

АКТИВНЫЕ ГАЛАКТИКИ И КВАЗАРЫ

Развитие радиоастрономических исследований привело в конце 40-х – начале 50-х годов XX в. к обнаружению дискретных источников радиоизлучения. Некоторые из наиболее сильных из них были отождествлены с галактиками, преимущественно пекулярными. Первые отождествления были сделаны для радиоисточников VirA (рис.35) и CenA (Рис. 36).

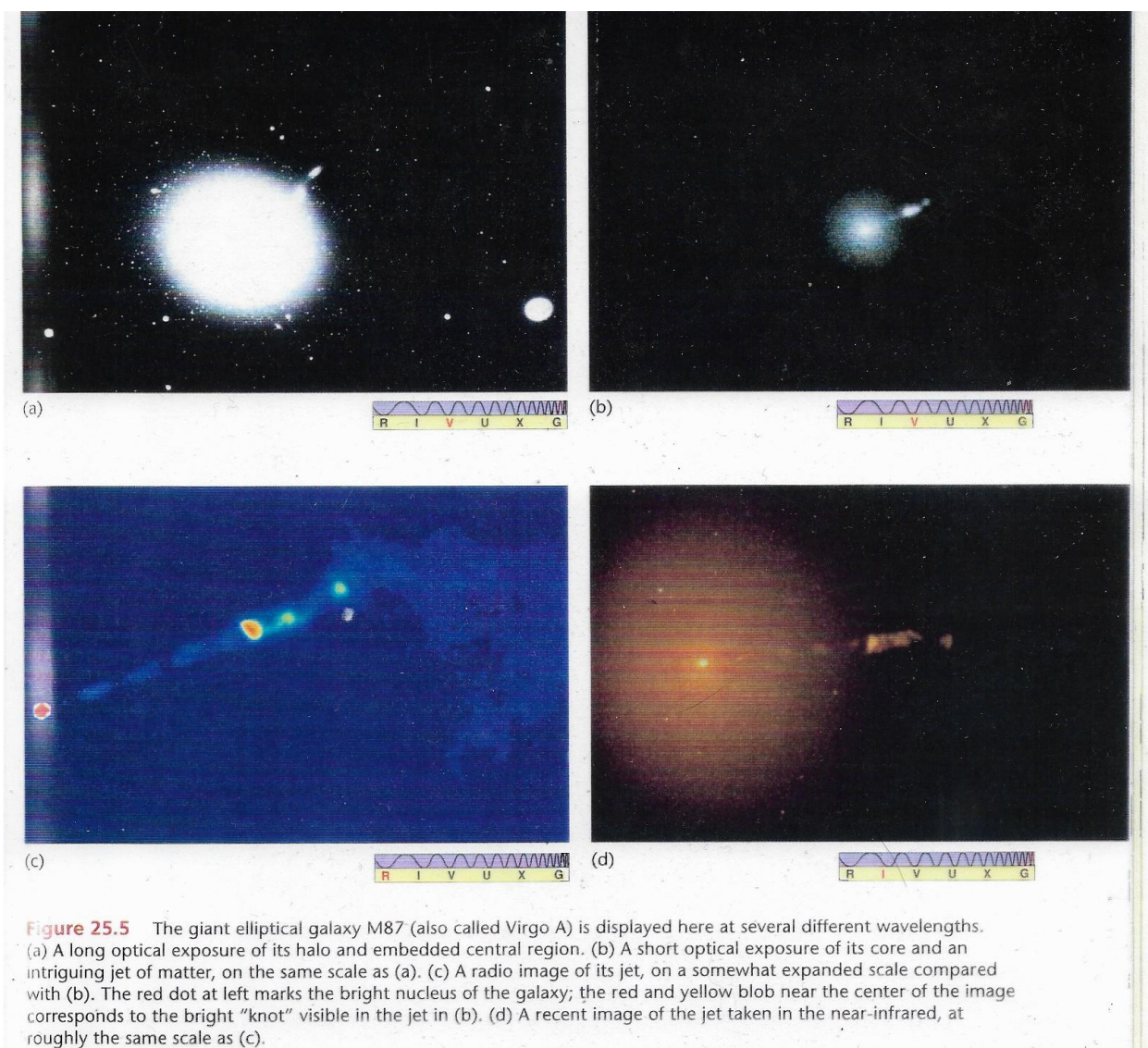


Figure 25.5 The giant elliptical galaxy M87 (also called Virgo A) is displayed here at several different wavelengths. (a) A long optical exposure of its halo and embedded central region. (b) A short optical exposure of its core and an intriguing jet of matter, on the same scale as (a). (c) A radio image of its jet, on a somewhat expanded scale compared with (b). The red dot at left marks the bright nucleus of the galaxy; the red and yellow blob near the center of the image corresponds to the bright "knot" visible in the jet in (b). (d) A recent image of the jet taken in the near-infrared, at roughly the same scale as (c).

Рис. 35. Галактика М 87, с которой отождествлен радиоисточник VirA.

На рис.35 (a) и (b) приведены оптические изображения М 87 с разными экспозициями (масштаб одинаков); видно, что в пределах галактики имеется выброс, направленный от ядра. Рисунки (c) и (d) показывают, как выглядит выброс в радио и ИК диапазонах.

На рис.36 на изображение радиоисточника CenA наложено оптическое изображение галактики NGC 5128. Радиоисточник состоит из двух обширных лопастей, расположенных по обе стороны от оптической галактики. Такое же строение (две радиолопасти) имеет радиоисточник CygA (Рис. 37). Здесь оптическое отождествление оказалось более сложным. Когда координаты радиолопастей были точно определены, примерно посередине между ними был найден слабый объект, оказавшийся галактикой.

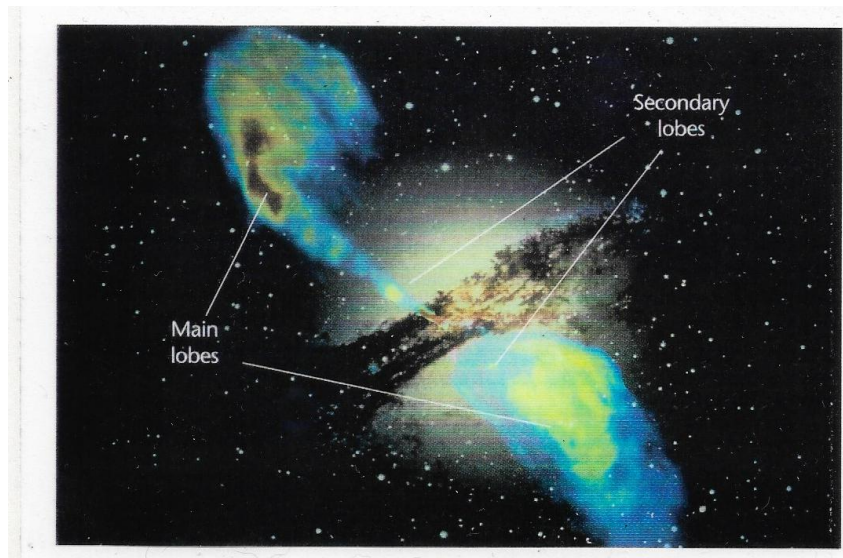


Рис.36. Отождествление радиоисточника CenA с галактикой NGC 5128.

На сделанной на рисунке 37 врезке видно, что изображение ее необычное, его можно интерпретировать как результат столкновения двух галактик, что и было сделано незамедлительно (в частности, при попытке объяснения мощного радиоизлучения объекта). Причем молчаливо предполагалось, что все дискретные источники радиоизлучения представляют собой сталкивающиеся галактики.

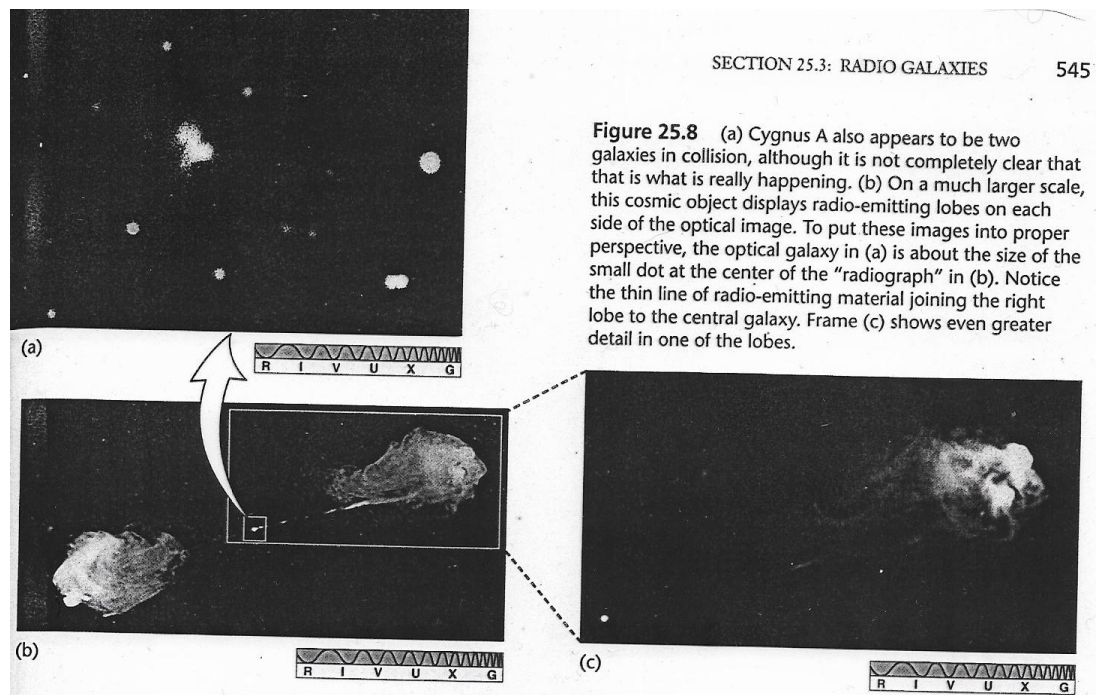


Рис. 37. Строения радиоисточника СугА: на рис (а) приведено оптическое изображение найденной между радиолопастями пекулярной галактики.

Однако не все астрономы согласились с этой интерпретацией. В частности, против гипотезы о сталкивающих галактиках выступил Амбарцумян. Прежде всего, он показал, что интерпретация *всех* дискретных радиоисточников как сталкивающих галактик не выдерживает критики по статистике, поскольку все имевшиеся к тому времени отождествления были сделаны с гигантскими галактиками, но таких галактик мало, а

дискретных радиоисточников много. Поэтому пекулярность скорее обусловлена делением галактики под действием каких-то сил, связанных с деятельностью ядра галактики. Деятельность ядра подтверждается выбросом из ядра в М87 и появлением радиолопастей дискретных радиоисточников. Таким образом, в конце 50-х годов Амбарцумян выдвинул гипотезу об особой роли ядер галактик в их образовании и эволюции – *гипотезу об активности ядер галактик*.

Вскоре гипотеза активности ядер галактик получила мощное наблюдательное подтверждение. В начале 60-х годов были обнаружены следы взрыва в ядре галактики М 82 (правда, впоследствии выяснилось, что это последствия не взрыва, а вспышки звездообразования, что также укладывается в рамки гипотезы об активности ядер) и некоторые дискретные радиоисточники были отождествлены со звездообразными объектами, получившими название *квазары* (квазизвездные радиоисточники).

Найденная степенная зависимость плотности потока дискретных радиоисточников от частоты привела И.С.Шкловского к заключению о синхротронной природе их радиоизлучения.

. Напомним, что синхротронное излучение – это излучение высокоэнергичных электронов, движущихся в магнитном поле. Ансамбль электронов со степенным распределением электронов по энергиям дает степенную зависимость плотности потока от частоты ($F_\nu \sim \nu^\alpha$), которая и была обнаружена у дискретных источников радиоизлучения. Обычно рассматривают зависимость в логарифмическом масштабе: $\lg F_\nu = \alpha \lg \nu + \text{const}$. Угловым коэффициентом α носит название «спектральный индекс». Синхротронное излучение показывает высокую степень поляризации с направлением поляризации, перпендикулярным направлению поля, и испускается в узком пучке в направлении движения ансамбля. Рис. 38 поясняет сказанное. Две верхние строчки дают распределение электронов ансамбля по энергиям. Следующие две – распределение энергии. При $\nu \ll \nu_c$ («критической частоты») интеграл близок к интегралу с нулевым нижним пределом и практически от ν не зависит; на графике мы имеем прямолинейный участок. При ν близких к ν_c с ростом ν интеграл уменьшается довольно быстро и наблюдается «высокочастотный завал». На низких частотах, начиная с некоторого ν_m , также наблюдается уменьшение плотности потока, обусловленное либо самопоглощением в источнике, если размер его мал (в этом случае спектральный индекс равен 2.5), либо некоторыми иными причинами. Далее даются сведения о степени поляризации. Видно, что она чрезвычайно высока.

Природа квазаров некоторое время оставалась невыясненной, поэтому их изучение велось вне связи с изучением галактик. Было найдено распределение энергии в их спектрах в оптической области. Оказалось, что оно не похоже на распределение энергии ни у звезд (после этого и был введен термин «квазар»), ни у галактик. Скорее это степенной спектр. Поскольку и у звезд, и у галактик спектр быстро падает в синефиолетовой области, по показателям цвета квазары, имеющие степенной спектр, оказываются более голубыми. В спектрах квазаров были обнаружены широкие эмиссионные линии, некоторое время не поддававшиеся отождествлению. Поляриметрические наблюдения показали, что у некоторых квазаров есть поляризация излучения, причем она переменна.

Первое отождествление эмиссионных линий в спектре квазара осуществил в 1963 году М.Шмидт. Он нашел, что эмиссионные линии в спектре квазара 3C 273 можно отождествить с линиями Бальмеровской серии водорода H_β , H_γ , H_δ , сильно смещенными в

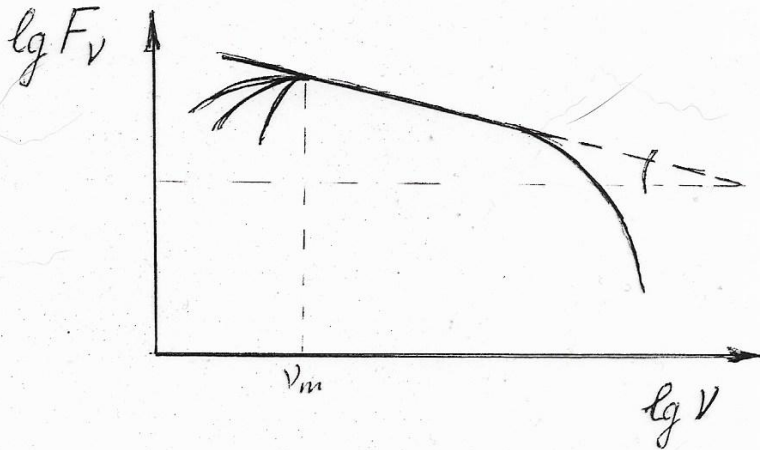
$$N(E) dE = k E^{-\beta} dE \quad E \in [E_0, E_{max}]$$

$$N=0$$

$$E \in [E_0, E_{max}]$$

$$F_\nu = C k H_\perp^{\frac{\beta+1}{2}} \nu^{-\frac{\beta-1}{2}} \int_{\nu/\nu_c}^{\infty} x^{\frac{\beta-3}{2}} F(x) dx$$

$$\nu_c = \text{const} \cdot H_\perp E_{max}^2$$



$$\alpha = \frac{\beta-1}{2}$$

$$(F_\nu \sim \nu^{-\alpha})$$

$$P = \frac{3\beta+3}{3\beta+7} = \frac{6\alpha+6}{6\alpha+10};$$

$$\alpha = 0.5 \rightarrow P = 0.69 \text{ (69\%)}$$

$$\alpha = 1 \quad 75\%$$

$$\alpha = 2 \quad 82\%$$

$$\alpha = 3 \quad 86\%$$

Рис. 38. Распределение энергии и поляризация однородного синхротронного источника.

красную сторону спектра. Правильность отождествления подтвердило обнаружение в ИК области спектра линии H_α в точности на длине волны, предсказанной Шмидтом. Величина этого красного смещения оказалась по тем временам беспрецедентно большой: $z = 0.14$. Если считать красное смещение космологическим, то светимость объекта оказывается гигантской, на два порядка превышающей светимость гигантских галактик.

Важным обстоятельством было обнаружение оптической переменности квазаров. Скорость переменности блеска накладывает из-за конечной скорости света c ограничения на размер объекта $R \leq c \tau$, где τ – характерное время переменности; за него можно принять,

например, время, за которое блеск изменяется вдвое ($\approx 0.7^m$). Полученные по скорости переменности малые размеры квазаров при гигантских их светимостях указывают на огромные плотности энергии в этих объектах, что заставило некоторых исследователей усомниться в космологической природе красного смещения квазаров, Споры о природе красного смещения квазаров велись около 10 лет. В ходе этих споров сторонники локальных гипотез пытались установить физическую связь между галактикой (с малым красным смещением) и расположенным поблизости квазаром (с большим z). Сторонники космологической природы опирались на сходство свойств квазаров и галактик с активными ядрами, в частности, сейфертовских.

В 1943г. К.Сейферт, наблюдая галактики с особенно яркими ядрами, обнаружил среди них такие, в спектрах ядер которых присутствуют широкие эмиссионные линии (эти галактики сейчас называют «сейфертовскими»). Работа Сейферта тогда не привлекла внимания, хотя, по существу, скорости, определяемые по ширине линий, указывают на активные процессы, протекающие в ядрах. После того, как Амбарцумян изложил свою концепцию активности ядер галактик, работа Сейферта была замечена, что вызвало поток исследований сейфертовских галактик. Некоторые результаты этих исследований демонстрируют Рис. 39–40. На рис. 39 три верхние полосы дают результаты спектрополяриметрических наблюдений сейфертовской галактики NGC 1068, две нижние – результаты после вычитания континуума галактики. Видно, что степень поляризации излучения ядра велика ($\approx 20\%$), это относится к континууму, а излучение в линиях не поляризовано. На рис.40 мы видим, что параметры поляризации ядерных областей галактик NGC 4151 и NGC 1275 переменны. Здесь влияние галактики не учтено; если его

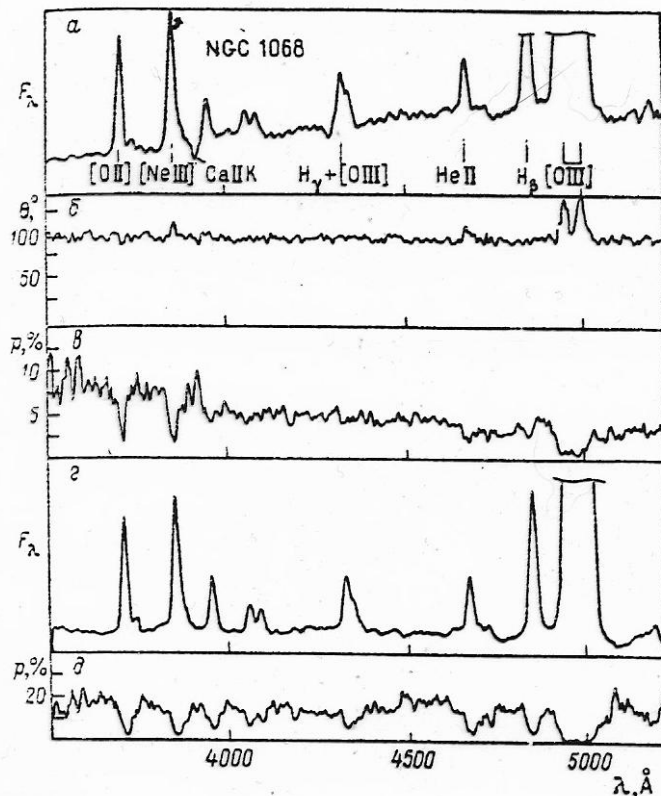


Рис. 39. Результаты спектрополяриметрии ядра галактики NGC1068

учесть, степень поляризации окажется существенно больше (мы видели это на предыдущем рисунке, где после учета вклада галактики степень поляризации увеличилась более, чем вдвое) .

