

УДК 524.7

Некоторые особенности оптической переменности АЯГ

В.М. Лютый

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга,
Университетский проспект 13, Москва, 119899, Россия
e-mail: lyuty@sai.crimea.ua

Поступила в редакцию 13 марта 2008 г.

Аннотация. Приводятся примеры кривых блеска АЯГ разных типов переменности: 1) преобладает F-компонента (быстрая), S-компонента (медленная) очень слабая или вообще отсутствует (I тип переменности); 2) амплитуда S-компоненты значительно больше, чем F-компоненты (II тип); 3) обе компоненты имеют примерно одинаковую амплитуду (III тип). Показано, что как и в случае деления АЯГ на два типа по спектру (Sy 1 и Sy 2) такая классификация зависит от интервала наблюдений – кривая блеска одного и того же объекта может быть отнесена к разным типам переменности.

Ранее на примере детального исследования NGC 4151 автором было показано, что природа F- и S-компонент разная. Хотя обе компоненты имеют тепловую природу, медленная связана с формированием и развитием аккреционного диска, а быстрая (вспышки) – с нестабильностями в аккреционном диске и их распространением по диску в виде ударной волны. Сравниваются особенности оптической переменности ядер сейфертовских галактик (на примере NGC 4151) и блазаров (на примере “лацертида” OJ 287). Делается вывод, что природа оптической переменности ядер сейфертовских галактик и объектов типа BL Lac разная: тепловое излучение и излучение со степенным спектром $F_\nu \propto \nu^\alpha$.

1 Введение

Открытие квазаров в начале 60-х годов привело к совершенно новому направлению в астрофизике – исследованию активных ядер галактик (АЯГ): квазаров, ядер сейфертовских галактик, “лацертид” – объектов типа BL Lac. Более чем 40-летние исследования выявили некоторые пекулярные особенности спектральных и фотометрических характеристик АЯГ.

Одной из наиболее примечательных особенностей кривых блеска АЯГ является наличие в них двух компонент переменности, различающихся характерным временем – медленные изменения блеска (тысячи дней) и накладывающиеся на них быстрые (десятки дней) вспышки (S- и F-компонента соответственно). Первыми на присутствие в кривых блеска ядер SyG двух компонент переменности указали Лютый и Проник (1975). Независимо, анализируя фотографические кривые блеска 20 АЯГ, Мак-Джимси и др. (1975), а затем Пика и др. (1988) для 144 объектов отметили не только наличие двух компонент, но и выделили разные типы кривых блеска: 1) преобладает F-компонента, S-компонента очень слабая или вообще отсутствует (I тип переменности); 2) амплитуда S-компоненты значительно больше, чем F-компоненты (II тип); 3) обе компоненты имеют примерно одинаковую амплитуду (III тип). Интересно, что, например, в NGC 4151 – наиболее подробно исследованном

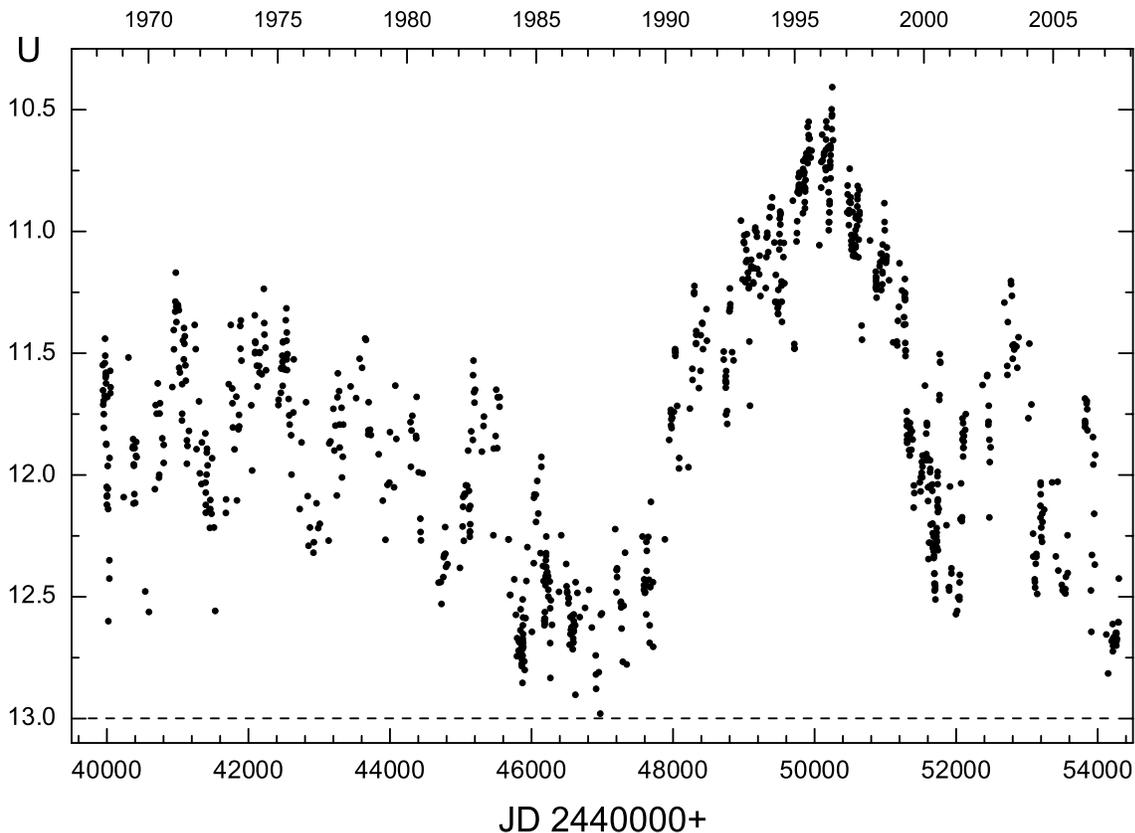


Рис. 1. Кривая блеска ядра сейфертовской галактики NGC 4151: первый (1968–1985 гг.) и второй циклы активности. Штриховой линией внизу показан уровень окружающей галактики в диафрагме 27''

АЯГ – медленная и быстрая компоненты проявляются не только в оптическом диапазоне, но также в УФ и переменности эмиссионных линий (Лютый, 2005).

