

УДК 524.882

КВАЗАРЫ УЛЬТРАВЫСОКОЙ СВЕТИМОСТИ КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО МЕЗОЛИНЗИРОВАНИЯ

© 2016 А. А. Райков^{1*}, В. В. Орлов^{2,1**}¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

Поступила в редакцию 11.10.2015; принята в печать 11.02.2016

Недавно были обнаружены два квазара SDSS J010013.02+280225.8 и J030642.51+185315.8 с красными смещениями $z = 6.30$ и $z = 5.363$, видимые величины которых в стандартной космологической модели дают светимости $L_{\text{bol}} \sim 4.3 \times 10^{14} L_{\odot}$ и $L_{\text{bol}} \sim 3.4 \times 10^{14} L_{\odot}$. В рамках современных представлений принято считать, что энерговыделение квазаров обеспечивает аккреция на черные дыры с массами $1.24 \pm 0.19 \times 10^{10} M_{\odot}$ и $1.07 \pm 0.27 \times 10^{10} M_{\odot}$. Поскольку в стандартной космологической модели возрасты этих объектов составляют порядка миллиарда лет, это создает серьезные трудности для сценария формирования таких объектов. В данной статье мы интерпретируем ультравысокие светимости квазаров как эффект линзирования их излучения на шаровых скоплениях или карликовых галактиках переднего фона.

Ключевые слова: квазары: общее — гравитационное линзирование: сильное

1. ВВЕДЕНИЕ

Недавно были обнаружены два квазара SDSS J010013.02+280225.8 и J030642.51+185315.8 с красными смещениями $z = 6.30$ и $z = 5.363$, для которых в рамках стандартной космологической модели получены болометрические светимости $L_{\text{bol}} \sim 4.3 \times 10^{14} L_{\odot}$ и $L_{\text{bol}} \sim 3.4 \times 10^{14} L_{\odot}$ (Бу и др. [1]; Ванг и др. [2]). Это примерно на порядок величины больше светимостей типичных ярких известных квазаров со сходными красными смещениями, которые считаются одними из самых высоких во Вселенной. Согласно современным представлениям, основной причиной энерговыделения таких объектов является аккреция на черные дыры. Массы черных дыр в двух упомянутых выше квазарах оцениваются как $1.24 \pm 0.19 \times 10^{10} M_{\odot}$ и $1.07 \pm 0.27 \times 10^{10} M_{\odot}$ соответственно. В стандартной космологической модели возраст этих объектов составляет порядка миллиарда лет, что приводит к существенным трудностям при создании разумного сценария их формирования.

Как было показано в работе Мацумото и др. [3], существование объектов с массами более $10^9 M_{\odot}$ на $z > 6$ является загадкой для астрофизиков, поскольку даже при самых оптимистичных оценках

темпа аккреции не хватает времени для превращения черной дыры с массой порядка $10 M_{\odot}$ в сверхмассивную черную дыру с массой порядка $10^9 M_{\odot}$. Решение этой задачи можно найти, если допустить коллапс звезд с массами порядка $10^5 M_{\odot}$. Однако тогда будут наблюдаться сверхдолгие гамма-всплески длительностью 10^4 – 10^6 секунд с потоками излучения 10^{-11} – 10^{-8} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$, которые должны детектироваться на КА «Свифт» с частотой порядка одного события в год. Полная энергия вспышки оценивается в [3] как 10^{55} – 10^{56} эрг. Такая мощная вспышка приводит к полному разрушению родительской галактики. Однако подобные ожидаемые гамма-всплески не регистрируются.

Еще одно объяснение, предложенное в работе Тагава и др. [4], основано на слиянии кратных черных дыр небольших и умеренных масс. Такие процессы также сопровождаются мощными гамма-всплесками, которые пока не обнаружены.