В 1966 году А.Н.Дейч на конференции, посвященной нестационарным явлениям в галактиках, доложил о переменности блеска ядра сейфертовской галактики NGC 5548. Эту переменность он обнаружил при сопоставлении негативов, полученных с большой разностью эпох для совершенно иных целей (определения собственных движений звезд в нашей Галактике). Хотя многие не поверили результатам Дейча, некоторые все-таки поставили специальные наблюдательные программы с целью подтверждения переменности ядер галактик. Уже через год появилась работа, подтверждающая оптическую переменность ядра сейфертовской галактики NGC 4151, у которой был к тому же найден ультрафиолетовый избыток.

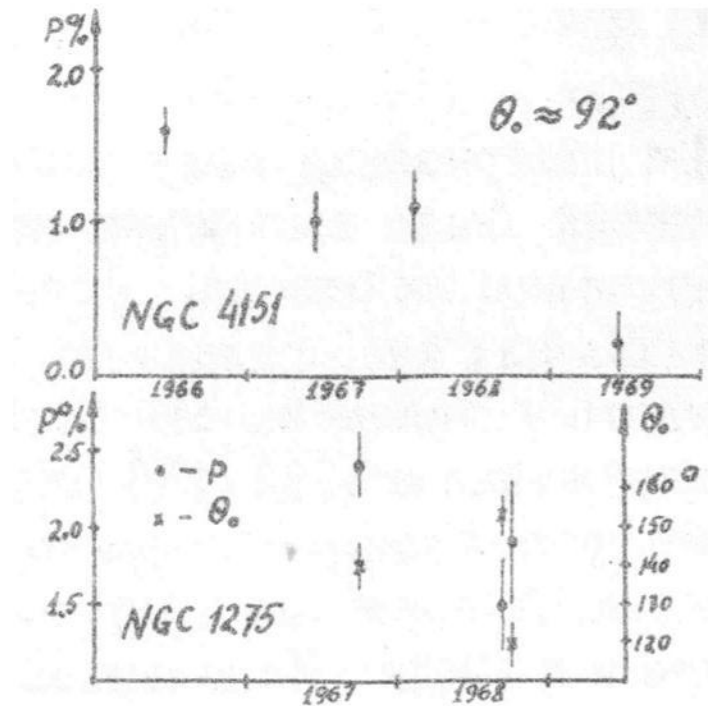


Рис. 40. Переменность поляризации у ядер сейфертовских галактик.

Таким образом, ко второй половине 60-х годов было установлено сходство квазаров и сейфертовских галактик по ряду параметров: оптическая переменность, наличие поляризации и ее переменность, голубые показатели цвета, радиоизлучение (NGC 1068 и NGC 1275 являются радиогалактиками) и др. Разница была только в мощности излучения.

Сейчас космологическая природа красного смещения квазаров не вызывает сомнения. Определяющую роль здесь сыграли работы Сандейджа, сопоставившего Хаббловскую диаграмму для квазаров с диаграммой для радиогалактик (см. рис. 41). Он обратил внимание на то, что на ней отсутствуют квазары в треугольнике, ограниченном прямой для радиогалактик, вертикальной прямой, определяющей предельную звездную величину наблюдений и горизонтальной прямой, проведенной для минимального значения $lg(cz)$, найденного у квазаров. Если бы красное смещение квазаров было собственным (не космологическим), то более удаленные объекты с тем же z должны были бы попасть в этот треугольник, чего нет. Значит предположение о собственном красном смещении квазаров неверно.

С другой стороны, если явление квазара есть проявление активности в ядре радиогалактики, то дополнительное квазарное излучение смещает точку по горизонтали от прямой для радиогалактик влево, что согласуется с расположением квазаров на Хаббловской диаграмме. Прямым подтверждением этих рассуждений послужило бы обнаружение подстилающих галактик у ряда квазаров. Ясно, что поиски подстилающих галактик нужно вести по наблюдениям в спектральной области, где контраст между красной галактикой и голубым квазаром максимален, то есть наблюдения надо вести в

красной области спектра, нужно выбирать квазары близкие к прямой для радиогалактик, чтобы квазарное излучение не «забивало» излучение галактики и с малым z , поскольку угловой размер галактики уменьшается с расстоянием. Поиски для 12 квазаров провел Корменди, и во всех случаях они оказались успешными.

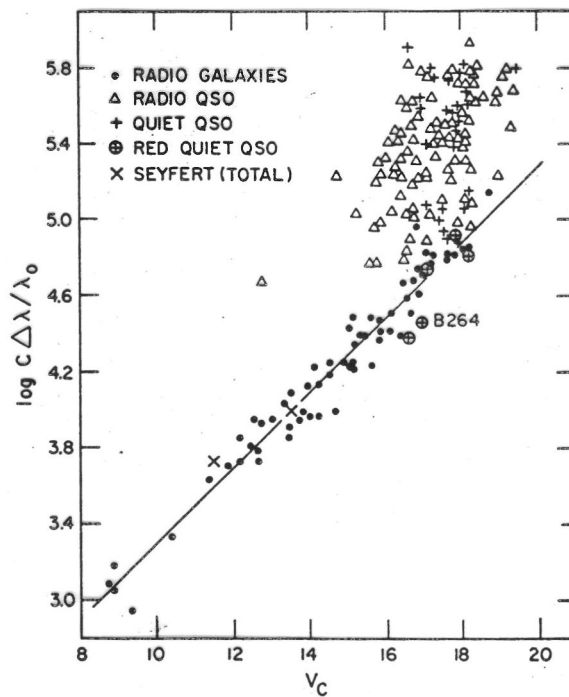


Рис. 41. Хаббловская диаграмма для радиогалактик и квазаров.

Пример обнаружения подстилающей галактики приведен ниже. На рис. 42 представлен снимок области квазара 3С 206 с красным смещением ($z = 0.200$), полученный на 3.6-метровом телескопе в Чили, а на рис. 43 результаты его фотометрии. Видно, что на периферии наблюдаемое распределение яркости у квазара (точки) превосходит соответствующее распределение у точечного источника (крестики). Это проявляется подстилающая галактика, распределение яркости которой дается сплошной линией.

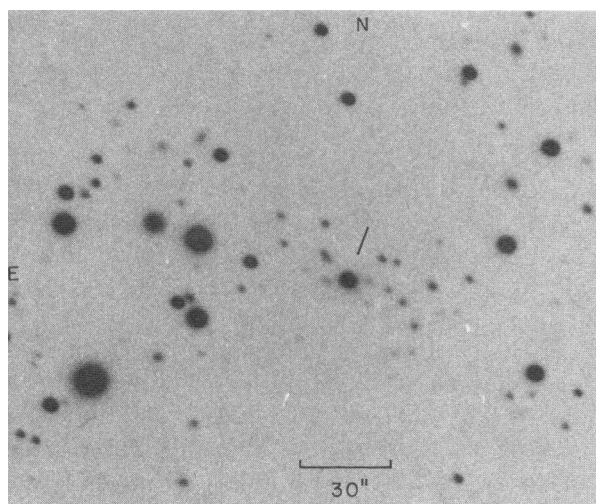


Рис.42. Снимок области квазара 3С 206.

Попутно заметим, что на рис.42 вокруг квазара наблюдается скопление галактик, причем галактика, в ядре которой находится квазар, очевидно, принадлежит этому

скоплению, поскольку красное смещение у галактик скопления такое же, как у квазара. Это аргумент в пользу космологической природы красного смещения квазаров.

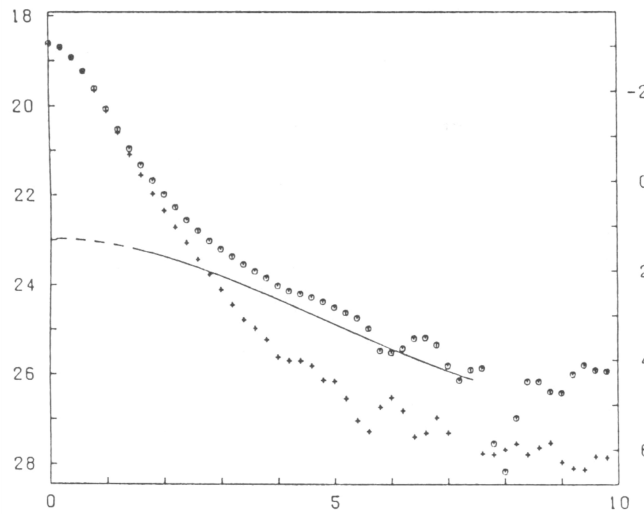


Рис.43. Выделение галактической подложки у квазара 3С 206.

Сандейдж предложил метод разделения компонентов излучения галактики и квазара по наблюдениям объекта с двумя диафрагмами. Пусть i – меньшая диафрага, j – большая, тогда $\Delta m = m_i - m_j > 0$. Если I – интенсивность, то $m_i = -2.5 \lg I_i$, $m_j = -2.5 \lg I_j$. Тогда для звездной величины кольца будет

$$m_{\text{кольца}} = -2.5 \lg I_{\text{кольца}} = -2.5 \lg (I_j - I_i) = -2.5 \lg (10^{-0.4m_j} - 10^{-0.4m_i}).$$

Определение звездных величин кольца в разных фильтрах позволяет найти показатели цвета кольца, то есть показатели цвета подстилающей галактики. Для N-галактики 3С 371, у которой наблюдается яркое звездообразное ядро (мини-квазар) и слабая оболочка, из $UBVR$ наблюдений с диафрагмами 12.2" и 48.3" были получены показатели цвета $U-B=0.50$, $B-V=1.05$, $V-R=0.65$. Это нормальные цвета для гигантской эллиптической галактики с $z_{3С\ 371}=0.0508$. Таким образом, подстилающая галактика является гигантской эллиптической галактикой. Такими же галактиками являются ярчайшие галактики скоплений, для которых была получена кривая нарастания блеска (Рис. 32), по ней можно взять величину $\Delta m(i,j)_{\text{curve}}$, которая понадобится в дальнейшем.

Очевидно, что $I_{obs} = I_Q + I_G$ и

$$I_{obs,i} = 10^{-0.4 m_{obs,i}}, \quad I_{obs,j} = 10^{-0.4 m_{obs,j}}$$

Значит $\frac{I_{obs,j}}{I_{obs,i}} = 10^{0.4(m_{obs,i} - m_{obs,j})} = 10^{0.4 \Delta m(i,j)_{obs}}$ (1)

Имеем

$$\frac{I_{obs,j}}{I_{obs,i}} = \frac{I_Q + I_{G,j}}{I_Q + I_{G,i}} = \frac{\frac{I_Q}{I_{G,i}} + \frac{I_{G,j}}{I_{G,i}}}{\frac{I_Q}{I_{G,i}} + 1}$$

Введем обозначение $\frac{I_Q}{I_{G,i}} = a_i$ (2)

Используя (1) и (2) и взяв разность в звездных величинах между данными для диаграммы i и j с кривой нарастающих блеска (рис. 32), получим

$$10^{0.4 \Delta m(i,j)_{obs}} = \frac{a_i + 10^{0.4 \Delta m(i,j)_{curve}}}{a_i + 1}$$

Решая относительно a_i , получим

$$a_i = \frac{I_Q}{I_{G,i}} = \frac{10^{0.4 \Delta m(i,j)_{curve}} - 10^{0.4 \Delta m(i,j)_{obs}}}{10^{0.4 \Delta m(i,j)_{obs}} - 1}$$
 (3)

Из (2) $m_{G,i} - m_Q = 2.5 \lg a_i$ (4)

Далее, учитывая (2), имеем

Переходя к звездным величинам, $I_{obs,i} = I_{G,i} + I_Q = I_{G,i} (1 + a_i)$
 $m_{obs,i} = m_{G,i} - 2.5 \lg (1 + a_i)$ (5)

(4) и (5) дают

$$m_Q = m_{obs,i} + 2.5 \lg (1 + a_i) - 2.5 \lg a_i = m_{obs,i} + 2.5 \lg \frac{1 + a_i}{a_i}$$
 и

$$m_{G,i} = m_{obs,i} + 2.5 \lg (1 + a_i)$$

Сандейдж дает еще один способ разделения компонентов – по наблюдаемым показателям цвета. Предполагается, что $(B-V)$ галактики известно. Это эллиптическая галактика с $(B-V) = +0.95$; тогда ее наблюдаемый показатель цвета $(B-V)_G = +0.95 + K_B - K_V$. Показатель цвета квазара задается. Предполагается, что он равен нулю, что недалеко от истины : $(B-V)_Q = 0^m.0$. Имеем следующие очевидные выражения:

$$\begin{aligned}
 a) \quad I(V)_Q / I(B)_Q &= 10^{0.4(B-V)_Q}, \\
 \delta) \quad I(V)_{G,i} / I(B)_{G,i} &= 10^{0.4(B-V)_{G,i}}, \\
 \beta) \quad \frac{I(V)_Q + I(V)_{G,i}}{I(B)_Q + I(B)_{G,i}} &= 10^{0.4(B-V)_{obs,i}}.
 \end{aligned}$$

Комбинация этих трёх выражений даёт a_i :

$$a_i \equiv \frac{I(V)_Q}{I(V)_{G,i}} = \frac{1 - 10^{0.4[(B-V)_{G,i} - (B-V)_Q]}}{10^{0.4[(B-V)_{cor,i} - (B-V)_Q]} - 1}.$$

В выражении для a_i фигурирует $(B-V)_{cor,i}$, это исправленный за межзвездное покраснение в нашей Галактике наблюдаемый показатель цвета: $(B-V)_{cor,i} = (B-V)_{obs,i} - E_{B-V}$, где E_{B-V} избыток цвета в направлении на квазар.

В модели квазара «подстилаящая галактика + дополнительный (кварзарный) источник излучения» наблюдаемая переменность, очевидно, обусловлена дополнительным источником. Поэтому изучение переменности должно способствовать выяснению его свойств и разделению компонентов в излучении квазара.

К сожалению, кварзарные источники в оптике не разрешаются, и их поток не наблюдается непосредственно – в наблюдаемое излучение вносят вклад подстилаящая галактика, а также другие источники непрерывного и линейчатого излучения. Выделение излучения переменного источника – непростая задача, поскольку потоки других “вкладчиков” нельзя оценить непосредственно. Неправильный учет вклада других компонентов ведет к неправильным заключениям о поведении переменного источника (чуть позже дадим примеры этого).

Используя переменность блеска квазаров, Адамс в предположении о неизменности цвета кварзарного источника показал, как его показатель цвета можно найти (а не полагать равным нулю, как это сделал Сандейдж во втором предложенном им методе разделения компонентов). Легко понять, что его можно найти по формуле (B и V – звездные величины квазара для двух моментов времени)

$$(B-V)_Q = -2.5 \lg \frac{10^{-0.4B_1} - 10^{-0.4B_2}}{10^{-0.4V_1} - 10^{-0.4V_2}}.$$

После обнаружения переменности ядер сейфертовских галактик было поставлено несколько обширных программ по их многоцветному мониторингу. В частности, такие наблюдения велись на Крымской станции Московского университета. На рис. 44 приведена полученная В.М.Лютым кривая блеска ядра галактики NGC 4151 в цвете U (сплошная линия). На ней виден глубочайший минимум блеска. Предположив, что в минимуме видна только галактическая подложка, Бабаджанянц, Гаген-Торн и Лютый

приписали разницу в наблюдаемом и минимальном потоках квазарному источнику и, располагая данными в других цветах, нашли у него изменения спектрального индекса со временем (пунктир на рис. 44). Из рассмотрения рисунка был сделан вывод, что чем ярче источник, тем он голубее. В дальнейшем оказалось, что это неверно, и причиной этого, как выяснилось, был неправильный учет вклада галактической подложки.

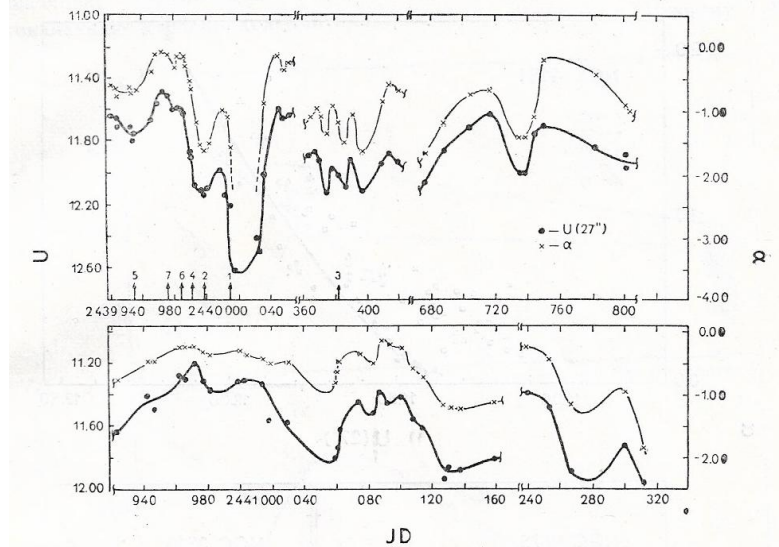
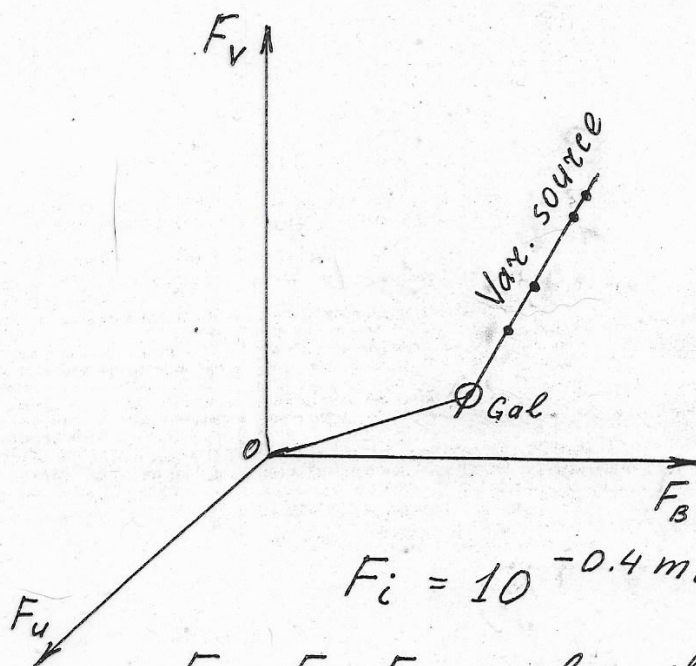


Рис. 44. Кривая блеска NGC 4151 и неправильное определение спектрального индекса.

Существенным недостатком методики изучения свойств переменного компонента после выделения его излучения из суммарного наблюдаемого излучения является то, что результат зависит от того, насколько успешно сделана оценка излучения постоянного компонента, который сам может содержать несколько субкомпонент. В приведенном примере ненадежными оказались результаты наблюдений для минимума блеска.

В 1981 году Холоневский предложил лишённую этого недостатка методику определения цветовых характеристик переменного компонента, при которой используется сразу же вся совокупность наблюдательных данных. Эта методика работает в случае неизменности цветовых характеристик переменного источника и не требует знания его вклада в суммарное излучение, причем неизменность проверяется в процессе анализа. Сам Холоневский использовал ее для определения показателей цвета переменных компонентов в ядрах сейфертовских галактик с целью установления их сходства с показателями цвета квазаров, не касаясь вопроса разделения компонентов излучения (именно в этом исследовании была установлена неизменность цветовых характеристик переменного источника в ядре NGC 4151). Методика получила развитие в работах, выполнявшихся на кафедре астрофизики СПбГУ, в частности, с целью разделения компонентов в ядрах активных галактик и квазаров.