Дальнейшие исследования показали, что деление кривых блеска на 3 разных типа так же относительно, как и деление на 2 основных спектральных типа – Sy 1 и Sy 2: как объект типа Sy 1 может перейти в Sy 2 и наоборот (Лютый и др., 1984), так же и объект с кривой блеска, например, типа 3 (одинаковая амплитуда S- и F-компонент) может перейти в тип 2 (амплитуда S-компоненты больше). Как будет показано в этой работе, все зависит от длительности интервала наблюдений (Лютый и Дорошенко, 1999). Более того, может меняться не только тип кривой блеска, но на некотором интервале переменность может вообще не проявляться. Причем для разных объектов длительность интервала, когда сохраняется какой-то один тип переменности, может меняться от нескольких лет до, возможно, сотен лет.

2 Кривые блеска

(a) NGC 4151

Хорошим примером разного отношения амплитуд быстрой и медленной компонент в одном объекте является кривая блеска ядра сейфертовской галактики NGC 4151 (рис. 1). В интервале 1968–1985 гг. (первый цикл активности) амплитуда S- и F-компонент была примерно одинаковой (III тип переменности). Однако в 1989–2000 гг. (второй цикл активности) амплитуда S-компоненты стала значительно (в среднем в 3 раза) больше. Кстати, именно это обстоятельство дало возможность

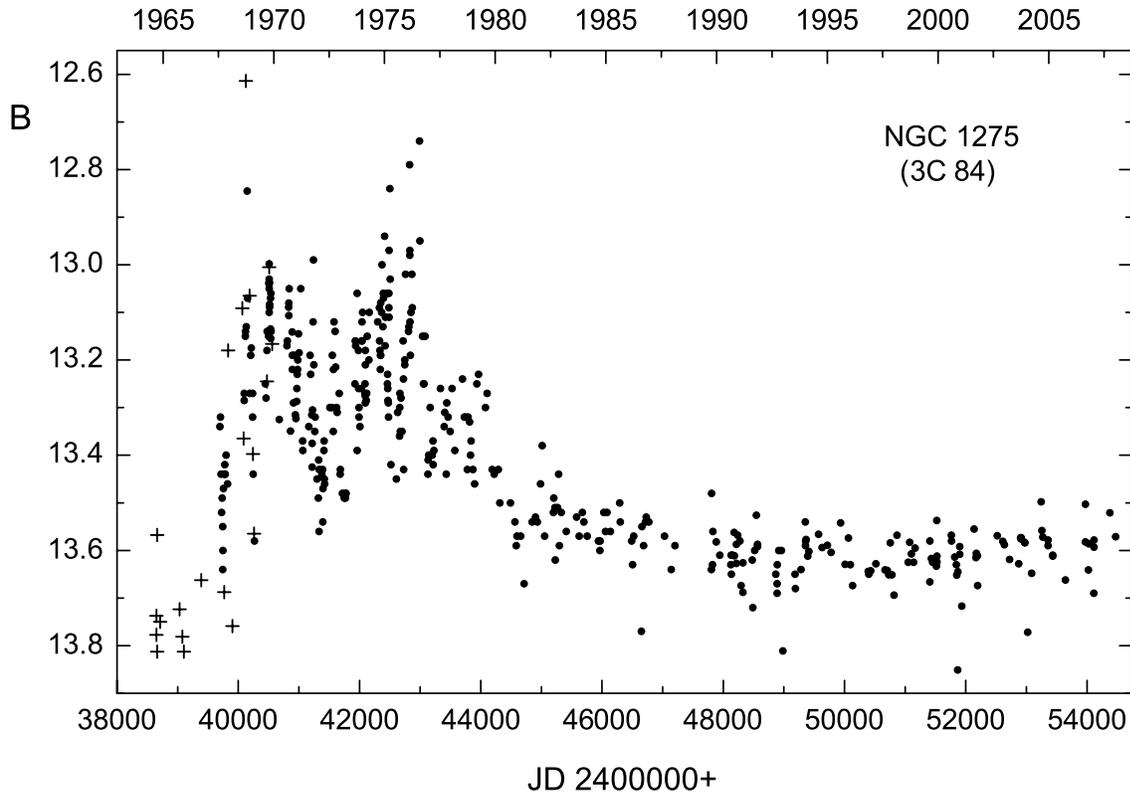


Рис. 2. Кривая блеска ядра сейфертовской галактики NGC 1275: крестики – фотографические наблюдения (Кэннон и др., 1971), точки – фотоэлектрические в диафрагме $27''$

разделить компоненты и выяснить их природу (Лютый, 2005) – см. ниже. После 2000 г. амплитуда S-компоненты снова уменьшилась. В минимуме 1985–1989 гг. наблюдался переход сейфертовского типа Sy 1 в Sy 2 (Лютый и др., 1984): исчезли широкие крылья линии $H\beta$ и сильно уменьшились крылья $H\alpha$. Однако во втором цикле активности широкие крылья снова появились, а поток в $H\alpha$ с 1990 по 1996 гг. (максимум второго цикла активности) увеличился в 5 раз (Мальков и др., 1997). Более того, в переменности линий $H\alpha$ и $H\beta$ проявилась S-компонента, которую Мальков и др. (1997) отметили как разные последовательности на зависимости потока в линии от потока в континууме. Проявление S-компоненты в линиях не согласуется с моделью BLR, но, анализируя показатели цвета S-компоненты, автор нашел, что должна существовать еще и протяженная область формирования широких линий – EBLR на расстоянии полтора световых года от центрального источника (Лютый, 2005).

