

УДК: 523.985.3

АНАЛИЗ ЦВЕТОВОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ BL Lac В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ ВО ВСПЫШКЕ 1997 г.

В.А.ГАГЕН-ТОРН, А.В.ГАГЕН-ТОРН, С.Г.МАРЧЕНКО,
О.В.МИКОЛАЙЧУК

Поступила 17 декабря 1999

Принята к печати 10 января 2000

Изучена цветовая переменность BL Lac во время мощной вспышки 1997г. Найдено, что в ходе вспышки распределение энергии в спектре переменного источника, определявшего фотометрическое поведение объекта, не менялось. Оно было степенным и более плоским, чем в других вспышках меньшей мощности. Синхротронная природа переменного источника сомнений не вызывает.

1. *Введение.* BL Lac является одним из самых исследованных в оптическом и радио диапазонах блазаров. Длительные ряды поляризационных и фотометрических наблюдений этого объекта в оптике были получены в ряде обсерваторий и, в частности, в Астрономическом институте Санкт-Петербургского университета [1-2]. Уникальными являются ряды его радионаблюдений, полученные в обсерватории Мичиганского университета [3]. С целью изучения быстрой переменности BL Lac было организовано несколько международных кампаний [4-5].

В оптическом диапазоне объект очень активен: переменность большой амплитуды имеется на всех временных шкалах от многих лет до минут. Анализ данных о поляризационной и фотометрической переменности позволяет найти свойства ответственного за активность центрального источника - распределение энергии в его спектре и параметры поляризации его излучения. Такой анализ был проведен нами в работах [6-8]. Как показывают результаты этих (а также и других) работ, свойства переменных источников могут изменяться от события к событию. Поэтому особенный интерес представляет анализ данных для летней вспышки 1997 г., когда блеск объекта достиг максимального за последние 30 лет значения. Анализу цветовой переменности BL Lac во вспышке 1997 г. посвящена настоящая работа.

2. *Наблюдательный материал и методика анализа.* Использованный нами наблюдательный материал взят из работ [9,10]. Первичный анализ наблюдательных рядов был выполнен так же, как это было сделано нами для объекта OJ 287 в работе [11], где можно найти подробности. Были выявлены и исключены ненадежные наблюдения, и после перехода

от звездных величин к плотностям потоков (в дальнейшем "потокам") с использованием абсолютной калибровки из работы [12] было проведено их усреднение на данную юлианскую дату (мы отвлекаемся здесь от переменности объекта в течение ночи). Полученный массив данных, использованный в дальнейшем для анализа, приведен в табл.1. Рис.1 дает кривую блеска BL Lac в цветовой полосе R . Данные работ [9] и [10] нанесены разными значками. В дальнейшем мы увидим, что между ними нет систематических различий (во всяком случае, цветовых).

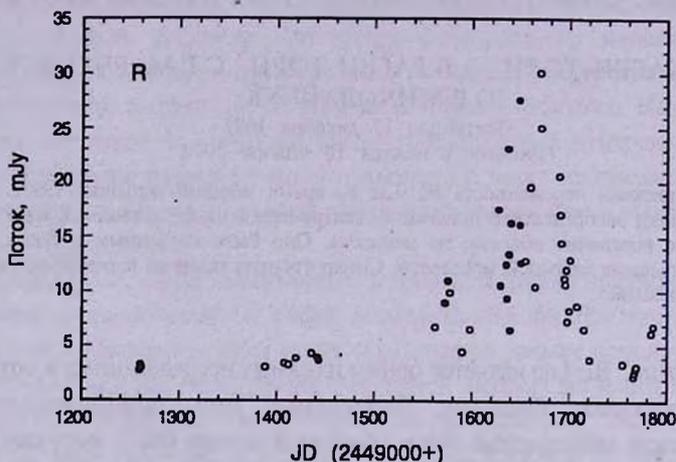


Рис.1. Кривая блеска BL Lac в полосе R (заполненные кружки - данные работы [9], открытые - работы [10].)

