

УЧРЕЖДЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



ПРЕПРИНТ

5

И.Н. ПАЦЕНКО , В.М. ВИТРИЩАК

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАКОМПАКТНЫХ
РАДИОИСТОЧНИКОВ В КОСМОЛОГИЧЕСКОМ
ТЕСТЕ “УГЛОВОЙ РАЗМЕР – КРАСНОЕ
СМЕЩЕНИЕ”**

Москва 2011

Использование ультракомпактных радиисточников в космологическом тесте “угловой размер – красное смещение”

И.Н. Пащенко¹, В.М. Витрищак²

С использованием выборки радиисточников, которые наблюдаются на радиоинтерферометрах со сверхдлинной базой (РСДБ), а также стандартной космологической модели показано, что ядра радиисточников (ультракомпактные радиисточники), наблюдаемые на наземных РСДБ-сетях с разрешением порядка нескольких мсек. дуги, по-видимому, не могут быть использованы в качестве “стандартных линеек” в космологическом тесте “угловой размер–красное смещение”, по крайней мере, для наземных баз. Это является следствием недостаточного разрешения на земных РСДБ-сетей и селекции в ограниченных по потоку используемых выборках радиисточников. В таком случае, корреляция “светимость– линейный размер”, обнаруживаемая многими авторами для РСДБ-выборок радиисточников, в противоположность похожей корреляции для радиогалактик и квазаров на угловых масштабах порядка нескольких секунд дуги, имеет инструментальную природу.

¹ In4pashchenko@gmail.com

² Государственный Астрономический Институт им. П.К. Штернберга

1. Введение

Одной из важнейших задач наблюдательной космологии является задача поиска “стандартной свечи” или “стандартной линейки” – наличие астрофизических объектов с известными величинами светимости или линейного размера или поиск величин с известной эволюционной историей для оценок расстояний, не прибегая к данным по красным смещениям. Например, зависимость от красного смещения наблюдаемого потока или углового размера для подобных объектов позволила бы уточнить важнейшие космологические параметры. В частности, построение первой зависимости (хаббловской диаграммы) для сверхновых типа Ia впервые предоставило прямые свидетельства в пользу ускоренного расширения Вселенной [1].

Космологический тест “угловой размер – красное смещение” (“ $\theta - z$ ”) как возможный способ выбора космологической модели был предложен более 50 лет назад Фредом Хойлом [2]. В этом тесте характерной ожидаемой особенностью для космологических моделей с достаточной средней плотностью материи Ω_M практически является независимость углового размера “стандартной линейки” от красного смещения z в некотором его диапазоне. Конкретная величина диапазона зависит от параметров космологической модели. Так для модели с критической плотностью материи $\Omega_M \sim 1$ ожидается минимальное значение θ при $z \sim 1$, сопровождающееся последующим увеличением углового размера с красным смещением. В современной стандартной модели с $\Omega_M = 0.3$ и $\Omega_\Lambda = 0.7$ этот минимум не так ярко выражен.

Особенно привлекательным оказалось использование ($\theta - z$)-теста в радиодиапазоне. Мощные радиогалактики и радиогромкие квазары, видимые на космологических расстояниях на масштабах угловых секунд-минут дуги, обладают противоположно направленными, уярчающимися к краю выбросами, которые заканчиваются в компактных ярких образованиях – “горячих пятнах”. Расстояние между этими деталями и послужило первым вариантом стандартной линейки в радиодиапазоне. Оказалось, что зависимость соответствующего углового размера от красного смещения является “евклидовой” (т.е. угловой размер $\theta \sim 1/z$, где z – красное смещение), что противоречит предсказаниям модели Фридмана–Леметра–Робертсона–Уолкера [3–5]. Авторы работ [6, 7] показали, что подобная зависимость может быть следствием эффектов эволюции радиоисточника, а именно, корреляции “светимость P – линейный размер l ”. Более яркие ра-

диоисточники, наблюдаемые на бóльших красных смещениях в ограниченной по потоку выборке, имеют меньшие линейные размеры. Это и приводит к более быстрому падению углового размера с ростом красного смещения по сравнению с предсказаниями стандартной космологической модели. Авторы [8] назвали этот эффект “вырождением молодость – красное смещение” (“youth–redshift degeneracy”) и связали меньшие линейные размеры более мощных радиоисточников с нахождением их в ранней стадии их эволюции.

