

УДК 520.872:524.884

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРСЕКОВОЙ СТРУКТУРЫ ВЫБРОСА

КВАЗАРА 1642+690

Пушкарев А.Б.^{1,2}

¹НИИ «Крымская астрофизическая Обсерватория», Научный, Украина

²Главная Астрономическая Обсерватория (Пулково), С.-Петербург, Россия

E-mail: pushkarev@crao.crimea.uu

Исследована парсековая структура релятивистского выброса квазара 1642+690 с помощью двухчастотных (2.3 и 8.6 ГГц) наблюдений на системе апертурного синтеза из 17 антенн методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). По данным наблюдений получены изображения объекта, карта распределения спектрального индекса на масштабах миллисекунд дуги, а также оценки яркостной температуры, светимости, угла к лучу зрения и угла раскрыва струи.

Ключевые слова: активные ядра галактик, квазары, интерферометрия.

ВВЕДЕНИЕ

Квазары (от англ. quasar – quasistellar radio source – квазизвездный источник радиоизлучения) являются мощнейшими внегалактическими источниками электромагнитного излучения. Они были открыты в 1960-м году как очень компактные радиоисточники, впоследствии отождествленные с оптическими объектами. Измеренные по положениям широких эмиссионных линий в оптических спектрах красные смещения квазаров позволили установить их внегалактическую природу. Широкие эмиссионные линии свидетельствуют о высоких скоростях движения облаков тепловой плазмы. Квазары излучают во всех участках электромагнитного спектра: от радио- до гамма-диапазона. Причем, их излучение сильно- и быстропеременно на масштабах времени вплоть до нескольких десятков минут, что свидетельствует о чрезвычайной компактности области генерации излучения. Кроме того, активность в квазарах проявляется также в формировании биполярных истечений вещества, представляющих собой выбросы нетепловой плазмы, движущиеся с релятивистскими скоростями. Излучение квазаров поляризовано, степень линейной поляризации в оптически тонких компонентах струй, как правило, составляет несколько десятков процентов, а в отдельных случаях может достигать 60-70%, т.е. верхнего предела на степень поляризации оптически тонкого синхротронного излучения. Этот факт отражает высокую степень упорядоченности силовых линий магнитного поля в джетах квазаров.

По современным представлениям, квазарами являются активные галактики, в центрах которых происходит аккреция вещества на вращающуюся сверхмассивную черную дыру с последующим образованием биполярных потоков плазмы. Несмотря на более чем полувекую историю изучения этих объектов, целый ряд вопросов, касающихся понимания физики процессов, проходящих как в аккреционном диске, вблизи горизонта событий черной дыры, а также и в самих выбросах, остаются

открытыми. В настоящее время активно обсуждаются следующие вопросы: (i) механизм ускорения выбросов, их коллимация и удержание; (ii) состав выбросов; (iii) природа ярких джет-компонент, которая может быть как следствием фронтов релятивистских ударных волн [1,2], так и распространением неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца [3]; (iv) механизм гамма-излучения квазаров; (v) место генерации оптического и гамма-излучения; (vi) механизм переменности излучения, (vii) взаимодействие выбросов с окружающей их средой и др.

В данной работе исследуется тонкая структура выброса в квазаре 1642+690 путем картографирования с предельным угловым разрешением, составляющим доли миллисекунд дуги, и последующего моделирования распределения радиояркости объекта, по результатам которого определяются такие физические параметры как интегральный поток на частотах 2.3 и 8.6 ГГц, спектральная светимость, яркостная температура, а также производятся оценки угла к лучу зрения и истинного угла раствора струи. Обсуждается карта распределения спектрального индекса по источнику. Данные, используемые в настоящей работе, получены из открытого архива Национальной Радиоастрономической Обсерватории [4].

1. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения источника 1642+690 проводились в рамках долгосрочного РСДБ-проекта RDV (Research and Development – VLBA) продолжительностью 24 часа, проведенного 18-19 июня 2003 г. с помощью системы VLBA (Very Long Baseline interferometry Array), состоящей из десяти 25-м антенн, а также семи дополнительных геодезических станций. В Таблице 1 приведены характеристики участвующих в эксперименте антенн. Запись сигнала велась в правой круговой поляризации с однобитным квантованием сигнала одновременно в восьми частотных каналах (IF) шириной 8 МГц каждый: в S-полосе с центрами на 2.22, 2.24, 2.33, 2.36 ГГц и в X-полосе с центрами на 8.41, 8.48, 8.79, 8.90 ГГц. Общая ширина полосы составила 32 МГц при 16 спектральных каналах в каждом частотном. Квазар 1642+690 имел 19 сканов наблюдений с общим временем слежения 57 мин, что для используемой конфигурации антенн соответствует 35500 измерений амплитуды и фазы функции видности. Корреляция данных была проведена на VLBA корреляторе в Сокорро (Нью-Мексико, США) со временем интегрирования четыре секунды.

Участие в наблюдениях большого количества радиотелескопов, расположенных в разных частях света, приводит к тому, что все антенны не могут следить одновременно за источником. Для обеспечения максимального использования антенного времени, т.е. работы в течение всего сеанса, полная система антенн разбивается на подсистемы (подрешетки) таким образом, чтобы в течение того или иного скана наблюдений для всех антенн, входящих в каждую из подрешеток, текущий источник был в зоне видимости. В эксперименте использовалось восемь подрешеток. Привлечение восьми геодезических антенн в дополнение к десяти радиотелескопам VLBA увеличивает количество баз и, соответственно данных, в три с половиной раза, что существенно улучшает заполнение плоскости пространственных частот и приводит к увеличению углового

разрешения в полтора раза на той же частоте. Максимальная проекция базы составила 11300 км между пунктами St. Croix (США) и Tsucuba (Япония).

Таблица 1

Параметры антенн, участвовавших в наблюдениях

Антенна	Код	Страна	Диаметр, м	DPFU, мК/Ян	
				S-полоса	X-полоса
Brewster	BR	США	25	98	112
Fort Devis	FD	США	25	102	84
Hancock	HN	США	25	89	110
Kokkee	KK	США	20	73	44
Kitt Peack	KP	США	25	908	114
Los Alamos	LA	США	25	88	109
Matera	MA	Италия	20	91	93
Mauna Kea	MK	США	25	77	118
North Liberty	NL	США	25	91	115
Onsala	ON	Швеция	20	29	43
Owens Valley	OV	США	25	84	112
Pie Town	PT	США	25	94	124
St. Croix	SC	США	25	90	110
TIGO	TC	Чили	6	7	10
Tsucuba	TS	Япония	32	238	165
Westford	WF	США	18	143	38
Wetzell	WZ	Германия	20	20	71

2. КАЛИБРОВКА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Первичная калибровка была проведена с помощью пакета обработки AIPS [5]. Для калибровки амплитуды, т.е. перевода коэффициентов корреляции в единицы плотности потока Ян ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт/м}^2/\text{Гц}$), использовались кривые усиления антенн, приведенные в Таблице 1 (параметр DPFU – degree per flux unit) и системные температуры, измеренные в течение сеанса. Параметр DPFU является мерой чувствительности радиотелескопа в направлении на зенит. Калибровка фазы, а именно, коррекция фазы за остаточные задержки была выполнена процедурой FRING с использованием четырехминутного интервала усреднения при нахождении решений и применением модели точечного источника. Все решения, имеющие отношение сигнал-шум меньше пяти, исключались. В среднем, доля плохих решений составляла 8% для X-полосы и 10% для S-полосы. Для получения полностью калиброванного массива данных на каждой из частот применялась процедура SPLIT с усреднением данных по спектральным каналам внутри каждого из четырех промежуточных частотных каналов в S- и X-полосе. Первая фазовая самокалибровка проводилась с помощью процедуры CALIB, имеющей два преимущества: (i) возможность находить первое решение, используя все

промежуточные частоты вместе, (ii) автоматическое флагирувание данных с низким отношением сигнал-шум.

3. КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРУИ

Дальнейшая обработка – самокалибровка и гибридное картографирование были проведены в пакете DIFMAP [6]. В качестве начальной модели использовалась модель точечного источника в фазовом центре. Сходимость достигалась за ~20 итераций, включая фазовую и фазо-амплитудную самокалибровки. При построении окончательной карты источника использовалось естественное взвешивание данных функции видности. На Рис. 1 представлены восстановленные изображения квазара 1642+690. На обоих частотах морфология источника представляет собой структуру типа яркое компактное ядро плюс односторонний выброс. Вследствие эффекта доплеровского усиления излучения детектируется только приближающийся к наблюдателю выброс. Излучение удаляющегося выброса ослаблено тем же эффектом и необнаружимо из-за ограниченности динамического диапазона изображения, рассчитываемого как отношение пикового потока к величине остаточного шума на карте, и составившего 1984 для изображения на 8.6 ГГц и 900 на 2.3 ГГц. Факт необнаружения потока от контр-джета свидетельствует о малом угле к лучу зрения, оценку сверху для которого можно сделать из соотношения $\varphi < \arcsin(1/\beta_{\text{app}})$, где β_{app} – видимая скорость движения компонент струи, измеренная в скоростях света. Величина β_{app} для 1642+690 составила 16.65 по кинематическим измерениям [8]. Тогда угол к лучу зрения $\varphi < 3.5^\circ$.

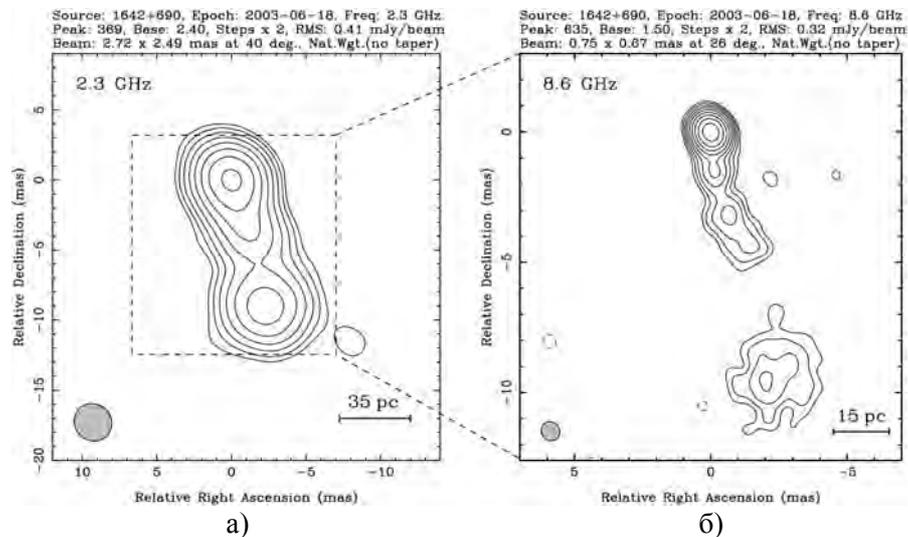


Рис. 1. РСДБ карты квазара 1642+690 на частоте 2.3 ГГц (а) и 8.6 ГГц (б). Оси даны в миллисекундах дуги. В левом нижнем углу показана синтезированная диаграмма направленности.

Источник находится на красном смещении 0.751, что соответствует фотометрическому расстоянию 4645 Мпк. Тогда одна миллисекунда дуги в угловом масштабе соответствует 7.35 пк для неоднородной Фридмановской модели Вселенной (λ CDM космология) с параметрами $\Omega_m = 0.27$, $\Omega_\Lambda = 0.73$ и постоянной Хаббла $H_0 = 71h$ км с⁻¹ Мпк⁻¹ [7]. Таким образом, структура выброса прослеживается на описанном выше уровне чувствительности до расстояний ~ 75 пк в проекции на небесную сферу или до ≥ 1245 пк в системе источника.

