

Джеты активных ядер галактик
на различных пространственных масштабах:
форма, ориентация, физические условия и
переменность наблюдаемых параметров

Бутузова Марина Сергеевна

Работа выполнена в
ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН»



1

Актуальность

Со сверхмассивными черными дырами и джетами активных ядер галактик связаны уникальные результаты, полученные в рамках крупных международных проектов, за последнее десятилетие. Также ожидаются новые результаты с появлением новой техники для наблюдений.

- Обнаружение экстремальной яркости блазаров по данным наземно-космического радиоинтерферометра «РадиоАстрон».
- Ассоциация высокоэнергетического нейтрино как с отдельными активными ядрами, так и присутствие статистически значимой корреляции между популяцией блазаров и нейтринными событиями. Ввод в строй обновленного детектора Baikal-GVD.
- Улучшение углового разрешения и расширение РСДБ-сети. Реализация проекта «Миллиметр».
- Детектирование гравитационных волн: проекты пульсарного тайминга (PTA) и космической гравитационно-волновой обсерватории (LISA).

3

Исследуемые объекты



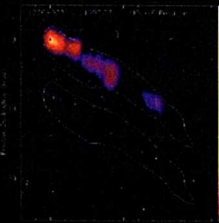
Активное ядро в представлении художника (интернет)

$$F \propto \delta^{3+\alpha} \nu^{-\alpha}$$

$$\nu = \nu' \delta$$

$$\beta_{app} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta}$$

Джет квазара
3C273 на
парсековых
масштабах



Килопарсековый джет
квазара 3C 273
Радио – контур, оптика – серый.
(Bahcall, 1995)

2

Цели

- Изучение влияния искривленной формы джетов и нерадиального движения вещества на поперечное распределение свойств поляризации при различных топологиях магнитного поля.
- Исследование корреляции и связи периодов переменности наблюдаемых величин, относящихся к различным областям винтового джета.
- Анализ механизмов переменности потока излучения блазаров на различных временных масштабах в предположении винтовой формы джета и нерадиального движения его деталей.
- Определение механизмов, искривляющих форму джетов.
- Анализ формы джетов от парсековых до килопарсековых масштабов.
- Определение геометрических, кинематических и физических параметров килопарсековых джетов квазаров.

4

Задачи

- Разработать геометрическую и кинематическую модель для описания винтовой формы джетов.
- Применить разработанную модель винтового джета к интерпретации данных фотометрических и радиоинтерферометрических наблюдений отдельных блазаров.
- Рассмотреть прецессию центральной машины и неустойчивость Кельвина-Гельмгольца как причины формирования винтовой формы струй на примере джета блазара OJ 287.
- Провести моделирование поперечных распределений свойств поляризации в рамках разработанной модели винтового джета с нерадиальным движением и сравнить с результатами РСДБ-наблюдений.
- Исследовать внутрисуточную и долговременную переменность потока излучения блазаров и сделать вывод относительно возможности образования переменности вследствие искривленного движения субкомпонентов джета.
- Проанализировать обратное комптоновское рассеяние излучения центрального источника как возможный механизм образования рентгеновского излучения килопарсековых джетов квазаров.
- Определить скорость и угол килопарсековых джетов с лучом зрения в рамках предложенного выше механизма образования их рентгеновского излучения.
- Сделать выводы относительно формы и кинематики джетов от парсековых до килопарсековых масштабов.

5

Содержание

Глава 1. Форма и кинематика джетов на парсековых масштабах.

Глава 2. Моделирование свойств поляризации парсековых джетов.

Глава 3. Джет блазаров на субпарсековых масштабах.

Глава 4. Джеты на килопарсековых масштабах.

Заключение.

7

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость

- Проведено комплексное исследование влияния винтовой формы парсековых джетов и нерадиального движения их компонентов на наблюдаемые фотометрические и радиоинтерферометрические параметры блазаров.
- Предложен универсальный способ исследования ориентации и скорости килопарсековых джетов квазаров.
- Разработанная модель винтового джета с нерадиальным движением компонентов может быть применена при решении широкого круга задач и является связующим звеном между теоретическими ожиданиями и их наблюдательными проявлениями.
- Полученные указания на отсутствие компактной системы черных дыр, предполагаемой из квазипериодичности потока излучения, является важным для эволюционных моделей и при прогнозировании детектирования гравитационных волн в проектах пульсарного тайминга и LISA.
- Присутствие хорошо упорядоченного глобального магнитного поля дает ограничения на природу ярких деталей джета, механизмов переменности излучения блазаров во всем диапазоне электромагнитного спектра, а также моделей распространения джета как (магнито)-гидродинамического потока.

6

Глава 1. Модель винтового джета

- Цели:**
- ✓ Анализ формы джетов на парсековых масштабах.
 - ✓ Исследование корреляции и связи периодов переменности наблюдаемых величин, относящихся к различным областям винтового джета.
 - ✓ Определение механизмов, искривляющих форму джетов.

- Задачи:**
- ✓ Разработать геометрическую и кинематическую модель для описания винтовой формы джетов.
 - ✓ Применить разработанную модель винтового джета к интерпретации данных фотометрических и радиоинтерферометрических наблюдений отдельных блазаров.
 - ✓ Рассмотреть прецессию центральной машины и неустойчивость Кельвина-Гельмгольца как причины формирования винтовой формы струй на примере джета блазара OJ 287.

8

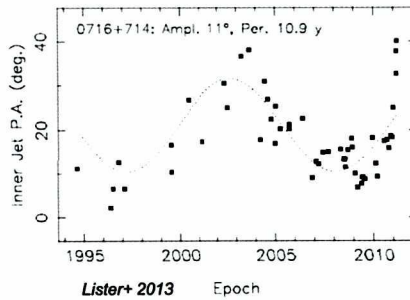
Глава 1. Модель винтового джета

Наиболее длительный ряд данных РСДБ-наблюдений джетов АЯГ получен в рамках программы **MOJAVE** (Monitoring Of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments).

Основные свойства:

1. Детали джетов часто движутся с ускорением и по искривленным траекториям.
2. Происходит изменение позиционного угла (РА) внутреннего джета PA_{in} . Для десятка объектов есть указания на квазипериодичность изменения.
3. Детали джетов распространяются внутри фиксированного интервала позиционных углов, который, при учете эффектов проекции, лежит в пределах от 0.5 до 3°.
4. Происходит замедление деталей джетов, которое проявляется для всех объектов выборки MOJAVE, начиная с депроекционных расстояний 100 пк.

Изменение позиционного угла внутреннего джета блазара S5 0716+714



9

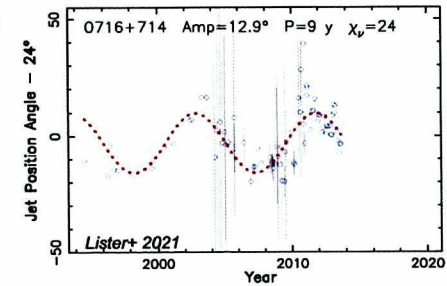
Глава 1. Модель винтового джета

Наиболее длительный ряд данных РСДБ-наблюдений джетов АЯГ получен в рамках программы **MOJAVE** (Monitoring Of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments).

Основные свойства:

1. Детали джетов часто движутся с ускорением и по искривленным траекториям.
2. Происходит изменение позиционного угла (РА) внутреннего джета PA_{in} . Для десятка объектов есть указания на квазипериодичность изменения.
3. Детали джетов распространяются внутри фиксированного интервала позиционных углов, который, при учете эффектов проекции, лежит в пределах от 0.5 до 3°.
4. Происходит замедление деталей джетов, которое проявляется для всех объектов выборки MOJAVE, начиная с депроекционных расстояний 100 пк.

Изменение позиционного угла внутреннего джета блазара S5 0716+714

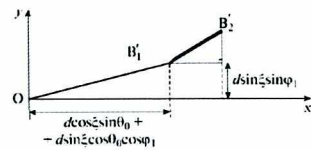


10

Глава 1. Модель винтового джета



Проекция на картинную плоскость



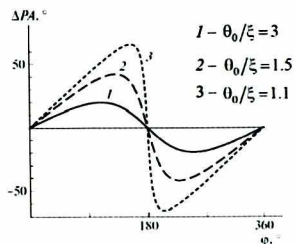
$$\text{tg } \Delta PA = \frac{\sin \xi \sin \varphi}{\cos \xi \sin \theta_0 + \sin \xi \cos \theta_0 \cos \varphi} \approx \frac{\sin \varphi}{\theta_0/\xi + \cos \varphi}$$

$$\Rightarrow PA_{\max} \approx \left[\left(\theta_0/\xi \right)^2 - 1 \right]^{-1/2}$$

Для блазара S5 0716+714 $\theta_0/\xi \approx 5.3$

Максимальные и минимальные значения PA_{in} приобретает при

$$\varphi = \pm \arccos(-\text{tg } \xi \cdot \text{ctg } \theta_0)$$



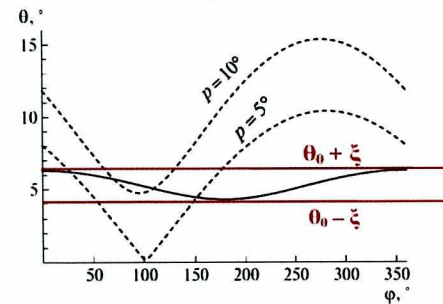
11

Глава 1. Модель винтового джета

Изменение угла вектора скорости компонентов с лучом зрения

При радиальном движении:

$$\cos \theta_b = \cos \xi \cos \theta_0 - \sin \xi \sin \theta_0 \cos \varphi$$



Для блазара S5 0716+714 по разным оценкам θ от 0.5° до 12°.