Как было отмечено выше, объекты столь большой массы не могли сформироваться за столь короткое время (1.3 и 1.5 млрд лет) из черных дыр звездных масс. Необходимо наличие первичных черных дыр умеренных масс (порядка $10^5 M_{\odot}$). Кроме того, в современную эпоху за счет аккреции они приобретут огромные массы и светимости, однако при $z < 1$ подобные «монстры» не наблюдаются. Обнаружение этих квазаров создает определенные трудности для стандартной модели

*E-mail: raikov@mail.ru

**E-mail: vorvor1956@yandex.ru

(см. выше) и вынуждает привлекать различные экзотические сценарии для объяснения экстремально высокой светимости таких объектов. Так, Брамбергер и др. [5] предлагают петли струн в качестве «затравки» для столь массивных черных дыр, а Блинников и др. [6] рассматривают аннигиляцию антиматерии в процессе аккреции на черную дыру в качестве дополнительного источника энергии.

2. МЕЗОЛИНЗИРОВАНИЕ

Мы предлагаем более реалистичный сценарий: рассматриваемые объекты фактически имеют светимости, характерные для типичных квазаров с z порядка 5–6, но подвергаются сильному гравитационному линзированию объектами переднего фона. Такая возможность обсуждается в работе Ванга и др. [2], но авторы приходят к выводу о неэффективности этого механизма, поскольку ни микролинзирование (на объектах звездных масс), ни макролинзирование (на объектах галактических масс) не дают желаемого эффекта — первое слишком слабо, а второе приводит к появлению кратных изображений, но не дает большого усиления яркости. Возможность мезолинзирования на объектах типа шаровых скоплений или карликовых сфероидальных галактик Ванг и др. [2] не рассматривают.

Гипотеза о мезолинзировании квазаров уже высказывалась в литературе (см., например, заметку Барноти [7], а также цикл статей Барышева с коллегами [8–10]). В этих работах показано, что при определенных относительных положениях линзы и источника излучения мезолинзирование может приводить к усилению наблюдаемой яркости источника (см. рис. 3 и 4 в [10]). В упомянутых выше публикациях мезолинзирование используется для объяснения повышенной концентрации квазаров около близких галактик, где линзами являются шаровые скопления гало. Показано, что максимальный эффект достигается, когда линза размещается либо вблизи наблюдателя, либо вблизи источника. В этом случае яркость квазара возрастает на 5^m – 7^m [9]. Авторы [9] приводят ряд аргументов в пользу именно такого рода линзирования.

Возникает вопрос о вероятности столь благоприятного события мезолинзирования. Заметим, что в качестве линз могут выступать как шаровые скопления и карликовые галактики, находящиеся в гало гигантских галактик, так и относительно изолированные объекты. Обычно предполагается, что гравитационные линзы располагаются в гало галактик. Тогда пространственное распределение линз соответствует распределению галактик.

Рассмотрим простой случай — равномерно случайное распределение линзирующих объектов в пространстве. Пусть эффективный размер линзы равен r_c . Если луч света от источника проходит от

центра линзы на расстоянии меньше r_c , то имеет место существенное усиление яркости источника за счет линзирования. Предположим, что средняя плотность линзирующих объектов в пространстве равна n_l . Пусть расстояние от наблюдателя до источника равно R . Тогда математическое ожидание числа линзирующих объектов внутри цилиндра с радиусом основания r_c и высотой R равно $\alpha = \pi n_l r_c^2 R$. Из распределения Пуассона вероятность того, что на луче зрения «наблюдатель—источник излучения» окажется по крайней мере один линзирующий объект, $P = 1 - e^{-\alpha} \approx \alpha$, если $\alpha \ll 1$. Грубые оценки дают значения $\alpha \sim 10^{-5}$. Поскольку наблюдается порядка 10^6 квазаров, то весьма вероятно, что излучение некоторых из них подверглось гравитационному линзированию. Причем, чем дальше находится квазар, тем такая вероятность больше.

