al.), Nature, **373**, 127 (1995)

Мирабел, Родригез (I.F. Mirabel and L.F. Rodriguez), Nature, **392**, 673 (1998)

Пайнер и др. (B.G. Piner et al.), Astrophys. J., **640**, 196 (2006).

Петерсон и др. (B.M. Peterson et al.), Astrophys. J., **613**, 682 (2004).

Соколов, Маршер (A. Sokolov and A.P. Marscher), Astrophys. J., **629**, 52 (2005).

Сэмбруна и др. (R. M. Sambruna et al.), Astrophys. J., **608**, 698 (2004).

Тремейн и др. (S. Tremaine et al.), Astrophys. J., **574**, 740 (2002).

Учияма и др. (Y. Uchiyama et al.), Astrophys. J., **640**, L113 (2005).

Фанарофф, Рилей (B.L. Fanaroff and J.M. Riley), MNRAS , **167**, 311 (1974).

Фендер, Беллони (R. Fender and T. Belloni), Ann. Rev. Astr. Astrophys., **42**, 317 (2004).

Харрис и др. (D. Harris et al.), Astrophys. J., **631**, 211 (2006).

Хартманн и др. (R.C. Hartmann et al.), Astrophys. J. Supp., **123**, 79 (1999).

Целотти, Фабиан (A. Celotti and A.C. Fabian), MNRAS , **264**, 228 (1993).

Шварц и др. (D.A. Schwartz et al.), Astrophys. J., **540**, L69 (2000).

Эрштадт и др. (S.G. Jorstad et al.), Astron. J., **130**, 1418 (2005).

Эрштадт, Маршер (S.G. Jorstad and A.P. Marscher), Astrophys. J., **614**, 615 (2004).

Эрштадт и др. (S.G. Jorstad et al.), Astrophys. J. Supp., **134**, 181 (2001a).

Эрштадт и др. (S.G. Jorstad et al.), Astrophys. J., **556**, 738 (2001b).