Для определения распределения энергии в спектре переменного компонента использовалась неоднократно опробованная нами методика, предложенная в [13] и развитая в [14]. Пусть наблюдаемое излучение состоит из двух компонентов - постоянного и переменного, который определяет фотометрическое поведение объекта на данном временном интервале. Тогда, если относительное распределение энергии переменного компонента не меняется, то в n -мерном пространстве потоков $\{F_1, \dots, F_n\}$ (n - число использованных при наблюдениях цветовых полос) точки, соответствующие наблюдениям, должны лежать на "прямой линии", направляющие тангенсы которой равны отношениям потоков переменного компонента в соответствующих цветовых полосах. (На практике осуществляется попарное сравнение потоков, причем одна из полос выбирается в качестве основной).

В [14] показано, что с очень большой степенью вероятности верно и обратное, то есть если точки, соответствующие наблюдаемым потокам, лежат на диаграммах "поток - поток" на прямых линиях, то можно заключить, что переменный компонент не меняет относительного распределения энергии в спектре и оно дается угловыми коэффициентами прямых. Достоинства и недостатки этой методики подробно обсуждаются в [14]. Большим ее преимуществом является то, что сведения о распределении энергии в спектре

Таблица 1

УСРЕДНЕННЫЕ НА ДАННУЮ ЮЛИАНСКУЮ ДАТУ ЗНАЧЕНИЯ
ПОТОКОВ В mJy

| JD 2449000+ | F_B | F_V | F_R | F_I |
|-------------|-------|-------|-------|---------|
| 1259 | - | 1.63 | 2.76 | 5.05 |
| 1260 | 0.89 | 2.07 | 3.23 | 6.18 |
| 1261 | - | 1.84 | 3.00 | 5.14 |
| 1379 | - | 1.87 | - | - |
| 1388 | - | - | 3.08 | - |
| 1408 | - | 2.07 | 3.41 | - |
| 1412 | 0.78 | 2.00 | 3.29 | - |
| 1420 | - | - | 3.88 | - |
| 1436 | - | 2.81 | 4.34 | - |
| 1442 | - | - | 3.95 | 5.14 |
| 1443 | - | - | 3.67 | 6.53 |
| 1444 | - | - | - | 6.41 |
| 1562 | - | 4.34 | 6.75 | - |
| 1572 | - | 5.66 | 8.97 | 19.72 |
| 1575 | - | 6.93 | 10.99 | 19.54 |
| 1577 | - | 6.44 | 9.93 | - |
| 1590 | - | - | 4.50 | - |
| 1598 | - | - | 6.56 | - |
| 1627 | 5.53 | 11.51 | 17.58 | 29.04 |
| 1629 | - | 7.46 | 10.59 | - |
| 1635 | 3.46 | - | 12.50 | 19.73 |
| 1636 | - | - | 9.40 | 16.11 |
| 1637 | 8.53 | 15.31 | 23.17 | (22.86) |
| 1638 | - | 9.14 | 13.46 | 22.86 |
| 1639 | 1.82 | 4.10 | 6.50 | 11.56 |
| 1640 | - | 10.02 | 16.33 | 25.76 |
| 1648 | 6.43 | 13.78 | 27.61 | 34.54 |
| 1649 | 4.69 | 12.79 | 16.18 | 31.11 |
| 1650 | 3.74 | 7.43 | 12.65 | 21.35 |
| 1652 | - | 14.89 | - | 36.56 |
| 1655 | 4.05 | 8.78 | 12.88 | - |
| 1660 | 6.65 | 12.85 | 19.64 | - |
| 1665 | 3.07 | 6.81 | 10.50 | - |
| 1670 | 9.67 | 20.33 | 30.11 | - |
| 1671 | 7.64 | 17.26 | 25.07 | - |
| 1690 | 6.30 | 14.26 | 20.65 | - |
| 1691 | 4.69 | 10.28 | 17.10 | - |
| 1692 | 4.67 | 10.17 | 14.50 | - |
| 1695 | 3.37 | 7.11 | 11.25 | - |
| 1696 | 2.89 | 6.57 | 10.70 | - |
| 1697 | 3.42 | 7.41 | 12.05 | - |
| 1698 | 2.01 | 4.65 | 7.33 | - |
| 1700 | 2.33 | 5.36 | 8.29 | - |
| 1701 | 3.67 | 7.78 | 12.96 | - |
| 1708 | 2.46 | 5.51 | 8.72 | - |
| 1715 | 1.74 | 4.03 | 6.60 | - |
| 1721 | 0.92 | 2.30 | 3.85 | - |
| 1755 | 0.89 | 2.21 | 3.44 | - |
| 1766 | 0.61 | 1.44 | 2.30 | - |
| 1767 | 0.68 | 1.66 | 2.64 | - |
| 1768 | 0.79 | 1.89 | 3.00 | - |
| 1769 | 0.84 | 2.02 | 3.20 | - |
| 1784 | 1.72 | 3.99 | 6.27 | - |
| 1786 | 1.95 | 4.46 | 6.87 | - |