Прежде всего осуществляется переход от звездных величин к плотностям потоков (для краткости будем говорить к «потокам»); необходимые для перехода постоянные известны. Далее рассматривается поведение объекта в пространстве потоков. Это поведение иллюстрирует следующий рисунок. Считается, что переменный компонент своего цвета не меняет – формулы (1).



$$F_i = 10^{-0.4 m_i} + \text{const}$$

F_u, F_B, F_V - obs. fluxes

F_u^c, F_B^c, F_V^c - fluxes of const. comp.

F_u^v, F_B^v, F_V^v - fluxes of var. comp.

$$\left. \begin{aligned} F_u^v / F_V^v &= a_{uv} - \text{const} \\ F_B^v / F_V^v &= a_{Bv} - \text{const} \end{aligned} \right\} (1)$$

Evidently

$$\left. \begin{aligned} F_u &= F_u^c + F_u^v \\ F_B &= F_B^c + F_B^v \\ F_V &= F_V^c + F_V^v \end{aligned} \right\} (2)$$

or

$$\left. \begin{aligned} F_u &= F_u^c + a_{uv} F_V^v \\ F_B &= F_B^c + a_{Bv} F_V^v \\ F_V^v &= F_V - F_V^c \end{aligned} \right\}$$

Eliminating F_V^v we obtain

$$\left. \begin{aligned} F_u &= a_{uv} F_V + (F_u^c - a_{uv} F_V^c) = a_{uv} F_V + C_{uv} \\ F_B &= a_{Bv} F_V + (F_B^c - a_{Bv} F_V^c) = a_{Bv} F_V + C_{Bv} \end{aligned} \right\} (3)$$

where C_{uv} and C_{Bv} are constant

Уравнение (3) – уравнение прямой в пространстве потоков. Далее, поскольку точка, представляющая галактику, лежит на этой прямой, имеем

$$\left. \begin{aligned} F_U^g &= a_{UV} F_V^g + C_{UV} \\ F_B^g &= a_{BV} F_V^g + C_{BV} \end{aligned} \right\} (4)$$

$$\text{Let } \left. \begin{aligned} F_B^g / F_V^g &= \alpha \\ F_U^g / F_V^g &= \beta \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\text{Then } \left. \begin{aligned} \beta F_V^g &= a_{UV} F_V^g + C_{UV} \\ \alpha F_V^g &= a_{BV} F_V^g + C_{BV} \end{aligned} \right\}$$

$$\text{or } \left. \begin{aligned} F_V^g (\beta - a_{UV}) &= C_{UV} \\ F_V^g (\alpha - a_{BV}) &= C_{BV} \end{aligned} \right\} (6)$$

Eliminating F_V^g we obtain

$$\beta = \frac{C_{UV}}{C_{BV}} \alpha + \left(a_{UV} - a_{BV} \frac{C_{UV}}{C_{BV}} \right)$$

Для нормальных галактик существует зависимость между показателями цвета $B-V$ и $U-V$, которую можно преобразовать в зависимость между β и α . Решение системы (7) из двух уравнений с двумя неизвестными дает β и α . Далее находится F_V^g и затем F_U^g и F_B^g .

$$(B-V)_g = \varphi(U-V)_g \longrightarrow \beta = \varphi(\alpha)$$

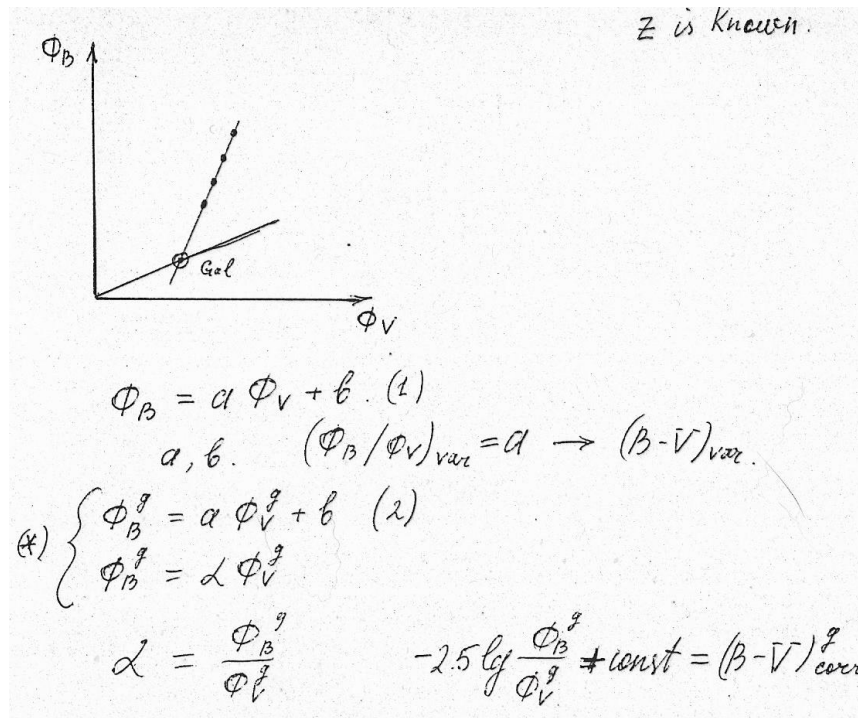
Thus

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{C_{UV}}{C_{BV}} \alpha + \left(a_{UV} - a_{BV} \frac{C_{UV}}{C_{BV}} \right) \\ \beta &= \varphi(\alpha) \end{aligned} \right\} (7)$$

$$\alpha, \beta \xrightarrow{(6)} F_V^g \xrightarrow{(5)} F_U^g, F_B^g$$

Иногда имеются результаты наблюдений только в двух цветах. На нижеследующем рисунке представлено поведение на плоскости потоков в цветах B и V . В этом случае для разделения компонентов приходится задавать показатель цвета подстилающей галактики. Ясно, что все галактики с одним и тем же показателем цвета $(B-V)$ располагаются на луче,

исходящим из начала координат, поскольку цвет характеризует отношение потоков в рассматриваемых цветах, и постоянство цвета означает постоянство отношения потоков в полосах B и V . Иными словами, показатель цвета определяет угловой коэффициент луча. Его пересечение с прямой, найденной по результатам определения наблюдаемых потоков, дает значение потоков подстилающей галактики. В качестве подстилающей галактики принимается та или иная галактика, показатель цвета которой на нулевом красном смещении хорошо известен. Часто это гигантская эллиптическая галактика. Если красное смещение объекта известно, в значение показателя цвета вносится поправка $K(z)$. Ниже проведено рассмотрение для случая гигантской эллиптической галактики. Решение системы (*) дает искомые значения ее потоков в полосах B и V .



After postulating of $(B-V)^g$ we find α
 Φ_B^g, Φ_V^g
 $(B-V)^g = f(z)$
 For giant ell. galaxy $(B-V)_{z=0}^g = +0.95$
 $(B-V)_{corr}^g = +0.95 + K(z)$

Чем меньше мы знаем, тем больше приходится делать предположений. Если z неизвестно, то кроме показателя цвета гигантской эллиптической галактики надо задать ее абсолютную величину и знать размер диафрагмы, с которой велись наблюдения. При этом будет использоваться кривая нарастания блеска. Точки, представляющие потоки лежат на прямой (1). Точка, представляющая галактику, также лежит на этой прямой – (2).

z is unknown

$$\Phi_B = a \Phi_V + b \quad (1)$$

$$\Phi_B^g = a \Phi_V^g + b \quad (2)$$

Galaxy is giant elliptical

$$\text{So } a) (B-V)_{z=0}^g = +0.95$$

$$b) M_B^{26} = -22.35$$

c) Curve of growth is known.

Then from $m = M - 5 + 5 \lg D$

where $D = cz/H_0$ ($H_0 = 50 \text{ km/s/Mpc}$)
we find

$$B_{\text{obs}}^g = -22.35 + \Delta(\theta'', z) + K_B(z) + 43.9 + 5 \lg z.$$

We can calculate the table, giving

B_{obs}^g for our aperture θ'' as a function of z .

$$z^{(0)}, B_{\text{obs}}^{g(0)}$$

Дальше используем метод итераций. В нулевом приближении задаем z^0 , (в таблице ему соответствует значение $B_{\text{obs}}^{g(0)}$). Зная z , используем предыдущий метод и находим $B_{\text{obs}}^{g(1)}$ и по таблице z^1 . С этим z^1 находим $B_{\text{obs}}^{g(2)}$ и z^2 и так далее пока не окажется $z^{n+1} = z^n$. Опыт показывает, что процесс быстро сходится. Найденное таким образом красное смещение позволяет, в частности, определить его для объектов с неизвестным ранее z . Для квазара OQ530 найденная таким путем величина z была подтверждена спектроскопически.

Надо заметить, что до сих пор рассматривался вопрос, что будет, если на излучение постоянного компонента накладывается излучение переменного компонента, не меняющего цветовых характеристик. Тогда точки должны лежать на прямой линии. На практике решается обратная задача: если из наблюдений следует, что их результаты ложатся на прямую линию, то излучение переменного компонента не меняет цветовых характеристик и их можно найти. Молчаливо предполагается, что это на самом деле так. Однако из прямой теоремы далеко не всегда следует обратная. Мы рассмотрим двумерный случай, поскольку всегда можно проектированием на интересующую нас плоскость перейти от n -мерного случая к плоскому.

Рассмотрим плоскость $\{F_i, F_j\}$ (рис.45). Допустим, что точки, соответствующим потокам, лежат (в пределах ошибок наблюдений) на прямой линии $F_j = a_{ji} F_i + b_{ji}$. Коэффициенты a_{ji} и b_{ji} надлежит определять методом ортогональной регрессии, поскольку случайные ошибки есть в обеих сопоставляемых величинах.

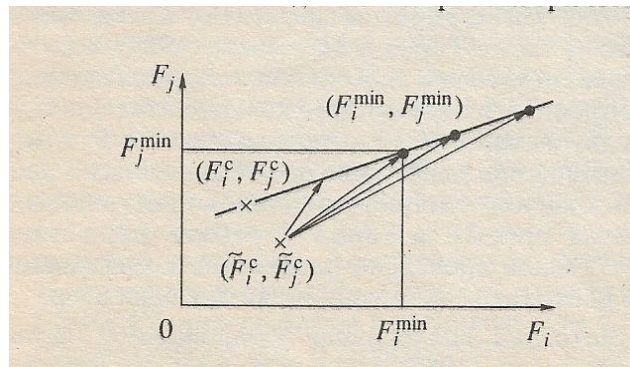


Рис. 45. Картина на плоскости $\{F_i, F_j\}$.

Рассмотрим, какие возможные интерпретации того, что точки лежат на прямой, имеются в рамках двухкомпонентной модели.

(а) Переменный источник не меняет распределения энергии. Тогда коэффициент a_{ji} дает отношение потоков переменного компонента $(F_j / F_i)^{var}$ в сопоставляемых полосах (иными словами, показатель цвета). Если имеются наблюдения в n фотометрических полосах, то определяется относительное распределение энергии переменного компонента в спектральном интервале, охваченном этими полосами. Существенно, что эту информацию удастся получить, *не зная вклада переменного компонента в наблюдаемое излучение*. Кроме того, известно, что точка, соответствующая постоянному компоненту (F_i^c, F_j^c) лежит не прямой.

(б) Формально интерпретация пункта (а) не является единственной. Это связано с тем тривиальным обстоятельством (см.рис.45), что в любой точке очерченного прямоугольника, например в точке $(\tilde{E}_i^c, \tilde{E}_i^c)$, может лежать точка, соответствующая постоянному компоненту (поскольку $F^v \geq 0$), и из нее в каждую из наблюдаемых точек можно попасть с помощью вектора, проекции которого будут равны F_i^v и F_j^v . При этом, если только точка $(\tilde{E}_i^c, \tilde{E}_i^c)$ не лежит на прямой, отношение F_j^v / F_i^v , очевидно, будет меняться с изменением F_i^v . Этот закон изменения легко получить. Поскольку точка с координатами $(\tilde{E}_i^c + F_i^v, \tilde{E}_i^c + F_i^v)$ попадает на прямую, имеем $\tilde{E}_i^c + F_i^v = a_{ji}(\tilde{E}_i^c + F_i^v) + b_{ji}$. Отсюда

$$\begin{aligned} (F_j / F_i)^v &= a_{ji} + C / F_i^v, \\ C &= a_{ji} \tilde{E}_i^c + b_{ji} - \tilde{E}_j^c. \end{aligned}$$

Таким образом, альтернативная пункту (а) интерпретация требует специального вида зависимости, при которой разность между текущим отношением $(F_j / F_i)^v$ и наблюдаемым угловым коэффициентом прямой a_{ji} обратно пропорциональна величине текущего потока переменного компонента в одной из полос. Физическое обоснование такой зависимости, по меньшей мере, затруднительно (если не невозможно). Это заставляет принять интерпретацию, изложенную в пункте (а).

Итак, **расположение точек на прямой линии означает неизменность спектра переменного компонента и возможность определения его цветовых характеристик по угловому коэффициенту прямой без предварительного знания его вклада в наблюдаемое излучение. Многополосная фотометрия дает, таким образом, относительное распределение энергии в спектре переменного компонента. Точка, соответствующая постоянному компоненту, лежит на прямой ближе к началу координат.**

Изложенная методика, разумеется, не является универсальной и при применении ее нужно соблюдать осторожность. Основные ограничения связаны с двумя обстоятельствами: многокомпонентностью переменной составляющей и ограниченным временем жизни отдельных компонентов. По существу, *изложенный метод позволяет определить характеристики того переменного источника, который определяет фотометрическое поведение на данном временном интервале*. При появлении нового переменного субкомпонента поведение точек на плоскости $\{F_i, F_j\}$ может измениться.

В суммарном излучении может присутствовать несколько переменных компонентов с разными характерными временами переменности и разными амплитудами. При анализе быстрых изменений (вспышек) изменениями медленно меняющегося компонента часто можно пренебречь, поскольку на малом временном интервале, охватывающем вспышку, они невелики, даже если общая амплитуда переменности этих плавных компонентов превосходит амплитуду вспышечного компонента.

С другой стороны, при анализе плавной переменности можно пренебречь быстрыми изменениями малой амплитуды, которые будут лишь увеличивать обусловленный случайными ошибками наблюдений разброс точек на графиках, дающих зависимость между потоками F_i и F_j .

Ограниченное время жизни переменных компонентов вносит серьезные затруднения в проведение анализа, поскольку это время заранее неизвестно. Правда, некоторые сведения можно получить из рассмотрения кривой блеска объекта, если она достаточно подробна.

Если цветовые характеристики вновь появившегося и ранее действовавшего переменных компонентов сильно отличаются друг от друга, то на графиках, где сопоставляются потоки F_i и F_j , это достаточно хорошо видно. Если же распределения энергии двух компонентов близки, то систематические различия могут оказаться замаскированными случайными ошибками. Поэтому недопустимо собирать воедино все наблюдения объекта и наносить данные на плоскость $\{F_i, F_j\}$ без индивидуального анализа каждой точки.

Проиллюстрируем вышесказанное примерами. На рис. 46 приведено сопоставление потоков для объекта АО 0235+164. Интервал наблюдений 22.11.1982 – 10.01.1983. Разными значками нанесены данные для 1982 (треугольники) и 1983 (точки) годов.

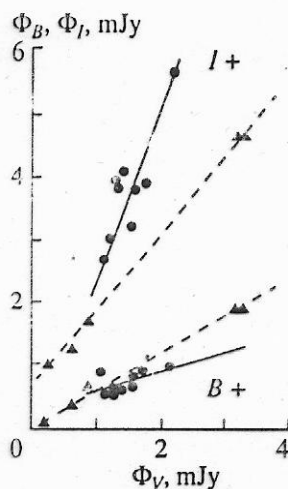


Рис. 46. Сравнение потоков для АО 0235+164, случай двух источников с сильно отличающимися цветовыми характеристиками.

Ясно, что на всем промежутке наблюдений модель с одним переменным по потоку источником с постоянным распределением энергии в спектре неприменима. Однако по отдельности через треугольники и через точки можно провести прямые, так что на меньших временных интервалах методика работает. В данном случае различия в цветовых характеристиках двух источников очень велики. Отметим, что в январе 1983 г. у объекта наблюдалась вспышка ИК излучения.

Второй пример относится к объекту OJ 287, у которого наблюдались сильные подъемы блеска в 1972 и 1983 годах. На рис. 47(a) проведено сопоставление потоков в полосах U, B, V для интервала с начала подъема в 1972 году до 1976 г. Видно, что точки прекрасно лежат на прямых линиях, что позволяет определить цвета переменного компонента (которые не меняются на этом промежутке времени). На рис. 47(b) точками нанесены данные для подъема блеска в 1983-1984 годах. Видно, что точки опять прекрасно лежат на

прямых линиях, но это не те линии, которые были на рис. 47(a) (здесь они нанесены штрихом). Рисунок показывает, что в 1972-1976 и 1983-1984 годах фотометрическое поведение OJ 287 определяли переменные источники с разными цветовыми характеристиками. Правда, различия здесь невелики, и если рассматривать все наблюдения в совокупности, их можно не заметить. Это привело бы к неправильному определению цветовых характеристик переменного компонента.

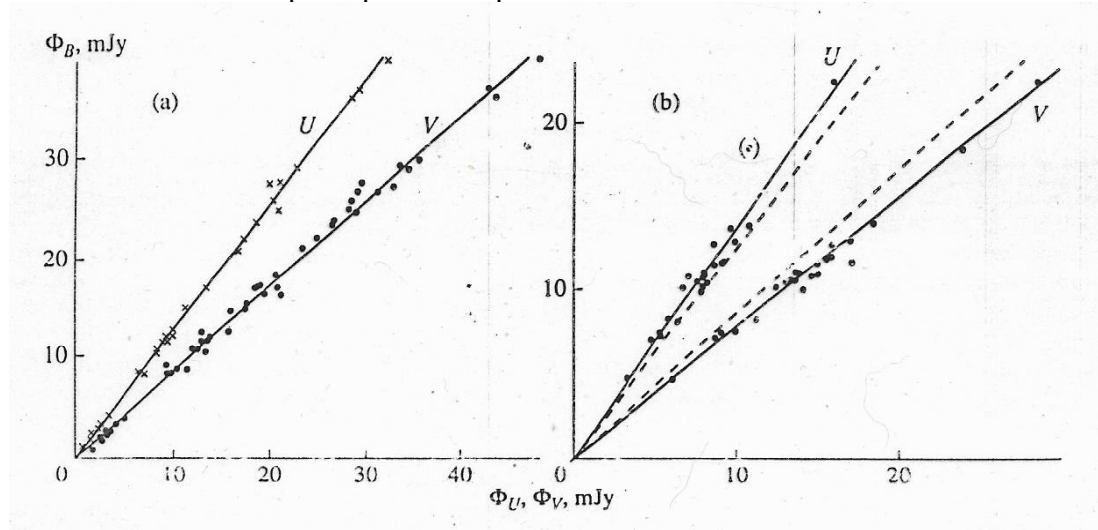


Рис. 47. Поведение OJ 287 во время двух подъемов блеска.

В рамках двухкомпонентной модели можно также получить из поляризационных наблюдений сведения о параметрах поляризации переменного компонента. Пусть p и θ_0 – наблюдаемые параметры поляризации:

Polarization parameters p and θ_0 .

p - degree of polarization

$$p = I_p / I$$

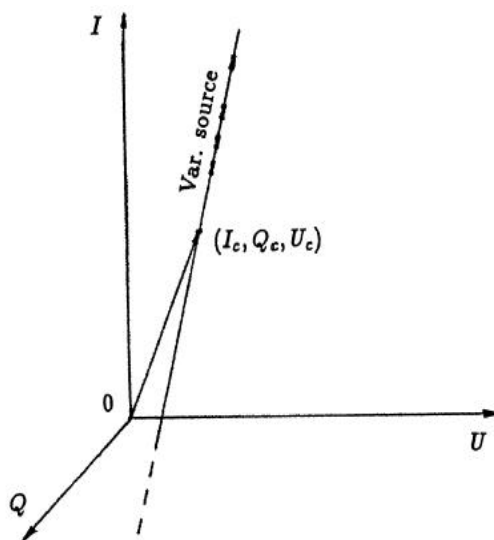
where I_p is polarized flux,
 I - total flux.

