

УДК 524.7

Структура и магнетизм объектов типа BL Lacertae

Ю.С. Ефимов

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

Поступила в редакцию 19 апреля 2006 г.

Аннотация. На основе поляризационных оптических и радио наблюдений блазаров приводится краткий обзор их основных структурных особенностей и топологии магнитного поля. Показано, что, в полном соответствии с теорией, доминирующей конфигурацией магнитного поля в джетах является спиральная структура.

STRUCTURE AND MAGNETISM OF BL LACERTAE OBJECTS, *by Yu.S. Efimov*. A brief review of blazar's main structure features and magnetic field topology is given on the basis of polarimetric observations of blazars in optics and radio bands. It is shown that the dominant configuration of magnetic field in jets is helical topology in full agreement with theoretical expectation.

Ключевые слова: объекты типа BL Lacertae, поляриметрия, магнитные поля

1 Введение

Исследования галактик с активными ядрами (AGN) в Крымской обсерватории ведутся с 60-х годов на 2.6м телескопе ЗТШ и 125 см телескопе АЗТ-11. Особую группу галактик с активными ядрами составляют объекты, называемые блазарами.

Эти радиогромкие внегалактические объекты являются сильнопеременными квазарами, квазарами с плоскими спектрами и объектами типа BL Lac, у которых непрерывное излучение доминирует по сравнению с линейчатым спектром. Все они показывают сильно поляризованное и сильно меняющееся со временем излучение от радиообласти до гамма-диапазона. Их излучение считается возникающим в струях (джетах) релятивистской плазмы, питаемой гравитационной аккрецией и ускоряемой черной дырой с массой в миллионы масс Солнца.

Джеты блазаров направлены практически по лучу зрения. Одним из выдающихся астрофизических открытий в последнее десятилетие было обнаружение спутником EGRET интенсивного гамма-излучения от многих блазаров, которое в некоторых случаях регистрируется наземными гамма-телескопами.

2 Основные характеристики блазаров

- 1) Блазары являются звездообразными объектами. Основное излучение идет от релятивистской струи (джета), исходящей от центрального источника, окруженного аккреционным диском.
- 2) Их спектры плоские, без сильных линий поглощения.
- 3) Излучение блазаров обладает значительной линейной поляризацией, которая меняется в пределах от одного до десятков процентов с характерным временем в десятки дней.
- 4) Переменность излучения наблюдается в короткой (часы) и длинной шкале времени (месяцы). Кроме того, у них наблюдаются быстрые вспышки. Амплитуда вспышек доходит до нескольких звездных величин.
- 5) Многие блазары излучают значительную часть энергии в области в рентгеновском и гамма-диапазонах.

3 Наблюдения блазаров.

Блазары начали активно изучаться с начала 70-х годов. Со временем количество обнаруженных блазаров начало быстро расти. Динамика роста числа обнаруженных квазаров и блазаров показана на рис. 1 (верхние столбики – квазары, нижние – блазары). В настоящее время зарегистрировано около 900 блазаров.

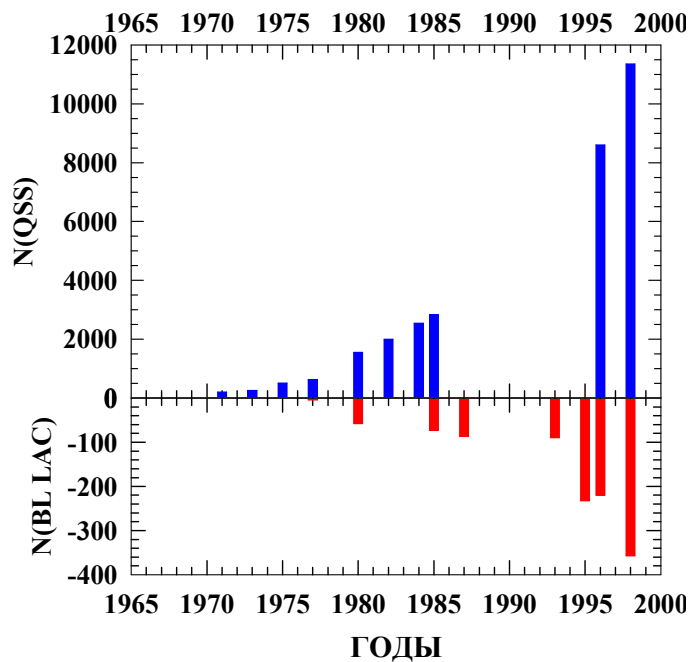


Рис. 1. Динамика роста числа обнаруженных до 1998 г. квазаров и блазаров по данным из Astronomy and Astrophysics Abstracts

3.1 Структурные особенности блазаров

Типичный спектр излучения блазаров состоит из двух компонент: синхротронного излучения в радио и оптическом диапазонах и обратного комптоновского излучения в области высоких энергий в рентгеновском и гамма-диапазонах. Примеры спектрального распределения энергии для некоторых блазаров показаны на рис. 2 (Гиселлини и др., 1998).