В [10] авторы приводят оценочную формулу для максимального коэффициента усиления

$$k_{\max} \approx \frac{\xi}{R_{LO} \Theta_0}, \quad (1)$$

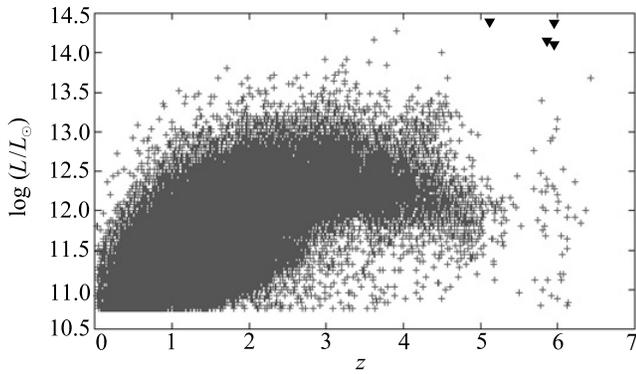
где $\xi = \sqrt{2r_g \frac{R_{OL} R_{LS}}{R_{OS}}}$ — радиус кольца Хвольсона—

Эйнштейна; $\Theta_0 = r_s / R_{OS}$ — угловой размер источника с линейным размером r_s , находящегося на расстоянии R_{OS} от наблюдателя; R_{LO} — расстояние между линзой и наблюдателем; R_{LS} — расстояние между линзой и источником; r_g — гравитационный радиус линзы. Авторы [10] оценивают максимальный коэффициент усиления для источника размером порядка 10^{-2} пк и линзы массой около $10^6 M_\odot$ и получают величину $k_{\max} \sim 10^4$, что соответствует усилению яркости приблизительно на 10^m . Таким образом, представляется обоснованным предположение о том, что обнаруженные в [1, 2] квазары ультравысокой светимости фактически являются результатами мезолинзирования на объектах переднего фона — шаровых скоплениях или карликовых сфероидальных галактиках.

В работе [10] также получен дифференциальный закон распределения коэффициента усиления

$$p(k) \sim k^{-3} \quad (2)$$

для фрактального распределения линзирующих объектов с размерностью $D_F = 2$. Из формулы (2) видно, что график распределения довольно крутой, поэтому случаи большого усиления сравнительно редки. При этом два максимума вероятности смещены к наблюдателю и к источнику (см. рис. 9 в [10]), тогда как при однородном распределении один максимум находится как раз посередине между источником и наблюдателем.



Зависимость между красным смещением z и логарифмом светимости L_V (в солнечных единицах) квазаров из каталога [11].

Данные о квазарах высокой светимости с $5 < z < 6$ из каталога [11]

Название	z	V	$B - V$
Q J10107–0131	5.090	18.04	1.07
SDSS J12485+2846	5.906	19.58	0.64
SDSS J12497+0806	5.959	19.34	0.28
SDSS J14102+1019	5.971	19.90	0.44

Косвенным свидетельством в пользу мезолинзирования излучения значительной части квазаров служит рисунок, на котором показана зависимость между красным смещением и светимостью этих объектов из каталога Верон-Сетти и Верона [11], содержащего около 170 000 объектов.

На рисунке видна немонотонность зависимости: в среднем имеет место повышение светимости квазаров и увеличение разброса светимости с ростом красного смещения до $z \approx 3$ и уменьшение светимости при дальнейшем росте z с увеличением разброса значений.

Увеличение разброса может быть связано с двумя факторами:

- (1) увеличение внутреннего разброса светимостей;
- (2) дополнительный разброс за счет мезолинзирования.

Выделим квазары с красными смещениями $5 < z < 6$ и светимостями $L_V > 10^{14} L_\odot$ (на рисунке обозначены треугольниками). Данные для этих объектов из каталога [11] приведены в таблице, где представлены названия объектов, их красные смещения, видимые величины в фильтре V и показатели цвета $B - V$.

По своему расположению на диаграмме «красное смещение–светимость» эти объекты весьма редки.

Согласно формуле (2), объектов с большим коэффициентом усиления должно быть мало, что и наблюдается. Светимости этих квазаров в полосе V , оцененные по данным из каталога [11], сравнимы с болометрическими светимостями квазаров, обнаруженных в [1, 2]. Таким образом, эти два квазара не являются уникальными объектами, хотя и принадлежат к классу довольно редких объектов. Можно предположить, что излучение всех упомянутых шести квазаров с большими z подвергается довольно сильному мезолинзированию объектами переднего фона.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нами предложено новое объяснение наблюдаемых ультравысоких светимостей недавно обнаруженных квазаров SDSS J010013.02+280225.8 и J030642.51+185315.8: это объекты обычной для квазаров светимости, подвергающиеся мезолинзированию на шаровых скоплениях или карликовых сфероидальных галактиках переднего фона.