При нерадиальном движении:

$$\sin \theta_{nb} = \sqrt{g_a^2 + g_b^2}$$

$$g_a = \cos p \sin \xi \sin \varphi + \sin p \cos \varphi$$

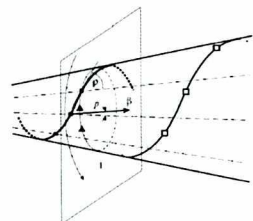
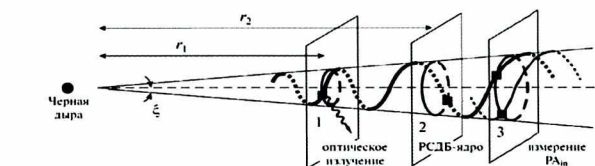
$$g_b = \cos p (\cos \xi \sin \theta_0 + \sin \xi \sin \theta_0 \cos \varphi) - \sin p \cos \theta_0 \sin \varphi$$

$$\theta(\varphi) \Rightarrow \delta = \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta} \Rightarrow \beta_{\text{app}} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta}$$

$F(\nu) = \delta^{3+\alpha} F'(\nu)$ – плотность потока излучения
– видимая скорость деталей джета

12

Глава 1. Периоды в переменности



$$T_{var} = \frac{2\pi r \sin \xi \cos p}{\beta c \sin(\rho - p)}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

Периоды переменности, годы

Диапазон	S5 0716+714	OJ 287
оптика	3.3	11.9
РСДБ-ядро	5.5-6	≈25
PA_{in}	10.9	28.3

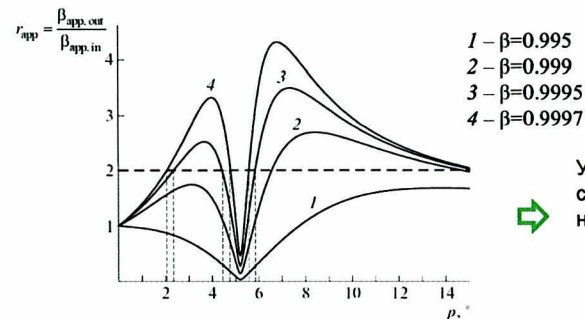
13

Глава 1. Винтовой джет блазара S5 0716+714

Из данных РСДБ-наблюдений блазара S5 0716+714 следует:

Эпоха	Внутренний джет	Внешний джет
2004	β_{app} до 20с (PA_{max})	10с (PA_{min})
2008-2010	$\beta_{app} < 10с$	$> 20с$

Зависимость параметров для эпохи 2008-2010

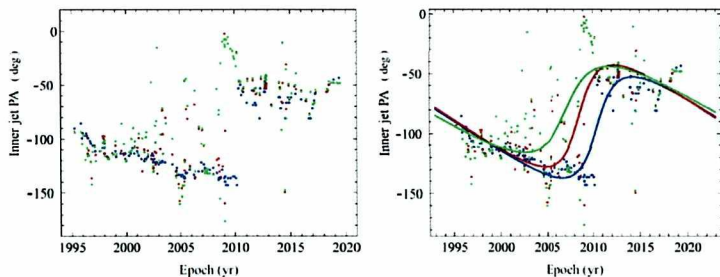


Угол между вектором скорости и радиальным направлением
 $p = 5.5^\circ$

14

Глава 1. Винтовой джет блазара OJ 287

Изменение PA_{in} джета блазара OJ 287

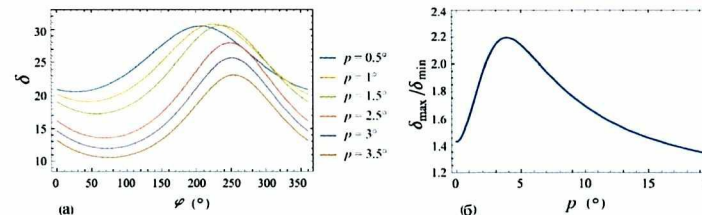


- PA линии хребта до 0.025 mas
- PA большой оси эллипса РСДБ ядра при одной детали джета
- PA большой оси эллипса РСДБ ядра при двух деталях джета

$$\theta_0/\xi = 1.5 \Rightarrow T = 28.3 \text{ Г.}$$

15

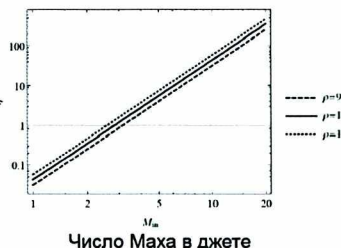
Глава 1. Винтовой джет блазара OJ 287



$$T_{var} = \frac{2\pi r \sin \xi \cos p}{\beta c \sin(\rho - p)} \Rightarrow p = 2.5^\circ, \rho \approx 10^\circ$$

Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца

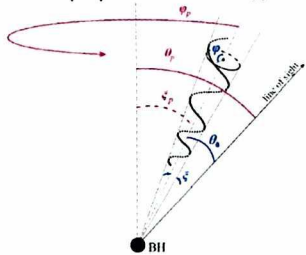
Отношение плотностей джета и окружающей среды



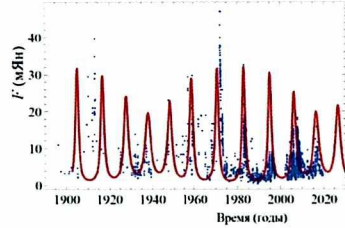
16

Глава 1. Винтовой джет блазара OJ 287

Схема прецессии винтового джета.



Наблюдаемая и модельная кривые блеска блазара OJ 287 в оптическом диапазоне.



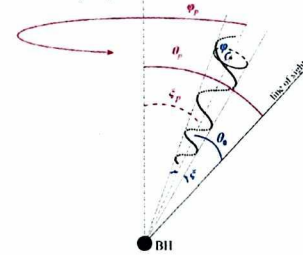
Период прецессии в СО источника $T_p' \approx 1.2 \cdot 10^3$ лет.

Прецессия Лензе-Тирринга?

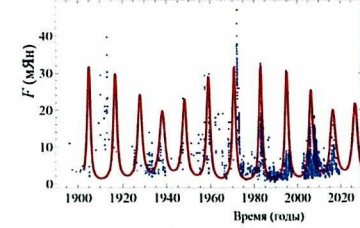
17

Глава 1. Винтовой джет блазара OJ 287

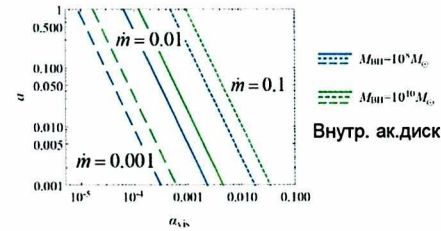
Схема прецессии винтового джета.



Наблюдаемая и модельная кривые блеска блазара OJ 287 в оптическом диапазоне.



Период прецессии в СО источника $T_p' \approx 1.2 \cdot 10^3$ лет.

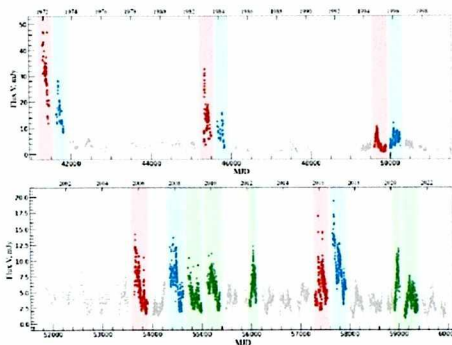


При $\alpha_{BH} = 0.01 - 1$, прецессия областей аккреционного диска происходит на приемлемых для механизма Блендфорда-Пейна расстояниях $(30 - 300)r_g$ от ЧД массой $M_{BH} = (10^8 - 10^{10})M_{\odot}$.

18

Глава 1. Винтовой джет блазара OJ 287

Кривая блеска блазара OJ 287 в полосе V



- 1-я 12-летняя вспышка
- 2-я 12-летняя вспышка
- событие переменности

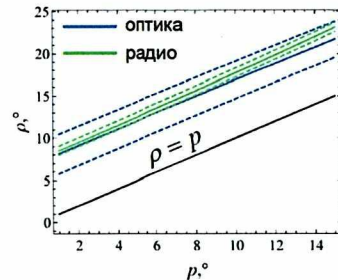
Максимальный доплер-фактор достигается при:

$$\varphi_{sf} = \arctan(\tan p / \sin \xi) + \pi$$

$$\Delta\varphi \approx 2\pi \Delta t / 12$$

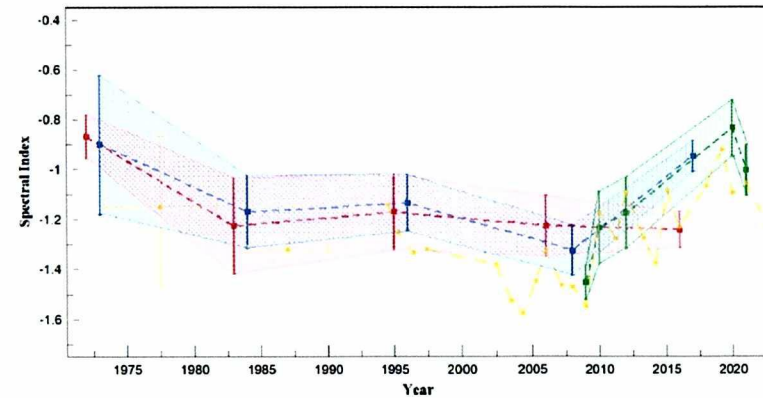
$$\Delta t = 1.5 \pm 0.5 \text{ лет}$$

$$\text{tg } \rho = \frac{\Delta\varphi r \sin \xi}{\beta c \Delta t \cos p} + \text{tg } p$$



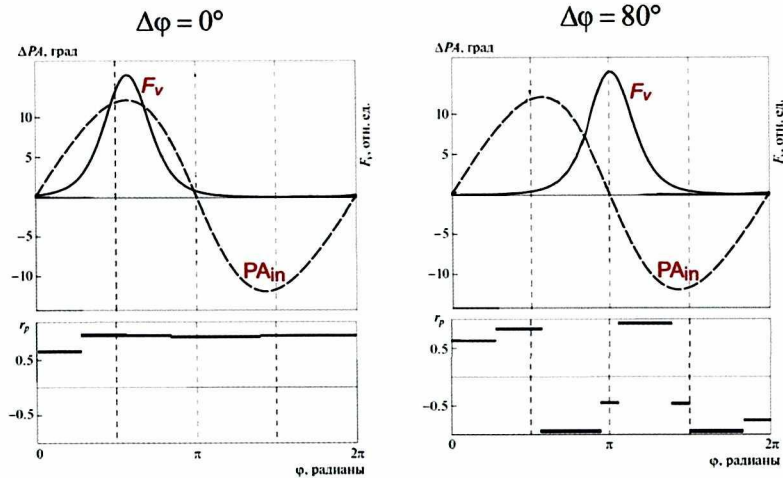
19

Глава 1. Винтовой джет блазара OJ 287



20

Глава 1. Корреляция наблюдаемых величин



В различные интервалы времени коэффициент корреляции между двумя величинами, ассоциирующимися с разным расстоянием от начала джета, может принимать разные значения.