По современным представлениям центральным источником блазара является черная дыра с массой в $10^6 - 10^8$ масс Солнца, окруженная аккреционным диском. Из центрального источника вещество выбрасывается в виде неоднородной тонкой струи (джета) плазмы, движущейся в магнитном поле джета с релятивистской скоростью. Общепринятая модель строения блазара показана на рис.3, взятом из энциклопедии Wikipedia (http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Galaxies_AGN_Inner-Structure-of.jpg).

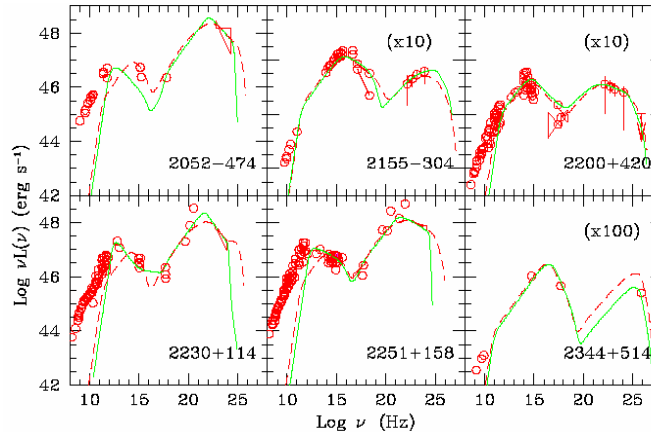


Рис. 2. Распределение энергии в спектрах некоторых блазаров

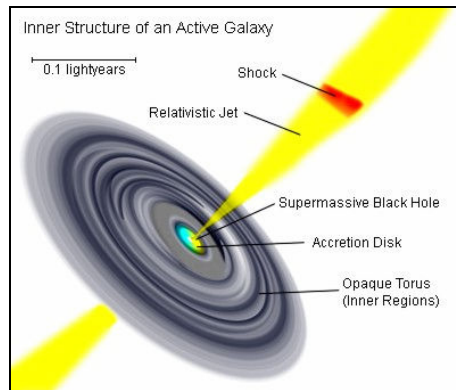


Рис. 3. Модель внутренней структуры блазара

На основе совокупности наблюдательных фактов в последние годы была предложена единая схема строения активных галактик – сейфертовских галактик и блазаров. Согласно этой схеме, в зависимости от направления луча зрения, галактика относится или к сейфертовскому типу галактик, если луч зрения направлен под достаточно большим углом к направлению джета и пересекает области с узкими и широкими эмиссионными линиями, или к типу блазаров, если джет направлен практически по лучу зрения. Более подробная схема строения AGN показана на рис. 4.

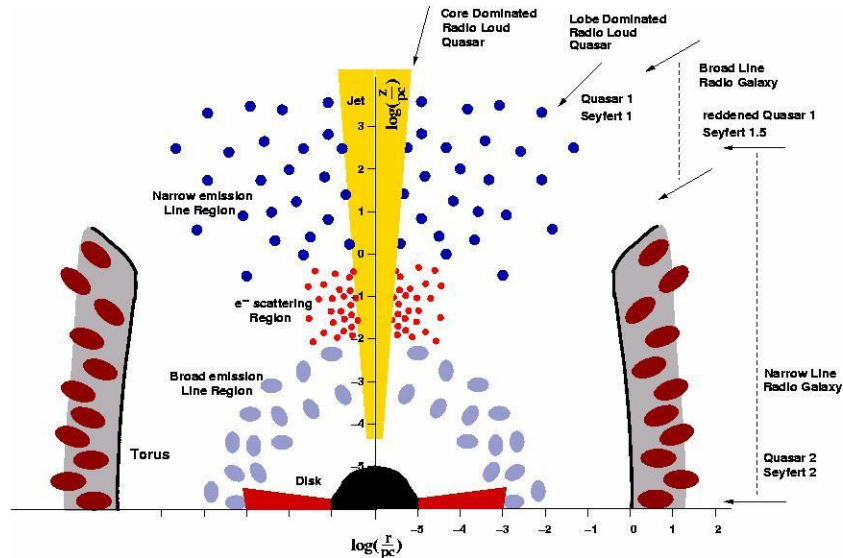


Рис. 4. Детальная схема строения AGN.

У некоторых блазаров зарегистрированы периодические всплески излучения. Наиболее впечатляющие данные получены для блазара OJ 287, у которого периодичность вспышек составляет 12.6 лет. Сводная кривая блеска для этого блазара в визуальной области спектра за 100 лет по данным Силлания и др. (1988) показана на рис. 5.

