

Определение параметра множественности частиц в релятивистских струйных выбросах с помощью эффекта видимого сдвига ядра

Е.Е. Нохрина¹, В.С. Бескин^{1,2}, Ю.Ю. Ковалёв², А.А. Желтоухов²

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

²Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

Одним из важнейших параметров в магнитогидродинамических (МГД) моделях релятивистских струйных выбросов является безразмерный параметр множественности частиц λ , который определяется как отношение концентрации частиц n к гольдрайховской концентрации $n_{GJ} = \Omega B / 2\pi c e$ (то есть минимальной концентрации, необходимой для экранирования продольного электрического поля в магнитосфере). Существует две модели [см., например, обзор 1] для определения величины λ . В первой из них электрон-позитронные пары рождаются в результате двухфотонных столкновений [11]. При этом предполагается что фотоны с достаточной энергией поставляются из внутренних частей аккреционного диска. В этом случае $\lambda_1 \sim 10^{10} - 10^{12}$. Вторая модель учитывает появление вблизи оси вращения области, где гольдрайховская плотность плазмы равна нулю из-за эффектов общей теории относительности, что соответствует внешнему зазору в магнитосфере пульсара [10, 12]. Эта модель даёт $\lambda_2 \sim 10 - 100$. Таким образом, независимая оценка значения параметра множественности λ из наблюдений представляет собой большой интерес, так как это позволило бы выбрать одну из моделей рождения частиц, если оценка окажется порядка предсказанных значений, или сделать вывод о необходимости новой модели образования плазмы, если оценка окажется существенно вне двух предсказанных диапазонов значений.

С λ связан параметр замагниченности МГД течения σ [1], имеющий смысл отношения энергии электромагнитного поля к энергии плазмы у основания течения. Параметр замагниченности связан с параметром множественности частиц простым соотношением

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{W_{tot} e^2}{m_e^2 c^5}},$$

где W_{tot} (эрг/с) — это полная мощность выброса. Таким образом если можно точно оценить один из этих параметров, второй определится из этого соотношения. Параметр σ равен максимальному Лоренц-фактору, который может получить вещество при трансформации всей электромагнитной энергии в кинетическую энергию движения вещества. Поскольку для нескольких струйных выбросов Лоренц-фактор γ известен из наблюдений, то знание σ может дать важную информацию о структуре течения. В частности, является ли течение сильно и слабо замагниченным вдали от его основания. Первая модель рождения частиц даёт для параметра замагниченности значение $\sigma \sim 10^2 - 10^3$, а вторая модель — $\sigma \sim 10^{10} - 10^{12}$.

Для определения параметра множественности частиц λ и, следовательно, параметра замагниченности σ , может быть использован эффект зависимости видимого положения ядра струйного выброса от частоты наблюдения [2,4,5,6,7,8]. Этот эффект связан с поглощением синхротронных фотонов газом релятивистских электронов, движущихся в магнитном поле в струйном выбросе. Видимое положение ядра определяется расстоянием, на котором для данной частоты оптическая толщина достигает единицы.

Впервые такие измерения сразу для статистически значимого (20 квазаров, блазаров и радиогалактик) числа объектов были выполнены К.В. Соколовским и др., [13]. Наблюдения на 9 частотах позволили аппроксимировать видимое положение ядра как функцию частоты

$$r_0 - r = \xi - \eta \left(\frac{\nu_m}{\Gamma \Gamma \omega} \right)^{-1},$$

где r_0 это положение яркого участка выброса, r это видимое положение ядра в миллиардсекундах (мас), ν_m — частота. Здесь величины ξ , измеряемая в миллиардсекундах, и η , измеряемая в миллиардсекундах на ГГц, — измеренные параметры этой аппроксимации. Одним из важных результатов этих измерений было подтверждение линейной зависимости сдвига ядра от частоты. Косвенно это подтверждает как гипотезу о равномерном распределении энергий электро-магнитного поля и плазмы в релятивистских выбросах, так и зависимость величины магнитного поля и плазмы с расстоянием.

Зная наклон зависимости $r(\nu)$ и предполагая равномерное распределение энергии между частицами и магнитным полем, можно записать для параметра множественности выражение

$$\lambda = 2.6 \cdot 10^{12} \left(\frac{\eta}{\text{мас} \cdot \Gamma \Gamma \mu} \right)^{3/2} \left(\frac{W_{tot}}{10^{47} \text{ эрг} / \text{с}} \right)^{-1/2} \left(\frac{D_L}{1 \text{ Гпк}} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{K}{\gamma_{\min}^2}} \frac{1}{\sqrt{\chi} \sin \varphi \cdot \delta \cdot (1+z)^2}.$$

Здесь D_L (Гпк) – это расстояние до объекта, χ (рад) – угол раскрытия выброса, φ (рад) – угол зрения, δ – доплер-фактор, z – красное смещение и K – безразмерная функция минимального и максимального лоренц-фактора электронов в их степенном распределении по энергиям [5].