(6) NGC 1275

Совершенно необычный характер имеет кривая блеска ядра NGC 1275 (рис. 2). После всплеска активности в 1968–1981 гг., когда амплитуда F-компоненты была значительно больше S-компоненты, блеск ядра упал до минимального (почти до уровня окружающей галактики), и резко снизилась амплитуда переменности: средний уровень блеска упал с $B = 13^m.24$ до $13^m.60$, а дисперсия точек (среднеквадратичное отклонение) – с $0^m.15$ до $0^m.06$, т. е. в 2.5 раза. Это состояние продолжается уже больше 20 лет. Интересно, что после 1981 г. практически исчезло звездообразное ядро галактики.

Уровню окружающей галактики соответствует блеск $B = 13^m.7$ – $13^m.8$ (фотографические наблюдения 1964–1967 гг.). После 1981 г. блеск ядра несколько раз достигал этого уровня, хотя средний

уровень был $13^m.6$. Это значит, что слабая активность ядра продолжается и после 1981 г. по настоящее время. Минимальный уровень блеска пришелся на 1990–1996 гг. Пять измерений в самом минимуме дают средние величину и показатели цвета $B = 13^m.77 \pm 0^m.03$, $B - V = 0^m.78 \pm 0^m.03$, $U - B = 0^m.17 \pm 0^m.04$. Это в пределах ошибок соответствует показателям цвета кольца $27'' - 14''$. Галактика NGC 1275 имеет пекулярную структуру, хотя в каталоге RC2 она относится к типу $T = -2$ (линзовидная). Показатели цвета таких галактик на $0^m.4$ больше, чем в минимуме блеска NGC 1275 в диафрагме $27''$ или кольце $27'' - 14''$ (Засов и Лютый, 1981). Как уже отмечалось, минимальный уровень блеска ядра NGC 1275 наблюдался в 1990–1996 гг. После этого начался постоянный рост яркости в полосе U , тогда как в B и V блеск оставался на минимальном уровне. Возможно, в ближайшие годы начнется очередной всплеск активности, аналогичный 1969–1980 гг.

(6) NGC 7469

Кривая блеска ядра NGC 7469 (рис. 3) отличается полным отсутствием S-компоненты вообще (предельный случай II типа переменности). Правда, за 40 лет наблюдений (1968–2007) средний блеск ядра NGC 7469 упал с $U = 12^m.65$ до 13.0. Если средний блеск будет и дальше падать такими же темпами, то уровень галактики будет достигнут через 80–90 лет. Возможно, продолжительность медленной компоненты в NGC 7469 не годы или десятки, а сотни лет. Тем не менее один раз за 40 лет наблюдений блеск почти достиг уровня галактики (1989 г.). В это время полностью исчезли широкие крылья эмиссионной линии $H\beta$ (Чуваев и др., 1990), т. е. как и в случае NGC 4151 (1984 г.), наблюдался переход спектрального типа $Sy 1$ в $Sy 2$.

В NGC 4151 продолжительный 5-летний минимум, во время которого ядро перешло в тип $Sy 2$, разделял два разных цикла активности. Они интерпретируются как полная диссипация старого аккреционного диска в 1984–1989 гг. и возникновение нового с другими характеристиками (Лютый и Дорошенко, 1999). Уровень S-компоненты упал почти до нуля. В NGC 7469 минимум был кратковременным, не больше одного года. Причем резкое падение блеска (почти $0^m.5$ в полосе U) произошло не более, чем за 4 месяца. Увеличение блеска после минимума – за 10 дней на ту же величину. Создается впечатление затменного минимума, однако слишком короткое время выхода исключает гипотезу двойственности.

(2) OJ 287

Описание кривых блеска и типов переменности было бы неполным без кривых блеска блазаров. Напомним, что блазарами называют АЯГ с очень большой амплитудой изменений блеска (иногда блазары путают с “лацертидами”: все “лацертиды” – блазары, но не все блазары – “лацертиды”). Из блазаров наиболее известны квазар 3C 279 и “лацертид” OJ 287. Последний к настоящему времени исследован наиболее подробно. Эти объекты имеют наибольшую амплитуду переменности, когда-либо наблюдавшуюся в АЯГ: почти 6 величин для OJ 287 и около 7 величин для 3C 279 (Ичус и Лиллер, 1975). Кривая блеска OJ 287 с 1965 г. показана на рис. 4. На первый взгляд кажется, что в кривой блеска присутствуют две компоненты, причем амплитуда быстрой ненамного больше. Однако, если перейти от звездных величин (логарифмическая шкала) к потокам (линейная), оказывается, что медленная компонента практически отсутствует (см. рис. 2 в статье Киджера (2000)). Это объясняется просто: поток от 18^m до 16^m (максимальный уровень S-компоненты) увеличивается всего в 6 раз, а поток от 18^m до $12^m.5$ – более, чем в 100 раз. Естественно, подобного не происходит для малоамплитудных АЯГ и объектов с умеренной амплитудой порядка 2^m (NGC 4151 – рис. 1).