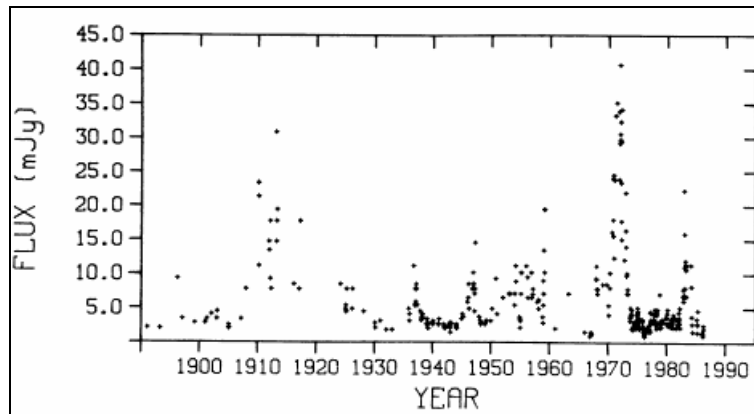


Рис. 5. Кривая блеска блазара OJ 287 за 100 лет. Повторяемость вспышек составляет 12.6 лет.

Периодичность изменений блеска этого блазара объясняется моделью центрального источника, состоящего из двух черных дыр разной массы. Теория предсказывает раздвоенный характер всплесков излучения из-за пересечения меньшим компонентом аккреционного диска вокруг более массивного компонента. Результаты моделирования хорошо согласуются с наблюдениями (рис. 6). Левый рисунок представляет наблюдательные данные, а правый – результат моделирования (Виллата и др., 1997).

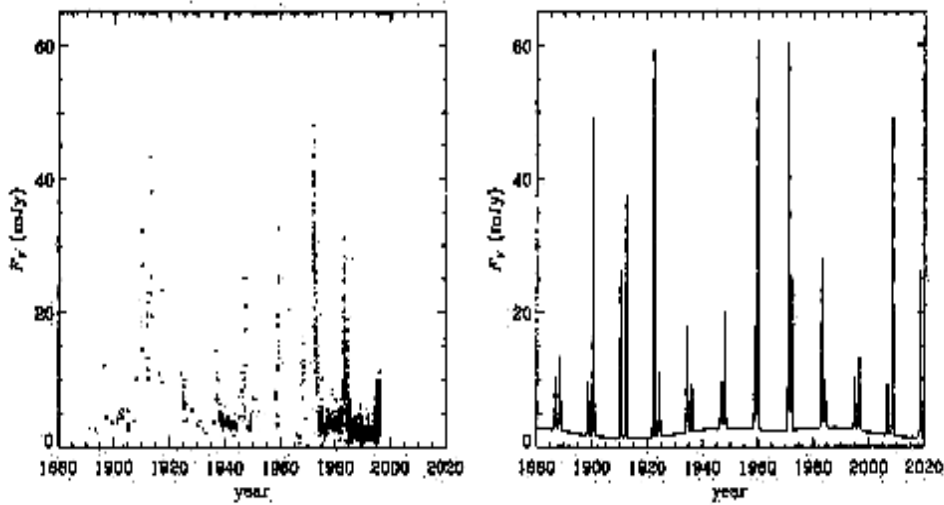


Рис. 6. Сравнение теории с наблюдениями блазара OJ 287

Кратковременные флюктуации блеска и изменения поляризационных параметров (степени и ориентации плоскости поляризации) объясняются общепринятой моделью прохождения ударных волн вдоль джета, вызывающих нарушение топологии магнитного поля в джете (shock-jet модель). Эта модель схематически показана на рис. 7 (Маршер, 1993), где угол ϕ определяет полуширину раствора конуса джета, угол θ показывает наклон оси джета к лучу зрения, а через β и стрелкой показано направление распространения излучения вдоль джета.

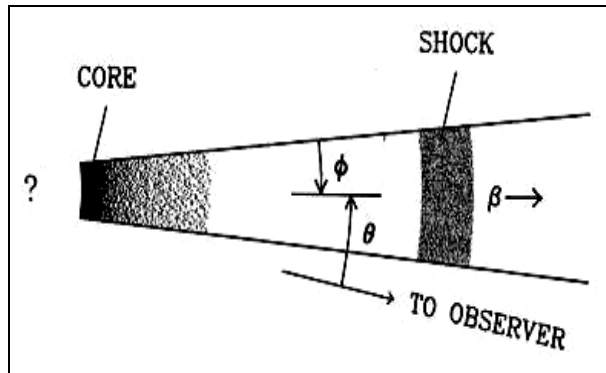


Рис. 7. Схема модели джета с ударными волнами (shock-jet модель)

При распространении излучения его пик со временем смещается в сторону длинных волн, а наклон поляризационного спектра меняется. Схематически эти изменения иллюстрируются на рис. 8 (Валтао́йа и др., 1991). Верхняя часть рисунка показывает смещение положения пика излучения, а нижняя часть – изменение вида поляризационного спектра со временем.