переменного компонента получаются без знания его вклада в наблюдаемое излучение и каких-либо предположений о свойствах постоянного компонента.

Дополнительная информация о цвете постоянного компонента позволяет в рамках этой двухкомпонентной модели разделить вклады в суммарное наблюдаемое излучение переменного и постоянного компонентов. Действительно, в плоскости потоков $\{F_j, F_i\}$ геометрическим местом точек, соответствующих постоянным компонентам с данным показателем цвета (т.е. отношением потоков F_i/F_j в рассматриваемых полосах), будет исходящий из начала координат луч, угловой коэффициент которого равен этому отношению ($F_i = \alpha_{ij} F_j$, где $\alpha_{ij} = (F_i/F_j)_{\text{const}}$). Очевидно, пересечение этого луча с прямой, проведенной через точки, соответствующие наблюдаемым потокам, даст значения потоков постоянного компонента.

3. *Результаты анализа и их обсуждение.* Результаты попарного сравнения наблюдаемых потоков представлены на рис.2. В качестве основной была выбрана полоса R - в ней получено наибольшее количество наблюдений. Прежде всего отметим, что между данными работ [9] и [10] (они нанесены разными значками) нет систематических различий. Видно, что точки (за исключением одной из них на графике $F_R + F_I$) прекрасно лежат на прямых линиях. Поскольку на графиках $F_R + F_B$ и $F_R + F_V$ эта точка не уклоняется от средних зависимостей, мы считаем, что для нее поток в полосе I ошибочен, и исключаем его из дальнейшего рассмотрения (в табл.1 и на

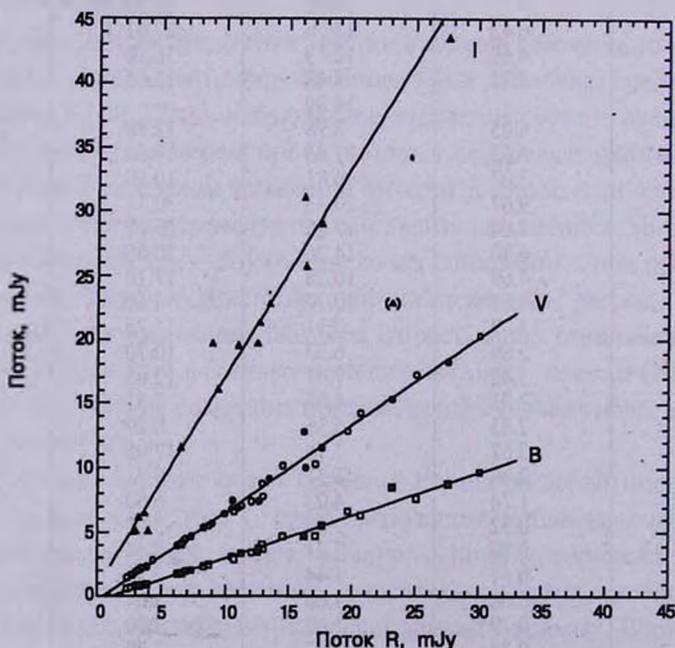


Рис.2. Сопоставление потоков в полосах B , V , I с потоком в полосе R (заполненные кружки - данные работы [9], открытые - работы [10].)