На рис. 4 приведены в основном фотоэлектрические наблюдения UBV или BV (1972–1990 гг.). Именно эти наблюдения представляют наибольший интерес для исследования природы переменности “лацертид”. Восходящая ветвь вспышки 1972 г. представлена фотографическими наблюдениями (Киджер и др., 1992). К сожалению, после 1990 г. почти прекратились фотоэлектрические UBV -наблюдения – наблюдатели перешли на ПЗС, и наблюдения проводились или в полосах BVR , или в VRI , или даже только в полосе V (исключение составляют фотополяриметрические $UBVRI$ -наблюдения Ефимова и др. (2002), но на рис. 4 эти данные не приведены, так как указанный архив

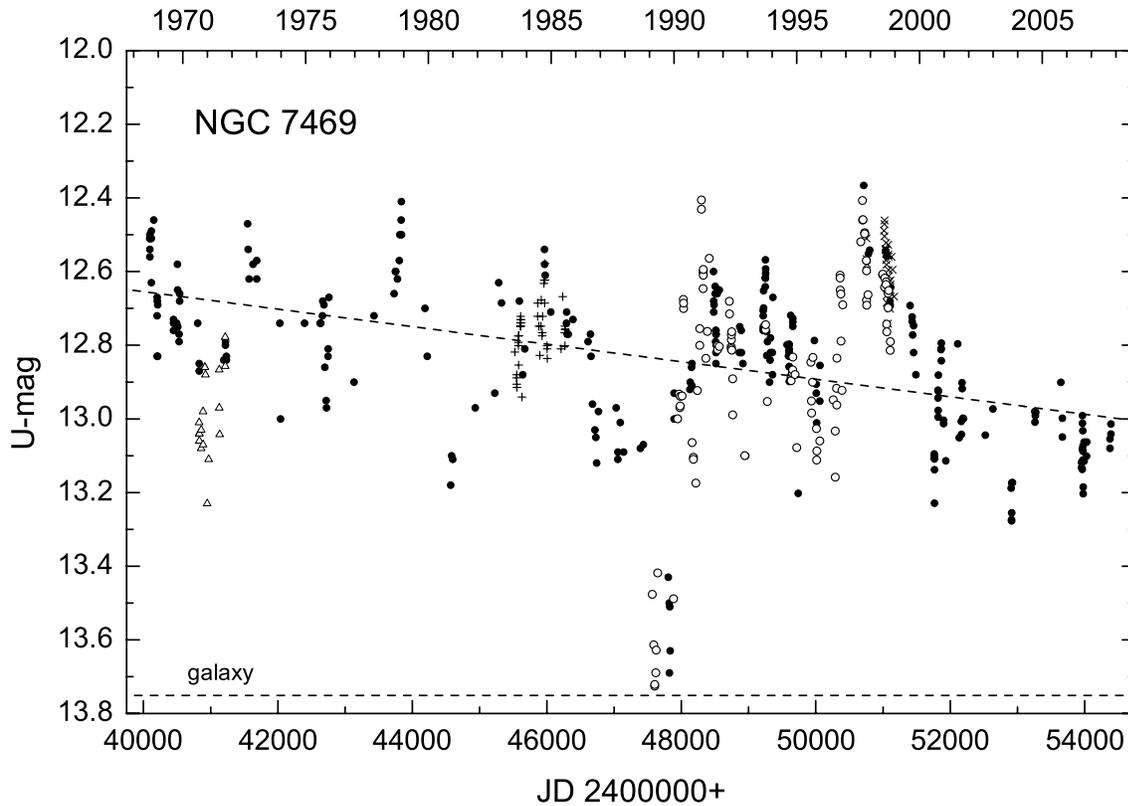


Рис. 3. Кривая блеска ядра сейфертовской галактики NGC 7469. Наклонной штриховой линией показано вековое падение блеска, а штриховой линией внизу – уровень окружающей галактики. Точки – наблюдения автора, треугольники – Пенстон и др. (1974), плюсы – Дорошенко и др. (1989), крестики – Дорошенко, кружки – Меркуловой

на сайте <http://www.astro.utu.fi/oj94> в настоящее время не существует). Прямыми крестиками на рис. 4 показаны ПЗС-наблюдения в полосе V , пересчитанные на B с учетом построенной автором зависимости $B-V$ от V . Довольно большой и подробный ряд наблюдений получен в работе Массаро и др. (2003), но только в полосе Rc . Пользы от таких наблюдений немного. Как и фотографические архивные наблюдения они дают представление только об амплитудно-временных характеристиках, а для выяснения природы переменности необходимы многоцветные. Пересчитать их на полосу B также невозможно из-за недостатка одновременных BVR -наблюдений.

Наибольший интерес к объекту OJ 287 проявился во время очень сильной вспышки 1972 г. С 1972 по 1990 гг. получен основной ряд UBV - или BV -наблюдений. Именно этот ряд с максимальной амплитудой переменности позволил автору сделать вывод о том, что природа оптической переменности OJ 287 (возможно, и остальных “лацертид”) в принципе отличается от таковой для ядер сейфертовских галактик.