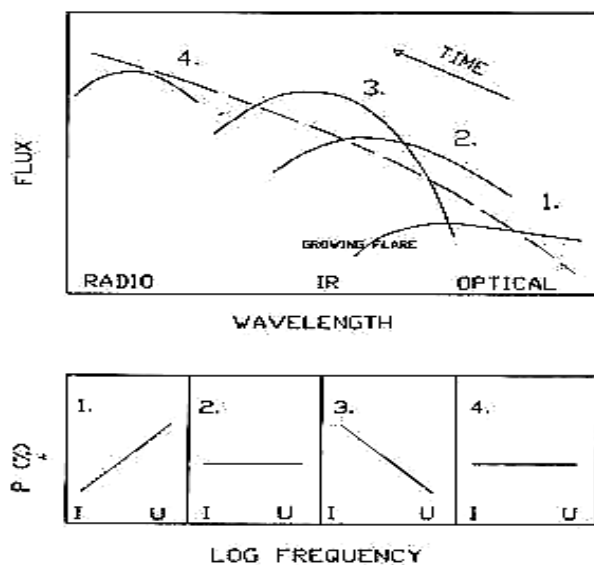


Рис. 8. Модель смещения пика излучения (верхний рисунок) и изменения наклона поляризационного спектра со временем по shock-jet модели

Теоретически было предсказано, что магнитное поле в джете должно иметь спиральную структуру (Кёнигл и Чудхари, 1985). Подробное рассмотрение этой конфигурации сделано в нескольких работах (например, Ценсус Д.А., 1997 и ссылки в этой статье; Березняк и др., 2003; Париев и др., 2003). Схематическая картина спиральной структуры магнитного поля в джете показана на рис. 9.

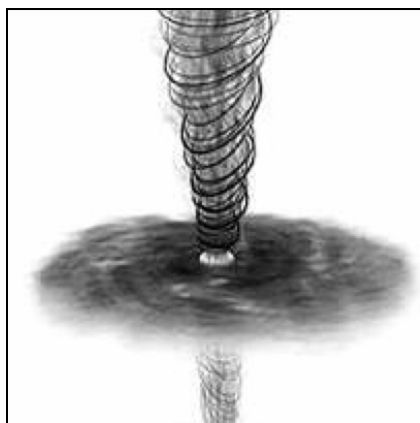


Рис. 9. Схематическая картина спиральной структуры магнитного поля в джете, построенная по наблюдениям телескопа Chandra объекта GB1508+5714, находящегося на расстоянии около 12 миллионов световых лет и $z = 4.3$ (<http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/quasar.html>).

4. Магнетизм блазаров

4.1 Радионаблюдения

Напряженность магнитного поля в джете может быть определена по фарадеевскому вращению плоскости поляризации. Фарадеевское вращение плоскости поляризации – это поворот наблюдаемой плоскости линейной поляризации при прохождении поляризованного излучения через

замагниченную плазму. При этом плоскость поляризации поворачивается на угол $\Delta\theta$, пропорциональный квадрату длины волны λ :

$$\Delta\theta = RM\lambda^2.$$

Коэффициент RM , называемый мерой вращения, зависит от плотности свободных электронов N , компоненты магнитного поля B по лучу зрения в плазме и длины пути L :

$$RM = 8.1 \cdot 10^5 \int N(s)B dl \text{ рад/м}^2,$$

где λ берется в метрах, а длина пути L – в парсеках.

В случае спирального поля в джете должен наблюдаться поворот плоскости поляризации. Обнаружение такого вращения по наблюдениям в нескольких длинах волн в радиодиапазоне указывает на наличие спиральной структуры магнитного поля в джете. Пример таких наблюдений показан на рис. 10, где во врезках иллюстрируется линейная зависимость ориентации плоскости поляризации от квадрата длины волны в местах, указанных на джетах (Габузда и др., 2004).

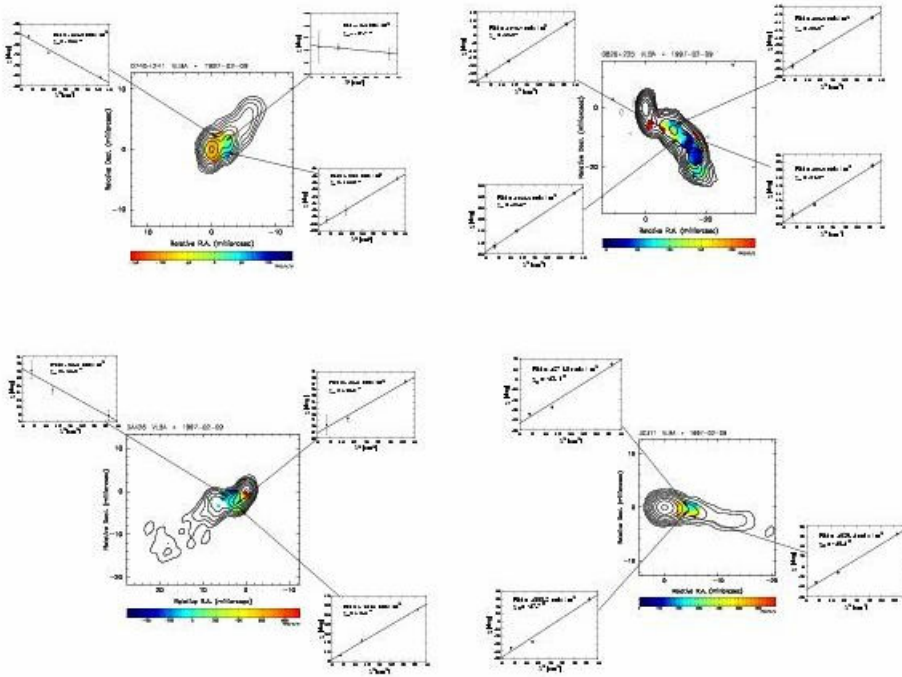


Рис. 10. Примеры фарадеевского вращения плоскости поляризации у блазаров 0745+241 (вверху слева), 0820+225 (вверху справа), 1652+398 (внизу слева), 3C 371 (внизу справа) на интерферометре со сверхдлинной базой (VLBI) на длинах волн 2,4 и 6 см.