21

Глава 2. Моделирование поляризации

Lyutikov, Pariev, Gabuzda 2005:

$$I = \frac{s+7/3}{s+1} \frac{\kappa(\nu)}{D_i^2(1+z)^{2+(s-1)/2}} \int dn K_e \delta^{2+(s-1)/2} |B' \sin \chi'|^{(s+1)/2},$$

$$Q = \frac{\kappa(\nu)}{D_i^2(1+z)^{2+(s-1)/2}} \int dn K_e \delta^{2+(s-1)/2} |B' \sin \chi'|^{(s+1)/2} \cos 2\tilde{\chi},$$

$$U = \frac{\kappa(\nu)}{D_i^2(1+z)^{2+(s-1)/2}} \int dn K_e \delta^{2+(s-1)/2} |B' \sin \chi'|^{(s+1)/2} \sin 2\tilde{\chi},$$

$V=0$,

$$\kappa(\nu) = \frac{\sqrt{2}}{4} \Gamma_E \left(\frac{3s-1}{12} \right) \Gamma_E \left(\frac{3s+7}{12} \right) \frac{e^3}{m_e c^2} \left(\frac{3e}{2\pi m_e c^2} \right)^{(s-1)/2} \nu^{-(s-1)/2},$$

χ' – угол между магнитным полем и лучом зрения в сопутствующей СО, $\cos \chi' = (\hat{n}, \hat{B}')$

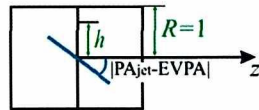
$\tilde{\chi}$ – наблюдаемый угол между направлением, электрического вектора в волне и опорным направлением,

$$\mathcal{B}(\beta, p, \rho, \varphi, \xi, \theta_0)$$

$\delta = \{\Gamma[1 - (\hat{n}, \hat{\theta})]\}^{-1}$ – Допплер-фактор,

$\hat{n} = \{\sin \theta_\rho, 0, \cos \theta_\rho\}$ – единичный вектор в направлении излученных фотонов,

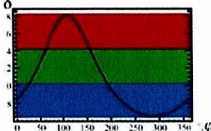
Интегрирование вдоль луча зрения в пределах от $-\sqrt{1-h^2}$ до $\sqrt{1-h^2}$.



$N(E) = K_e E^{-s}$ – степенной электронный спектр
 $s = 2.5$

Свертка одномерной гауссианой с FWHM=0.3R.

Полагали
 $p=0, 2, 3, 5^\circ$
 $\rho/p=0, 1, 2, 3, 5, 15, 25^\circ$
 $\theta_0=2, 5, 10^\circ$



23

Глава 2. Моделирование поляризации

Цели:

✓Изучение влияния искривленной формы джетов и нерадиального движения вещества на поперечное распределение свойств поляризации при различных топологиях магнитного поля.

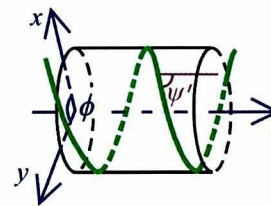
Задачи:

✓Провести моделирование поперечных распределений свойств поляризации в рамках разработанной модели винтового джета с нерадиальным движением и сравнить с результатами РСДБ-наблюдений.

22

Глава 2. Моделирование поляризации

Спиральное



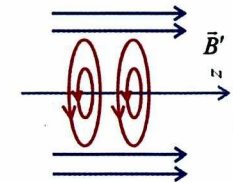
$$B' = \frac{10}{1 + \sqrt{x^2 + y^2}} \begin{cases} -\sin \psi' \sin[\phi(x, y)] \\ \sin \psi' \cos[\phi(x, y)] \\ \cos \psi' \end{cases}$$

ψ' – угол между магнитным полем и осью z,

использовали 0, 10, 25, 45, 55, 65, 75, 90°

528 наборов параметров

Тороидальное в центре, продольное на краю



R_t – расстояние от локальной оси, на котором происходит переход, использовали 0.25, 0.33, 0.5, 0.7, 0.9 радиусов джета.

$\beta_s=0.995, 0.95, 0.745$ – скорость оболочки

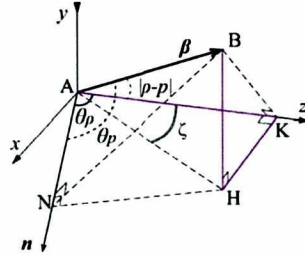
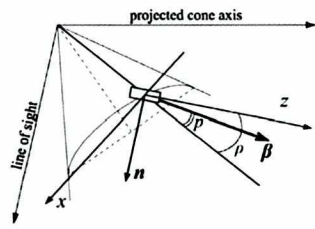
990 наборов параметров

$\beta=0.995$ – скорость компонентов джета во всех случаях.

24

Глава 2. Моделирование поляризации

Определение вектора скорости компонента



$$\beta_x = \beta \cos(\rho - p) \operatorname{tg} \zeta,$$

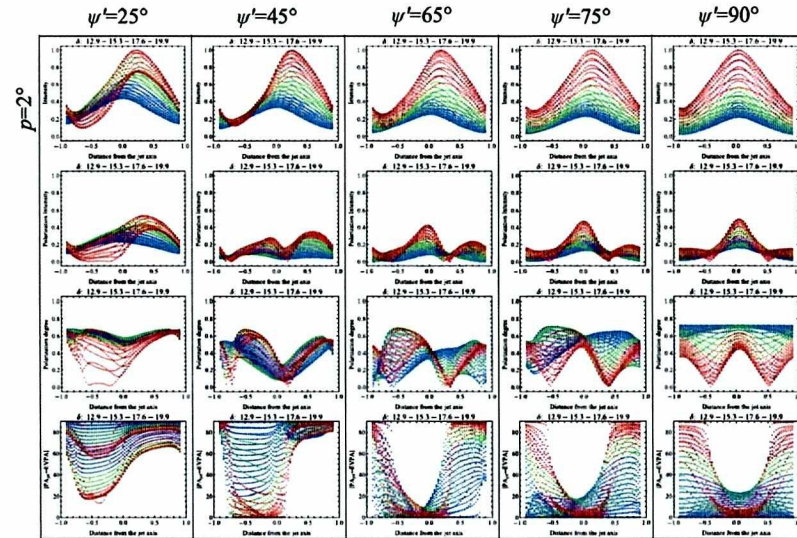
$$\beta_y = -\beta \sqrt{\sin^2(\rho - p) - \cos^2(\rho - p) \operatorname{tg}^2 \zeta},$$

$$\beta_z = \beta \cos(\rho - p).$$

Вспомогательный угол ζ :
$$\operatorname{tg} \zeta = \frac{\cos \theta_p - \cos(\rho - p) \cos \theta_p}{\cos(\rho - p) \sin \theta_p}$$