θ_0 - the preferable angle (the direction of polarization).

пропорциональна величине потока переменного компонента F_v , что трудно объяснить (если объяснимо вообще). Ситуация та же, что была рассмотрена нами ранее при определении спектра переменного компонента.

Очевидно, что в этом случае наблюдаемая степень поляризации увеличивается с увеличением блеска. Однако наблюдения показали, что это далеко не всегда так. Вероятной причиной этого может быть наличие поляризации в излучении постоянного компонента. Простой пример: если направление поляризации переменного компонента перпендикулярно направлению поляризации постоянного компонента, то увеличение потока переменного компонента будет приводить к увеличению наблюдаемого потока, но наблюдаемая степень поляризации будет уменьшаться.

Для выяснения природы переменного компонента нужно знать его поляризационные характеристики. Оказывается их можно получить в предположении, что параметры поляризации его излучения не меняются со временем, а изменение наблюдаемых параметров поляризации и потока обусловлены изменениями вклада переменного компонента в суммарный наблюдаемый поток. Удобно перейти к абсолютным параметрам Стокса, которые имеют одинаковую размерность и аддитивны, и рассмотреть поведение в пространстве параметров Стокса $\{I, Q, U\}$ (см. нижеследующий рисунок).



Пусть

I_c, Q_c, U_c — Stokes par. of all unvar. comp.

I_v, Q_v, U_v — — — of variable source.

$Q_v = I_v p_x; U_v = I_v p_y; p_x, p_y$ are constant.

$$I = I_c + I_v$$

$$Q = Q_c + Q_v = Q_c + I_v p_x$$

$$U = U_c + U_v = U_c + I_v p_y$$

(1)

$$Q = Q_c - p_x I_c + p_x I$$

$$U = U_c - p_y I_c + p_y I$$

(2)

Уравнение (2) — уравнение прямой в пространстве $\{I, Q, U\}$. Нам будет удобно записать его в виде (3)-4). Таким образом, если p_x и p_y постоянны, то точки в пространстве абсолютных

параметров Стокса лежат на прямой линии, направляющие тангенсы которой определяются относительными параметрами Стокса переменного компонента. Обратное также верно: если точки, отвечающие наблюдениям, лежат на прямой линии, то относительные параметры Стокса переменного компонента постоянны и могут быть найдены по (5), где коэффициенты a, b, c, d находятся методом ортогональной регрессии.

$$\left. \begin{aligned} aQ + b &= I \\ cU + d &= I \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

where

$$\left. \begin{aligned} a &= 1/p_x, \quad c = 1/p_y \\ b &= I_c - Q_c/p_x, \quad d = I_c - U_c/p_y \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} aQ_k + b &= I_k \\ cU_k + d &= I_k \end{aligned} \right\} \quad k=1, \dots, n \quad (5)$$

$$p_x = 1/a, \quad p_y = 1/c \quad \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{c^2} < 1 \right)$$

Ясно, что найденные параметры Стокса относятся к тому переменному источнику, который определяет поведение объекта на том временном интервале, в течение которого точки, представляющие наблюдения, располагаются на прямой. В качестве примера на рис. 48 приведены результаты анализа поляризационной переменности блазара OJ 287. Здесь сопоставлены абсолютные параметры Стокса для поляризационной вспышки в период JD 2445782-794. Ясно, что в пределах этого временного интервала относительные параметры Стокса переменного источника не менялись. Степень поляризации его излучения составляла около 35%.

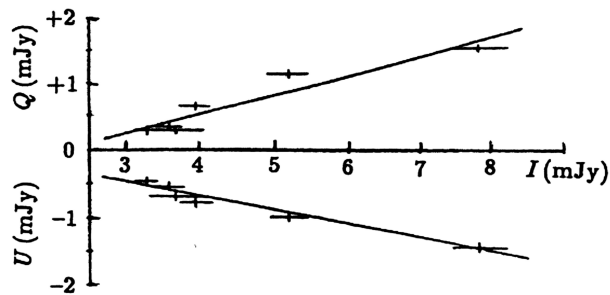


Рис. 48. OJ 287: сопоставление абсолютных параметров Стокса в поляризационной вспышке в интервале JD 2445782-794.

Многоцветные наблюдения позволяют определить зависимость поляризационных характеристик переменного компонента от длины волны. В качестве примера приведем результаты выделения поляризованного источника у квазара 3C 345 по результатам фотометрического и поляризационного мониторинга в пяти цветах (U, B, V, R, I) в феврале – июле 1983 года. На рис. 49 приведены результаты сопоставления наблюдаемых абсолютных параметров Стокса (для примера выбраны цвета U и V). Полученные поляризационные характеристики переменного компонента даются в нижеследующей таблице. Видно, что степень поляризации очень велика (больше 50%) и практически не зависит от длины волны, направление поляризации одинаково во всех спектральных полосах. Такие поляризационные свойства присущи однородному синхротронному источнику.

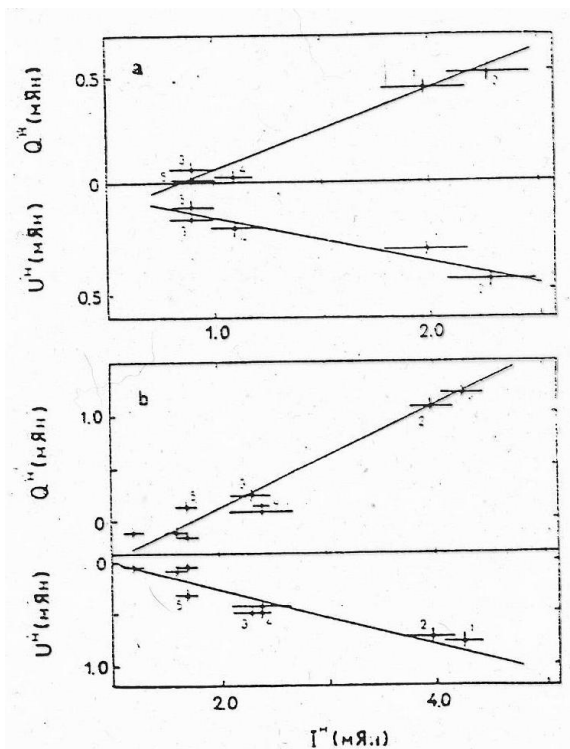


Рис. 49. 3C 345: сопоставление абсолютных параметров Стокса по результатам многоцветного мониторинга в феврале – июле 1983 г.

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА				
Полоса	p_x^{δ} (%)	p_y^{δ} (%)	p^{δ} (%)	θ_0^{δ} (°)
U	37.4 ± 4.0	20.9 ± 3.3	42.9 ± 4.0	15 ± 3
B	43.1 4.6	24.2 3.6	49.3 4.6	15 3
V	47.2 4.5	25.7 4.0	53.4 4.5	14 2
R	47.8 3.2	27.2 4.2	55.0 4.2	15 2
I	46.8 ± 4.6	26.7 ± 3.7	53.8 ± 4.6	15 ± 2

Отождествление эмиссионных линий в спектре квазара 3C 273 (а вскоре и других) привело к обнаружению объектов с беспрецедентно большими красными смещениями и получающимися в результате гигантскими светимостями. Астрономы столкнулись с необходимостью объяснить природу этих объектов. Сразу было предложено множество моделей, поскольку каждый теоретик считал своим долгом выдвинуть модель (моделей оказалось даже больше, чем теоретиков, поскольку некоторые предлагали не одну модель). Необходимо было объяснить не только энергетику, но и наблюдаемую оптическую переменность.

Модели в основном можно было отнести к двум группам: компактное звездное скопление, в котором происходят столкновения звезд (вызывающие, например, цепочку взрывов сверхновых); единое тело, которое может быть либо сверхзвездой, – гигантской магнитно-плазменной конфигурацией (для которой было придумано название «магнитоид»), поддерживаемой в равновесии вращением и магнитным полем, либо черной дырой, вокруг которой разворачиваются события.

В модели единого тела можно ожидать наличия периодичности в изменениях блеска, например, если вспышка вызвана «горячим пятном», время жизни которого больше периода вращения, в модели звездного скопления столкновения звезд происходят случайно, и периодичности быть не должно. В частности, это обстоятельство

спровоцировало большое число работ по мониторингу квазаров и построению их исторических кривых блеска по данным стеклянных библиотек. Выяснилось, что имеются изменения с разными характерными временами. Для примера на рисунках 50 и 51 приведены кривые блеска двух квазаров.

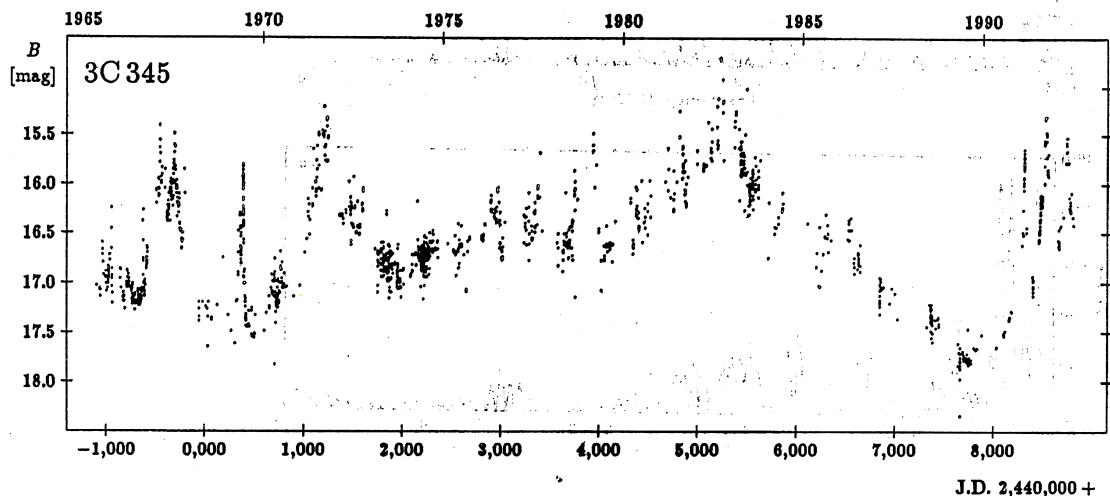


Рис.50. Результаты мониторинга квазара 3С345.

На рис.50 видны плавные изменения с большим характерным временем переменности, плавные изменения с промежуточным характерным временем и очень быстрые изменения (вспышки). Последние представляют особый интерес, поскольку, как уже говорилось ранее, скорость переменности позволяет оценить размер объекта. На исторической кривой блеска OJ287 (Рис.51) приведены определенные по пластинкам, полученным до 1972 года,

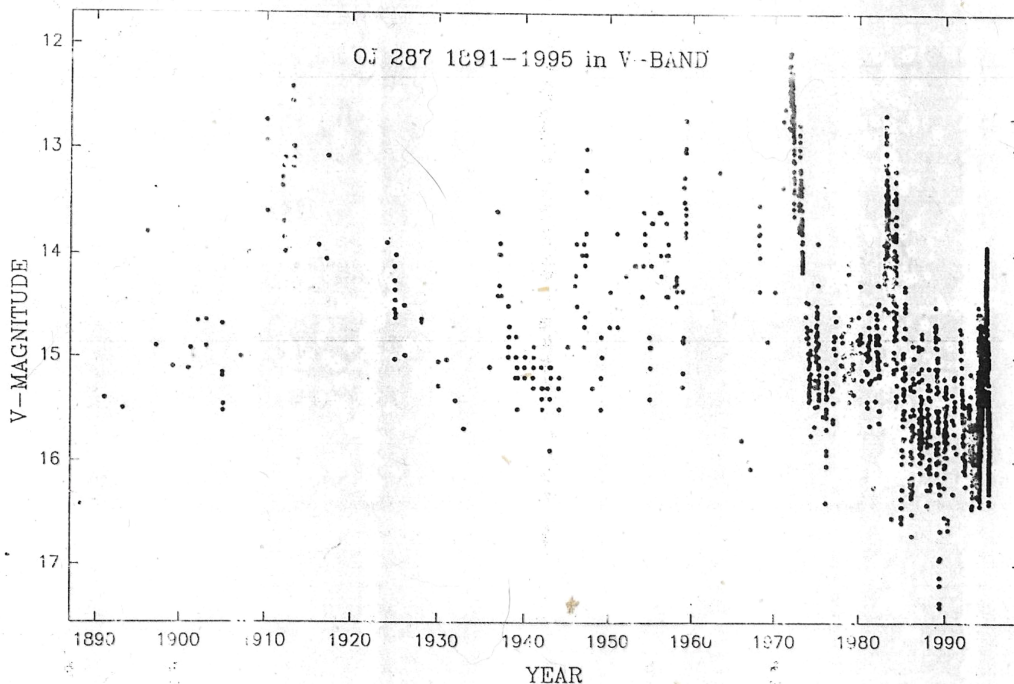


Рис. 51. Историческая кривая блеска квазара OJ 287.

оценки блеска и далее (после обнаруженной вспышки) результаты интенсивной фотоэлектрической фотометрии.

Как уже говорилось, после 1963 года появилось много статей, в которых сообщались результаты мониторинга квазаров и поиска периодичности в изменениях их блеска. Однако надежных результатов существования периодических изменений долгое время получить не удалось. Иногда для одного и того же объекта разные наблюдатели получали противоречивые результаты. Наиболее надежное определение наличия периодичности было сделано в 1986 году финскими астрономами для квазара OJ 287. Они

построили историческую кривую блеска, приведенную на рис.51, и заметили, что промежуток между вспышками равен примерно 11.5 годам. Более точное определение дало 11.65 года. Было предсказано, что следующая вспышка объекта произойдет в 1994 году. Наблюдения в рамках предложенного ими международного проекта OJ-94 подтвердило их предсказание. Это отчетливо видно на рис. 51. Правда, ожидавшаяся в 2005 -2006 годах вспышка не наблюдалась.

Одним из наиболее исследованных квазаров является объект BL Lac. На рис.52 приведены результаты фотометрического и поляризационного мониторинга BL Lac, проведенного в Санкт-Петербургском университете, позволившие провести поиски периодичности в изменениях не только блеска, но параметров поляризации.

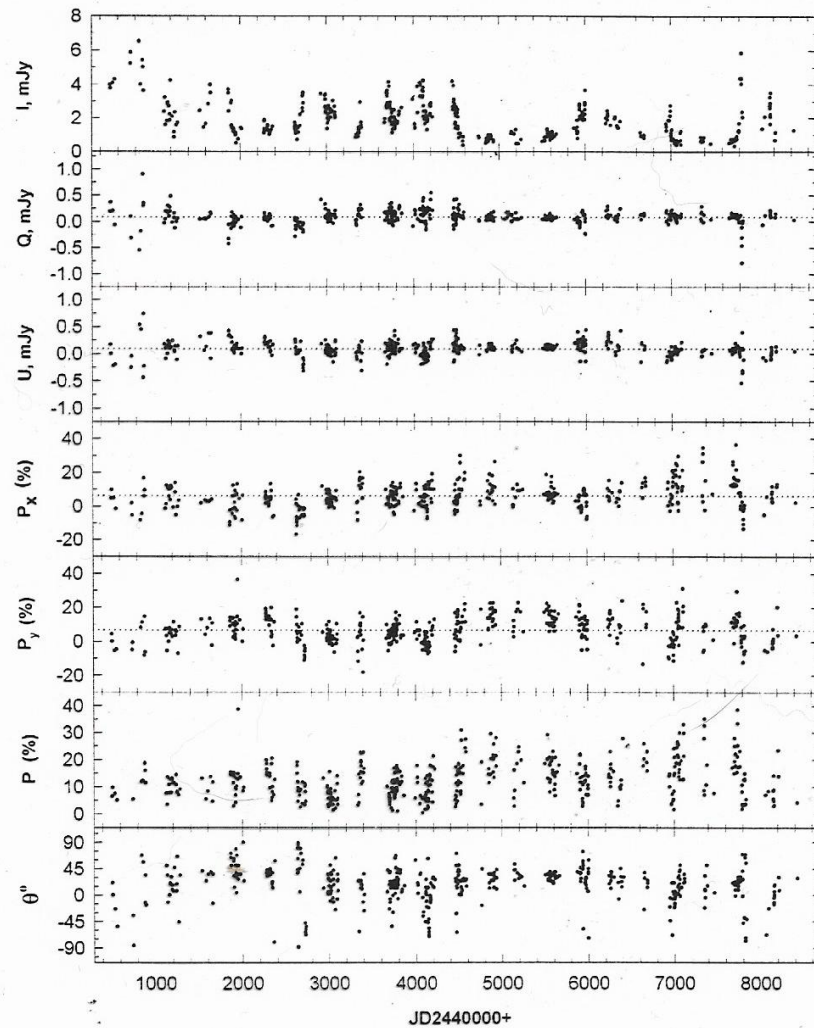


Рис. 52. Результаты фотометрического и поляризационного мониторинга BL Lac.

Использовался метод Диминга, разработанный для случая неравномерно распределенных данных. Как известно, в случае равномерно распределенных по времени данных в спектре мощности наблюдается максимум на частоте, соответствующей периоду. В случае неравномерно распределенных данных в спектре мощности помимо основного появляются «ложные» максимумы, затрудняющие интерпретацию. Для их идентификации строится функция, называемая «спектральным окном», дающая максимумы на частотах, отвечающих временам получения наблюдательных данных. Частоты ложных максимумов в спектре мощности равны сумме и разности частот главного максимума и максимумов спектрального окна.

Рис. 53 иллюстрирует обнаружение периодического компонента в излучении BL Lac. На Рис, 53(3) приведены спектры мощности и спектральное окно для второй половины рядов (1980-1991 годы). В спектре для интенсивности (верхняя полоса) виден

выдающийся максимум на частоте $\nu = 0.00325$, соответствующей периоду 308.6 дня. Два следующих по высоте максимума – ложные: их частоты равны сумме и разности частот главного максимума и спектрального окна. В спектре для q (то-есть p_x) наиболее выдающийся максимум расположен на той же частоте, что и в спектре для интенсивности. Для подтверждения того, что максимумы не связаны с распределением наблюдений по времени были образованы ряды, в которых данные об I и q были случайным образом перемешаны, и для этих рядов были рассчитаны спектры мощности. Результаты приведены на Рис. 53(4), где спектры мощности даны сплошными линиями, а найденные для исходных рядов штриховыми. Подчеркнем, что фотометрические и поляризационные

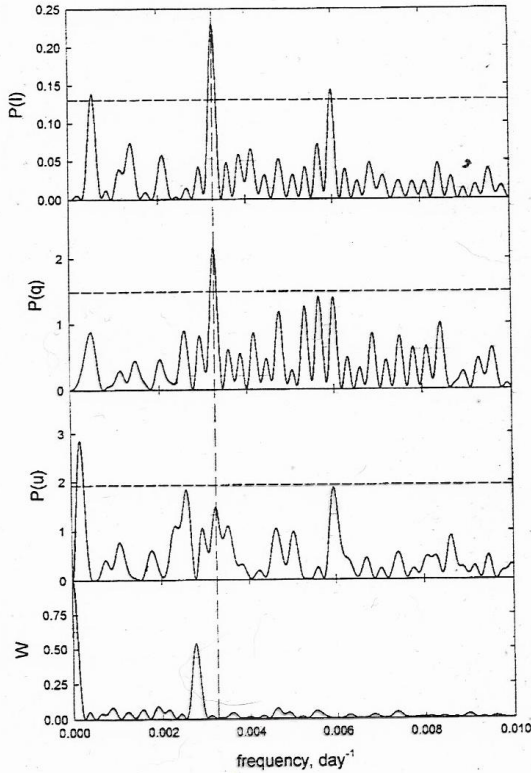


FIG. 3.—Power spectra and spectral window for the photometric and polarimetric data from 1980 to 1991; the horizontal dashed lines in the power spectra represent a significance level $\alpha = 0.05$; the vertical dashed line corresponds to the frequency $\nu = 0.00325$ mentioned in the text.

spectrum of the u -set has no prominent maximum at this frequency, although a moderate local maximum does exist. The exact coincidence of the maxima in two completely independent sets (I and q) point to the reality of the periodicity found.

