

# Мезолинзирование как возможное объяснение сверхвысокой светимости квазаров в различных спектральных диапазонах

Ловягин Н.Ю.<sup>1</sup>, Райков А.А.<sup>2</sup>, Ершов В.Н.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ, <sup>2</sup>CAO & GAO РАН, <sup>3</sup>MSSL  
n.lovagin@spbu.ru

В настоящее время известно несколько десятков квазаров, у которых в рамках стандартной космологической модели болометрическая светимость  $L_{bol}$  превышает  $10^{14} L_{\odot}$ , а светимость в рентгеновском диапазоне  $L_{2-10keV} > 5 \times 10^{45}$  эрг/с [1], что соответствует массам центральных объектов  $10^{10} M_{\odot}$  и больше. Число открываемых объектов с такой рентгеновой светимостью растёт по мере накопления информации, получаемой при обзорах всего неба, выполняемых космической обсерваторией *Спектр-ПГ* (SRG).

При этом возраст таких объектов составляет менее 1 млрд лет ( $z > 5$ ), что приводит к трудностям объяснения их формирования в столь короткое время. Телескоп космической миссии JWST откроет новые возможности для обнаружения и исследования квазаров со сверхвысокими светимостями на  $z$  больших 10. Спектральное исследование таких объектов наземными телескопами в настоящий момент затруднено.

Ещё с работы Арна 1987 г. [2] было известно, что имеется превышение плотности распределения квазаров вблизи галактик переднего фона. Возможное объяснение этому было предложено в работах [3, 4, 5], показавших, что удалённые квазары могут быть линзированы объектами промежуточной массы ( $10^6 - 10^7 M_{\odot}$ ), расположенными в окрестностях галактик фона (например, шаровыми скоплениями). Гравитационное линзирование объектами промежуточной массы (мезолинзирование) отличается от микролинзирования [6] гораздо более длительным временем периода повышения яркости. Оно также отличается и от линзирования на больших массах, так как при мезолинзировании не происходит расщепления изображения линзированного объекта.

Позже Райков и Орлов [7] предположили, что тот же самый процесс мезолинзирования может приводить к усилению яркости некоторых квазаров со сверхвысокими светимостями, имеющими большие красные смещения. За последние несколько лет значительно увеличилось число таких квазаров [8, 9, 10, 11].

Большинство квазаров со сверхвысокими светимостями и большими красными смещениями видны как одиночные объекты, но мы знаем [4], что, если профиль распределения массы гравитационной линзы соответствует профилю Кинга [12], а масса линзы составляет  $10^3 - 10^9 M_{\odot}$  (шаровые скопления, карликовые галактики), то яркость квазаров может быть усилена без расщепления изображения источника (эффект гравитационного мезолинзирования). В окрестностях галактик переднего фона имеется очень много объектов с таким профилем распределения массы, поэтому следует ожидать, что большая доля квазаров может быть линзирована.

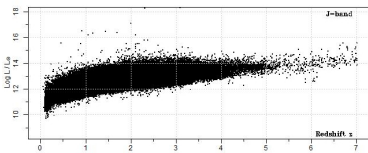


Рис.1. Распределение болометрических светимостей квазаров, вычисленных с использованием инфракрасной полосы J каталога LQAC-4

Можно оценить эту долю, исследуя статистические свойства опубликованных каталогов квазаров. Удобным для такой цели является большой астрометрический каталог квазаров LQAC-4 [9], так как он включает в себя вычисленные абсолютные величины объектов для различных спектральных полос.

Мы преобразовали эти абсолютные величины в болометрические светимости, используя среднее распределение энергии в спектре квазаров из работы [13]. Рис.1 показывает распределение этих светимостей, вычисленных для инфракрасной полосы J по данным каталога LQAC-4.