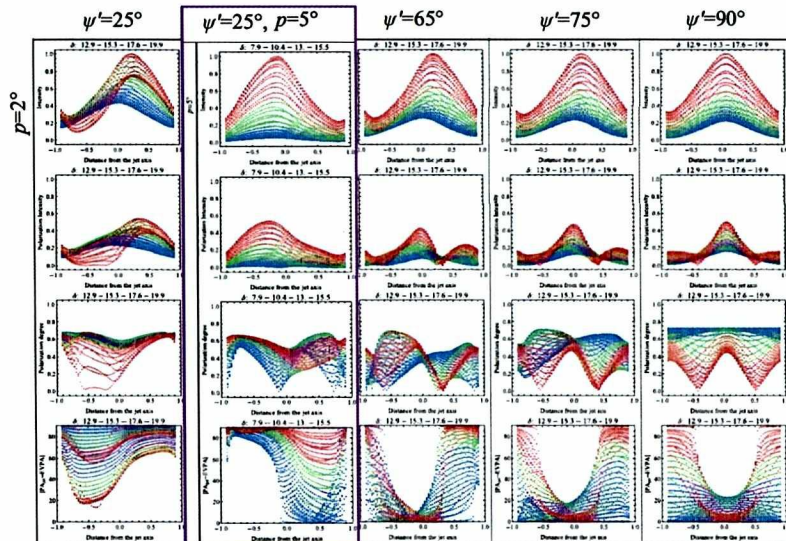
25

$\theta_0 = 2^\circ, \rho = 30^\circ$



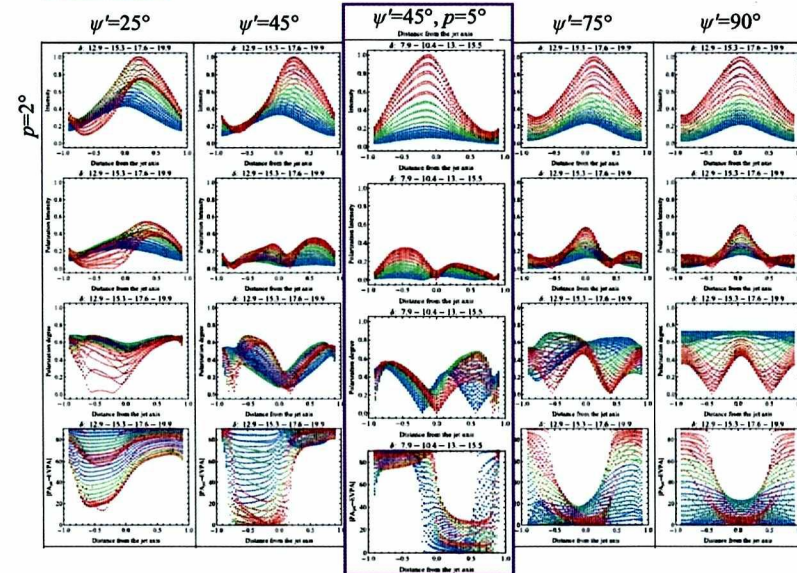
26

$\theta_0 = 2^\circ, \rho = 30^\circ$



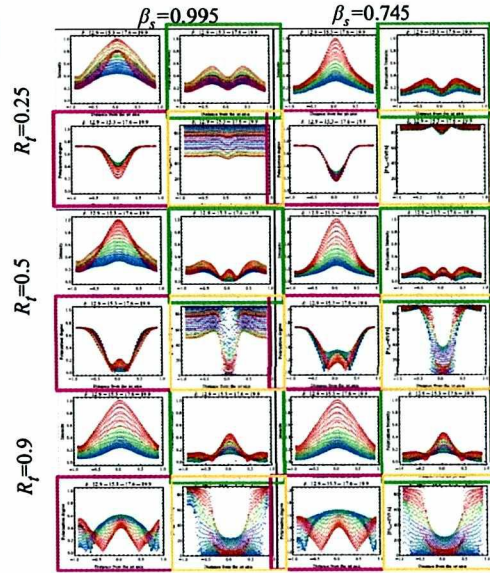
27

$\theta_0 = 2^\circ, \rho = 30^\circ$



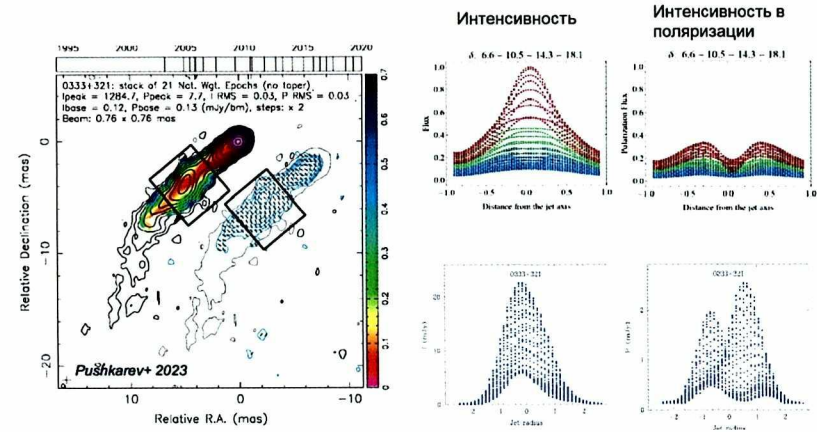
28

$\theta_0=2^\circ, p=2^\circ, \rho=30^\circ$



29

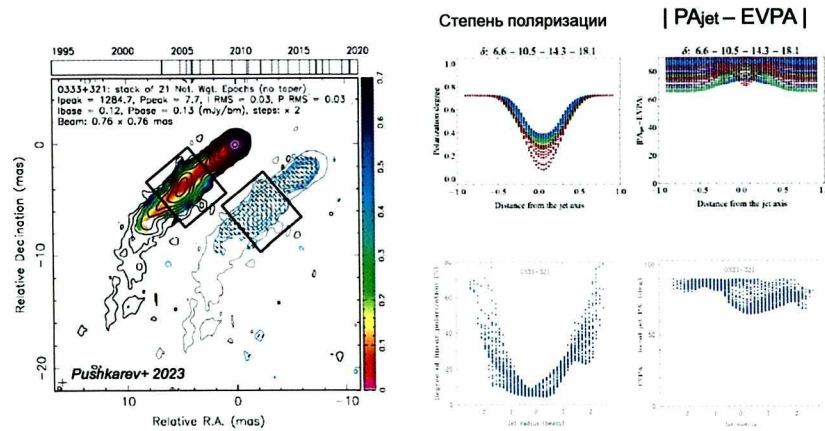
Глава 2. Результаты



Распределения при параметрах $R_j=0.33, \theta_0=5^\circ, \rho=45^\circ, p=3^\circ, \beta_{\text{sheath}}=0.95, \beta_{\text{spine}}=0.995$

30

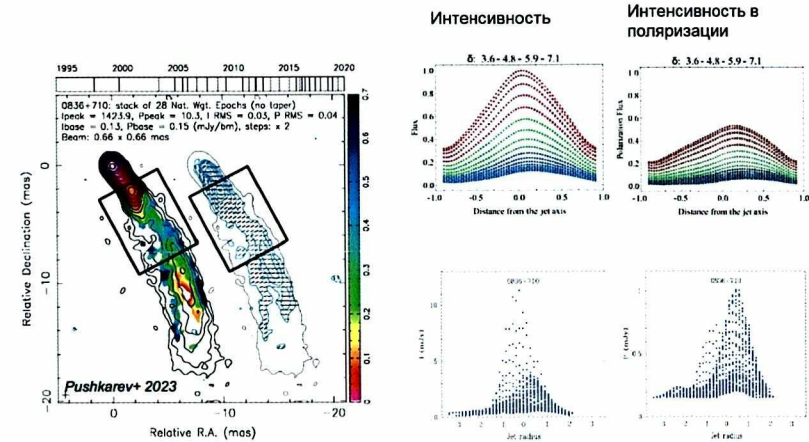
Глава 2. Результаты



Распределения при параметрах $R_j=0.33, \theta_0=5^\circ, \rho=45^\circ, p=3^\circ, \beta_{\text{sheath}}=0.95, \beta_{\text{spine}}=0.995$

31

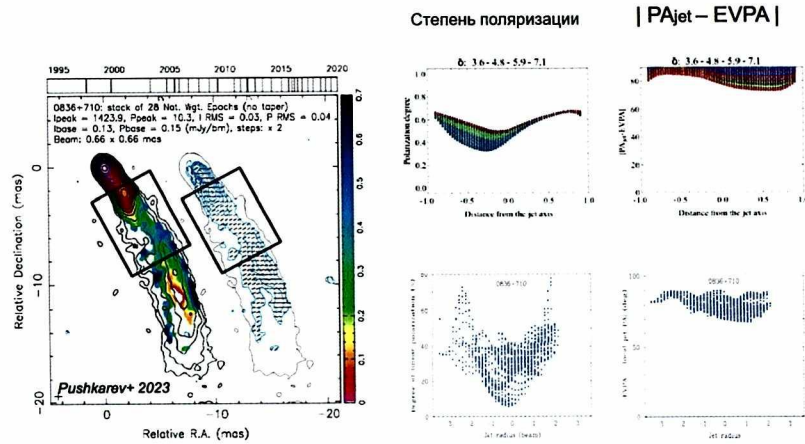
Глава 2. Результаты



Распределения при параметрах $\psi'=25^\circ, p=2^\circ, \rho/p=2, \theta_0=10^\circ, \beta=0.995$.

32

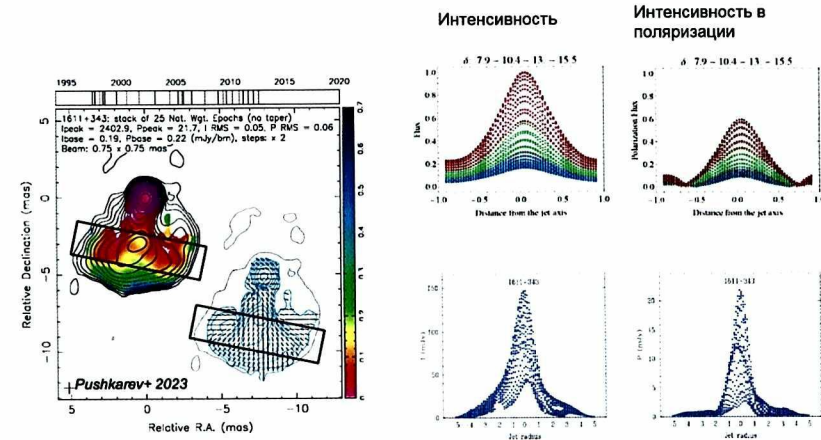
Глава 2. Результаты



Распределения при параметрах $\psi=25^\circ$, $p=2^\circ$, $\rho/p=2$, $\theta_0=10^\circ$, $\beta=0.995$.

33

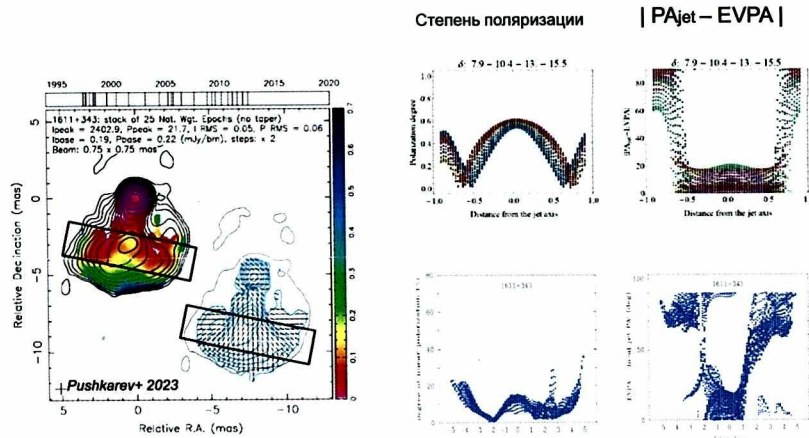
Глава 2. Результаты



Распределения при параметрах $R_j=0.9$, $\theta_0=2^\circ$, $\rho=25^\circ$, $p=5^\circ$, $\beta_{\text{sheath}}=\beta_{\text{spine}}=0.995$.

34

Глава 2. Результаты



Распределения при параметрах $R_j=0.9$, $\theta_0=2^\circ$, $\rho=25^\circ$, $p=5^\circ$, $\beta_{\text{sheath}}=\beta_{\text{spine}}=0.995$.

35

Глава 3. Джеты на суб-пк масштабах

Цели:

✓ Анализ механизмов переменности потока излучения блазаров на различных временных масштабах в предположении винтовой формы джета и нерадиального движения его деталей.