To verify that the maxima are not related to the temporal spacing of the observations, we have constructed a number of simulated data sets. Each simulated series has the same temporal spacing, fluxes, and Stokes parameters as the observed data, but the values of flux and the q and u parameters are randomly mixed. We analyzed the simulated sets for a periodicity in the same manner as the actual data. None of the simulated data sets shows a significant maximum in its power spectrum. The results for five simulated sets are shown in Figures 4a and 4b for flux density and q , respectively. This supports the reality of the period $P = 308$ days found in the optical behavior of BL Lac during the time interval from 1980 to 1991.

Figures 5a–5c give the dependencies of flux and relative Stokes parameters on phase for the period $P = 308$ days (the initial phase being the same in all cases). The systematic behavior and evident correlation are well seen in Figures 5a

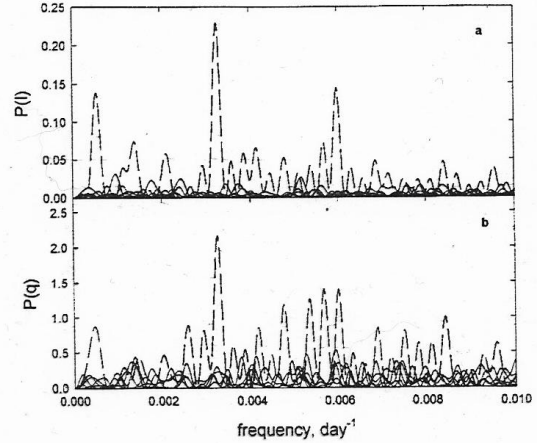


FIG. 4.—Comparison of the observed power spectrum (dashed line) with those for five simulated data sets (solid lines); (a) flux density, (b) q -parameter.

and 5b. The swing in flux density is more than 3 mJy and in q -parameter is about 10%. In Figure 5c the systematic behavior is apparent only if one knows about this in advance.

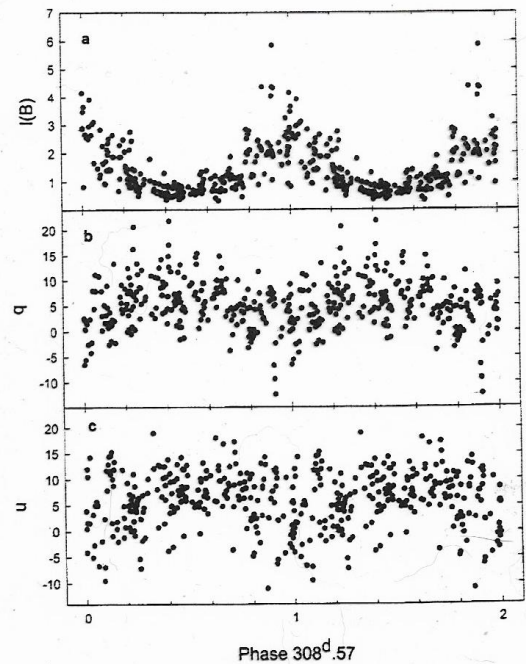


FIG. 5.—Variations with phase for a period $P = 308$ days; (a) flux density (b) q -parameter (c) u -parameter

Рис. 53. Выделение периодического компонента в излучении BL Lac.

ряды совершенно независимы (они были получены на разных телескопах, в разные моменты времени). Это подтверждает реальность полученного периода $P = 308.6$ дней. На Рис.53(5) приведены зависимости интенсивности и параметров поляризации от фазы для периода 308.6 дня. На дух верхних полосах систематический ход хорошо виден, для полосы u его тоже можно заметить.

Важно, что для первой половины ряда (1968-1979 гг.) никаких следов периодичности не обнаруживается. Это означает, что **наличие периодичности – это преходящее явление**. На некоторых временных интервалах периодичность может присутствовать, на некоторых ее может не быть. Видимо этим объясняются противоречивые результаты поисков периодичности, полученные разными авторами в разные промежутки времени. Отметим еще, что к моменту появления этой работы (2002 год) поляриметрические ряды на поиски периодичности не исследовались.

Разумеется, фотометрический и поляризационный мониторинг позволяет решить целый ряд задач (а не только выявить наличие периодичности). Еще одна задача – вылавливание вспышек объекта и определение скорости переменности. Как уже говорилось ранее, скорость переменности позволяет оценить размер источника. Результаты одного из первых специально поставленных исследований с целью определения максимальной скорости переменности приведены на рис. 54. Около 0 часов блеск объекта увеличился на

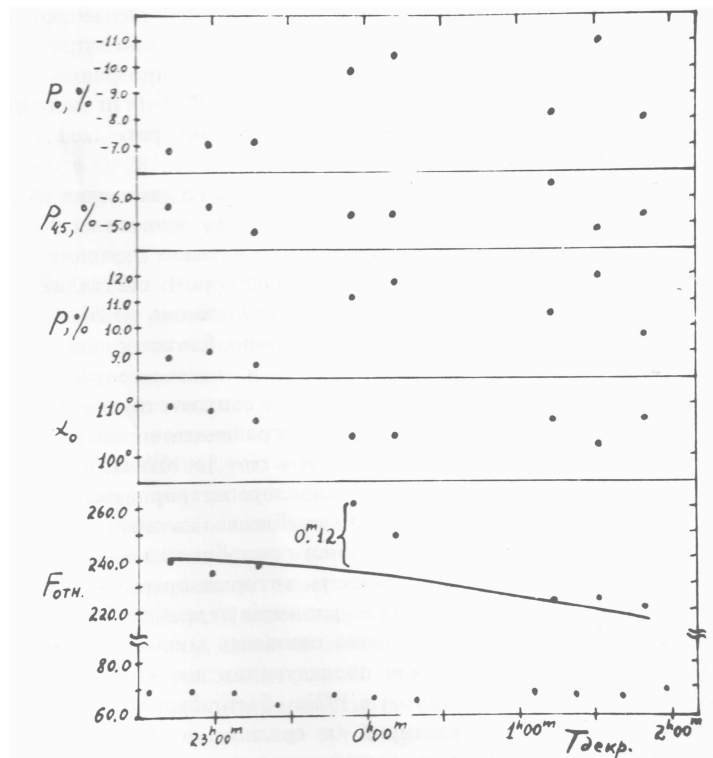


Рис. 54. Быстрая переменность OJ 287 в марте 1972 года.

$0.^m12$, что в 5 раз больше, чем ошибка наблюдений. Одновременно увеличилась степень поляризации. Скорость переменности указала на то, что размер объекта меньше орбиты Сатурна. Впоследствии быстрая переменность наблюдалась у многих объектов. В качестве примера на рис. 55 приведены данные для вспышки объекта AO 0235+164 в декабре 2006 года. Как и в случае OJ 287 сверхбыстрая переменность зафиксирована как в блеске, так и в параметрах поляризации.

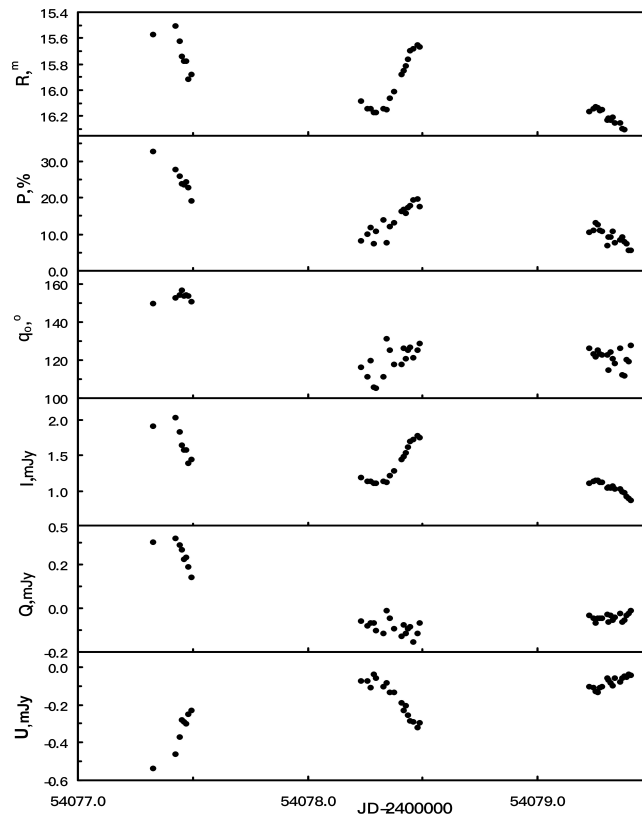


Рис. 55. Вспышка АО 0235+164 в декабре 2006 года.

Данные, аналогичные приведенным на рис. 52, позволяют изучить корреляции между изменениями блеска и параметров поляризации на разных временных шкалах. Одной из первых работ (1981 г.) была работа, основанная на результатах наблюдений OJ 287 во вспышке 1972 года и последовавшем за ней падении блеска). Зависимости между блеском и параметрами поляризации представлены на рисунках 56-58. Видно, что у объекта определенно имеется преимущественное направление поляризации (Рис. 56), Более 90% наблюдений дают направление поляризации в интервале углов от 35° до 135° . Среднее значение угла составляет 81° . Видно, что высокие значения степени поляризации имеются лишь вблизи преимущественного направления. Зависимость степени поляризации от

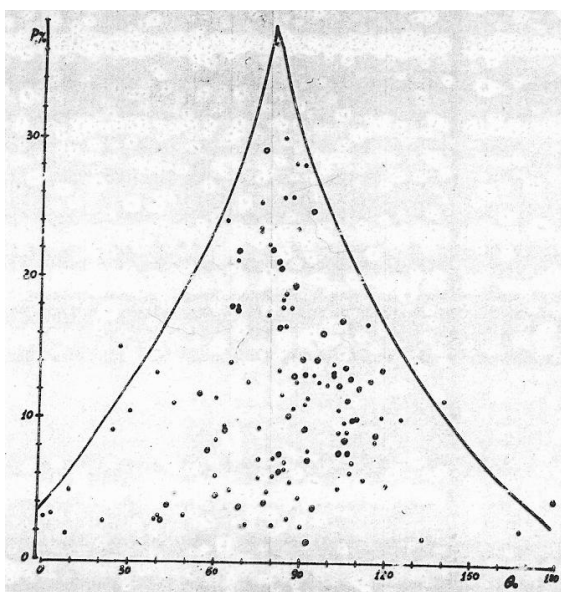


Рис.56. OJ287: зависимость между степенью поляризации и ее направлением.

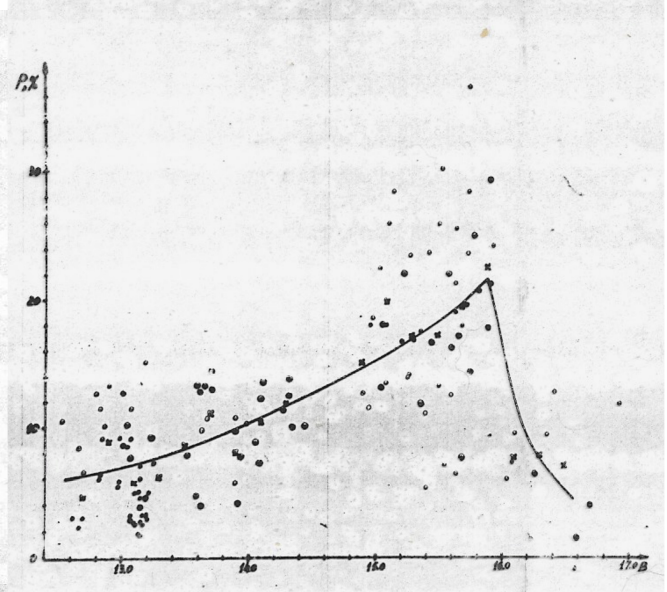


Рис. 57. OJ287: зависимость между блеском и степенью поляризации.

блеска представлена на рис. 57. Видно, что с увеличением блеска степень поляризации уменьшается. Кривая проведена через средние значения степени поляризации на отрезках в 0.2^m . Такое поведение было объяснено тем, что у объекта имеется постоянно действующий источник поляризованного излучения, на который накладывается излучение переменных источников с хаотически распределенными направлениями поляризации. Это подтверждается и зависимостью направления поляризации от блеска (Рис.58). Видно, что при больших значениях потока появляются значения направлений поляризации сильно отличающиеся от преимущественного.

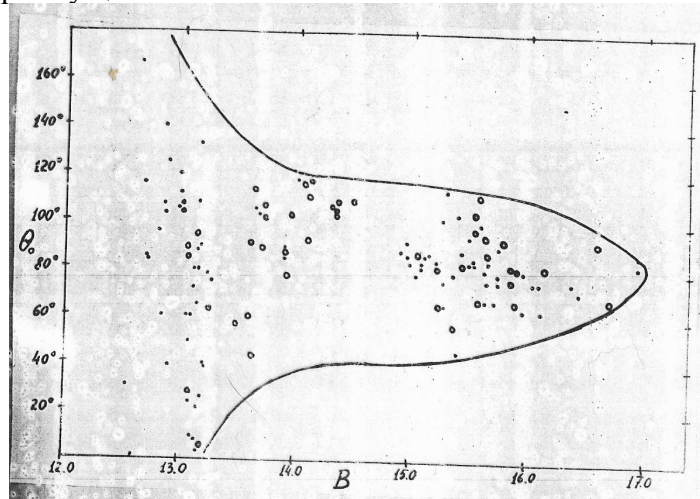


Рис. 58 . OJ287: Зависимость между направлением поляризации и блеском.

Предложенная в 1981 году модель с постоянно действующим источником поляризованного излучения и наложенными на него поляризованными источниками с хаотически распределенными направлениями поляризации получила подтверждение при анализе данных для BLLac, приведенных на рис.52. На рис.59 дается зависимость степени поляризации от блеска. Видно, что степень поляризации уменьшается с увеличением блеска. Картина такая же, как на рис.57.

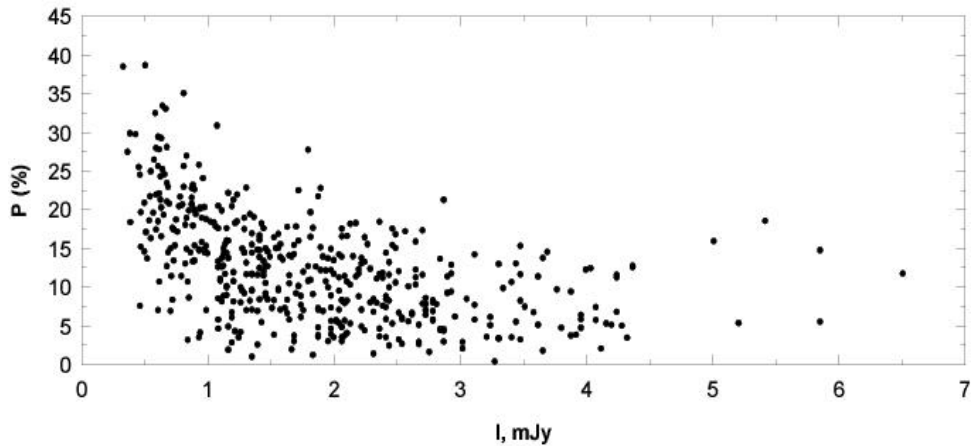


Рис. 59. BLLac: зависимость степени поляризации от потока.

На рис.60 дается зависимость степени поляризации от направления. Картина опять такая же, как на рис.56. Высокие степени поляризации имеются лишь вблизи от значения направления около 28^0 , которое определяет преимущественное направления поляризации. Гистограмма, дающая распределение направлений поляризации, приведена на рис. 61(a). В модели, предложенной по наблюдениям OJ 287, говорилось о хаотическом распределении направлений поляризации переменных источников. В случае BL Lac это обстоятельство можно проверить, рассмотрев зависимость между относительными

параметрами Стокса. На рис.62, дающем эту зависимость, видно, что распределение точек случайно. Это подтверждается гистограммами, приведенными на рис. 61(в и с). Наконец,

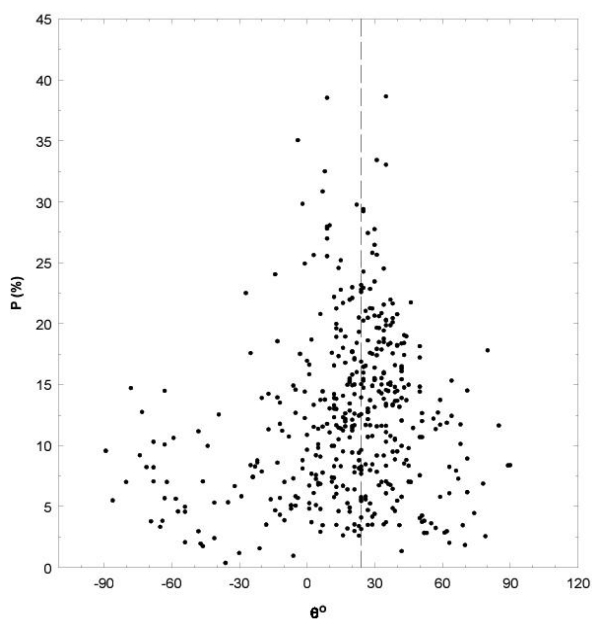


Рис. 60. BL Lac: зависимость между степенью поляризации и ее направлением.

рассмотрение зависимости направлений поляризации от потока, приведенное на рис. 63, показывает, что при малых потоках (меньше 1 мЯн) разброс в значении направлений мал и увеличивается с ростом потока. Картина такая же, как на рисунке 58.

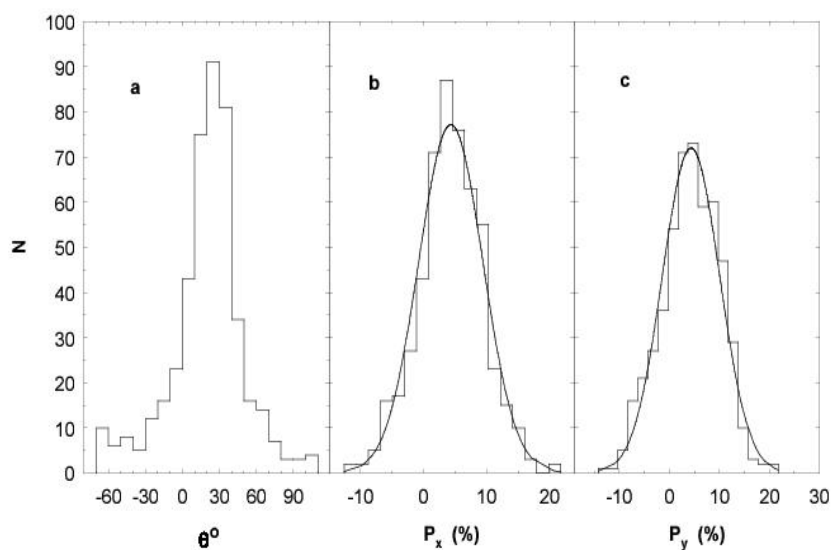


Рис. 61. BL Lac: распределение направлений поляризации и относительных параметров Стокса.

Вся совокупность результатов наблюдений BL Lac качественно укладывается в рамки модели с постоянным источником поляризованного излучения, на который накладываются переменные поляризованные источники со случайным распределением направлений поляризации. Но хотелось бы получить ее количественное подтверждение и оценку числа переменных источников и их характеристики. Относительно постоянного компонента сразу можно сказать, что его поток должен быть меньше минимального наблюдаемого потока, степень поляризации высока, чтобы обеспечить высокую наблюдаемую степень поляризации при малых наблюдаемых потоках, а направление близко к преимущественному.