рис.2 величина F_i и уклоняющаяся точка заключены в скобки). Коэффициенты корреляции r_{iR} для каждой из зависимостей приведены во второй строке табл.2. Видно, что они практически равны 1.

Коэффициенты в уравнениях прямых $F_i = \alpha_{iR} F_R + b_{iR}$ ($i = B, V, I$), проведенных методом ортогональной регрессии, предложенным в [15] для случая, когда обе сравниваемые величины содержат случайные ошибки, представлены в третьей и четвертой строках табл.2.

Таблица 2

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

| | B | V | R | I |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------|-------------|
| $\log \nu$, Hz | 14.834 | 14.737 | 14.662 | 14.585 |
| r_{iR} | 0.993 | 0.995 | 1.000 | 0.987 |
| $a_{iR} \pm \sigma$ | 0.332±0.007 | 0.681±0.008 | 1.000 | 1.636±0.037 |
| $b_{iR} \pm \sigma$, mJy | -0.360±0.092 | -0.294±0.111 | 0.000 | 0.761±0.450 |
| $a_{iR}^{corr} \pm \sigma$ | 0.598±0.013 | 0.827±0.010 | 1.000 | 1.250±0.028 |
| $\log(F_i/F_R)^{corr} \pm \sigma$ | -0.223±0.009 | -0.082±0.006 | 0.000 | 0.097±0.010 |
| α_{iR}^{obs} | 0.154 | 0.565 | 1.000 | 2.399 |
| $F_{i,correct}^{obs}$, mJy | 0.26 | 0.96 | 1.84 | 3.77 |

Поскольку точки лежат на прямых линиях, можно заключить, что распределение энергии переменного компонента не меняется на рассматриваемом временном интервале, и коэффициенты a_{iR} дают наблюдаемые отношения $(F_i/F_R)^{obs}$. BL Lac имеет малую галактическую широту, так что в величины a_{iR} необходимо внести поправку за покраснение в Галактике. В [8] мы использовали приведенное в [16] значение $A_V = 1^m \cdot 33$ и для определения величин A_i брали нормальную кривую покраснения. Используя эти данные и здесь, получим величины a_{iR} , дающие отношения $(F_i/F_R)^{corr}$ для переменного источника, приведенные в пятой строке табл.2. В шестой строке даются их логарифмы, использованные для построения относительного распределения энергии в спектре переменного источника (точки на рис.3).

Видно, что точки лежат на прямой, и, следовательно, спектр переменного источника степенной. Проведение прямой методом наименьших квадратов дает для величины спектрального индекса значение $\alpha = -1.29 \pm 0.06$. Для сравнения на рис.3 прерывистой прямой нанесено распределение с $\alpha = -1.94$, полученное (с точностью ± 0.07) в [8] для переменного источника, выделенного у BL Lac в 1983-1984гг. при меньшем блеске. Видно, что спектр во вспышке 1997г. более жесткий (это было отмечено и в [9]). Ранее такая же корреляция между мощностью вспышки и спектральным индексом (чем сильнее вспышка, тем более плоский спектр) была найдена нами для блазара OJ 287 [11].