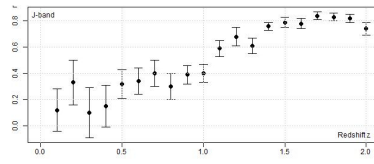


Рис.2. Доля  $r = (n_{bright} - n_{faint}) / (n_{bright} + n_{faint})$ , соответствующая превышению числа ярких квазаров над слабыми в гистограммах светимости для срезов красных смещений в диапазоне  $0.1 < z < 2$  с шириной каждого среза  $\Delta z = 0.1$  (два примера таких гистограмм приведены на Рис.3 для  $z = 0.2$  и  $z = 0.8$ ).

Инфракрасная полоса J наименее вероятно подвержена эффекту наблюдательной селекции, по сравнению с другими спектральными полосами каталога LQAC-4. Тем не менее, нет сомнения, что и в случае этой полосы эффект наблюдательной селекции имеет место для  $z > 3$ , поскольку можно заметить, что для этих красных смещений полоса разброса точек эволюционной кривой квазаров на графике Рис.1 подрезается со стороны низких светимостей. И наоборот – ширина полосы разброса точек для  $0.5 < z < 2.0$  остаётся приблизительно постоянной. Это означает, что эффект наблюдательной селекции для относительно близких квазаров с малыми красными смещениями – минимален или вовсе отсутствует (в самом деле, можно ожидать, что квазары, будучи самыми яркими объектами во Вселенной, регистрируются в полном объёме, если они расположены близко к наблюдателю, то есть, если они имеют небольшие красные смещения).

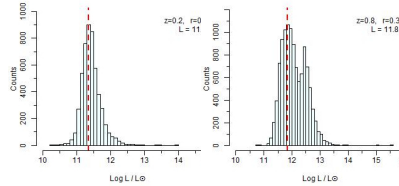


Рис.3. Два примера гистограмм болометрических светимостей квазаров для срезов по красным смещениям  $z = 0.2$  и  $z = 0.8$  с шириной каждого среза  $\Delta z = 0.1$ . Вычисленные асимметрии этих гистограмм равны, соответственно,  $r = 0.15$  и  $r = 0.30$ . Положения пиков максимумов светимости  $L_{max}$  указаны правых верхних углах каждой гистограммы, а также отмечены вертикальными пунктирными линиями.

Мы построили гистограммы светимостей для квазаров с красными смещениями в диапазоне от  $z = 0.1$  до  $z = 2.0$  с шагом 0.1, и используя такую же ширину среза  $\Delta z = 0.1$  по красным смещениям. Путём подсчёта числа ярких и слабых объектов,  $n_{bright}$  и  $n_{faint}$ , мы можем оценить асимметрию – превышение числа ярких объектов над числом слабых объектов  $r = (n_{bright} - n_{faint}) / (n_{bright} + n_{faint})$ , что даёт нам долю гравитационно-линзированных квазаров (полагая, конечно, что естественное распределение квазаров по светимостям в каждом срезе по красным смещениям симметрично по отношению к средней светимости).

Как можно видеть на Рис.2, число гравитационно-линзированных квазаров растёт с ростом красного смещения, что вполне ожидаемо, так как число галактик переднего фона и число окружающих их мезолинз (шаровых скоплений) растёт пропорционально объёму переднего фона. Пренебрежимо малая доля линзированных квазаров с наибольшими красными смещениями возрастает до 80% на красных смещениях  $z = 1.5$ . Далее линейный рост  $r$  нарушается, и доля линзированных квазаров получается недооценённой из-за эффекта наблюдательной селекции (вычисления для  $z > 2$  дают нам  $r \approx 30\%$ ).

Поэтому мы можем заключить, что доля гравитационно-линзированных, по крайней мере, составляет 30%. Однако наши вычисления предполагают гораздо более радикальный вывод, что для больших красных смещений (скажем, для  $z > 5$ ) практически все квазары гравитационно-линзированы, а для некоторых из них геометри-

ческая конфигурация между линзируемым квазаром, гравитационной линзой и наблюдателем такова, что линзированный квазар наблюдается как объект со сверхвысокой светимостью. Коэффициент усиления яркости таких объектов может достигать от нескольких сотен до нескольких тысяч раз.