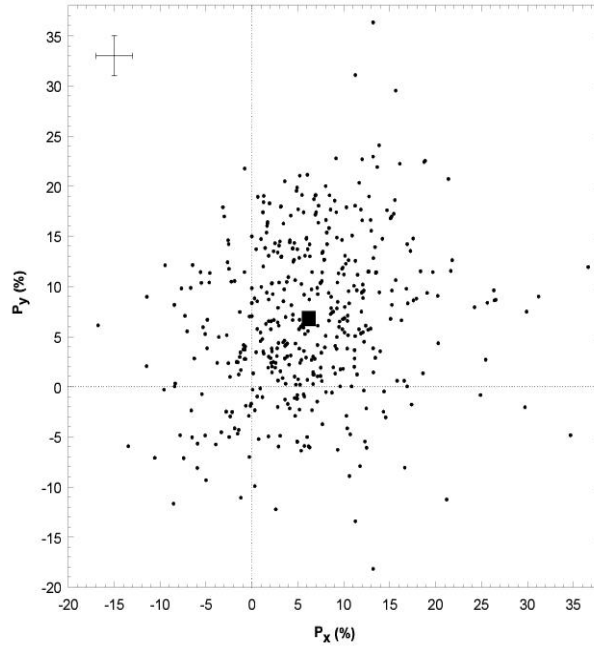


Рис.62. BL Lac: зависимость между относительными параметрами Стокса

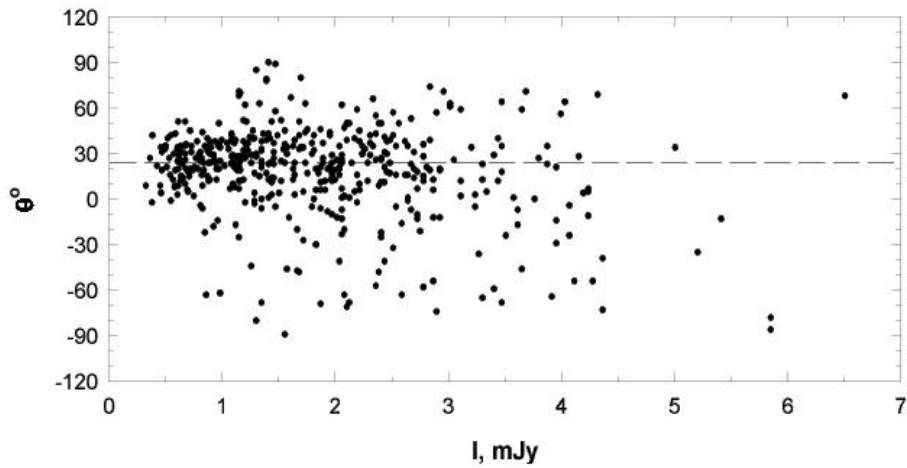


Рис. 63. BL Lac: связь между направлениями поляризации и потоком.

Количественное подтверждение приемлемости модели может быть получено в результате моделирования полученных зависимостей. При моделировании используется метод Монте Карло с использованием 7 свободных параметров: число переменных источников n , параметры постоянного компонента I^c , p_x^c , p_y^c и параметры переменного компонента I_i^v , p_{xi}^v , p_{yi}^v . Все параметры переменных источников являются случайными нормально-распределенными величинами с математическим ожиданием M и дисперсией σ^2 . Ввиду аддитивности абсолютных параметров Стокса I, Q, U , суперпозиция источников в каждый момент времени будет давать следующие параметры:

$$I_{mod} = I^c + \sum_{i=1}^n I_i^v, \quad (1)$$

$$Q_{mod} = p_x^c I^c + \sum_{i=1}^n p_{xi}^v I_i^v, \quad (2)$$

$$U_{mod} = p_y^c I^c + \sum_{i=1}^n p_{yi}^v I_i^v, \quad (3)$$

$$p_{xmod} = \frac{p_x^c I^c + \sum_{i=1}^n p_{xi}^v I_i^v}{I^c + \sum_{i=1}^n I_i^v}, \quad (4)$$

$$p_{ymod} = \frac{p_y^c I^c + \sum_{i=1}^n p_{yi}^v I_i^v}{I^c + \sum_{i=1}^n I_i^v}, \quad (5)$$

$$p_{mod} = \sqrt{p_{xmod}^2 + p_{ymod}^2}, \quad (6)$$

$$\theta_{mod} = 0.5 \arctan \left(\frac{p_{ymod}}{p_{xmod}} \right). \quad (7)$$

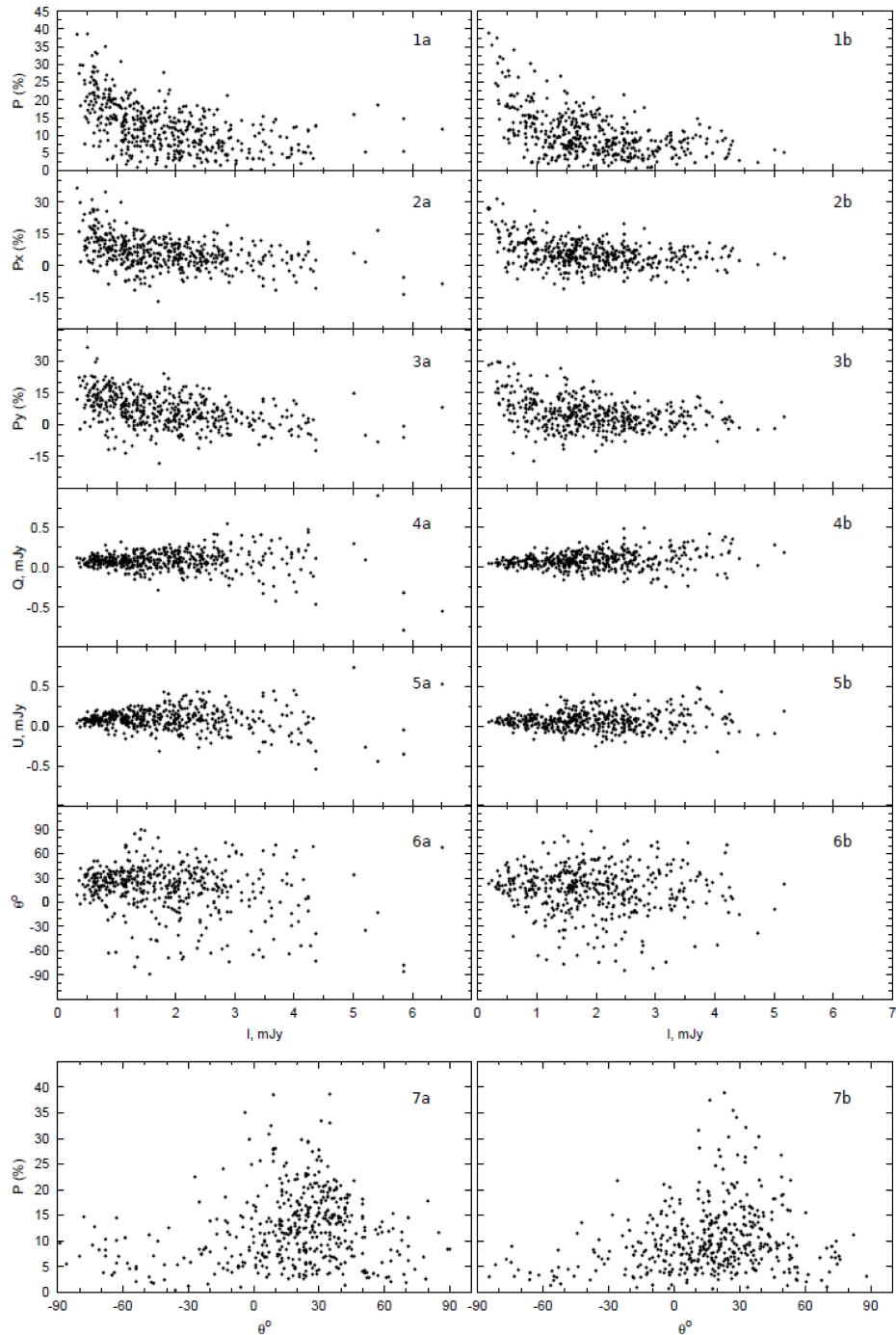


Рис. 64. BL Lac: сопоставление моделированных зависимостей с наблюдаемыми.

Детали моделирования описаны в статьях Д.И.Блинова (см., например, АЖ, т.88, с.1169, 2011), который создал для их реализации сложную программу. Результаты моделирования для BL Lac показаны на рис. 64. В левом столбце представлены наблюдаемые зависимости, в правом – смоделированные. Согласие между данными столбцов превосходное. Это позволяет найти наиболее вероятные значения искомым параметров.

Метод оказался полезным и при анализе фотометрических и поляризационных данных других квазаров и объектов типа BL Lac (лацертид). Отличительной чертой лацертид является отсутствие (или крайняя слабость) эмиссионных линий в их спектрах при высокой оптической активности. Среди квазаров есть относительно спокойные, за которыми сейчас закрепилось название «квазар». Наиболее активные квазары и лацертиды объединены в группу объектов, называемую «блазары». Это название мы будем использовать в дальнейшем.

При выяснении природы переменных источников в первую очередь необходимо определить распределение энергии в их спектрах. Описанный ранее метод с переходом от звездных величин к потокам и рассмотрением поведения объекта в пространстве потоков дает возможность определить относительное распределение энергии в спектре переменного компонента, ответственного за активность объекта. Приведем несколько примеров удачного применения этого метода.

На рис. 65 даются диаграммы «поток-поток» для вспышки OJ 287 в 1983-84 годах. Используются данные пятицветной U, B, V, R, I фотометрии. Видно, что точки практически идеально располагаются на прямых линиях, что говорит о неизменности относительного распределения энергии переменного компонента. Угловые коэффициенты прямых дают относительное распределение энергии в его спектре в оптической области. В логарифмическом масштабе оно представлено на врезке.

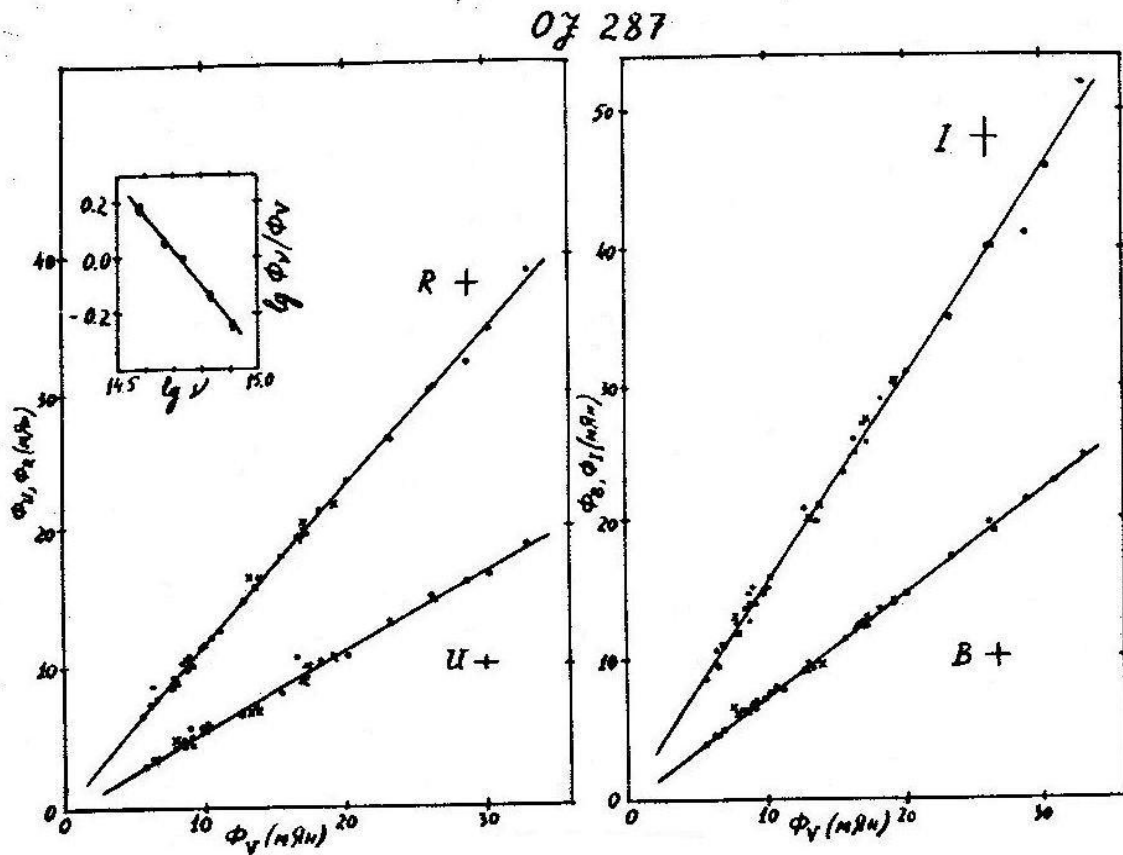


Рис. 65. OJ287: диаграммы «поток-поток» и спектр переменного компонента в оптической области.

Аналогично сопоставление потоков в ИК полосах позволило получить распределение энергии в ИК области, а диаграмма «поток-поток» для одной из полос в оптике и одной из полос в ИК позволило сшить спектры. Были найдены квазиодновременные наблюдения в заатмосферном УФ, и спектр удалось продлить в область более высоких частот. Полученный спектр представлен на рис.66 (точки, указаны ошибки). Сплошная линия дает рассчитанный по формулам рисунка 38 спектр однородного синхротронного источника. Видно, что достигается область высокочастотного завала.

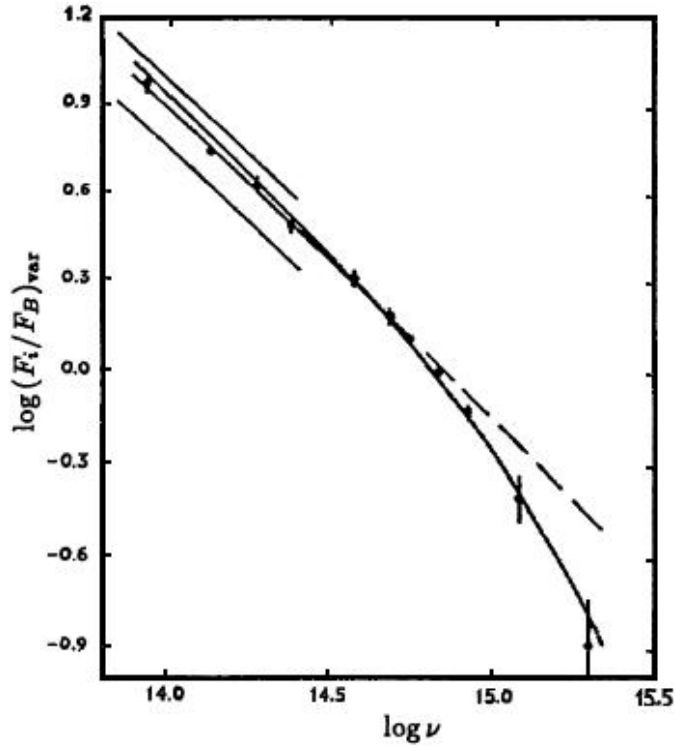


Рис. 66. OJ287: спектр переменного компонента в 1983-84 годах и его представление спектром однородного синхротронного источника.

В ходе выполнения проекта OJ-94 были проведены обширные многоцветные наблюдения. Их анализ позволил определить относительное распределение энергии в спектре переменного компонента во вспышке 1994 года. Оно представлено на рис. 67. Видно различие в спектрах двух вспышек. В 1994 году нет высокочастотного завала, зато видно отклонение от прямолинейности в ИК области, о котором говорилось при описании синхротронного спектра. Спектральные индексы источников различны ($\alpha = -1.3$ в 1983 г. и $\alpha = -1.5$ в 1994г.). В более сильной вспышке 1983-1984 года спектр был более жестким.

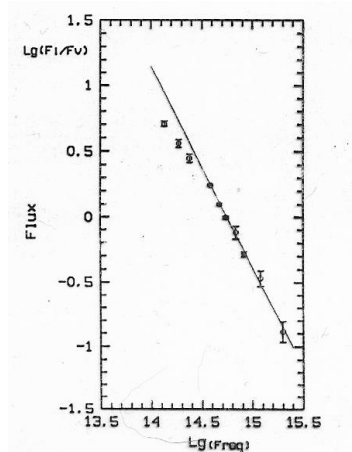


Рис. 67. OJ 287: спектр переменного источника во вспышке 1994 года.

Ранее мы приводили результаты определения параметров поляризации переменного компонента во вспышке квазара 3C 345 в 1983 году. Многоцветные наблюдения позволили найти относительное распределение энергии в его спектре. Оно дано на Рис. 68 (точки). Сплошные линии – спектры однородных синхротронных источников, рассчитанные для разных значений критической частоты. Напомним, что она зависит от двух параметров: напряженности магнитного поля и максимальной энергии в распределении электронов по энергиям. Если одну из этих величин удастся найти из независимых наблюдений, то вторая определяется по величине критической частоты. Пунктир – линейная экстраполяция ИК спектра на оптическую область. Уклонение от нее свидетельствует о близости высокочастотного завала.

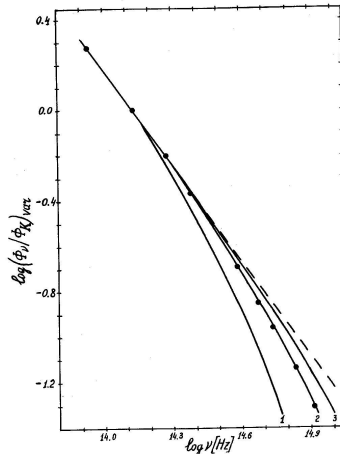


Рис. 68. 3C 345: относительное распределение энергии в спектре переменного источника в 1983 году.

В качестве еще одного примера рассмотрим поведение блазара S5 0716+174 в 2001-2004 годах. На рис.69 даются результаты его многоцветных наблюдений.

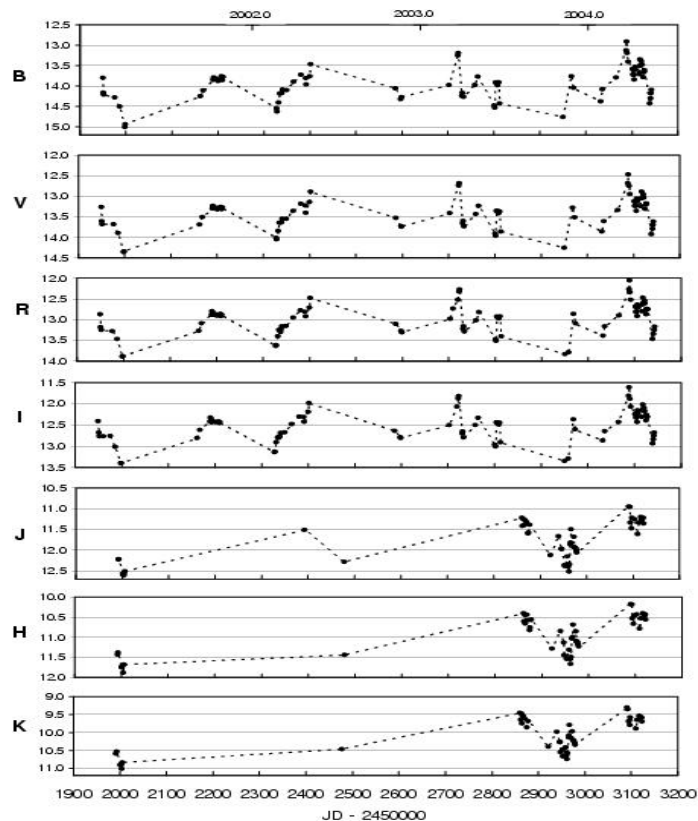


Рис. 69. S5 0716+174: результаты многоцветных наблюдений в 2001-2004 годах.