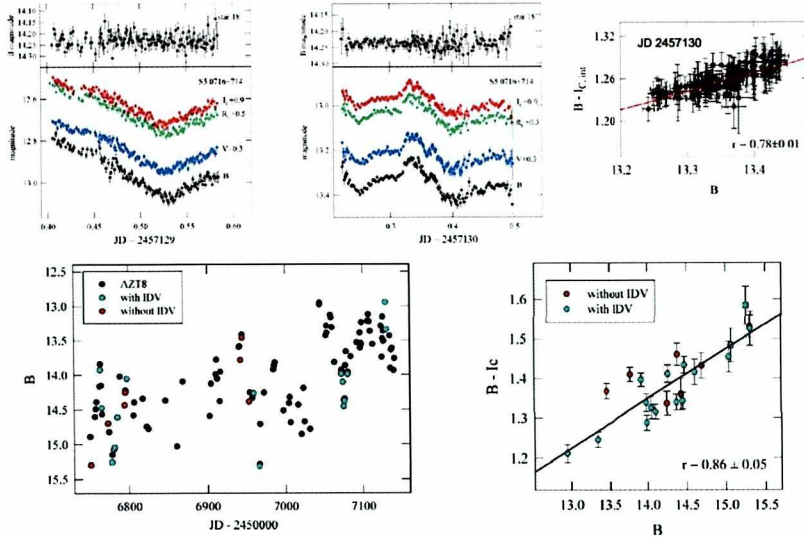
Задачи:

✓ Исследовать внутрисуточную и долговременную переменность потока излучения блазаров и сделать вывод относительно возможности образования переменности вследствие искривленного движения субкомпонентов джета.

36

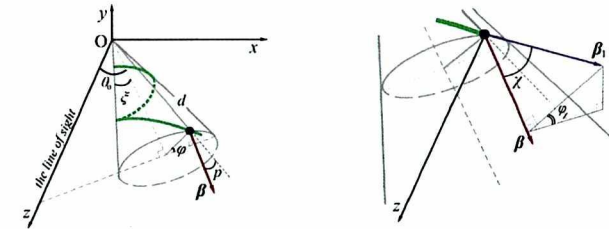
Глава 3. Джет S5 0716+714 на суб-пк

Внутрисуточная переменность за 2014-2015 гг: в 16 ночах из 22.

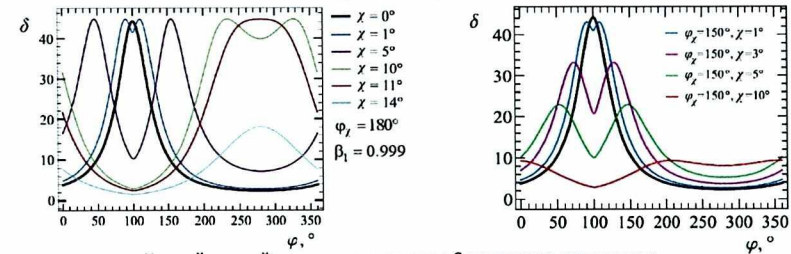


37

Глава 3. Джет S5 0716+714 на суб-пк



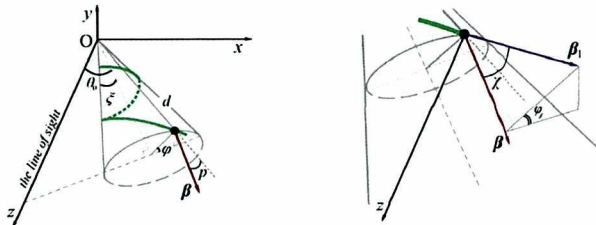
Изменение доплер-фактора субкомпонентов, движущихся прямолинейно, в зависимости от их азимутального угла



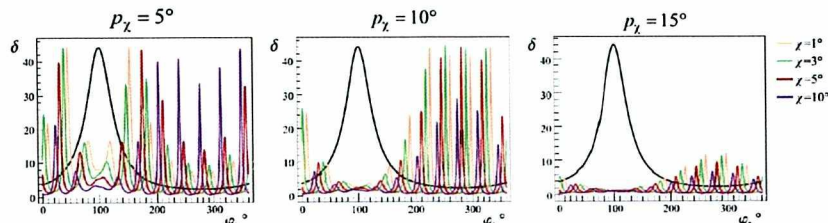
Черной линией отмечено изменение б основного компонента.

38

Глава 3. Джет S5 0716+714 на суб-пк



Изменение доплер-фактора субкомпонентов, вращающихся вокруг beta

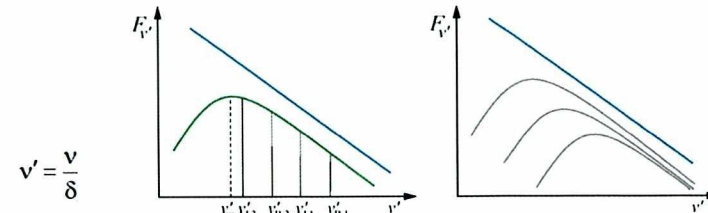


Скорость изменения ϕ_χ в 10 раз больше чем ϕ . Каждый последующий график имеет начальное значение ϕ_χ на 9° больше, чем предыдущий.

39

Глава 3. Джет S5 0716+714 на суб-пк

Спектр блазара – сумма спектров отдельных излучающих областей джета. Спектр отдельной области изогнутый из-за синхротронного самопоглощения.



Различие в показателях цвета в максимуме и минимуме блеска, например, между полосами B и I: $\Delta(m_B - m_I) = 2.5 \lg \left(\frac{1 + F_{B,sc}/F_{B,1}}{1 + F_{I,sc}/F_{I,1}} \right)$

Основной поток: $F_1 = Qv^{-\alpha}$, поток от субкомпонента $F_{sc} = Q_{sc} v^{5/2} \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{v(1+z)}{\delta_{sc}} \right)^{-\alpha-5/2} \right] \right]$

$$\Rightarrow \frac{Q_{sc}}{Q} = \frac{C-1}{a(v'_1) - C \cdot b(v'_1)}$$

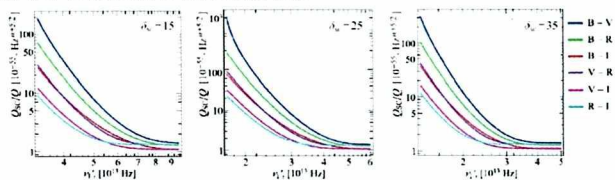
$$C = 10^{0.4 \Delta(m_B - m_I)}$$

$$a(v'_1) = v_B^{5/2+\alpha} \left[1 - \exp \left[- \left(\frac{v_B(1+z)}{\delta_{sc} v'_1} \right)^{-\alpha-5/2} \right] \right]$$

40

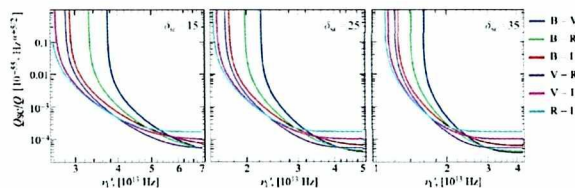
Глава 3. Джет S5 0716+714 на суб-пк

Для IDV-вспышки за JD 2457130



Получено $\nu_1' = (2-4) \cdot 10^{13}$ Гц, что при $\delta=5$ и $\alpha=1.12$ дает $\nu_m = (0.9-1.7) \cdot 10^{14}$ Гц.

Для долговременной переменности за 04.2014 – 04.2015



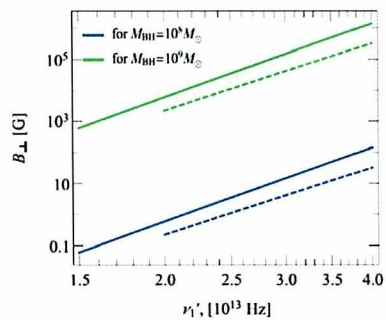
Получено $\nu_1' = (1.5-4) \cdot 10^{13}$ Гц, что при $\delta=5$ и $\alpha=1.46$ дает $\nu_m = (0.6-1.6) \cdot 10^{14}$ Гц.

41

Глава 3. Джет S5 0716+714 на суб-пк

Оценим напряженность магнитного поля в области, излучающей в оптическом диапазоне и имеющей размер в один гравитационный радиус центральной ЧД:

$$B_{\perp} = \left[\frac{\pi c_2}{4 c_6} [1 - \exp(-\tau_{\nu})] \right]^2 (2c_1)^{-5} \frac{R^4}{D_2^2} F_{\nu}^{-2} \nu^5 (1+z)^{-1} \delta^{-3}$$

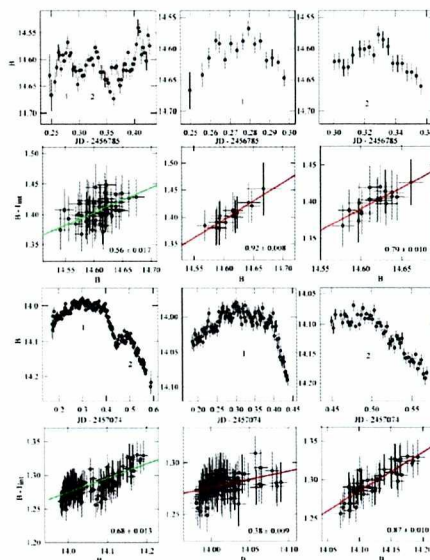


Пунктирные линии – для параметров IDV-вспышки за JD 2457130,

Сплошные линии – для параметров долговременной переменности за 04.2014–04.2015.

43

Глава 3. Джет S5 0716+714 на суб-пк

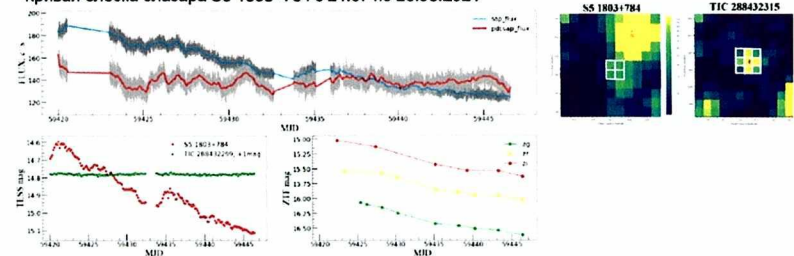


Последовательные вспышки на внутрисуточной временной шкале имеют различную зависимость показателя цвета от яркости.