Следовательно, оценки масс сверхмассивных чёрных дыр, ассоциированных с этими квазарами, существенно уменьшаются, что разрешает противоречие между возрастом Вселенной, соответствующим красному смещению квазаров со сверхвысокими светимостями и временем, необходимым для формирования этих сверхмассивных чёрных дыр.

Временной масштаб изменения яркости квазара при гравитационном линзировании на шаровых скоплениях может варьироваться от нескольких лет до нескольких тысяч лет [4], что зависит от геометрической конфигурации источника и гравитационной линзы. Дополнительно можно ожидать некоторую переменность яркости линзированного объекта на небольших интервалах времени вследствие микролинзирования на отдельных звёздах, входящих в шаровое скопление.

Как пример такой переменности, яркость рентгеновского квазара со сверхвысокой светимостью SRGE J170245.3+130104 с красным смещением  $z = 5.5$  уменьшилась примерно в два раза на интервале времени от первого до второго полного обзора неба космической обсерваторией SRG [1]. Это могло быть обусловлено как изменением интенсивности процесса аккреции вещества на чёрную дыру, так и изменением геометрической конфигурации между квазаром и гравитационной линзой переднего фона.

Логично ожидать, что такие короткопериодические изменения яркости должны происходить одновременно в нескольких диапазонах длин волн. Однако в случае с рентгеновскими квазарами геометрическое положение рентгеновского источника может несколько отличаться от геометрического положения источника оптического и ультрафиолетового излучения. Поэтому конфигурация источник-линза может быть разной для рентгеновского и оптического диапазонов, что, даже в случае небольшого различия, может приводить к весьма существенным различиям в изменениях яркости.

Отметим, что согласно [4], в зависимости от взаимной конфигурации линзы, источника и наблюдателя, мезолинзирование может наблюдаться как без расщепления источника, так и с малым, недостаточным для разрешения принимающей аппаратурой, расщеплением. Это может свидетельствовать о том, вероятность усиления мезолинзированием яркости рентгеновских источников выше в следствие меньшей, чем в оптике и ИК, разрешающей способности.

В заключение можно повторить, что гравитационное мезолинзирование квазаров объектами переднего фона промежуточных масс, такими как карликовые галактики или шаровые скопления, приводит к значительному (на 1-2 порядка) увеличению наблюдаемой яркости квазаров, что позволяет снизить оценку массы центрального объекта.

## Библиография

- [1] Khoruzhev G.A., Meshcheryakov A.V., Medvedev P.S., et al., 2021, *AZh Lett.*, 47, 155
- [2] Arp H., 1987, *Quasars, redshifts and controversies*, Interstellar Media, Berkley
- [3] Baryshev Yu.V., Raikov A.A., Yushchenko A.V., 1993, in *31st Liège Intern. Astroph. Coll.*, 307
- [4] Baryshev Yu.V., Bukhmastova Yu.I. 1997, *AZh*, 74, 497
- [5] Yushchenko A.V., Baryshev Yu.V., Raikov A.A. 1998, *Astron. Astrophys. Trans.*, 17, 9
- [6] Linder E.V. & Schneider P., 1988, *A&A*, 204, L8
- [7] Raikov A.A., Orlov V.V. 2016, *Astrophys. Bull.*, 71, 129
- [8] Fleisch E.W., 2015, *PASA*, 32, e010
- [9] Gattano C., Andrei A. H., Coelho B., et al., 2018, *A&A*, 614, A140
- [10] Ross N.P., Cross N. J. G., 2020, *MNRAS*, 494, 789
- [11] Fleisch E.W., 2021, e-Print: arXiv:2105.12985
- [12] King I.R., 1962, *Aston. J.*, 67, 471
- [13] Krawczyk C.M., Richards G.T., Mehta S.S., et al., 2013, *ApJS*, 206, 4