DOI 10.15826/B978-5-7996-3848-1.16

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИИ ДЖЕТОВ АКТИВНЫХ ГАЛАКТИК НА ПАРСЕКОВЫХ МАСШТАБАХ

И. М. Костричкин

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Эта работа посвящена системному изучению изменений в геометрии джетов активных ядер галактик (АЯГ). В ходе работы была разработана процедура анализа РСДБ-карт для определения видимых направлений джета. Также для 1 216 АЯГ были получены зависимости видимых позиционных углов от времени, что позволило нам оценить такие физические параметры джета, как скорости поворота джета и периоды переменности в рамках модели спирального джета. В предположении наличия двойных черных дыр были рассмотрены два сценария развития переменности в направлении джета: орбитальный и прецессионный, а также оценены характерные отношения масс черных дыр и примерные расстояния между ними.

ANALYSIS OF PARSEC-SCALE JET DIRECTION VARIATIONS IN ACTIVE GALAXIES

I. M. Kostrichkin

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

This work is devoted to a systematic study of changes in the geometry of active galactic nuclei (AGN) jets. We developed a procedure for analyzing VLBI maps to determine the apparent directions of the jets. For 1216 AGN we obtained time dependencies of jet position angles, which allowed us to estimate such physical parameters as: jet rotation velocities and periods of variability. Under the assumption of the presence of binary system, we considered two scenarios for the development of variability in the direction of jet: orbital and precession, and determined characteristic relations of black hole masses and distances between them.

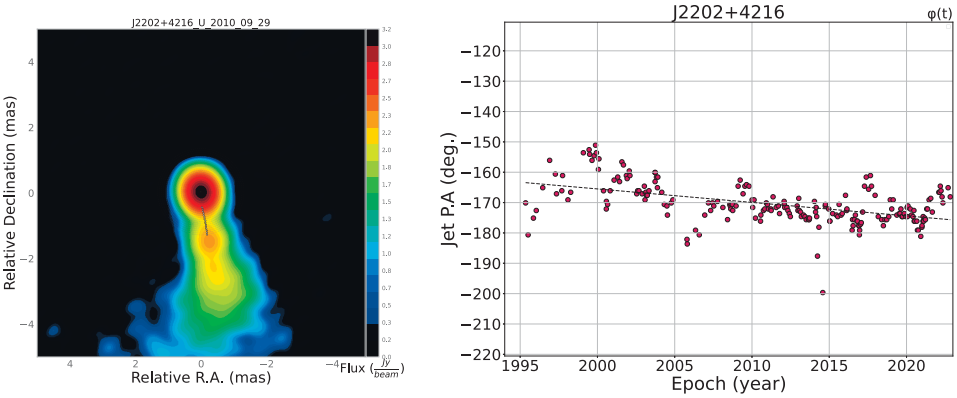
Введение

В работе исследуется эволюция геометрии джета активных галактических ядер на парсековых масштабах с помощью радионаблюдений. Предыдущие исследования, например [1, 2], показали, что у отдельных квазаров направление джета может изменяться со временем. Модели, объясняющие это явление, включают прецессию струи из-за несовпадения векторов углового момента центральной черной дыры и аккреционного диска [3], развития неустойчивостей [4] и наличия в системе второй черной дыры [5]. В данной работе мы представляем данные о временных зависимостях позиционных углов джетов, временных периодах переменности и пространственных масштабах существенных изменений в углах в рамках модели спирального джета.

© Костричкин И. М., 2024

Методы анализа РСДБ-карт

Основным способом получения информации о направлении джета для отдельного квазара является анализ его РСДБ-карт. Для этого был разработан полностью автоматический метод определения направления джета на карте, что позволяет нам изучать существенно большее количество источников без потери качества анализа. Процедура определения позиционного угла джета на карте следующая. Работая с изначально круговой диаграммой направленности, мы определяем наиболее яркую точку на карте, в дальнейшем она будет отождествляться с видимым началом джета на карте. Далее, из данной точки мы строим концентрические окружности, радиус которых меняется от 80 до 200 % от размера изначальной диаграммы направленности. После этого на каждой из этих окружностей, определяется наиболее яркая точка. Характерный пример такой карты указан на рисунке (слева).



Слева — РСДБ-карта источника J2202+4216, полученная 29 сентября 2010 г. на частоте в 15 ГГц. Цветом показано распределение плотности потока излучения; черным пунктиром — концентрические окружности; черными точками — наиболее яркая точка на окружности. Справа — график зависимости позиционного угла джета J2202+4216 от времени на частоте 15 ГГц; черная пунктирная линия — результат аппроксимации зависимости линейным законом

Такая процедура реализуется для всех РСДБ-карт отдельного источника. Таким образом мы получаем информацию о временной зависимости позиционного угла джета отдельно выбранного АЯГ. Эти зависимости могут иметь произвольный вид, однако большинство активных ядер демонстрирует или стационарное, или линейное поведение направления джета во времени. Так, для квазара J2202+4216 зависимость имеет вид, представленный на рисунке (справа)

Модель спирального джета

Для объяснения полученных данных в данной работе используется модель спирального джета, подробно описанная в [6, 7]. В рамках данной модели предполагается, что геометрические проявления переменности в направлении джета вызваны спиралевидной структурой джета, которая, в свою очередь, образуется вследствие периодического изменения направления излучения центрального объекта.