Результаты анализа цветовой переменности иллюстрирует Рис. 70, на котором даются диаграммы «поток-поток» для оптической (слева) и ИК (справа) областей спектра. Точки хорошо лежат на прямых линиях, что позволяет заключить, что в 2001- 2004 гг. относительное распределение энергии в спектре переменного источника оставалось неизменным и в оптической, и в ближней ИК областях спектра. На Рис.71 даются

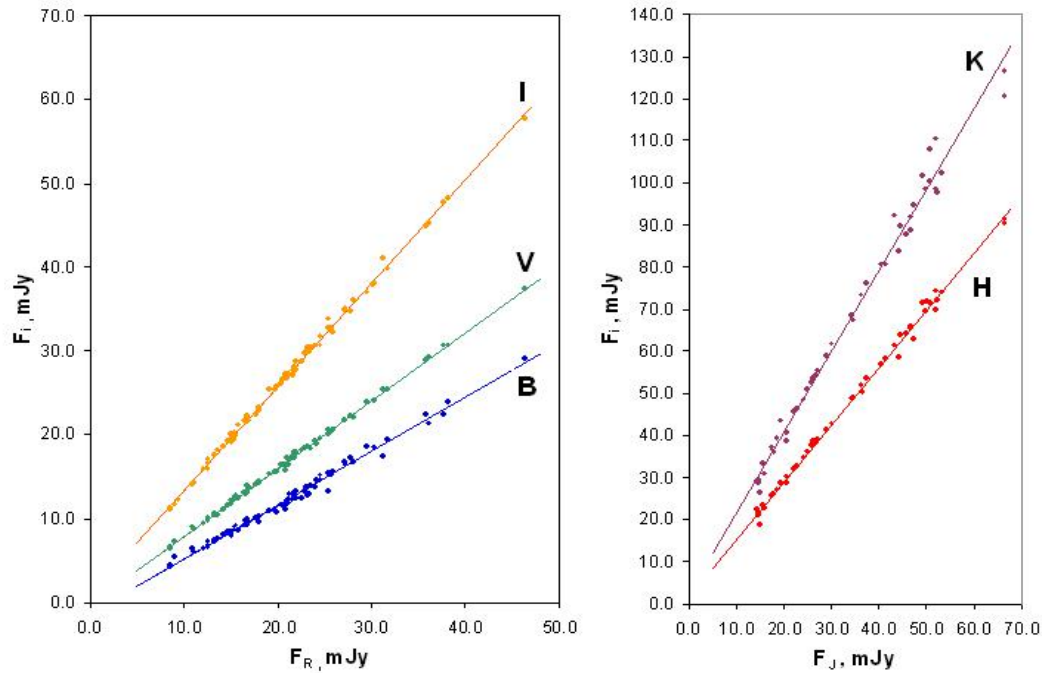


Рис. 70. Диаграммы «поток-поток» для блазара S5 0716+714 (2001-2004 гг.)

полученные спектры. Они прекрасно сшиваются без скачка и излома, откуда следует, что в оптическом и ближнем ИК диапазонах действует один и тот же переменный источник. Сшитый спектр прекрасно представляется степенным законом $F_\nu \sim \nu^{-1.12}$. Степенной характер спектра и обычно наблюдаемая у S5 0716+714 высокая и быстро меняющаяся поляризация не оставляют сомнения в том, что источник, ответственный за переменность S5 0716+714 в 2001–2004 гг., имеет синхротронную природу.

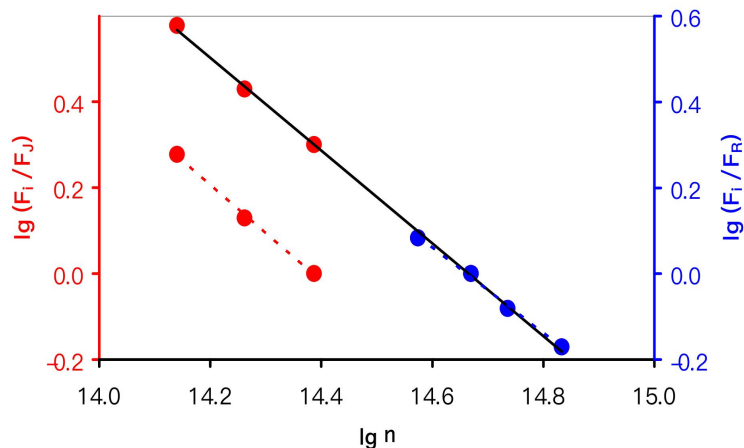


Рис. 71. S5 0716+714: спектры в оптической и ИК областях и сшитый спектр.

Почти во всех фотометрических работах отмечается зависимость *наблюдаемого* цвета объекта от его блеска и эта зависимость часто приписывается изменению цвета активного компонента при изменении его блеска. Корректное определение цветовых характеристик переменного объекта с помощью вышеописанной методики показывает, что, по большей

части, цвет переменного компонента остается постоянным, а наблюдаемая зависимость цвета от блеска связана с тем, что наблюдается суммарное излучение постоянного и переменного компонентов. Если цветовые характеристики постоянного и переменного компонентов различны, то в суммарном излучении с изменением блеска будет наблюдаться изменение цвета. Причем обе ситуации «чем ярче, тем краснее» и «чем ярче, тем голубее» могут осуществляться. Приведем примеры. На Рис.72 значки + и ▲ дают *наблюдаемые* распределения энергии в спектре блазара Q 1633 в минимуме и максимуме блеска, соответственно (левая шкала ординат). Видно, что с ростом блеска блазар краснеет. Значком × нанесен спектр выделенного переменного источника (правая шкала ординат). Видно, что распределения энергии в максимуме и у переменного источника практически одинаковы, что не удивительно, поскольку в максимуме основной вклад в наблюдаемое излучение дает переменный источник. На Рис. 73 спектр в максимуме блеска более голубой, чем у постоянного источника и близкого к нему спектра в минимуме. Спектр в максимуме, как и в предыдущем случае, не отличается от спектра переменного источника, дающего основной вклад в наблюдаемое излучение..

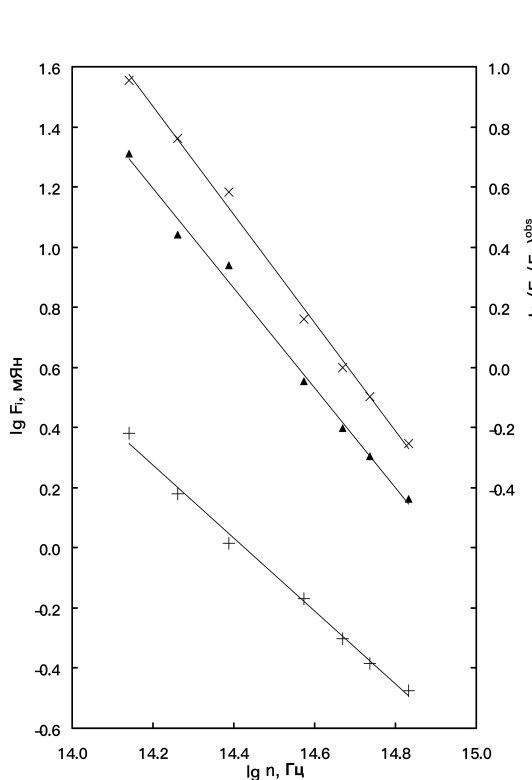


Рис. 72. Q 1633: «чем ярче, тем краснее»

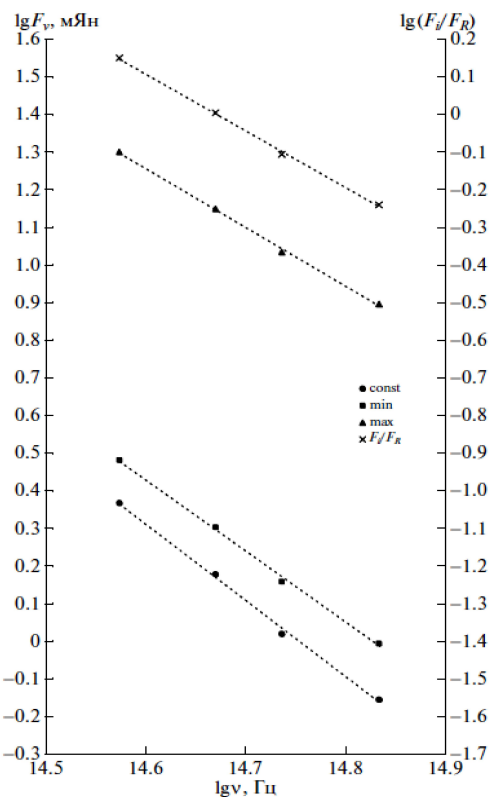


Рис. 73. OJ 287: «чем ярче, тем голубее»

Степенной характер спектра – сильный аргумент в пользу синхротронной природы переменного компонента. Второй аргумент – наличие высокой степени поляризации его излучения. Ранее мы приводили два примера определения параметров поляризации переменного компонента (Рис.48 и Рис.49). Теперь приведем еще один пример, показывающий, в частности, что изменения параметров поляризации переменного компонента могут быть очень быстрыми. Используем данные для блазара АО 0235+164, приведенные на Рис. 55 для трех последовательных ночей во вспышке в декабре 2006 года. Зависимости между абсолютными параметрами Стокса представлены на Рис. 74. Параметры поляризации переменного источника оказались равными: а) $p = 50\%$, $\theta_0 = -30^\circ$, б) $p = 36.7\%$, $\theta_0 = -50^\circ$, с) $p = 33.1\%$, $\theta_0 = -54^\circ$.

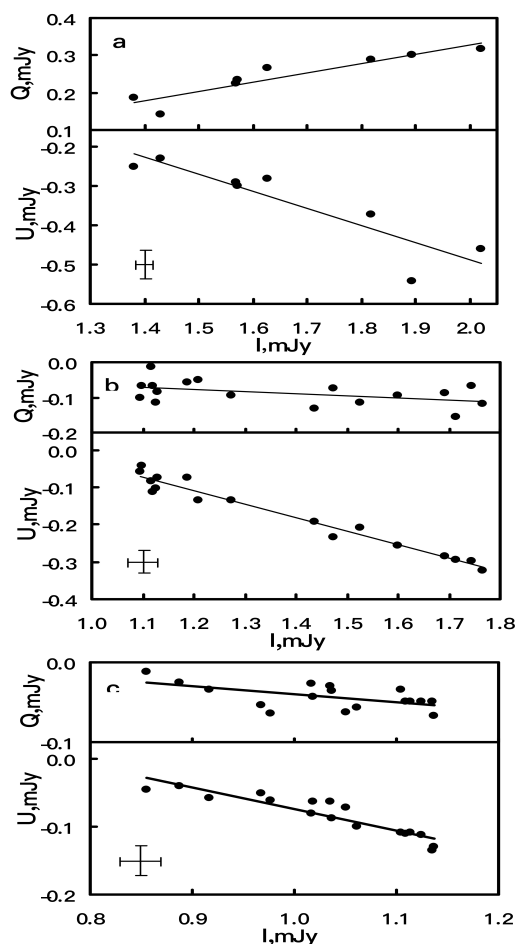


Рис. 74. АО 0235+164: зависимости между абсолютными параметрами Стокса.

Подведем итоги фотометрического и поляризационного мониторинга активных ядер галактик и блазаров.

- 1) Во многих случаях их фотометрическое поведение на разных временных шкалах и в разных спектральных интервалах может быть объяснено присутствием единственного переменного источника с изменяющимся потоком, но неизменным относительным распределением энергии в спектре. Как правило, форма спектра одна и та же с самого начала и до окончания каждого события.
- 2) Спектральное распределение энергии переменного компонента хорошо представляется спектром однородного синхротронного источника с высокочастотным завалом или без такового. Иногда на самой вершине кривой блеска во вспышке может существовать синхротронное самопоглощение.
- 3) Поляризационное поведение определяется единственным переменным источником довольно редко; но если это имеет место, то степень поляризации излучения источника может достигать 50%, указывая на его синхротронную природу.

Проявления активности в ядрах галактик многообразны. Весьма наглядно они видны по наблюдениям в радио диапазоне, где зафиксированы струйные выбросы («джеты») на килопарсековых (а иногда и мегапарсековых) масштабах. Пример гигантского джета представлен на рис. 75. На рис. 76 показан джет, заканчивающийся радиолопастью. Искривленный джет, интерпретируемый как результат вращения центрального тела, дается на рис. 77. В отдельных случаях такие джеты удается наблюдать и в оптическом диапазоне. Например, радиоисточник 3C 273 является двойным, причем один из радиокомпонентов, 3C 273В, точечный (это и есть квазар), второй, 3C273А, – джет, поток

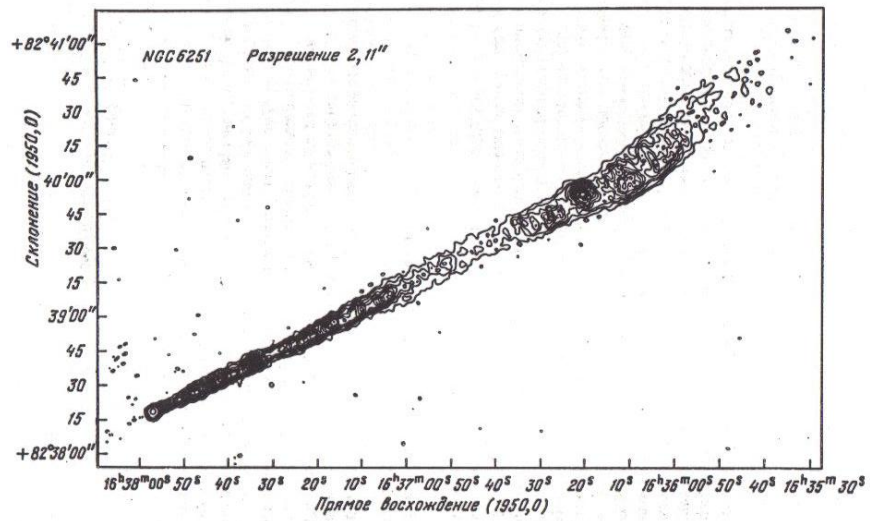


Рис.75. Гигантский джет в галактике NGC 6251.

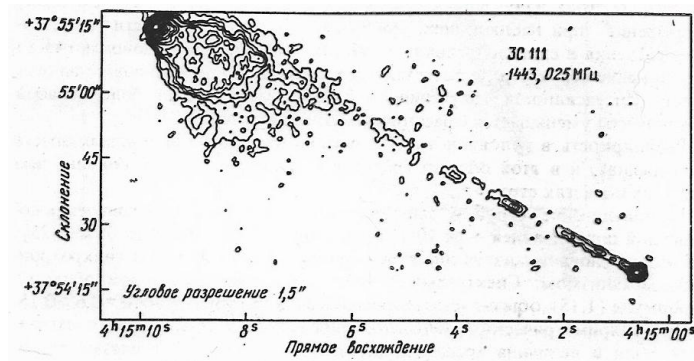


Рис. 76. Джет в радиисточнике 3C111, заканчивающийся радиолопастью.

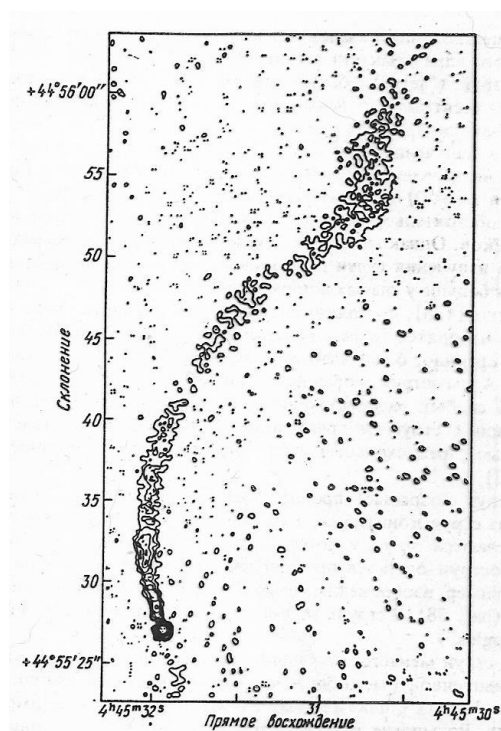


Рис. 77. Искривленный джет.

которого превышает поток от 3C273В. Поиски оптического источника в районе 3C273А показали, что там наблюдается слабый джет. Оптическое изображение области 3C 273 приведено на Рис. 78.

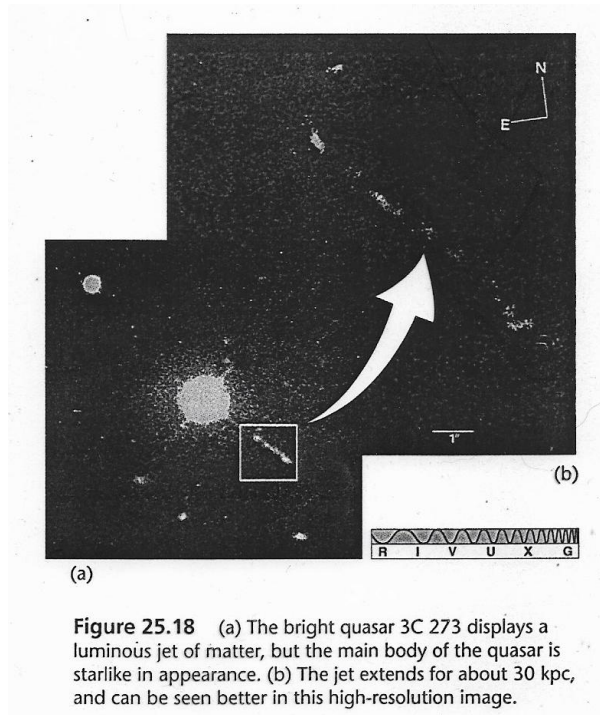


Рис. 78. Радиоисточник 3C 273. Точечный объект и оптический джет протяженностью 30 кпс.

Но основные события, связанные с активностью, разыгрываются в непосредственной близости от ядра, и оптического разрешения для установления структуры активных ядер недостаточно. Однако радиоинтерферометрические наблюдения со сверхдлинной базой (РСДБ - наблюдения) фиксируют структуру активных ядер на миллисекундных (парсековых при больших красных смещениях) масштабах.

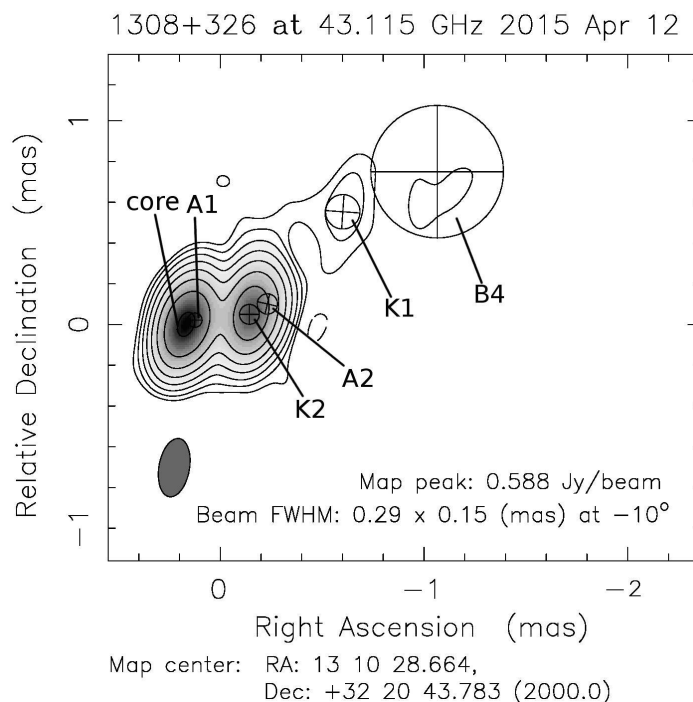


Рис. 79. В 1308+326: структура источника в миллисекундном масштабе.

Для примера на Рис. 79 представлен результат РСДБ – наблюдений блазара В 1308+326 на частоте 43 ГГц, полученных 12 апреля 2015 года. Видны отдельные детали структуры.