Моделирование структуры объекта на частоте 8.6 ГГц также было выполнено в DIFMAP с использованием шести круговых гауссовых компонент, которые при свертке с соответствующей диаграммой направленности воссоздавали основу структуры источника. Результатами моделирования (Таблица 2) являются поток (S), положение гаусс-компонента в полярных координатах (R , Θ), а также его размер (D) по уровню половинной мощности. Все позиционные углы отсчитываются в направлении с севера на восток. Положения компонент пересчитаны по отношению к ядру, яркостная температура которого, рассчитанная как $T_b = 2 \ln 2 S \lambda^2 (1+z) / (\pi k D^2)$, где λ – длина волны, k – постоянная Больцмана, составила $T_b = 1.94 \times 10^{12}$ К. Спектральная светимость источника на 8.6 ГГц, рассчитанная по формуле $L = 4\pi S_{\text{tot}} d^2$, где S_{tot} – интегральный поток с РСДБ-масштабов, d – фотометрическое расстояние, составила $L = 2.35 \times 10^{27}$ Вт Гц⁻¹. Предполагая, в первом приближении, коническую форму струи, т.е. линейную пропорциональность между ее поперечным размером и расстоянием до РСДБ-ядра $D = aR$, был определен параметр $a = 0.236$. Тогда видимый угол раскрыва струи может быть рассчитан как $\alpha_{\text{app}} = 2 \arctg(0.5D/R) \approx 13.5^\circ$, а истинный, соответственно, $\alpha_{\text{int}} = \alpha_{\text{app}} \sin \varphi \approx 0.8^\circ$, что свидетельствует о высокой степени коллимации выброса на дека- и гектопарсековых расстояниях от центральной машины активного галактического ядра.

Таблица 2

Модель источника на частоте 8.6 ГГц

Компонент	S , мЯн	R , мсек	Θ , град	D , мсек
Ядро	524±41	0.000±0.002	0.0±0.0	0.088±0.004
C5	198±24	0.322±0.009	-168.0±2.0	0.248±0.019
C4	42±11	1.570±0.036	-175.1±1.4	0.421±0.072
C3	29±7	3.250±0.071	-169.4±1.3	0.762±0.143
C2	25±6	4.463±0.104	-162.1±1.4	1.063±0.207
C1	93±16	9.740±0.156	-166.0±0.9	2.029±0.313

Распределение ансамбля релятивистских электронов по энергиям в выбросе неравномерно и чаще всего аппроксимируется степенной зависимостью вида

$N(E) \sim E^{-\gamma} dE$, где γ – показатель энергетического спектра электронов, а величина $\alpha = (1 - \gamma)/2$ представляет собой спектральный индекс, связывающий интенсивность синхротронного излучения с частотой соотношением $S \sim \nu^\alpha$.

Используя изображения источника на частотах 2.3 и 8.6 ГГц (Рис. 2), приведенных к одному размеру пикселя, свернутых с одинаковой диаграммой и совмещенных по ахроматическим компонентам струи, была получена карта распределения спектрального индекса $\alpha = \log(S_1/S_2)/\log(\nu_2/\nu_1)$, приведенная на Рис. 2. В подрисунках даны профили интенсивности и спектрального индекса вдоль хребтовой линии, полученной вписыванием гауссианы в поперечный срез выброса и определением координат, соответствующим максимуму интенсивности. Излучение из ядерной области – оптически толстое с характерным значением $\alpha_{\text{core}} \approx (0.5 - 1)$, тогда как излучение струи – оптически тонкое с медианным значением $\alpha_{\text{jet}} = -0.62$ и показателем энергетического спектра электронов $\gamma = 2.2$.