Учитывая большую поляризацию излучения, обычно наблюдаемую у BL Lac [1,2], можно считать, что переменный источник имеет синхротронную

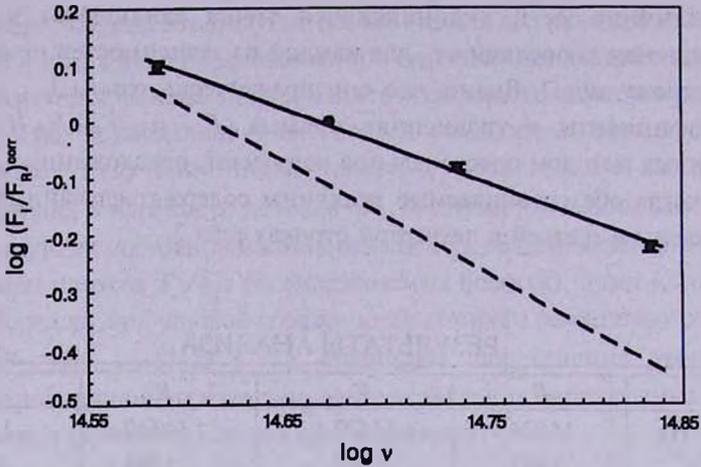


Рис.3. Относительное распределение энергии в спектре переменного источника (точки); сплошная линия - их представление прямой, прерывистая - распределение энергии переменного источника в 1983-1984гг.

природу, а изменение величины спектрального индекса отражает изменение показателя степени в распределении электронов по энергиям в ансамбле, ответственном за излучение.

Необходимо отметить, что наше заключение о неизменности спектрального распределения у переменного источника в ходе вспышки 1997г. противоречит выводу, сделанному в [9], где утверждается, что во время вспышки имела место корреляция между потоком и спектральным индексом. Наш анализ определенно указывает на неизменность последнего (в противном случае на диаграммах "поток-поток" точки не лежали бы на прямых линиях). Нам кажется, что найденная в [9] корреляция связана с не вполне корректным учетом вклада галактической подложки. Авторы [9] пишут, что данные для подстилающей галактики взяты ими из [17], однако в этой работе нет данных для полос R и I , и, по-видимому, авторы [9] получили их интерполированием. Косвенным указанием на неуверенность в учете вклада галактической подложки может служить отмеченный в [9] и никак не объясненный систематический избыток излучения переменного компонента в полосе V .

Мы сделали попытку оценить вклад подстилающей галактики в предположении о том, что это гигантская эллиптическая галактика. Показатели цвета для таких галактик для нулевого красного смещения при отсутствии поглощения даются в [8]. Скорректировав их за поглощение с использованием нормального закона покраснения и величины $A_V = 1^m \cdot 33$, и учтя K -поправку согласно [19], мы нашли наблюдаемые показатели цвета галактики и, следовательно, угловые коэффициенты лучей α_{IR}^{abs} (седьмая строка табл.2). Координаты точек пересечения этих лучей с прямыми, изображенными на рис.2 дают наблюдаемые потоки галактической подложки. Они помещены в последней строке табл.2 (для F_R^{corr} взято среднее из трех полученных значений, остальные

найлены с использованием этого среднего значения и уравнений прямых, нанесенных на рис.2). Найденные нами значения потоков для полос В и V (правда, не слишком надежные) заметно отличаются от приведенных в [17].

Остановимся теперь на рассмотрении цветовой переменности в течение ночи. Данные работы [10] позволяют изучить ее для двух ночей наблюдений: JD 2450690 (7 оценок) и JD 2450698 (4 оценки). В первую из ночей блеск был высоким: $(18 \div 24)mJy$ в полосе R, во вторую - низким: $(7 \div 8)mJy$. На диаграммах "поток-поток" смещения точек, соответствующих последовательным оценкам блеска, в обоих случаях происходит вдоль прямых, проведенных на рис.2. Следовательно, цветовые характеристики переменных компонентов с характерными временами переменности от минут до десятков дней одинаковы, и быстрые изменения можно приписать флуктуациям компонента, меняющего блеск медленно. Разумеется, этот вывод, основанный на небогатом наблюдательном материале, следует рассматривать как сугубо предварительный.

4. *Заключение.* Таким образом, наш анализ цветовой переменности BL Lac во время мощной вспышки в августе 1997г. показывает, что относительное распределение энергии в спектре переменного компонента в ходе вспышки не изменялось. Спектр был степенным, со спектральным индексом (после исправления за покраснение в Галактике) $\alpha = -1.28$, существенно меньшим по абсолютной величине, чем в менее мощной вспышке 1983-1984г.