В связи с этим можно поставить наблюдательную программу на крупных инструментах — поиск следов линзирующего объекта в спектре такого квазара. Как уже говорилось выше, для достижения максимального усиления линза должна находиться либо вблизи наблюдателя, либо вблизи источника. В первом случае можно надеяться обнаружить линии, связанные с линзирующим объектом, с помощью разделения синтетических спектров. В качестве спектров сравнения можно использовать спектры реальных шаровых скоплений и карликовых галактик, измененные с учетом красного смещения, светимости линзы и спектрального диапазона наблюдений реального объекта. Согласование спектров наблюдаемых объектов с суперпозицией модельного спектра сравнения и спектра квазара при определенных значениях красного смещения линзы и ее светимости даст нам представление о реалистичности модели и ее параметрах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят В. В. Цымбала и А. В. Ющенко за ценную дискуссию, а также Р. В. Герасима за техническую помощь. Авторы также благодарны анонимному рецензенту за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. X.-B. Wu, F. Wang, X. Fan, et al., *Nature* **518**, 512 (2015).
2. F. Wang, X.-B. Wu, X. Fan, et al., *Astrophys. J.* **807**, id. L9 (2015).
3. T. Matsumoto, D. Nakauchi, K. Ioka, et al., *Astrophys. J.* **810**, id. 64 (2015).
4. H. Tagawa, M. Umemura, N. Gouda, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **451**, 2174 (2015).
5. S. F. Bramberger, R. H. Brandenberger, P. Jreidini, and J. Quintin, *J. Cosmology Astropart. Phys.*, No. 06, id. 007 (2015).
6. S. I. Blinnikov, A. D. Dolgov, and K. A. Postnov, *Phys. Rev. D* **92**, id.023516 (2015).
7. J. M. Barnothy, *Bull. Am. Astron. Soc.* **6**, 212 (1974).
8. Yu. V. Baryshev, A. A. Raikov, and A. V. Yushchenko, in *Proc. 31st Liege Intern. Astrophys. Coll. (LIAC 93) on the Gravitational Lenses in the Universe*, *Inst. d'Astrophysique, Liege, 1993*, Ed. by J. Surdej, D. Fraipont-Caro, E. Gosset, et al. (Universite de Liege, Institut d'Astrophysique, 1993), p. 307.
9. A. V. Yushchenko, Yu. V. Baryshev, and A. A. Raikov, *Astron. Asophys. Trans.* **17**, 9 (1998).
10. Yu. V. Baryshev and Yu. L. Ezova, *Astronomy Reports* **41**, 436 (1997).
11. M.-P. Véron-Cetti and P. Véron, *Astron. and Astrophys.* **518**, id. A10 (2010).

Ultraluminous Quasars as Effect of Gravitational Mesolensing

A. Raikov and V. Orlov

Recently there two quasars SDSS J010013.02+280225.8 and J030642.51+185315.8 with redshifts $z = 6.30$ and $z = 5.363$ were discovered, the apparent magnitudes of which in the standard cosmological model give the luminosities $L_{\text{bol}} \sim 4.3 \times 10^{14} L_{\odot}$ and $L_{\text{bol}} \sim 3.4 \times 10^{14} L_{\odot}$. In the framework of modern concepts it is accepted that the energies of quasars are provided by accretion onto black holes with masses $(1.24 \pm 0.19) \times 10^{10} M_{\odot}$ and $(1.07 \pm 0.27) \times 10^{10} M_{\odot}$. As in the standard cosmological model the ages of these objects are of the order of one billion years, it creates serious difficulties for the scenario of formation of such objects. Here we interpret the ultra-high luminosities of quasars as lensing effect of their radiation on globular clusters or dwarf galaxies of foreground.

Keywords: *quasars: general—gravitational lensing: strong*