Повторные наблюдения источников показывают, что детали структуры меняют свое положение относительно центральной детали (ядра изображения). Отождествление деталей на последовательных изображениях позволяет заключить, что они удаляются от ядра. В качестве примера на Рис. 80 приведены результаты наблюдений блазара BL Lac.

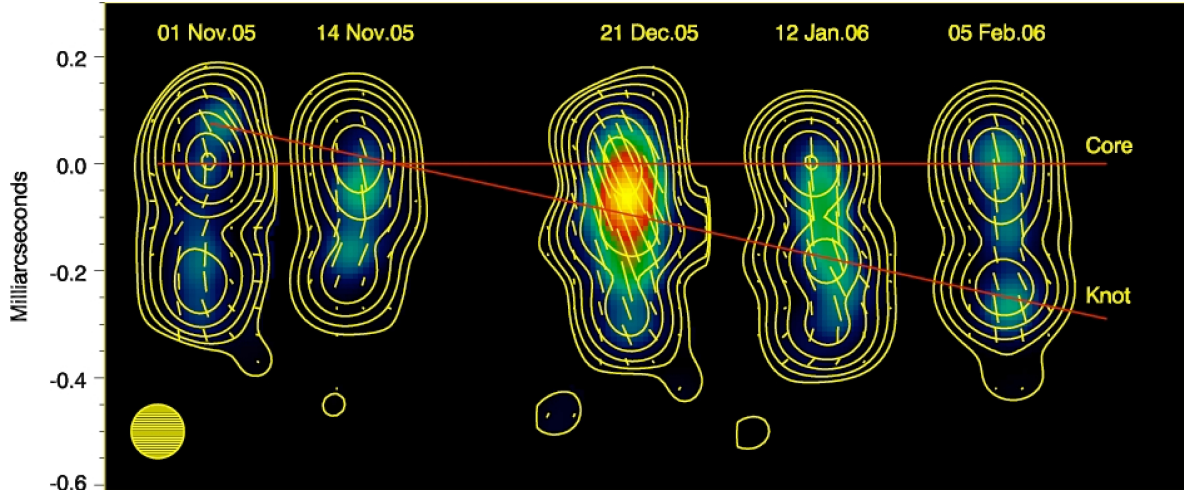


Рис.80. Изменения в структуре джета BL Lac.

Знание красного смещения (то есть расстояния до объекта) позволяет определить видимую скорость удаления. Оказалось, что она часто превышает скорость света (чего быть, конечно, не может). В первую минуту все опешили, но довольно скоро поняли, что получаемые видимые скорости на самом деле являются кажущимися (впрочем название «видимые» – «apparent» за ними сохранилось).

Из теории относительности следует, что если источник света движется к наблюдателю со скоростью, близкой к скорости света ($\beta = v/c$ близко к 1), в направлении, составляющем угол Φ с лучом зрения, то будет $\beta_{app} = \beta \sin \Phi / (1 - \beta \cos \Phi) > 1$ при Φ , близких к 0. Наблюдаемые значения β_{app} могут составлять от нескольких единиц до двух-трех десятков. Истинной скорости движения β отвечает Лоренц-фактор $\Gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$. Вводится также Доплер-фактор $\delta = 1/\Gamma(1 - \beta \cos \Phi)$, описывающий увеличение интенсивности испускаемого излучения. Если первоначальная интенсивность испускаемого ансамблем электронов синхротронного излучения ($F_\nu \sim \nu^\alpha$) равна F_0 , то интенсивность после доплеровского усиления излучения будет $F = F_0 \cdot \delta^{3+\alpha}$. Наличие доплеровского усиления позволяет объяснить оптическую переменность при неизменных характеристиках переменного компонента небольшими изменениями угла между направлением движения электронного ансамбля и лучом зрения. Доплеровское усиление возникает при движении излучающего объекта в сторону наблюдателя, при движении от наблюдателя интенсивность соответственно падает. Это может иметь отношение к вопросу о том, почему мы часто наблюдаем односторонние джеты.

Таблица. Значения Доплер-фактора.

$\beta \backslash \Phi$	0.990	0.995	0.997	0.999
1°	13.89	19.38	24.56	38.80
3°	12.48	16.69	17.73	18.87
5°	10.25	11.36	11.39	9.31
10°	5.64	4.96	4.26	2.16

Минимальное значение Лоренц-фактора, Γ_{min} , связано с β_{app} соотношением $\Gamma_{min} = \sqrt{\beta_{app}^2 + 1}$, то есть всегда $\Gamma \geq \sqrt{\beta_{app}^2 + 1}$. Таким образом, β_{app} определяет нижнюю границу допустимых значений Лоренц-фактора. Для дальнейших оценок эта нижняя граница часто используется.

Теоретическое рассмотрение показывает, что в центре активной галактики находится черная дыра. Саму черную дыру мы наблюдать не можем, однако можно наблюдать ее тень на окружающем веществе. Для одной из черных дыр в ядре галактики первые успешные наблюдения ее тени удалось получить в прошлом году. Согласно теоретическим представлениям, центральная черная дыра окружена питающим ее аккреционным диском. Замагниченный вращающийся диск является источником появления в перпендикулярном к плоскости диска направлении выброса вещества, движущегося с релятивистской скоростью и формирующего джет со спиралевидным магнитным полем. Движение релятивистских электронов в магнитном поле приводит к появлению синхротронного излучения.

Разрешение в оптике не позволяет увидеть ни аккреционного диска, ни начальных участков джета. Но РСДБ-наблюдения позволяют приблизиться к этим областям, хотя самое начало джета этим наблюдениям недоступно, поскольку вблизи диска оптическая толщина источника из-за синхротронного самопоглощения настолько велика, что он не наблюдается. По мере движения излучающего ансамбля по джету оптическая толщина уменьшается и наступает момент, когда излучение начинает выходить и радиисточник «появляется». Это то, что на РСДБ картах называется «ядром». Дальнейшее движение компонент с релятивистской скоростью в случае малых углов между лучом зрения и направлением движения вдоль джета обеспечивает кажущиеся сверхсветовые скорости.

Область между основанием джета и ядром на РСДБ картах носит название области коллимации и ускорения. Радиоизлучение из этой области не фиксируется, но оптическое (и более высокочастотное) излучение выходит беспрепятственно. Размеры этих областей можно оценить по скорости переменности. Они составляют 10-20 парсек.

Чрезвычайно важными для построения физической модели активного ядра и объяснения в рамках этой модели его поведения являются многочастотные мониторинговые наблюдения. Для получения непрерывных данных принимаются программы, в которых участвуют многие обсерватории (пример - программа WEBT (Whole Earth Blazar Telescope), по фотометрическим и поляризационным наблюдениям блазаров).



Рис. 81. Распределение по долготе обсерваторий, осуществляющих наблюдения по программе WEBT.

Регулярно объявляются кампании по наблюдениям того или иного объекта с целью детального изучения его поведения, в ходе которых проводятся многочастотные наблюдения. Приведем несколько примеров. На рис.82 слева сопоставлены результаты

наблюдений BL Lac в разных диапазонах, справа – результаты оптических наблюдений во время вспышки. Бросается в глаза быстрое и сильное изменение направления поляризации, интерпретируемое как подтверждение движения излучающего ансамбля в спиралевидном магнитном поле.

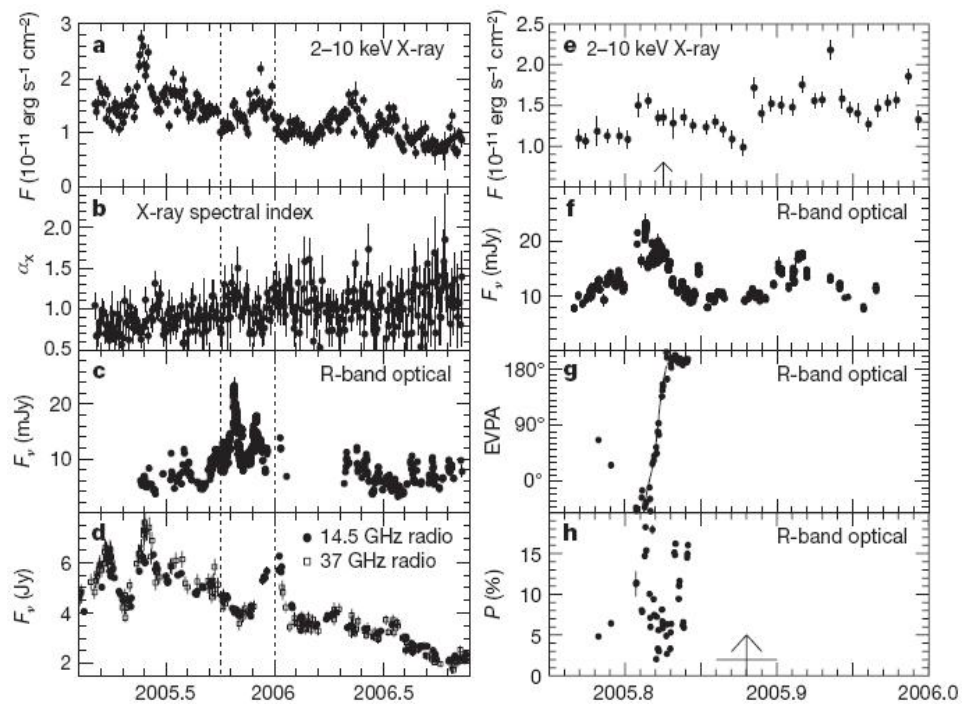


Рис. 82. Переменность BL Lac во время кампании 2005 года.

На Рис 83 даются результаты наблюдений блазара 3C 279 в ходе WEBT кампании. Сильное изменение направления поляризации, такое же, как в оптике, наблюдается и на длине волны 7 мм (данные для ядра на РСДБ карте) Результат интерпретируется как доказательство близкой локализации источников оптического и радио излучения и наличия спиралевидного магнитного поля..

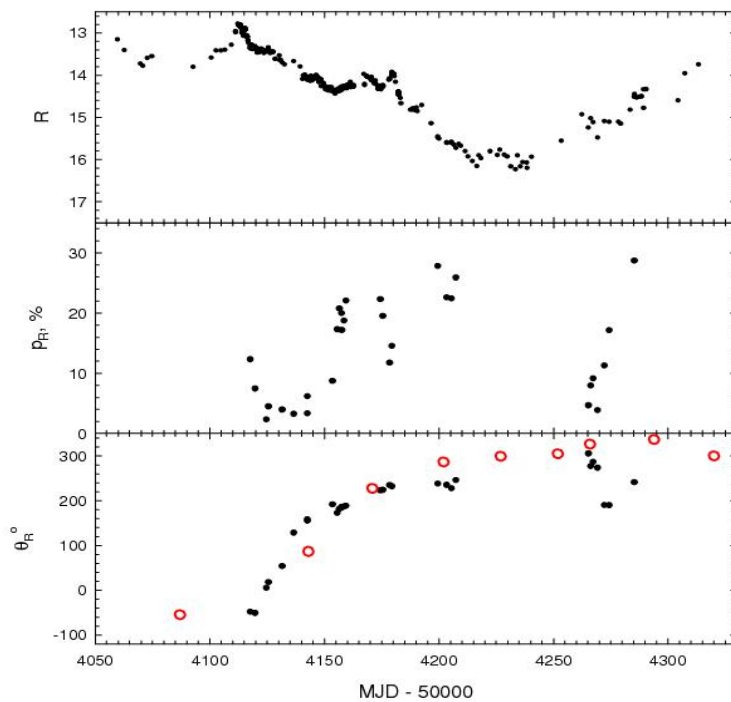


Рис.83. Вращение направления поляризации у блазара 3C 279 .

При интерпретации важную роль играет сопоставление направления поляризации с направлением джета. В случае синхротронного излучения направление поляризации указывает на направление магнитного поля, поскольку эти направления взаимно перпендикулярны. Почти у всех объектов имеется преимущественное направление поляризации, и часто оно примерно перпендикулярно направлению джета, указывая на то, что магнитное поле направлено вдоль джета. Расчеты показывают, что продвижение излучающего ансамбля электронов вниз по джету может привести к такой конфигурации магнитного поля.

С другой стороны общепринято, что причиной вспышек объектов может быть прохождение по джету ударных волн, которые упорядочивают магнитное поле в направлении, перпендикулярном направлению их движения. В этом случае направление поляризации должно быть параллельно направлению джета, что и наблюдается во многих вспышках. Есть, однако, вспышки, в которых направление поляризации примерно перпендикулярно направлению джета, что указывает на направление магнитного поля вдоль джета. В этом случае вспышку следует связать с появлением в джете новых излучающих электронных ансамблей.

Многочастотные мониторинговые наблюдения позволяют получить и другую информацию об области коллимации и ускорения. После запуска гамма-обсерватории Ферми для многих блазаров были получены подробные кривые блеска в гамма диапазоне. Их сравнение с оптическими показали почти полную корреляцию между активностью в оптике и гамма – пример на рис.84. Подобная картина наблюдается у многих блазаров и говорит об идентичной локализации источников оптического и гамма излучения в джете блазара во время вспышки.

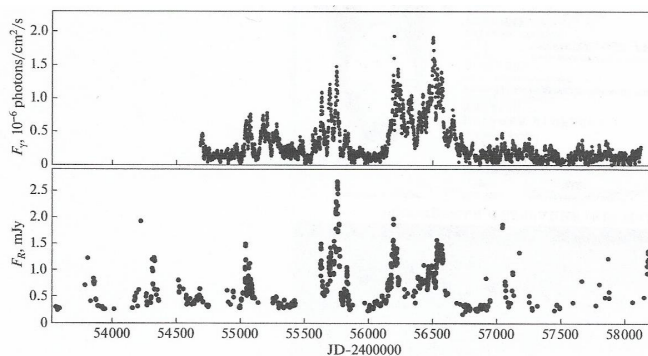


Рис. 84. Квазар Q 1633: сопоставление кривых блеска в оптике и гамма.

Гамма-излучение возникает в результате обратного Комптон-эффекта при взаимодействии энергичных электронов с ИК квантами. Скорость переменности гамма излучения даже больше, чем в оптике, что говорит о локализации источников гамма излучения вблизи от основания джета. За появление ИК квантов ответствен пылевой тор, окружающий центральные области активного ядра. Модель джета приведена на рис.85.

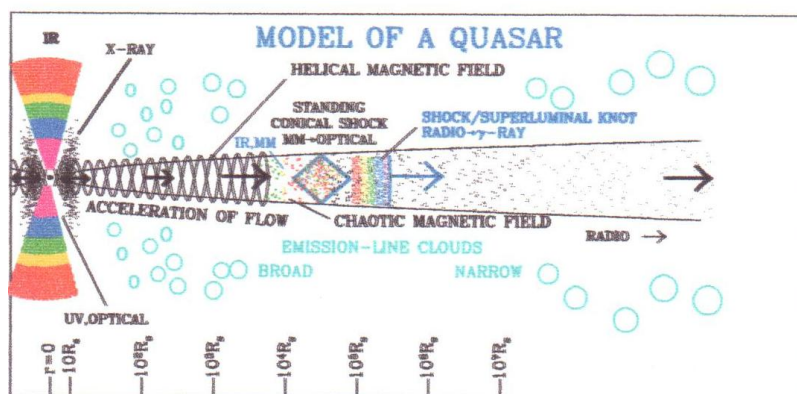


Рис. 85. Модель квазара.

Структура активной галактики на разных пространственных масштабах представлена на рис. 86. На мегапарсековых масштабах имеются радиолопасти, подпитывание их энергией осуществляется джетами (радиолопасти есть далеко не у всех активных галактик), сама галактика почти не выделяется. На следующем рисунке основным объектом является галактика, рядом с ней спутник, взаимодействие с которым инициирует активность ядра (впрочем, наличие спутника вовсе необязательно), видны килопарсековые джеты, излучающие в радиодиапазоне. На масштабе в 1 килопарсек видна центральная часть галактики и начинает проявляться ее активное ядро. На масштабе 100 парсек виден поглощающий пылевой тор, окружающий самые центральные области. На масштабе 1 парсек мы находимся внутри тора в непосредственной близости от ядра. На следующем рисунке виден аккреционный диск, питающий черную дыру, корона вокруг него и основания джетов, дающие оптическое излучение.

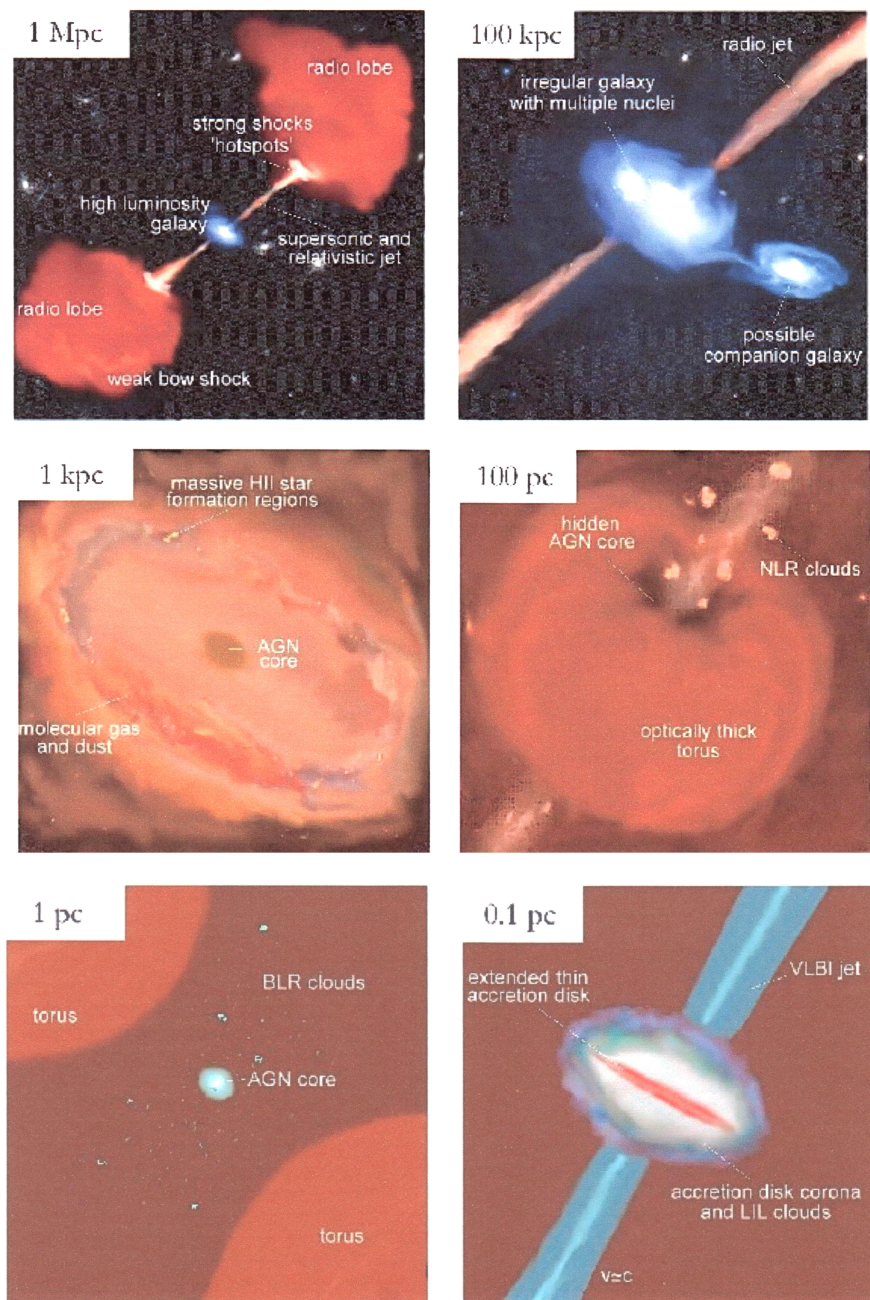


Рис. 86. Структура активной галактики на разных пространственных масштабах (сторона квадрата указана в верхнем левом углу).