Нами были выполнены вычисления параметра множественности для статистически значимого числа объектов – 86, что позволяет с уверенностью оценивать величину параметра множественности и параметра замагниченности, играющих решающую роль в построении МГД моделей релятивистских струйных выбросов. Для вычисления параметров множественности были использованы результаты измерений сдвига видимого ядра, выполненные Пушкарёвым и др. [14] для 163 объектов. Расстояния до объектов D_L были получены по значению красного смещения z для общепринятой космологической модели. Мы положили полную мощность потерь равной $W_{tot}=10^{47}$ эрг/с, что соответствует Эддингтоновской светимости для центрального объекта массой $10^9 M_{\text{sun}}$. Углы χ и φ являются функциями от наблюдаемых величин: кажущегося угла полураскрыва χ_{app} , кажущейся скорости яркой особенности β_{app} и доплер-фактора δ . Значения углов полураскрыва для объектов с измеренным видимым сдвигом ядра были взяты из работы [16] (102 из 163 объектов), а значения видимой скорости – из работы [15] (87 из 102 объектов).

Для определения доплер-фактора течения могут быть использованы два принципиально различных способа измерения: по переменности [8] и по кинематике [17]. Таким образом, мы получим переменный λ_{var} и кинематический λ_{kin} параметры множественности. Мы имеем выборку из 50 внегалактических активных ядер, для которых может быть получен λ_{var} , и 86 объектов, для которых может быть вычислен λ_{kin} . Соответствующие результаты представлены на Рис. 1 (параметры по переменности) и Рис. 2 (кинематические параметры). Медианное значение для параметра λ , вычисленного по кинематике, совпадает со значением, полученным по переменности. Эта величина, а также медианное значение параметра замагниченности равны, соответственно: $\lambda_{\text{med}}=2 \cdot 10^{13}$, $\sigma_{\text{med}}=50$.

Так как результаты получены по выборке из 86 объектов, то их можно считать статистически значимыми. Полученное значение параметра множественности очень хорошо согласуется с первой моделью заполнения магнитосферы плазмой. При этом параметр замагниченности σ получается порядка нескольких десятков, что находится в согласии с наблюдаемыми Лоренц-факторами течений.

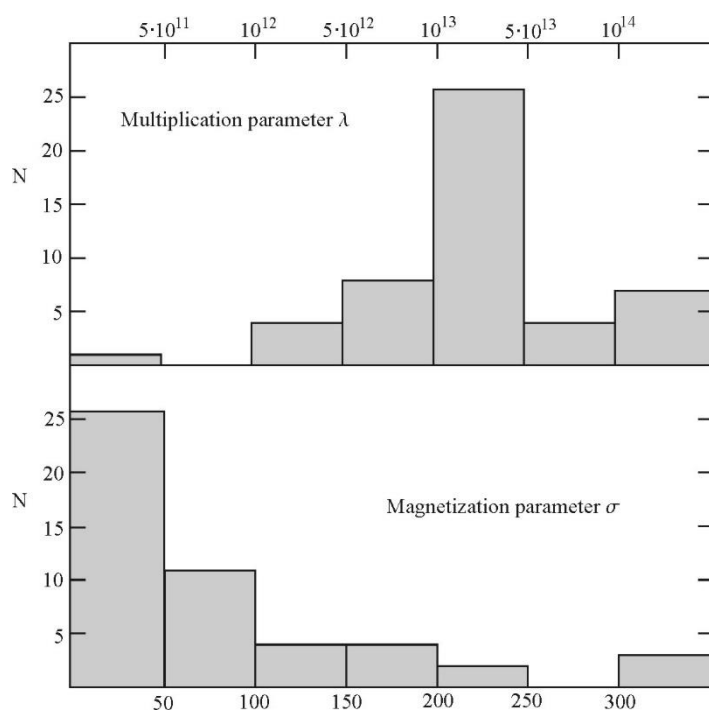


Рис. 1. Распределение параметров множественности и замагниченности, определённых по переменности для 50 объектов.