42

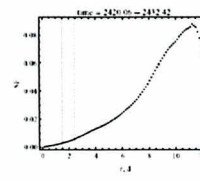
Глава 3. Переменность блазара S5 1803+784

Кривая блеска блазара S5 1803+784 с 24.07 по 20.98.2021

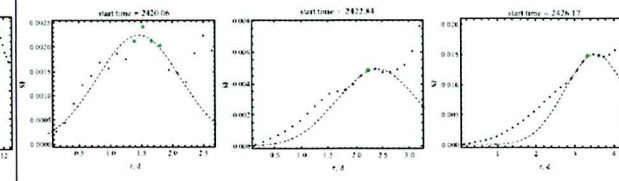


Результаты поиска кратчайшего характерного времени переменности.

Структурная функция по всем данным

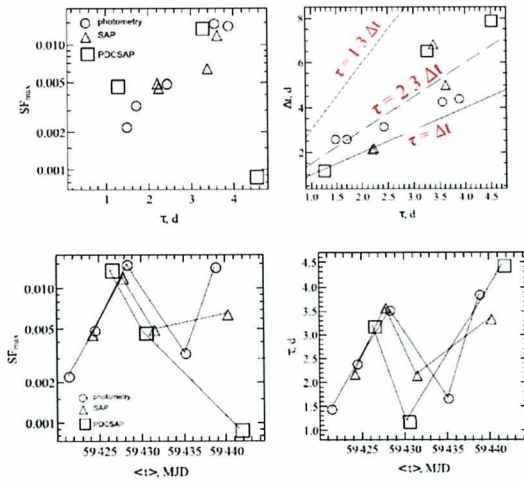


Структурные функции по данным за более короткие временные интервалы



44

Глава 3. Переменность блазара S5 1803+784



Свойства переменности блазара S5 1803+784 очень изменчивы на масштабах времени несколько дней. Это может объясняться попеременным определяющим вкладом в наблюдаемый поток различных частей излучающей области, обладающими немного отличающимися параметрами.

45

Глава 4. Килопарсековые джеты

Цели:

- ✓ Анализ формы джетов от парсековых до килопарсековых масштабов.
- ✓ Определение геометрических, кинематических и физических параметров килопарсековых джетов квазаров.

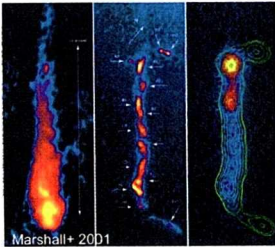
Задачи:

- ✓ Проанализировать обратное комптоновское рассеяние излучения центрального источника как возможный механизм образования рентгеновского излучения килопарсековых джетов квазаров.
- ✓ Определить скорость и угол килопарсековых джетов с лучом зрения в рамках предложенного выше механизма образования их рентгеновского излучения.
- ✓ Сделать выводы относительно формы и кинематики джетов от парсековых до килопарсековых масштабов.

46

Глава 4. Килопарсековые джеты

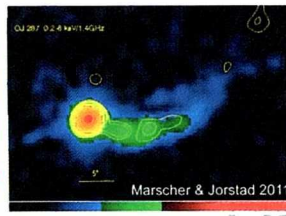
Джет квазара 3C273 в радио-, оптическом и рентгеновском диапазонах.



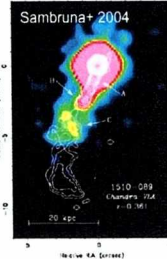
PKS 1127-145 в радио- и рентгеновском диапазонах.



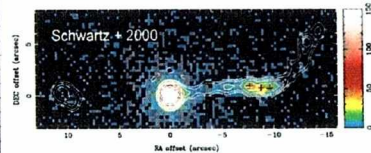
Джет квазара OJ 287 в радио- и рентгеновском диапазонах.



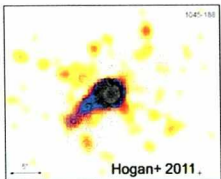
Джет квазара PKS 1510-08.



Джет квазара PKS 0637-752.



Джет квазара PKS 1045-188.



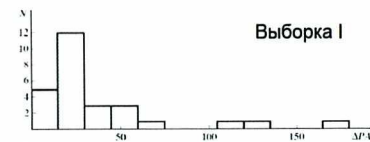
47

Глава 4. Килопарсековые джеты

Составлены:

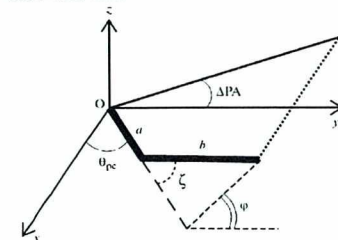
Выборка I: джеты с зарегистрированным рентгеновским излучением. 27 штук.

Выборка II: джеты без обнаруженного рентгеновского излучения. 23 штуки.

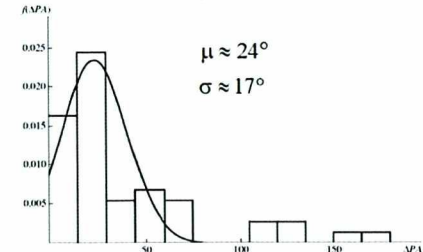


Однородность выборок по тесту Колмогорова-Смирнова.

Схема изгиба джета между пк- и кпк-масштабами



Плотность вероятности delta PA



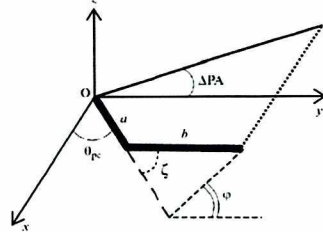
48

Глава 4. Килопарсековые джеты

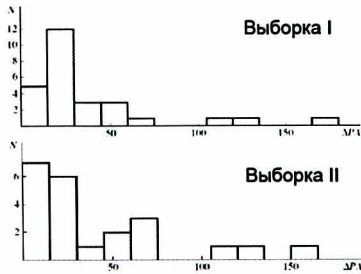
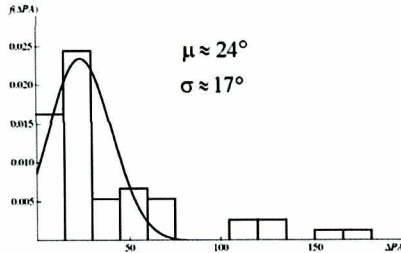
Скорость и направление кпк-джетов не являются решающими параметрами для определения вероятности обнаружения кпк-джетов в рентгеновском диапазоне.

Джеты имеют изгиб между пк- и кпк-масштабами, величина которого $\theta_{pc} \approx 1.4$.

Схема изгиба джета между пк- и кпк-масштабами



Плотность вероятности ДРА



Однородность выборок по тесту Колмогорова-Смирнова.

Глава 4. Обратное комптоновское рассеяние

$$k' \nabla N(k) = \int \frac{r_e^2}{2} (m_e c^2)^2 \frac{\hbar c^2}{EE' \omega} \delta(p+k-p'-k') \times \delta(E+\hbar\omega-E'-\hbar\omega') G(\xi, \xi') f(p) N(k) d^3 p' d^3 p d^3 k$$

(Nagirner & Poutanen 1994, 2001; Nagirner 1994)

$$G(\xi, \xi') = (1/\xi - 1/\xi')^2 + 2(1/\xi - 1/\xi') + \xi/\xi' + \xi'/\xi$$

$$\xi = \frac{E\hbar\omega}{m_e^2 c^4} (1 - \beta \cos \psi) \quad \xi' = \frac{E\hbar\omega'}{m_e^2 c^4} (1 - \beta \cos \phi)$$

Функция распределения рассеиваемых фотонов:

$$N(k) = \frac{c^3}{4\pi\omega^2} N(\omega) \Rightarrow N(\omega_j) = \left[(1+z) \frac{\delta_j}{\delta} \right]^{3+\alpha} \frac{D_L^2 \sin^2 \theta}{chR^2} Q \omega_j^{-1-\alpha}$$

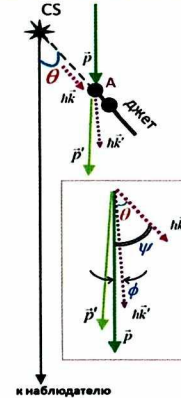
Функция распределения электронов:

$$f(p) = \frac{c^3}{4\pi E^2} f(E), \quad f(E) = \mathcal{K} E^{-s}$$

$$F(\omega') = (1+z)^{3+\alpha} \left(\frac{\delta_j}{\delta} \right)^{3+\alpha} \frac{r_e^2}{2} \frac{\sin^2 \theta}{R^2} (m_e c^2)^{1-s} \mathcal{K} Q \omega' \iint \Gamma^{-s-2} \omega_j^{-\alpha-2} d\Gamma d\omega_j$$

Пределами интегрирования являются либо физические ограничения, либо ограничения:

$$\Gamma^2 \geq \frac{\omega'}{2\omega_j(1-\beta \cos \theta)} \quad \text{и} \quad \omega_j \geq \frac{\omega'}{2\Gamma^2(1-\beta \cos \theta)}$$