Вскоре после обнаружения этих объектов в начале 70-х годов, Н.М. Шаховской и Ю.С. Ефимов в КрАО начали поляризационные наблюдения ряда наиболее активных блазаров. В период с 1994 по 2003 год на телескопе АЗТ-11 проводились регулярные UVRI фотополариметрические наблюдения некоторых объектов типа BL Lac, выполняемые в КрАО по международной программе OJ – 94. Всего за 2002-2003 гг. за 60 ночей было сделано около 1400 измерений блеска и параметров поляризации этих объектов общей продолжительностью около 90 часов. Известно, что оптическое излучение блазаров имеет синхротронную природу, для которого характерна высокая степень поляризации и степенная зависимость спектра от частоты.

Это излучение идет из внутренних областей джета, ближайших к центральному источнику. Оба этих параметра тесно связаны с топологией и напряженностью магнитного поля. Изучение поведения параметров оптической поляризации и спектрального индекса блазаров со временем дает ценные сведения о свойствах магнитного поля во внутренних областях джета. Целью наших наблюдений было изучение изменений этих параметров со временем и их связи с изменениями блеска у ряда блазаров. Это объекты OJ 287, 3C 66A, S5 0716+71, 3C 273, Mkn 421, Mkn 501, PG1553+116, H1722+1196, W Com и некоторые другие объекты.

У всех наблюдавшихся объектов зарегистрированы сильные изменения параметров линейной поляризации со временем с характерным временем в несколько суток. Эти наблюдения дали независимые подтверждения спиральной структуры магнитных полей у блазаров. Наиболее важные результаты наблюдений получены для объектов OJ 287 и 3C 66A.

4.2 Оптические наблюдения, выполненные в КрАО

В рамках модели спиральной структуры конец вектора поляризации оптического излучения должен описывать петлю на плоскости параметров Стокса $P_x = P \cos 2\chi$, $P_y = P \sin 2\chi$, где P есть степень линейной поляризации излучения, а χ – позиционный угол плоскости поляризации. Результаты наблюдений блазаров PKS 0735 + 178 и OJ 287 по наблюдениям в КрАО показаны на рис. 12 (Шаховской, Ефимов, 2001) и рис. 13 (Ефимов, Шаховской, 2002). Цифрами на рис. 12 указаны даты наблюдений PKS 0735 + 178 в марте 1977 г.

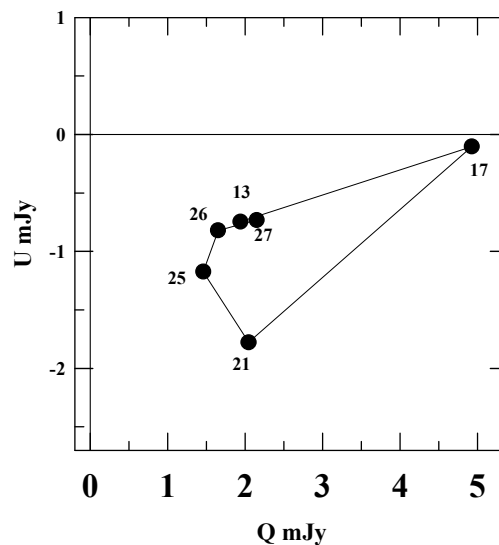


Рис. 12. Диаграмма полных параметров Стокса Q,U для PKS 0735 + 178 по наблюдениям в полосе V в марте 1977 г. в КрАО на телескопе ЗТШ

Отметим, что в обоих рассмотренных случаях направление вращения плоскости поляризации одно и то же – по часовой стрелке. При наличии генетической связи между джетом и аккреционным диском и черной дырой имеется возможность определения направления вращения аккреционного диска или черной дыры по поляризационным наблюдениям.