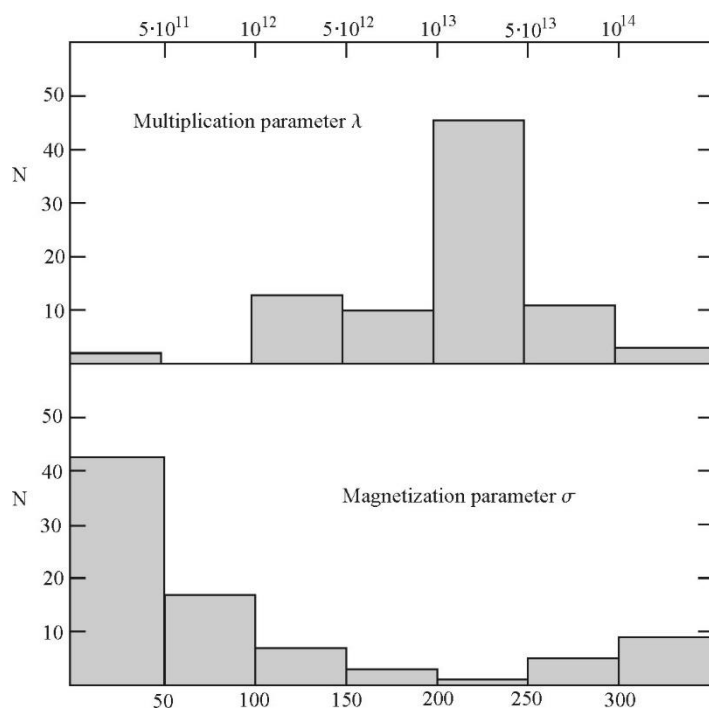


Рис. 2. Распределение параметров множественности и замагниченности, определённых по кинематике для 58 объектов.

Литература

1. Бескин В.С. Магнитогидродинамические модели астрофизических струйных выбросов // Успехи физических наук. 2010. Т.180. №12. С.1241-1278.
2. Lobanov A.P. Ultracompact jets in active galactic nuclei // Astronomy & Astrophysics. 1998. V. 330. P. 79-89.
3. Hovatta T., Valtaoja E., Tornikoski M., Lähteenmäki A. Doppler factors, lorentz factors, and viewing angles for quasars, BL Lacertae objects and radio galaxies // Astronomy & Astrophysics. 2009. V. 498. P. 723-724.
4. Gould R.J. Compton and synchrotron processes in spherically-symmetric non-thermal sources // ApJ. 1979. V. 76. P. 306-311.
5. Hirotani K. Kinetic luminosity and composition of active galactic nuclei jets // ApJ. 2005. V. 619. P. 73-85.

6. *Marscher A.P.* Accurate formula for the self-compton x-ray flux density from a uniform, spherical, compact radio source // *ApJ*. 1983. V. 264. P. 296-297.
7. *Kovalev Y.Y., Lobanov A.P., Pushkarev A.B., Zensus J.A.* Opacity in compact extragalactic radio sources and its effect on astrophysical and astrometric studies // *Astronomy & Astrophysics*. 2008. V. 483. P. 759-768.
8. *Savolainen T., Homan D.C., Hovatta T., Kadler M., Kovalev Y.Y., Lister M.L., Ros E., Zensus J.A.* Relativistic beaming and gamma-ray brightness of blazars // *Astronomy & Astrophysics*. 2010. V. 512. P. A24.
9. *Jorstad S.G. et al.* Polarimetric observations of 15 active galactic nuclei at high frequencies: jet kinematics from bimonthly monitoring with the Very Long Baseline Array // *Astron.J.* 2005. V. 130. P. 1418-1465.
10. *Hirovani K., Okamoto I.* Pair plasma production in a force-free magnetosphere around a supermassive black hole // *ApJ*. 1998. V. 497. P. 563-572.
11. *Blandford R., Znajek R.L.* Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes // *MNRAS*. 1977. V. 179. P. 433-456.
12. *Бескин В.С., Истомин Я.Н., Парьев В.И.* // *Астрономический журнал*. 1992. Т. 69. С. 1258.
13. *Sokolovsky K.V., Kovalev Y.Y., Pushkarev A.B., Lobanov A.P.* A VLBA survey of the core shift effect in AGN jets I. Evidence for dominating synchrotron opacity // *Astronomy & Astrophysics*. 2011. V. 532. P. A38.
14. *Pushkarev A.B., Hovatta T., Kovalev Y.Y. et al.* MOJAVE: Monitoring of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments. IX. Nuclear opacity // *Astronomy & Astrophysics*. 2012. V. 545. P. A113.
15. *Pushkarev A.B., Kovalev Y.Y., Lister M.L. and Savolainen T.* Jet opening angles and gamma-ray brightness of AGN // *Astronomy & Astrophysics*. 2009. V. 507. P. L33-L36.
16. *Lister M.L., Cohen M. H., Homan D. C., et al.* MOJAVE: Monitoring of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments. VI. Kinematics analysis of a complete sample of blazar jets // 2009. *Astrophysical Journal*. V. 138. P. 1874.
17. *Cohen M.H., Lister M.L., Homan D.C. et al.* Relativistic beaming and the intrinsic properties of extragalactic jets. 2007. *Astrophysical Journal*. V. 658. P. 232.