Компактные радиоисточники, наблюдаемые на РСДБ, свободны от подобных эффектов [9]. Во-первых, их времена жизни составляют порядка нескольких лет (а не десятков миллионов лет в случае протяженных радиокомпонент на угловых масштабах в несколько секунд дуги). Это гарантирует отсутствие космологической эволюции их линейных размеров³. Во-вторых, свойства “центральных машин” радиогромких активных ядер галактик (АЯГ), скорее всего, лежат в достаточно узких пределах [10]. Кроме того, масштабы в несколько миллисекунд дуги на космологических расстояниях соответствуют парсекам, т.е. рассматриваемые источники лежат в ядре родительской галактики радиогромкого АЯГ. Таким образом, свойства радиоструктуры не зависят от свойств межгалактической среды, среды родительского скопления или группы, которые, как известно, эволюционируют с красным смещением [11]. Наконец, в ограниченные по потоку РСДБ-выборки попадают радиоисточники с узким диапазоном углов выброса к лучу зрения (вблизи угла $\Theta \sim 1/(2\gamma)$, где γ – лоренц-фактор объемного движения вещества выброса) [12]. Это минимизирует влияние эффектов проекции.

Таким образом, на первый взгляд, использование компактных (наблюдаемых на РСДБ-масштабах) радиоисточников, а также их ядер⁴ (в сложившейся терминологии – ультракомпактных радиоисточников) в космологическом тесте “угловой размер – красное смещение” кажется достаточно обоснованным. Например, в работе [13] утверждается о том, что ультракомпактные радиоисточники могут рассматриваться как космологические стандартные линейки. Однако, как показано в настоящей работе, некоторые инструментальные эффекты, связанные, прежде всего, с конечным разрешением наземных РСДБ-наблюдений, могут приводить к неверным интерпретациям теста и индуцировать корреляции

³ Однако полностью не исключена и космологическая эволюция свойств “центральных машин”, формирующих выбросы.

⁴ Под “РСДБ-ядром” принято понимать основание РСДБ-выброса — обычно самую яркую деталь на РСДБ-изображении радиоисточника, имеющую плоский спектр.

между наблюдаемыми параметрами радиоисточников, не связанные с их физическими свойствами.

План работы следующий. В разделе 2 кратко представлены результаты использования наблюдаемых на РСДБ-сетях компактных и ультракомпактных радиоисточников в космологическом тесте “угловой размер – красное смещение”, выводы из них и возникающие вопросы. Следует отметить, что нас будет интересовать не собственно оценка космологических параметров, а выбор некоторой наблюдаемой величины, претендующей на роль стандартных линеек. В разделе 3 мы используем РСДБ-выборку ≈ 200 радиоисточников, наблюдавшихся на VLBA на частоте 15 ГГц [14] для проведения рассматриваемого космологического теста. Показывается, что использование в качестве “характерного размера” θ_{char} наблюдаемого углового размера РСДБ-ядра радиоисточника, полученного в результате моделирования функции видности или распределения полной интенсивности гауссианнами (или использование величины компактности⁵) может индуцировать наблюдаемую корреляцию “светимость – линейный размер”. Это связано, прежде всего, с неразрешенностью ядерной области радиоисточника. Так же рассмотрена выборка ≈ 300 радиоисточников из работы [15], в которой использована компактность для определения характерного углового размера θ_{char} и в которой также наблюдается подобный эффект. Наконец, в разделе 4 представлены основные выводы. В Приложении на простом примере показано, что, вопреки часто встречающейся точке зрения, частотный сдвиг спектра радиоисточника в связи с релятивистским объемным движением вещества выброса может сверхкомпенсировать частотный сдвиг, возникающий в результате космологического красного смещения объекта.

Везде, кроме специально оговоренных случаев, в этой работе использована космологическая модель со следующими параметрами: $H_0 = 71$ км/с/Мпк, $\Omega_M = 0.27$, $\Omega_\Lambda = 0.73$.

2. Использование компактных радиоисточников в космологическом тесте “угловой размер – красное смещение”

Одной из проблем, с которой приходится сталкиваться при использовании компактных радиоисточников в тесте “угловой размер–красное смещение”, является выбор наблюдаемой характерной величины θ_{char} , которая может отра-

жать угловой размер объекта. Такой угловой масштаб должен соответствовать какому-либо физическому размеру, в целом характеризующему источник и не зависящему от конкретных деталей распределения яркости. Ниже приводится краткое описание основных работ, посвященных использованию компактных радиоисточников в космологическом тесте “угловой размер – красное смещение”, а также выбранный авторами характерный угловой размер. Следует отметить, что мы не ставим целью перечисление и описание всех работ в этой области. Нас интересует исключительно выбор авторами характерного размера θ_{char} .