3 Природа оптической переменности АЯГ

Попытки выяснить природу оптической переменности АЯГ начались сразу же после обнаружения переменности квазаров и ядер сейфертовских галактик. Первые годы доминировала гипотеза синхротронного излучения, как в радиодиапазоне (количество соответствующих работ таково, что нет смысла их перечислять). Однако не все ядра сейфертовских галактик и даже квазары являют-

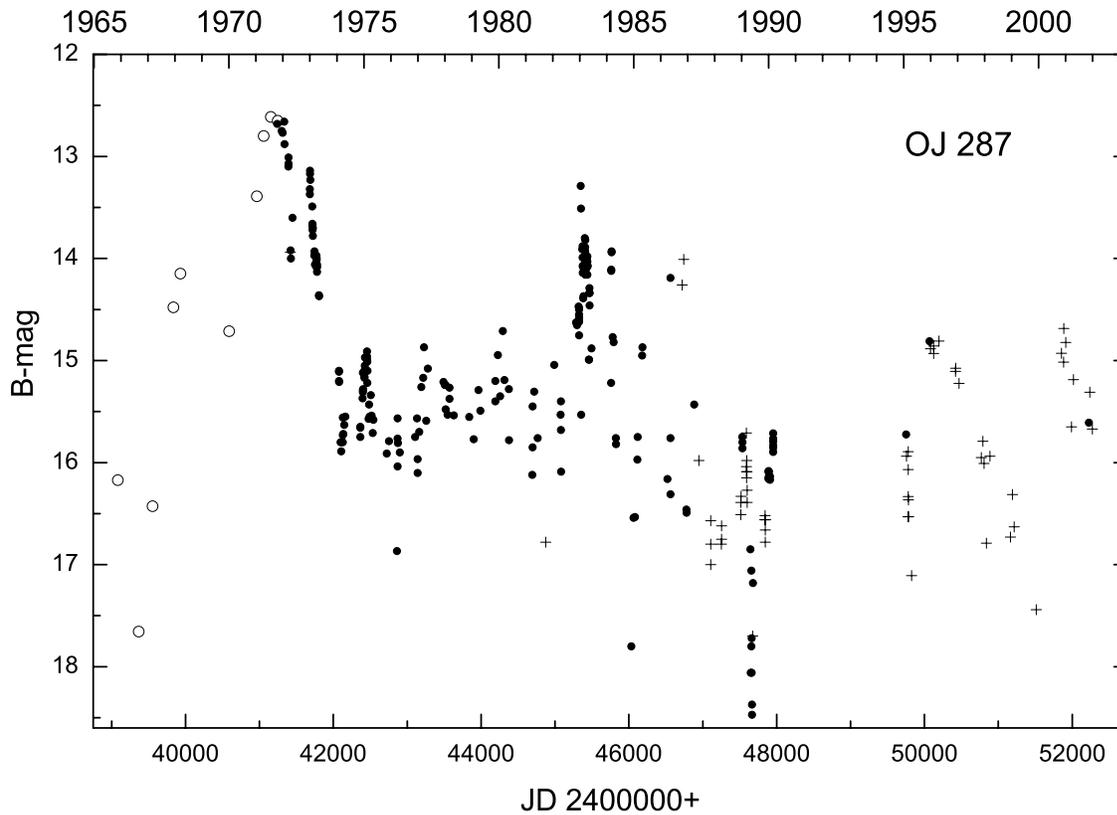


Рис. 4. Кривая блеска объекта типа VL Лас OJ 287 в полосе B : точки – фотоэлектрические наблюдения автора и по литературным данным (Силланпаа и др., 1996 и ссылки в этой работе), кружки – фотографические наблюдения (Киджер и др., 1992), плюсы – ПЗС-наблюдения (см. текст)

ся достаточно сильными и переменными радиоисточниками. Между тем оптическая переменность наблюдается у всех АЯГ.

В середине 1970-х годов автор впервые получил наблюдательные свидетельства того, что оптическая переменность АЯГ имеет, скорее, не синхротронную, а тепловую природу (Лютый, 1977). Синхротронная составляющая если и есть, то не превышает нескольких процентов, по крайней мере, в ядрах сейфертовских галактик. В этой же работе было описано основное (и неожиданное) свойство быстрой компоненты переменности – наличие минимального характерного времени вспышки. Причем оказалось, что это время для каждого объекта одно и то же независимо от амплитуды вспышки. Однако оно зависит от светимости АЯГ: чем выше светимость, тем больше характерное минимальное время переменности (от одного до двух-трех десятков дней).

Детальное исследование оптической и ультрафиолетовой (УФ) переменности NGC 4151 (Лютый, 2005) показало, что это время зависит также от длины волны: если для оптического диапазона характерное минимальное время переменности составляет 25–28 дней, то на $\lambda\lambda 1720\text{--}1450 \text{ \AA}$ – 19, а на $\lambda 1000 \text{ \AA}$ – всего 6 дней. При этом амплитуда увеличивается более, чем в 2 раза. Этот эффект очень хорошо как качественно, так и количественно, интерпретируется в рамках модели Шакуры и Сюняева (1976) дисковой аккреции на сверхмассивную черную дыру. Для черной дыры с массой порядка $10^9 M_{\odot}$ дисковая аккреция может обеспечить светимость $\sim 10^{47}$ эрг/с, при $L/L_{Edd} \simeq 0.1\text{--}1$ температура излучения $\sim 10^5$ К, минимальное время переменности 2–3 дня.