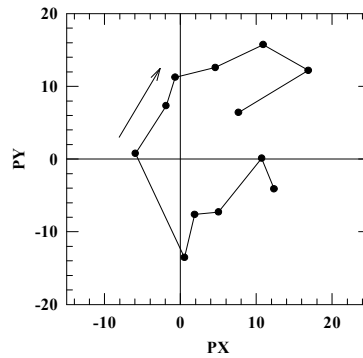


Рис. 13. Диаграмма нормированных параметров Стокса P_X, P_Y для OJ 287 на телескопе АЗТ-11 по наблюдениям в КрАО в феврале-марте 1996 г. Стрелкой указано направление обхода диаграммы

Устойчивое вращение плоскости поляризации у OJ 287 на протяжении двух лет со скоростью ~ 4.92 градуса в сутки наблюдалось на телескопе АЗТ-11 в 1994-1996г. (Ефимов, Шаховской, 2002). Эти наблюдения дают прямое указание на спиральную структуру магнитного поля в джете и возможность длительного сохранения его топологии. Результаты наблюдений показаны на рис. 14, где по оси ординат отложена величина усредненной по датам позиционного угла плоскости поляризации $\langle MPA \rangle$. В верхней части рисунка показано сравнение наблюдений (точки) с моделью постоянного вращения плоскости поляризации у OJ 287 (пунктир). Прямая линия на нижней части рисунка проведена через положения плоскости поляризации с учетом 180-градусной неопределенности ориентации плоскости поляризации.

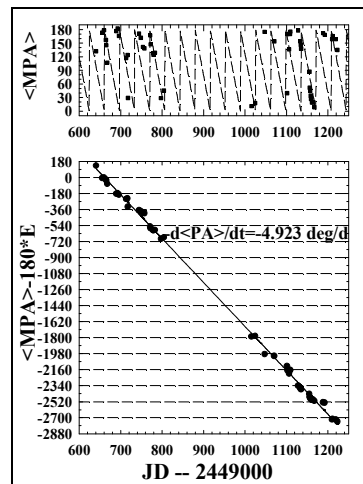


Рис. 14. Вращение плоскости поляризации у OJ 287 по наблюдениям в КрАО в 1994-1996 гг. на телескопе АЗТ-11

Из теории синхротронного излучения известно, что оно обладает высокой степенью поляризации. При нарушении однородности поля степень поляризации падает. Для определения степени однородности магнитного поля в выражение, связывающее наблюдаемую степень поляризации P с величиной спектрального индекса α вводится численный коэффициент s , величина которого определяется из сравнения наблюдаемой зависимости степени поляризации от спектрального индекса:

$$P = c(\alpha + 1)/(\alpha + 5/3).$$

Обе эти величины тесно связаны со свойствами магнитного поля (его напряженности и упорядоченности) и, как показывают наблюдения, заметно меняются со временем. Поэтому, сравнивая результаты наблюдений поляризации и спектрального индекса с сеткой модельных расчетов, можно судить о том, как меняются со временем эти характеристики магнитного поля. Пример такого сравнения дан на рис. 15 по наблюдениям блазара OJ 287 на телескопе АЗТ-11 в КрАО в полосе R (Ефимов, Шаховской, 2002). Цифрами у пунктирных линий указана принятая в расчетах степень однородности с магнитного поля.

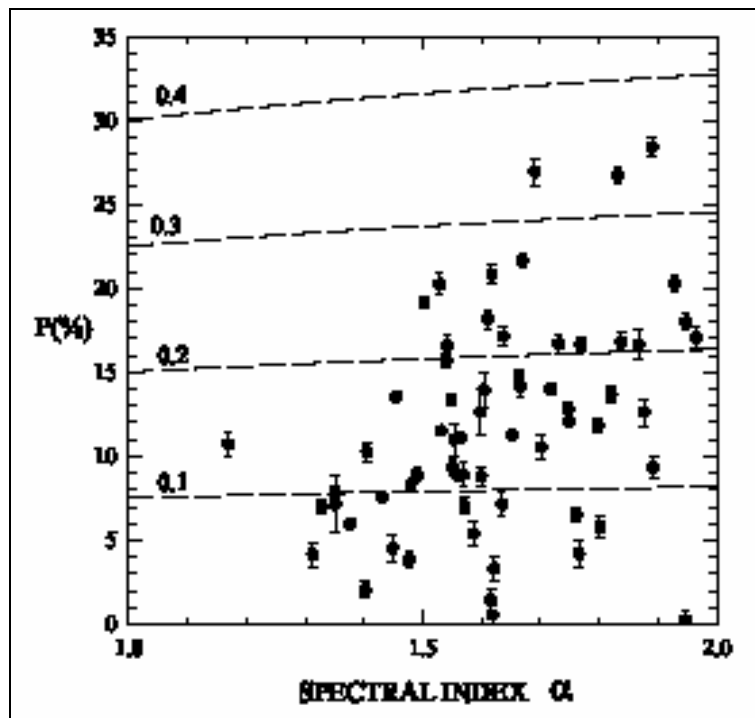


Рис. 15. Изменение степени поляризации P со спектральным индексом α для OJ 287 по наблюдениям в КрАО в 1996 г. в полосе R

Видно, что, как и следовало ожидать, чем больше степень однородности магнитного поля, тем выше наблюдаемая степень поляризации и тем больше величина спектрального индекса, то есть максимум спектра синхротронного излучения смещается в длинноволновую сторону. Разброс точек на графике указывает на наличие флуктуаций характеристик магнитного поля со временем, вызванными прохождением неоднородностей в потоке вещества вдоль джета.