49

50

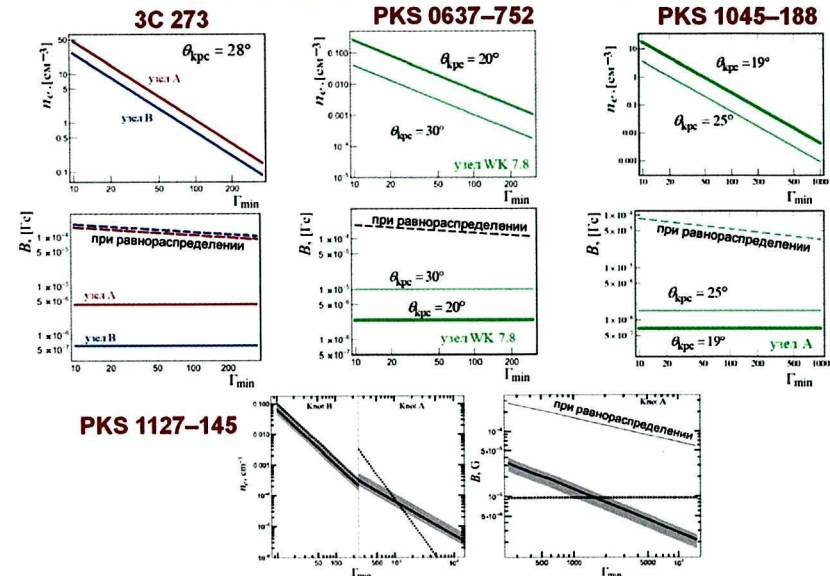
Глава 4. Угол с лучом зрения

$$\sin \theta'_{pc} = \delta \sin \theta_{pc}, \quad \theta'_{pc} = \theta'_{kpc}, \quad \delta_{kpc} = \delta_{pc} \frac{\sin \theta_{pc}}{\sin \theta'_{kpc}}$$

Объект	$\theta_{kpc}, ^\circ$	δ_{kpc}	β_{kpc}	Γ_{kpc}
PKS 0637-752	>27	2.19	0.87	2.0
			0.91	2.4
OJ 287	35-42	1.02	0.025	1
PKS 1045-188	>34	1.79	0.81	1.7
			0.84	1.9
3C 273	25-26	2.37	0.90	2.3
			0.91	2.4
PKS 1510-089	>24	2.43	0.88	2.1
			0.94	2.9
PKS 1127-145	35	1.74	0.8	1.7

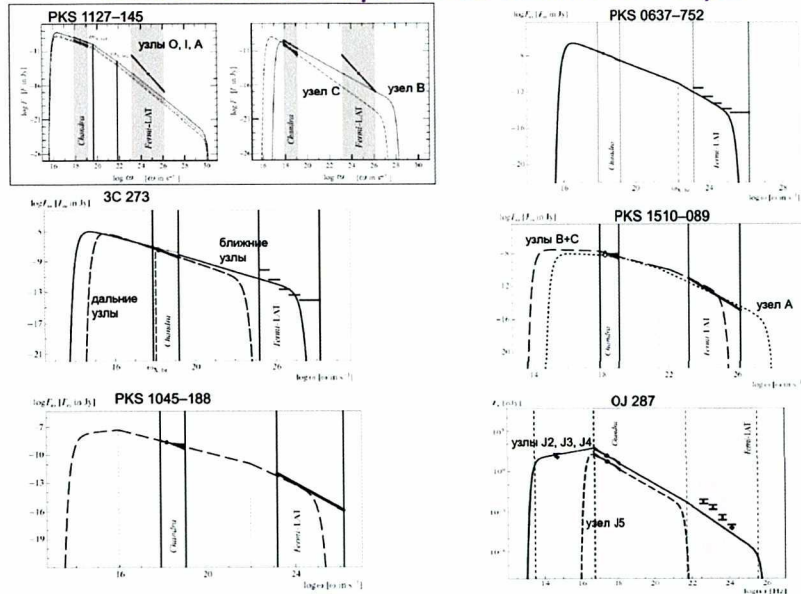
51

Глава 4. Магнитное поле и концентрация e-



52

Глава 4. Моделирование гамма-спектра



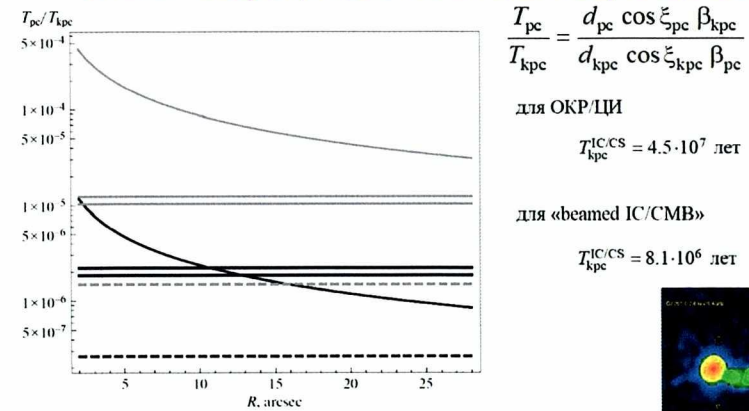
53

Положения, выносимые на защиту

1. Предложена и успешно применена для описания различных, иногда противоречивых наблюдаемых свойств блазаров, модель винтового парсекового джета с нерадиальным движением компонентов и в предположении различного расстояния от истинного начала джета областей, ответственных за различные наблюдаемые величины.
2. Дана интерпретация различному поведению наблюдаемых свойств блазаров в различные интервалы времени.
3. Впервые предложен способ определения угла между вектором скорости компонента джета и радиальным направлением из отношения наибольшей и наименьшей видимой скорости компонентов джета.
4. Впервые доказано изменение квази-периода вариации наблюдаемых величин, образующихся на разных расстояниях от истинного начала джета.
5. Показано, что наблюдаемые свойства блазара OJ 287 от парсековых до килопарсековых масштабов могут быть обусловлены прецессией с периодом около 1200 лет винтового джета, образованного развитием неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Сама прецессия является результатом эффекта Лензе-Тирринга в системе одиночной сверхмассивной черной дыры и её аккреционного диска.
6. Единая модель образования переменности – постоянное появление и эволюция в потоке джета субкомпонентов при изогнутом спектре излучения.

55

Глава 4. Прецессия джета блазара OJ 287



Отношение периодов прецессии, определяемых на пк- и кпк-масштабах. Черный цвет соответствует величинам, найденным в рамках ОКР/ЦИ, серый – beamed IC/CMB. Изогнутые линии показывают отношение периодов в зависимости от углового расстояния от ядра при подстановках: $\xi_{pc} = 0.7^\circ$, $\xi_{kpc} = 18.1^\circ$, $\beta_{pc} = 0.9979$, $\beta_{kpc} = 0.025$ (для ОКР/ЦИ) и $\xi_{pc} = 0.7^\circ$, $\xi_{kpc} = 2.3^\circ$, $\beta_{pc} = 0.9979$, $\beta_{kpc} = 0.97$ (для «beamed IC/CMB»). Прямые линии отмечают соответствующие отношения периодов 92 ± 8 лет (сплошные) и 12 лет (штриховые) к найденным величинам T_{kpc} .



$$\frac{T_{pc}}{T_{kpc}} = \frac{d_{pc} \cos \xi_{pc} \beta_{kpc}}{d_{kpc} \cos \xi_{kpc} \beta_{pc}}$$

для ОКР/ЦИ

$$T_{kpc}^{IC/CMB} = 4.5 \cdot 10^7 \text{ лет}$$

для «beamed IC/CMB»

$$T_{kpc}^{IC/CMB} = 8.1 \cdot 10^6 \text{ лет}$$

54

Положения, выносимые на защиту

7. Предложен и успешно применен метод определения кратчайшего времени переменности с высоким уровнем статистической значимости.
8. Получены убедительные доказательства присутствия хорошо упорядоченного глобального магнитного поля в джетах на парсековых масштабах.
9. Впервые показано, что по асимметрии поперечного джету распределения направлений электрического вектора в волне невозможно однозначно определить направление закрутки винтового магнитного поля.
10. Продемонстрировано существенное изменение свойств поляризации в зависимости от геометрических и кинематических параметров джета при магнитном поле с фиксированной топологией.
11. Доказано, что скорость и направление килопарсекового джета не являются параметрами, на основе которых определяется возможность его детектирования в рентгеновском диапазоне.
12. Разработан универсальный метод определения скорости продвижения и нижнего ограничения на угол с лучом зрения килопарсековых джетов. Получены субрелятивистские скорости килопарсековых джетов, которые с лучом зрения составляют углы более 20° .

56

Публикации по теме диссертации

1. **Butuzova M. S.** Search for differences in the velocities and directions of the kiloparsec-scale jets of quasars with and without X-ray emission // *Astronomy Reports*. – 2016. – V. 60, Is. 3. – P. 313-321.
2. **Raiteri C. M., Villata M., Acosta-Pulido J. A., ..., Butuzova M. S., ... (86 аэропое)** Blazar spectral variability as explained by a twisted inhomogeneous jet // *Nature*. – 2017. – V. 552, Is. 7685. – P. 374.
3. **Butuzova M. S.** Geometrical and kinematic parameters of the jet of the blazar S5 0716+71 in a helical-jet model // *Astronomy Reports*. – 2018. – V. 62, Is. 2. – P. 116-122.
4. **Butuzova M. S.** Periods of the long-term variability of the blazar 0716+714 and their inter-correlations in a helical jet model // *Astronomy Reports*. – 2018. – V. 62, Is. 10. – P. 654-663.
5. **Pushkarev A. B., Butuzova M. S., Kovalev Y. Y., Hovatta T.** Multifrequency study of the gamma-ray flaring BL Lacertae object PKS 2233-148 in 2009-2012 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2019. – V. 482, Is. 2. – P. 2336-2353.
6. **Butuzova M. S., Pushkarev A. B.** Inverse Compton Scattering of the Central Source Photons as an X-Ray Emission Mechanism on Kiloparsec Scales in PKS 1127-145 // *The Astrophysical Journal*. – 2019. – V. 883, Is. 2. – P. 131-141.
7. **Vercellone S., Romano P., Piano G., ..., Butuzova M. S., ... (59 аэропое)** AGILE, Fermi, Swift, and GASP/WEBT multi-wavelength observations of the high-redshift blazar 4C +71.07 in outburst // 2019. – *Astronomy & Astrophysics*. – V. 621. – id. A82.
8. **Raiteri C. M., Villata M., Carnerero M. I., ..., Butuzova M. S., ... (64 аэропое)** The beamed jet and quasar core of the distant blazar 4C 71.07 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2019. – V. 489, Is. 2. – P. 1837.
9. **D'Ammando F., Raiteri C. M., Villata M., ..., Butuzova M. S., ... (99 аэропое)** Investigating the multiwavelength behaviour of the flat spectrum radio quasar CTA 102 during 2013-2017 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – V. 490, Is. 4. – P. 5300.