Быстрая компонента переменного источника в ядре NGC 4151 имеет амплитуду около 3.5 величин (12.8–16.2), однако при уменьшении яркости от максимума на 2^m температура меняется мало и

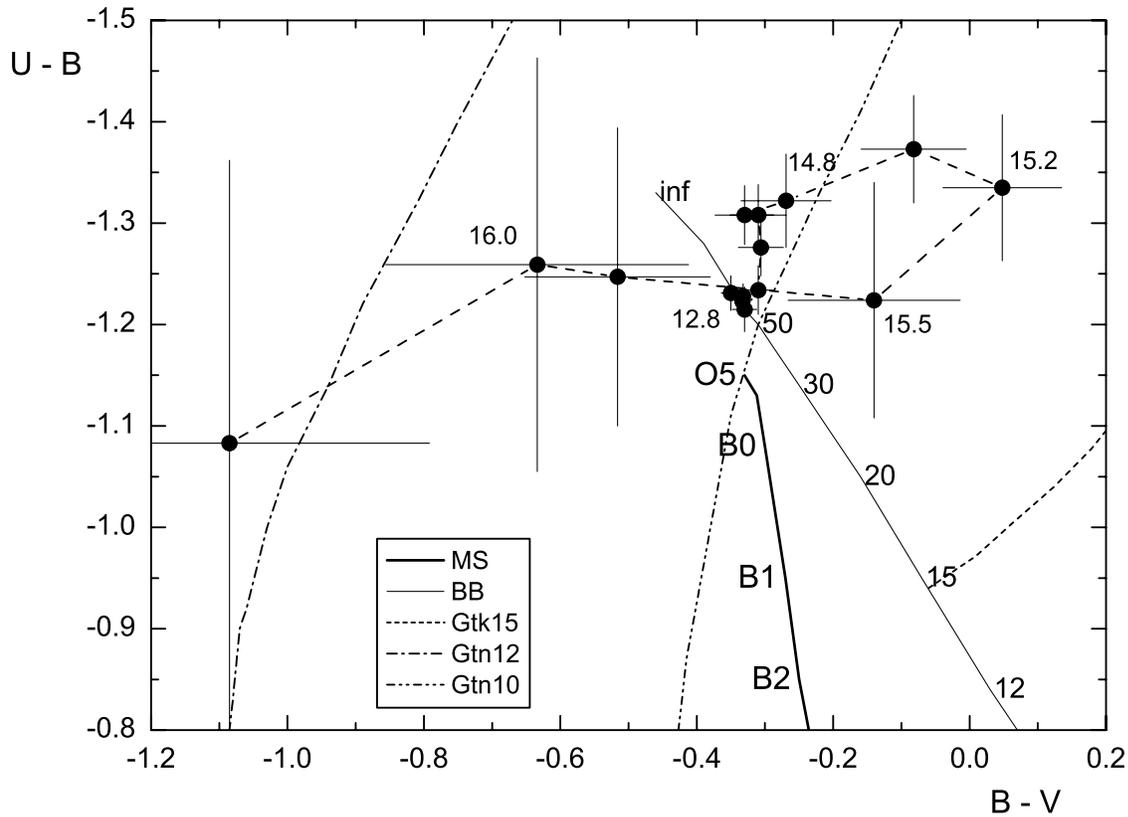


Рис. 5. Изменение показателей цвета быстрой компоненты переменного источника в NGC 4151 (числа возле точек указывают блеск в V). Обозначения: MS – главная последовательность, BB – черное тело с указанием температуры в кельвинах, Gtk15 – оптически толстый газ при $T_e = 15$ тыс. К, Gtn12 и Gtn10 – оптически тонкий газ при температуре 12 и 10 тыс. К (Чаленко, 1999)

составляет порядка 60000 К (рис. 5). При дальнейшем падении блеска начинает проявляться газовая компонента. Таким образом, основную долю светимости вспышек дает тепловая компонента.

Как уже говорилось выше, в OJ 287 наблюдается практически только быстрая компонента. Полная амплитуда переменности за 1972–1990 гг., когда проводились UBV -наблюдения, достигает почти 6^m . В 1989 г. блеск OJ 287 упал до самого минимального значения с 1890 г. – $B = 18.^m5, V = 17.^m4$ (Такало и др., 1990). Измерений в полосе U в это время не было. Не было также попыток обнаружить окружающую галактику при таком низком блеске. Бенитес и Дульцин-Хасьян (1996) попытались обнаружить окружающую галактику при $V \sim 16$ и получили для нее размеры порядка 40 кпк, но интегральную величину не приводят, ограничиваясь величинами нескольких образований в окрестностях $20''$ от центрального (переменного) источника. Хейдт и др. (1999) пишут, что обнаружили компактную окружающую галактику и приводят величину $R = 18.4$ ($M_R = -23.4$). Однако их наблюдения также проводились при $V \sim 16$. Поскольку показатель цвета $B - R$ переменного источника в минимуме равен $\sim 2^m$ (Такало и др., 1990), показатель цвета $B - R$ для галактики не может быть меньше. Тогда величина окружающей галактики в полосе B должна быть больше $20.^m5$, т. е. вклад окружающей галактики не превышает 10–15 % даже в самом глубоком минимуме – доминирует переменный источник.