Столкновение ударных волн, движущихся с разными скоростями, кроме нарушения топологии магнитного поля, может вызывать всплески интенсивности, имеющие нерегулярный характер. Многочисленными наблюдениями установлено, что при повышении интенсивности излучения уменьшается величина спектрального индекса и падает степень поляризации. Наглядный пример такого поведения дают наблюдения блазара 3C 66A, проведенные в 2003 г. в КрАО на телескопе АЗТ-11 и показанные на рис. 16 (Ефимов, Примаков, 2006).

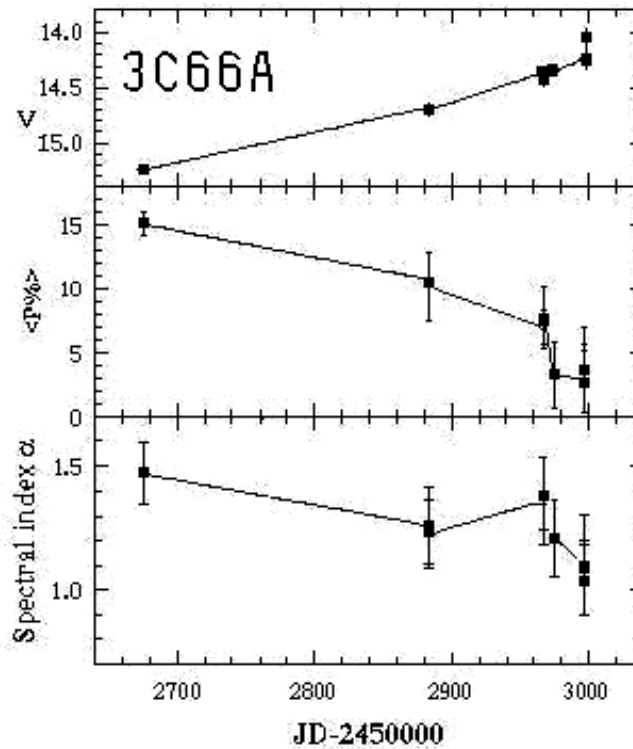


Рис. 16. Блеск в полосе V, степень поляризации P и спектральный индекса α у блазара 3C 66A по наблюдениям в КрАО в 2003 г. на телескопе АЗТ-11

За время наших наблюдений с февраля до декабря 2003 г. яркость объекта выросла на одну звездную величину, а степень поляризации излучения объекта упала от 16% в феврале до примерно 3% в декабре 2003 г. При этом распределение энергии в спектре становилось более плоским (спектральный индекс уменьшился от 1.47 до 1.1). Это может быть вызвано уменьшением напряженности магнитного поля в джете.

Как указывалось выше, степень поляризации и спектральный индекс служат индикатором упорядоченности магнитного поля. Проведенные ранее расчеты связи этих параметров с величиной хаотической компоненты поля (Сазонов, 1972) позволяют в первом приближении определить, как меняется вклад этой компоненты со временем по наблюдениям степени поляризации и спектрального индекса излучения. Изменение вклада хаотической компоненты показано на рис. 17 на примере наших наблюдений 3C 66A (Ефимов, Примаков, 2006).

Видно, что падение степени поляризации от примерно 16% до 2-3% и падение спектрального индекса от 1.5 до 1.1 у блазара 3C 66A в 2003 г. вызвано увеличением напряженности хаотического поля примерно на 30%.

Заключение

Поляризационные наблюдения объектов PKS 0735 + 178 и OJ 287, выполненные в КрАО, дали прямые указания на наличие спиральной структуры, по крайней мере у некоторых блазаров. Более того, они позволили определить направление вращения плоскости поляризации и тем самым определить направление вращения аккреционного диска или центрального источника. На такую возможность указали Асада и др. (2003). Как показал анализ наших поляризационных и фотометрических наблюдений блазара 3C 66A, использование связи степени поляризации и спектрального индекса позволяет определить, хотя бы и грубо, степень неоднородности магнитного поля и его изменения со временем. Так как такие данные имеются для многих бла-

заров, то открывается возможность отбора наиболее перспективных объектов для оценки структуры магнитных полей джетов у блазаров.