В таком предположении зависимость позиционного угла от времени описывается законом вида (1)

$$\mathrm{PA}(\varphi(t)) = \pm \arctan \frac{\sin \varphi(t)}{\theta_0/\xi + \cos \varphi(t)} + \mathrm{PA}_0 \,. \tag{1}$$

Упрощая зависимость (1), можно получить выражение для скорости поворота в рамках линеаризованной модели спирального джета, оно будет иметь вид (2), где T — временной период переменности:

$$a = \frac{dPA}{dt} = \frac{2\pi}{T(1 + \theta_0/\xi)} \,. \tag{2}$$

Результаты

В ходе работы нами были получены зависимости видимого позиционного угла джета для 1216 активных ядер. В рамках линеаризованной модели спирального джета медианное значение скорости поворота джета $a = d\mathrm{PA}(t)/dt$ по всей выборке составляет $a = 0.4 \pm 0.26\ \frac{\text{град}}{\text{год}}$. Полагая характерное отношение $\theta_0/\xi \approx 2.5$, было определено медианное значение периода переменности по всей выборке, равное $T \approx 155$ лет. Причем половина всех исследуемых в этой выборке активных ядер имеют период переменности в диапазоне от 94 до 260 лет. Из полученного медианного периода можно получить характерную длину витка спирали в рамках такой модели. С учетом проекционных эффектов эта связь задается выражением (3)

$$H = \frac{T\beta c \sin\theta}{1 - \beta\cos\theta} \approx 440 \text{ пк} \,. \tag{3}$$

Также, предполагая что переменность вызвана наличием в системе второй черной дыры, были рассмотрены два механизма возникновения переменности — из-за орбитального движения вторичной черной дыры или возникновения прецессии из-за несовпадения угловых моментов импульса двух черных дыр. В первом случае полученный период переменности соответствует характерному расстоянию между черными дырами, равному $R \approx 0.1$ пк. В случае прецессионного механизма развития переменности $R \approx 0.001$ пк.

Считая, что видимый поворот джета может быть вызван нерадиальным движением его отдельных компонент, нами были получены характерные угловые скорости поворота этих компонент по всей выборке. Эти значения совпадают со средними скоростями поворота джета, однако дальнейший корреляционный анализ показал, что взаимосвязь между этими двумя эффектами почти отсутствует.

Заключение

По характерным значениям угловых скоростей поворота джетов можно утверждать, что явление переменности в направлении джета у активных ядер не является массовым. Общее число переменных источников, демонстрирующих существенно переменное поведение, можно оценить сверху как не более 25 % от общего числа выборки. Полученные нами характерные значения периода являются подтверждением первоначальной догадки о том, что для существенной части активных ядер характерно стационарное или слабопеременное поведение. В предположении, что видимые вариации в позиционном угле джета вызваны наличием в системе второй черной дыры, были оценены характерные временные периоды и расстояния между черными дырами согласно [8]. Исходя из наших расчетов, мы предполагаем более вероятным прецессионный механизм изменения направления джета, а механизм, связанный с орбитальным движением, менее вероятным, поскольку расстояние в доли парсек значительно и могло бы быть напрямую обнаружено при наблюдениях на

частотах в 43 или 86 ГГц. Однако неоднородностей на таких масштабах обнаружено не было, из чего можно сделать вывод, что данный сценарий возникновения переменности в видимом позиционном угле маловероятен. На основе имеющихся у нас данных мы склонны предполагать, что корреляция между полученными нами скоростями поворота джетов и угловыми скоростями нерадиального движения их компонент отсутствует.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 20-72-10078.

Библиографические ссылки

[1] *Plavin A. V., Kovalev Y. Y., Pushkarev A. B.* Direction of Parsec-scale Jets for 9220 Active Galactic Nuclei // Astrophys. J. Suppl. Ser. — 2022. — Vol. 260. — P. 4.

[2] *Lister M. L., Homan D. C., Kellermann K. I. et al.* VizieR Online Data Catalog: MOJAVE. XVIII. Bright radio-loud active AGNs (Lister+, 2021) // VizieR Online Data Catalog. — 2023.

[3] *Cui Yuzhu, Hada Kazuhiro, Kawashima Tomohisa et al.* Precessing jet nozzle connecting to a spinning black hole in M87 // Nature. — 2023. — Vol. 621. — P. 711–715.

[4] *Nikonov A. S., Kovalev Y. Y., Kravchenko E. V. et al.* Properties of the jet in M87 revealed by its helical structure imaged with the VLBA at 8 and 15 GHz // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2023. — Vol. 526. — P. 5949–5963.

[5] *Valtonen M. J., Wiik K.* Optical polarization angle and VLBI jet direction in the binary black hole model of OJ287 // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2012. — Vol. 421. — P. 1861—1867.

[6] *Butuzova M. S.* Geometrical and Kinematic Parameters of the Jet of the Blazar S5 0716+71 in a Helical-Jet Model // Astronomy Reports. — 2018. — Vol. 62. — P. 116–122.

[7] *Butuzova M. S., Pushkarev A. B.* Is OJ 287 a Single Supermassive Black Hole? // Universe. — 2020. — Vol. 6. — P. 191.

[8] *Begelman M. C., Blandford R. D., Rees M. J.* Massive black hole binaries in active galactic nuclei // Nature. — 1980. — Vol. 287, № 5780. — P. 307–309.