На рис. 6 показано изменение показателей цвета OJ 287 с блеском (числа возле кружков – V -величины). Видно, что при падении блеска на 3^m от максимального показатели цвета почти не меняются и соответствуют $\alpha \simeq 1$. При дальнейшем падении блеска уменьшается спектральный

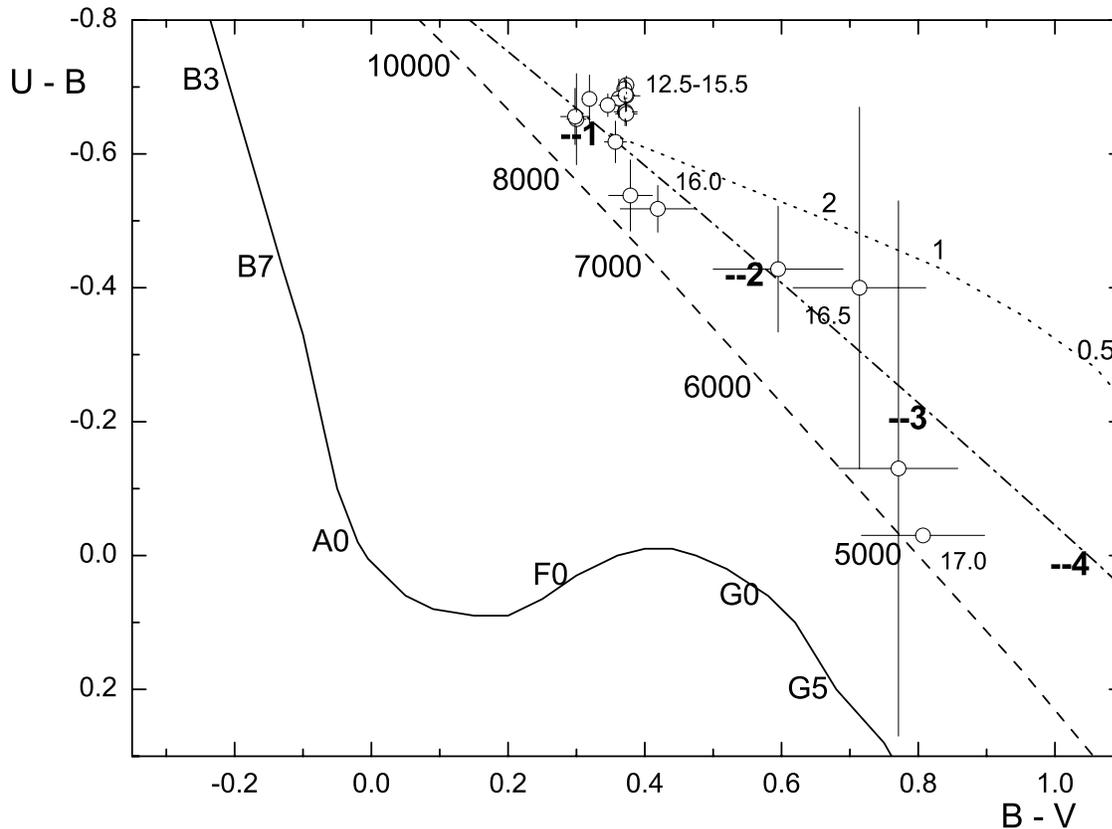


Рис. 6. Изменение показателей цвета OJ 287 с изменением блеска V (числа возле кружков). На диаграмме приведены главная последовательность, черное тело (с указанием температуры) и показатели цвета излучения со степенным спектром $F_\nu \propto \nu^\alpha$ (штрихпунктирная линия), а также двухкомпонентная модель (пунктир) – см. текст

индекс, но показатели цвета $U-B$ и $B-V$ в пределах ошибок соответствуют источнику со степенным спектром $F_\nu \propto \nu^\alpha$.

Согласно Бескину и др. (1985) изменение показателей цвета OJ 287 с изменением блеска можно представить двухкомпонентной моделью: переменный источник с нетепловым спектром ($\alpha = -1$) и эллиптическая галактика с $z = 0.3$ (показатели цвета $B-V \simeq 1.6$, $U-B \simeq 0.7$). На рис. 6 показаны изменения показателей цвета при разном вкладе галактики (пунктирная линия, цифры указывают отношение потока переменного нетеплового источника к потоку окружающей галактики в полосе V). Видно, что показатели цвета OJ 287 не соответствуют этой модели, т. е. или галактика в OJ 287 не эллиптическая, или она слабее, чем получили Хейдт и др. (1999). Кстати, они отмечают, что галактика, скорее, неправильная (тогда ее показатели цвета меньше). Возможно, конечно, и то и другое. В любом случае падение блеска ниже $V = 15.^m$ сопровождается изменением спектрального индекса от -1 до -3 или -4 .

4 Заключение

На примере нескольких АЯГ продемонстрированы разные типы кривых блеска. Хотя ядра сейфертовских галактик имеют небольшую наблюдаемую амплитуду переменности, амплитуда изменений потока переменных источников в ядрах значительно больше. Например, для NGC 4151 после учета

вклада окружающей галактики она сравнима с амплитудой блазаров. Природа оптической переменности ядер сейфертовских галактик тепловая, и наблюдения хорошо соответствуют модели дисковой аккреции на сверхмассивную черную дыру, причем не только качественно, но и количественно. Правда, в первое время (конец 1960-х годов), когда начались систематические исследования оптической переменности ядер сейфертовских галактик, считалось, по аналогии с радиоизлучением, что оптическая переменность имеет также нетепловую природу (синхротронное излучение).