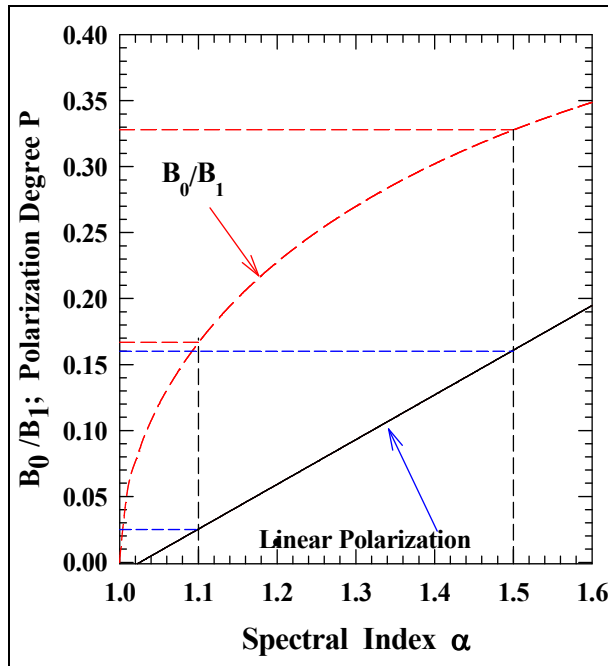


Рис. 17. Изменение отношения регулярной компоненты B_0 к хаотической компоненте B_1 магнитного поля (пунктирная кривая) при 90° угле наклона оси джета к лучу зрения в зависимости от величин степени поляризации P и спектрального индекса α для блазара 3C 66A. Прямой линией показана зависимость степени поляризации от спектрального индекса. Пунктирными линиями показаны пределы изменения степени поляризации P , спектрального индекса α и отношения B_0/B_1 .

К настоящему времени спиральная структура магнитных полей надежно установлена у 12 блазаров, перечисленных в нижеследующей таблице:

ОБЪЕКТ	RA (2000)	DEC	Z
3C 66A	02 22 40	+43 02 08	0.444
AO 0235+16	02 38 30	+16 36 59	0.940
S5 0716+714	07 21 53	+71 20 36	>0.2
PKS 0735+178	07 38 07	+17 42 19	0.425
PKS 0745 +241	07 48 36	+24 00 24	0.409
PKS 0820+225	08 23 25	+22 23 03	0.951
OJ 287	08 54 49	+20 06 31	0.306
S4 0954+658	09 58 47	+65 33 55	0.367
MRK 421	11 04 27	+38 12 32	0.031
3C 273	12 29 07	+02 03 08	0.158
MRK 501	16 53 52	+39 45 37	0.033
3C 371	18 06 51	+69 49 28	0.051

Работа частично поддержана грантом CRDF RP1-2394-MO-02.

Литература

- Асада К. И др. (Asada K., Inoue M., Uchida Y., Kameno S.) // *Carnegie Observatories Astrophysical Series*. V. 1.
- Березняк и др. (Beresnyak A.R., Istomin Ya.N., Pariev V.I.) // *Astron. Astrophys.* 2003. V. **403**. P. 793.
- Валтаоја и др. (Valtaoja L., Valtaoja E., Shakhovskoy N.M. et al.) // *Astron. J.* 1991. V. **101**. P. 78.
- Виллата и др. (Villata M., Raiteri C.M., Sillanpää A., Takalo L.O.) // *Mem. S. A. It.* 1997. V. **68**. P. 203.
- Габузда и др. (Gabuzda D.C., Murray E., Cronin P.) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2004. V. **351**. P. L89.
- Гиселлини Г. (Gisellini G., Celotti A., Fossati G., et al.) // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1998. V. **301**. P. 451.
- Ефимов Ю.С., Примак Н.В. // *Астрофизика*. 2006. Т. **49**. С. 41.
- Ефимов Ю.С., Шаховской Н.М. (Efimov Yu.S., Shakhovskoy N.M.) // *Astrophysical Letters and Communications*. 2001. V. **40**. P. 115.
- Ефимов Ю.С., Шаховской Н.М. (Efimov Yu.S., Shakhovskoy N.M.) // in “High Energy Blazar Astronomy”. ASP Conf. series. Eds. L.O. Takalo and E. Valtaoja. 2003. V. **299**. P. 209.
- Ефимов и др. (Efimov Yu.S., Shakhovskoy N.M., Takalo L.O., Sillanpää A.) // *Astron. Astrophys.* 2002. V. **381**. P. 408.
- Кёнигл А., Чудхари А.Р. (Königl A., Choudhuri A.R.) // *Astrophys. J.* 1985. V. **289**. P. 173.
- Лаинг и др. (Laing R.A., Canvin J.R., Bridle A.H.) // 2006. astro-ph/0601328.
- Маршер А. (Marscher A.) // in “Astrophysical Jets”. 1993. P. 73.
- Париев и др. (Pariev V.I., Istomin Ya.N., Beresnyak A.R.) // *Astron. Astrophys.* 2003. V. **403**. P. 805.
- Сазонов В.Н. // *Astrophysics and Space Science*. 1972. V. **19**. P. 3.
- Силланпяя и др. (Sillanpää A., Haarala S., Valtonen M.J., Sundelis B., Byrd G.G.) // *Astrophys. J.* 1988. V. **325**. P. 628.
- Урри С.М. (Urry С.М.) // *Advances in Space Research*. 1998. V. **21**. P. 89.
- Ценсус Д.А. (Zensus J.A.) // *Ann. Rev. Astr. Astrophys.* 1997. V. **35**. P. 607.
- Шаховской Н.М., Ефимов Ю.С. // Труды Всероссийской конференции, проходившей в Пушинской радиоастрономической обсерватории 17-22 мая 1999 г. Ред. Н.С. Кардашев, Р.Д. Дагкесаманский, Ю.А. Ковалев, Москва, “ЯНУС-К. 2001”. С. 435.