Неизменность распределения энергии переменного компонента в ходе вспышки, наблюдаемая почти во всех случаях [20], должна приниматься во внимание при разработке моделей оптической переменности активных внегалактических объектов.

Авторы признательны Российскому Фонду Фундаментальных Исследований за финансовую поддержку (грант N 98-02-16609).

Санкт-Петербургский государственный университет,
Стерлитамакский педагогический институт,
Россия

ANALYSIS OF COLOUR VARIABILITY OF BL LAC IN THE OPTICAL REGION DURING ITS OUTBURST IN 1997

V.A.HAGEN-THORN, A.V.HAGEN-THORN, S.G.MARCHENKO,
O.V.MIKOLAICHUK

The colour variability of BL Lac during its powerful outburst in 1997 is investigated. It is found that during the outburst the spectral energy distribution

of the variable component responsible for photometric behaviour of the object was unchanged. It follows power law and is more flat than in other less powerful outbursts. Synchrotron nature of the variable source is without doubt.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А.Гаген-Торн, С.Г.Марченко, В.А.Яковлева, *Астрон. ж.*, **61**, 925, 1984.
2. В.А.Гаген-Торн, С.Г.Марченко, А.В.Юрченко, В.А.Яковлева, *Астрон. ж.*, **71**, 717, 1994.
3. H.D.Aller, M.F.Aller, P.A.Hughes, *ASP Conf.Ser.*, **110**, 208, 1996.
4. R.L.I.Moore, J.T.McGrew, J.R.P.Angel et al., *Astrophys. J.*, **260**, 415, 1982.
5. C.Brindle, J.H.Hough, J.A.Bailey et al., *Mon.Not. Roy. Astron. Soc.*, **214**, 619, 1985.
6. В.А.Гаген-Торн, С.Г.Марченко, В.А.Яковлева, *Астрофизика*, **22**, 5, 1985.
7. В.А.Гаген-Торн, С.Г.Марченко, В.А.Яковлева, *Астрофизика*, **25**, 485, 1986.
8. В.А.Гаген-Торн, С.Г.Марченко, О.В.Миколайчук, *Астрофизика*, **32**, 429, 1990.
9. J.R.Webb, I.Freedman, E.Howard et al., *Astron. J.*, **115**, 2244, 1998.
10. G.Sobrito, M.Villata, C.M.Ratieri et al., *Bazar data*, **1**, n.5, 1999.
11. V.A.Hagen-Thorn, S.G.Marchenko, L.O.Takalo et al., *Astron. Astrophys.*, **133**, 353, 1998.
12. A.R.G.Mead, K.R.Ballard, P.W.J.L.Brand et al., *Astron. Astrophys.*, **83**, 183, 1990.
13. J.Choloniewski, *Acta Astron.*, **31**, 293, 1981.
14. В.А.Гаген-Торн, *Письма в Астрон. ж.*, **23**, 23, 1997.
15. A.Wald, *Ann. Math. Statistics*, **11**, 284, 1940.
16. P.S.Smith, T.J.Balonek, R.Elston, P.A.Heckert, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **64**, 459, 1987.
17. L.M.J.Brown, E.I.Robson, W.K.Gear, V.A.Yakovleva, *Astrophys. J.*, **340**, 129, 1989.
18. R.Buta, S.Mitra, G.de Vaucouleurs, H.G.Corwin, *Astron. J.*, **107**, 118, 1994.
19. Z.Frei, J.E.Gunn, *Astron. J.*, **108**, 1476, 1994.
20. V.A.Hagen-Thorn, S.G.Marchenko, V.A.Yakovleva, A.V.Hagen-Thorn, In "Active Galactic Nuclei and Related Phenomena". Eds. Y.Terzian, D.Weedman, E.Khachikian, *ASP Publisher*, 384. 1999.