57

Публикации по теме диссертации

10. **Butuzova M. S., Pushkarev A. B., Shablovinskaya E. S., Nazarov S. V.** Inverse Compton Scattering of Radiation from a Central Source as a Possible Mechanism for the Formation of X-Ray Radiation from Kiloparsec Jets of Core-Dominated Quasars // *Astronomy Reports*. – 2020. – V. 64, Is. 11. – P. 894-914.
11. **Butuzova M. S., Pushkarev A. B.** Is OJ 287 a Single Supermassive Black Hole? // *Universe*. – 2020. – V. 6, Is. 11. – id. 191.
12. **Butuzova M. S.** A geometrical interpretation for the properties of multiband optical variability of the blazar S5 0716+714 // *Astroparticle Physics*. – 2021. – V. 129. – id. 102577.
13. **Butuzova M. S.** The Blazar OJ 287 Jet from Parsec to Kiloparsec Scales // *Astronomy Reports*. – 2021. – V. 65, Is. 8. – P. 635-644.
14. **Gorbachev M. A., Butuzova M. S., Sergeev S. G., Nazarov S. V., Zhovtan A. V.** Long-term Multiband Optical Variability of Blazar S5 0716+714 // *The Astrophysical Journal*. – 2022. – V. 928, Is. 1. – P. 86-104.
15. **Butuzova M. S.** The Observed Polarization Direction Depending on Geometrical and Kinematic Parameters of Relativistic Jets // *Astronomy Reports*. – 2022. – V. 66, Is. 10. – P. 845-871.
16. **Butuzova M. S., Pushkarev A. B.** Configuration of the global magnetic field in AGN parsec-scale jets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2023. – V. 520, Is. 4. – P. 6335-6349.
17. **Gorbachev M. A., Butuzova M. S., Nazarov S. V., Zhovtan A. V.** Evidence of jet-caused 12-year optical periodicity of blazar OJ 287 // *Astroparticle Physics*. – 2024. – V. 160. – id. 102965.
18. **Butuzova M. S., Guseva V. A., Gorbachev M. A., Krivenko A. S., Nazarov S. V.** A new method for studying the blazar variability on the shortest time scales and its application to S5 1803+784 // *Journal of High Energy Astrophysics*. – 2025. – V. 45. – P. 19.

58

Апробация результатов

- Семинары КрАО и Астрокосмического центра ФИАН.
- Всероссийские астрономические конференции, г. Ялта (2017), г. Москва (2021), п. Нижний Архыз (2024).
- «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пущино (2016, 2017, 2018, 2019).
- 11-я молодежная научная школа-конференция «Исследования космоса: микро- и макромир», п. Научный и г. Симферополь (2016).
- «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», г. Москва (2018, 2019).
- 15th Potsdam Thinkshop «The role of feedback in galaxy formation: from small-scale winds to large-scale outflow», г. Потсдам, Германия (2018).
- European VLBI Network (EVN) Symposium and Users Meeting, г. Гранада, Испания (2018); г. Корк, Ирландия (2021).
- International conference on gravitation, cosmology and astrophysics, г. Санкт-Петербург (2020).
- Международная конференция «Extragalactic jets on all scales - launching, propagation, termination», online (2021)
- Международная конференция «Galaxies with Active Nuclei on Scales from Black Hole to Host Galaxy» dedicated to the E.A. Dibal's 90th anniversary, п. Научный (2021).
- Конференция «Вселенная: от большого взрыва до наших дней», посвященная 90-летию Н. С. Кардашева, г. Москва (2022).
- Конференция «Многоликая Вселенная: теория и наблюдения», посвященная 90-летию академика Ю. Н. Парийского, п. Нижний Архыз (2022).
- Международная научная конференция «Активные галактики на разных масштабах и длинах волн», п. Нижний Архыз (2024).

59

Ответы за замечания оппонента

в.н.с. Института астрономии РАН, д.ф.-м.н., Баркова М.В.

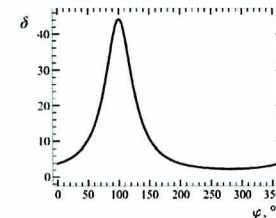
Время в системе отсчета источника:

$$\Delta t' = \delta \Delta t \quad (1.19)$$

Период переменности в СО наблюдателя:

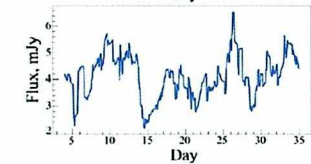
$$P_1 = \sum_{j=1}^n \frac{\Delta t'_j}{\delta(\theta(\varphi))} \approx \frac{n \Delta t'_j}{\delta(\theta_0, \beta)} \quad (1.20)$$

Изменение доплер-фактора в S5 07'6+714

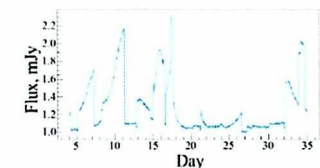


В разделах 3.3 и 3.4 не обсуждаются размер и физические свойства блязов

Несколько сотен субкомпонентов.



50 субкомпонентов.



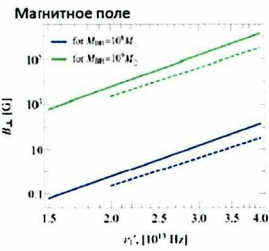
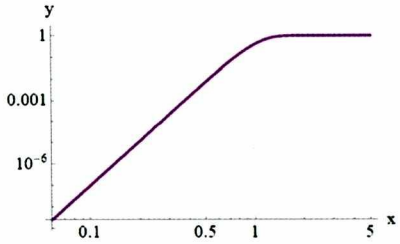
60

$$B'_1 = \left[\frac{\pi c_s}{4 c_6} [1 - \exp(-\tau_v)] \right]^2 (2c_1)^{-5} \frac{R^4}{D_L^4} F_v^{-2} v^5 (1+z)^{-1} \delta^{-3}, \quad (3.9)$$

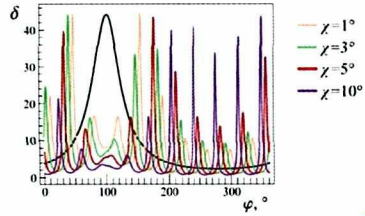
$$\tau_v = (v'/v'_1)^{-\alpha-5/2}$$

$$f(x) := (1 - \text{Exp}[-(x\theta/x)^{-1.5/2}])^2$$

$x\theta = 1$



Вариации доплер-фактора в оптическом ядре

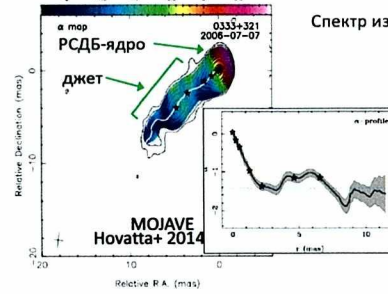


61

Ответы за замечания оппонента

в.н.с. ФТИ им. Иоффе, д.ф.-м.н., член-корр. РАН Иванчика А.В.

1. Было бы уместным привести значения физических параметров, реализуемых в джетах АЯГ.



Спектр излучения $F(\nu) = Q\nu^{-\alpha}$

Энергетический спектр $N(E) = KE^{-s}$ электронов

Спектральный индекс α РСДБ-ядра $\approx 0 - 0.5$

джета $0.5 - 1.5$ $s \approx 2 - 4$

Оптическое излучение $\alpha \approx 0.6 - 2, s \approx 2.2 - 5.$

Лоренц-факторы $\Gamma: \Gamma_{\min} \sim 1 - 10$

$\Gamma_{\max} \sim 10^3 - 10^6$

Килопарсекковые масштабы:

Радиоизлучение: $\alpha \approx 0.5 - 1, s \approx 2 - 3$

Оптическое излучение: $\alpha \approx 1 - 1.8, s \approx 3 - 4.2$

Рентгеновское излучение: $\alpha \approx 0.4 - 1, s \approx 2 - 3.$

$\Gamma_{\min} \sim 1 - 10$

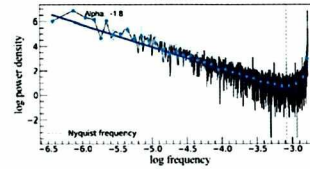
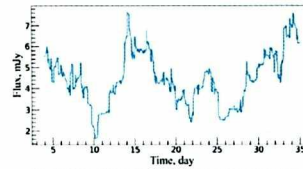
$\Gamma_{\max} \sim 10^3 - 10^6$

62

Ответы за замечания оппонента

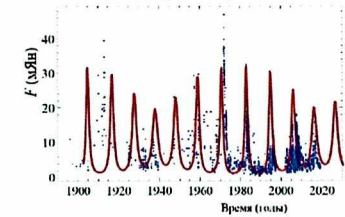
Зав.лаб. Радиоастрофизики, в.н.с. САО РАН, д.ф.-м.н., Трушкина С.А.

Синтетическая кривая блеска при моделировании переменности за счет эволюции субкомпонент потока джета и соответствующий спектр мощности.

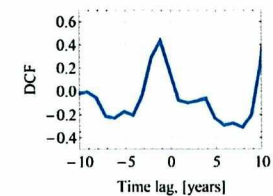


Gorbachev & Butuzova, A&AT, 2025

Долговременная кривая блеска OJ 287 и её интерпретация



DCF при усреднении за 0.05 года и окне 1 год



64

Схема джета

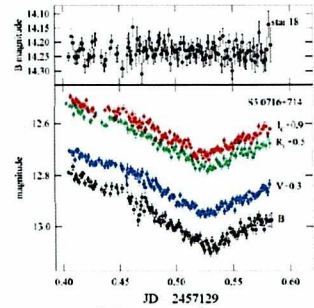


Рис. 3.1. Кривые блеска в ночь с IDV.

Амплитуда переменности [Heidt & Wagner 1996]:

$$A = \sqrt{(m_{\max} - m_{\min})^2 - 2\sigma^2}$$

63