Что касается объектов типа VL Лас, в частности наиболее хорошо исследованного объекта ОJ 287, то в нетепловой природе их оптической переменности не сомневались, прежде всего, из-за высокой степени поляризации до $\sim 30\%$. Излучение аккреционного диска такую поляризацию обеспечить не может (степень поляризации излучения ядер сейфертовских галактик не превышает $2\text{--}3\%$). Анализ изменения показателей цвета $U - B$ и $B - V$ ОJ 287 с блеском показал, что действительно оптическое излучение этого объекта имеет нетепловую природу (по-видимому, синхротронное излучение). Но здесь остается много непонятого. Прежде всего, неясно, почему при падении блеска на 3^m от максимального показателя цвета почти не меняются (рис. 6). Вопрос об окружающей галактике также остается открытым, можно только сказать, что туманность вокруг ОJ 287 обнаружена. По-видимому, это не эллиптическая галактика, и она гораздо слабее, чем указывают.

Наконец, остается открытым вопрос о природе энергетики. Светимость ОJ 287 очень высока – в максимуме 1973 г. его видимая величина примерно такая же, как у квазара 3C 273, но он находится вдвое дальше. Сказать, как обычно говорят, что светимость подобных объектов обеспечивает синхротронное излучение релятивистских электронов, значит ничего не сказать: а что является источником релятивистских электронов? В ядрах сейфертовских галактик, если выводы, сделанные для NGC 4151, применимы и для других сейфертовских галактик, энергетику обеспечивает хорошо разработанная модель дисковой аккреции. Для объектов типа VL Лас и, по-видимому, квазаров, с этим еще придется разбираться.

Литература

- Бенитес и Дульцин-Хасьян (Benitez E., Dultzin-Nacyan D.) // *Astrophys. J.* 1996. V. 464. P. L47.
 Бескин Г.М., Лютый В.М., Неизвестный С.И., Пустильник С.А., Шварцман В.Ф. // *Астрон. журн.* 1985. Т. 62. С. 432.
 Дорошенко В.Т., Лютый В.М., Рахимов В.Ю. // *Письма в Астрон. журн.* 1989. Т. 15. С. 483.
 Ефимов и др. (Efimov Yu.S., Shakhovskoi N.I., Takalo L.O., Sillanpää) // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 381. P. 408.
 Засов А.В., Лютый В.М. // *Письма в Астрон. журн.* 1981. Т. 7. С. 459.
 Ичус и Лиллер (Eachus L.J., Liller W.) // *Astrophys. J.* 1975. V. 200. P. L61.
 Карини и др. (Carini M.T., Miller H.R., Noble J.C., Goodrich B.D.) // *Astron. J.* 1992. V. 104. P. 15.
 Киан и Тао (Qian B., Tao J.) // *Publ. Not. Roy. Astron. Soc.* 2003. V. 115. P. 490.
 Киджер (Kidger M.R.) // *Astron. J.* 2000. V. 119. P. 2053.
 Киджер и др. (Kidger M., Takalo L., Sillanpää A.) // *Astron. Astrophys.* 1992. V. 264. P. 32.
 Кэннон и др. (Cannon R.D., Penston M.V., Brett R.) // *Mon. Roy. Astron. Soc.* 1971. V. 52. P. 79.
 Лютый В.М. // *Астрон. журн.* 1977. Т. 54. С. 1153.
 Лютый В.М. // *Письма в Астрон. журн.* 2005. Т. 31. С. 723.
 Лютый В.М., Дорошенко В.Т. // *Письма в Астрон. журн.* 1999. Т. 25. С. 403.
 Лютый В.М., Окнянский В.Л., Чуваев К.К. // *Письма в Астрон. журн.* 1984. Т. 10. С. 803.
 Лютый В.М., Проник В.И. // “*Var. Stars and Stellar Evol.*”. IAU Symp. № 67./ Eds Sherwood V.E., Plaut L. Dordrecht: D. Reidel Publ. Co. 1975. P. 591.
 Мак-Джимси и др. (McGimsey B.Q., Smith A.G., Scott R.L., Leacock R.J., Edwards P.L., Hackney K.R.) // *Astron. J.* 1975. V. 80. P. 895.
 Мальков и др. (Malkov Yu.F., Pronik V.I., Sergeev S.G.) // *Astron. Astrophys.* 1997. V. 324. P. 904.

- Массаро и др. (Massaro E., Giommi P., Perri M., Tagliaferri G., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2003. V. 399. P. 33.
- Пенстон и др. (Penston M.V., Penston Margaret J., Selmes R.A., Becklin E.E., Neugebauer G.) // *Mon. Roy. Astron. Soc.* 1974. V. 169. P. 357.
- Пика и др. (Pica A.J., Smith A.G., Webb J.R., Leacock R.J., Clements S.) // *Astron. J.* 1988. V. 96. P. 1215.
- Силланпää и др. (Sillanpää A., Takalo L.O., Pursimo T., Nilsson K., et al.) // *Astron. Astrophys.* 1996. V. 315. P. L13.
- Такало и др. (Takalo L.O., Kidger M., de Diego J.A., Sillanpää A., Piirola V., Teräsranta H.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1990. V. 83. P. 459.
- Хейдт и др. (Heidt J., Nilsson K., Appenzeller I., Jäger K., Seifert W., et al.) // *Astron. Astrophys.* 1999. V. 352. P. L11.
- Чаленко Н.Н. // *Астрон. журн.* 1999. Т. 76. С. 529.
- Чуваев К.К., Лютый В.М., Дорошенко В.Т. // *Письма в Астрон. журн.* 1990. Т. 16. С. 867.
- Шакура и Сюняев (Shakura N.I., Sunyaev R.A.) // *Mon. Roy. Astron. Soc.* 1976. V. 175. P. 613.