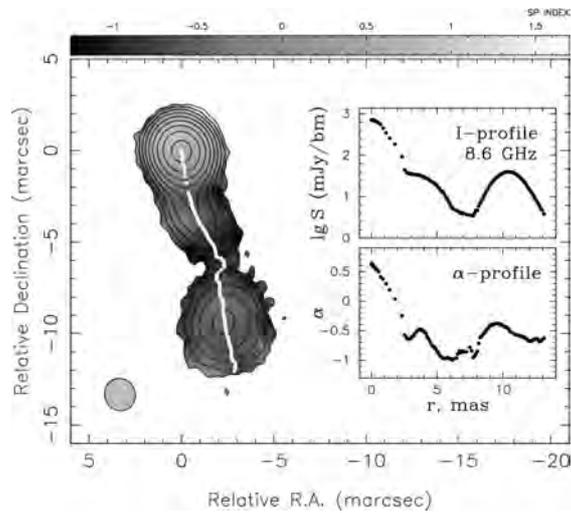


Рис. 2. Распределение спектрального индекса по источнику (слева). Контурами показаны уровни интенсивности по данным на 8.6 ГГц. Хребтовая линия выброса показана белыми точками. В подрисунках даны профили интенсивности (вверху) и спектрального индекса (внизу).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Восстановлены РСДБ-изображения квазара 1642+690 с миллисекундным угловым разрешением на частоте 2.3 и 8.6 ГГц. Проведено моделирование структуры источника, по результатам которого проведена оценка таких физических параметров струи, как интегральный поток, спектральная светимость, яркостная температура, угол к лучу зрения, а также видимый и истинный угол раскрытия выброса. Показан нетепловой характер излучения источника, малый угол к лучу зрения и высокая

степень коллимации релятивистского джета. Распределение спектрального индекса по струе неоднородно; синхротронное излучение джета просветляется с увеличением расстояния от РСДБ-ядра, однако в ярких компонентах струи спектральный индекс имеет тенденцию к уплощению, что обусловлено усилением магнитного поля в этих областях.

Список литературы

1. Hughes P.A. Synchrotron Emission from Shocked Relativistic Jets. II. A Model for the Centimeter Wave Band Quiescent and Burst Emission from BL Lacertae / Hughes P.A., Aller H.D., Aller M.F. // *Astrophysical Journal*. – 1989. – V. 341. – P. 68-79.
2. Laing R. A model for the magnetic field structure in extended radio sources / Laing R. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 1980. – V. 193. – P. 439-449.
3. The role of Kelvin-Helmholtz instability in the internal structure of relativistic outflows. The case of the jet in 3C 273 / Perucho M., Lobanov A.P., Marti J.-M., Hardee P.E. // *Astronomy & Astrophysics*. – 2006. – V. 456. – P. 493-504.
4. NRAO Science Data Archive / NRAO. – <http://archive.nrao.edu>. – 02.10.2010.
5. Greisen E. The Astronomical Image Processing System / Greisen E. // *Seminar on Acquisition, Processing and Archiving of astronomical Images*. – 1990. – P. 125-142.
6. Shepherd M.C. DIFMAP: an interactive program for synthesis imaging / Shepherd M.C., Pearson T.J., Taylor G.B. // *Bull. Am. Astron. Soc.* – V. 26. – No. 2. – P. 987-989.
7. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Cosmological Interpretation / Komatsu E., Dunkley J., Nolte M.R. et al. // *Astrophysical Journal Supplement*. – V. 180. – No. 2. – P. 330-376.
8. Sub-Milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. III. Kinematics of Parsec-scale Radio Jets / Kellermann K.I., Lister L.M., Homan D.C. et al. // *Astrophysical Journal*. – V. 609. – No. 2. – P. 539-563.

Пушкаръов О.Б. Дослідження парсекової структури квазара 1642+690 / Пушкаръов О.Б. // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Фізико-математичні науки. – 2010. – Т. 23(62), №3. – С. 17-23.

Досліджена парсекова структура релятивістського викиду квазара 1642+690 за допомогою двочастотних (2.3 і 8.6 ГГц) спостережень на системі апертурного синтезу з 17 антен методом радіоінтерферометрії з наддовгими базами (РНДБ). За даними спостережень отримані зображення об'єкта, карта розподілу спектрального індексу на масштабах мілісекунд дуги, а також оцінки яркісної температури, світності, кута до променя зору, а також кута розкриття струменя.

Ключові слова: активні ядра галактик, квазари, інтерферометрія.

Pushkarev A.B. Investigation of a parsec-scale structure of the quasar 1642+690 / Pushkarev A.B. // *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University*. – Series: Physics and Mathematics Sciences. – 2010. – Vol. 23(62), No.3. – P. 17-23.

Parsec-scale structure of a relativistic jet of the quasar 1642+690 is investigated using dual-frequency (2.3 and 8.6 GHz) aperture synthesis observations with 17 antennas applying the method of very long baseline interferometry (VLBI). The observational data allowed to construct the radio images of the source, the map of spectral index distribution on a milliarcsecond scale, and also derive such physical parameters as brightness temperature, luminosity, angle to the line of sight, and jet opening angle.

Keywords: active galactic nuclei, quasars, interferometry.

Поступила в редакцію 10.10.2010 г.