Впервые компактные радиоисточники были использованы в тесте “угловой размер – красное смещение” в работе [9]. Автор использовал скомпилированную выборку из 82 радиоисточников, для которых были доступны РСДБ-изображения с угловым разрешением примерно 1.5 мсек. дуги и динамическим диапазоном⁶, по крайней мере, 100 : 1. Еще одним критерием выборки являлся нижний предел светимости на частоте 5 ГГц $P_{5 \text{ ГГц}} = 10^{24}$ Вт/Гц. Автор отмечает, что эта величина является граничной для радиотихих и радиогромких квазаров⁷, а также примерно соответствует значению, разделяющему радиогалактики Fanaroff–Riley типа I и II различной морфологии [17] и соответствующему излому в функции радиосветимости. Автор также исключил из анализа объекты типа BL Lacertae (BL Lac) и компактные объекты с крутым спектром (CSS – Compact Steep Spectrum), для которых, как он утверждает, существенны эффекты проекции.

В качестве характерного углового размера θ_{char} автором работы [9] было использовано расстояние от РСДБ-ядра до самого дальнего компонента, яркость которого составляет более 2% от потока ядра. Автор отмечает, что характерный угловой размер на построенной зависимости от красного смещения практически не зависит от последнего в диапазоне $0.5 \leq z \leq 3$ и при красном смещении $z = 3$ практически на порядок выше величины углового размера, полученного путем экстраполяции “евклидовой” зависимости $\theta \sim 1/z$. Построенная зависимость “ $\theta - z$ ” может быть представлена моделью Эйнштейна–Де Ситтера с величиной параметра замедления $q_0 = 1/2$, что, как отмечает автор, является прямым подтвер-

⁵ Для радиоисточника, доминированного излучением ядра, это эквивалентно использованию гауссиан при моделировании.

⁶ Динамическим диапазоном изображения называется отношение пика интенсивности к величине шума.

⁷ Существуют, однако, работы, ставящие наличие дихотомии, связанной с радиогромкостью АЯГ под сомнение (см., например, [16]).

ждением равенства средней плотности материи во Вселенной ее критическому значению, разделяющему открытую и закрытую модели.

В работе [15] для определения характерного углового размера использовались измерения компактности для ограниченной по потоку выборки 337 радиоисточников с известными красными смещениями из обзора [18] на частоте 2.3 ГГц. Выборка составлена таким образом, что средний спектральный индекс между частотами 2.3 и 5 ГГц составляет $\alpha \approx 0$. Компактность определяется как отношение коррелированного S_c (соответствующего используемой базе радиоинтерферометра и содержащегося на угловом масштабе разрешения) и общего S_t (интегрального) потока радиоисточника:

$$\Gamma = S_c/S_t \quad (1)$$

В случае гауссова распределения яркости с круговой симметрией, компактности можно сопоставить характерный угловой размер:

$$\theta_{char} = 2\sqrt{-\ln 2 \cdot \ln \Gamma} / (\pi B) \quad (2)$$

где B – длина базы, выраженная в длинах волн. Как отмечается, например, в работе [15], гауссово распределение яркости может очень грубо описывать реальное распределение яркости источника. Автор работы [15] утверждает, что полученный таким способом угловой размер (θ_{char}) статистически представляет собой размер радиоисточника в выборке. Как уже отмечалось, использование компактности Γ для представления угловых размеров радио источника в случае объекта с доминирующим излучением ядра эквивалентно использованию гауссова распределения при моделировании функции видности или распределения яркости радиоисточника. Об этом пойдет речь ниже (см. подраздел 3.2).

В цитированной работе для радиоисточников предполагается следующая зависимость между линейным размером l , светимостью P и красным смещением z :

$$l \sim P^b \cdot (1+z)^n \quad (3)$$

Автор обосновывает использование этого соотношения данными наблюдений радиоисточников (радиогалактик и квазаров) на угловых масштабах порядка секунд-минут дуги, что в тысячи раз больше РСДБ-масштабов. Учитывая приведенные во Введении соображения о преимуществе использования компактных РСДБ-радиоисточников относительно использования радиоисточников на масштабах в несколько минут дуги в тесте “ $\theta - z$ ”, не приходится ожидать “наследования” этого соотношения для компактных радиоисточников по каким-либо физическим причинам.

Существенным для нас является предположение, сделанное автором работы [15], об использовании для космологического теста только радиоисточников с красными смещениями $z \geq 0.5$. Автор отмечает, что источники с $z \leq 0.5$ и $z \geq 0.5$ имеют на 3 порядка различающиеся светимости, что является следствием ограниченности выборки по потоку. Кроме того, источники с $z \geq 0.5$ имеют меньшую дисперсию светимостей и, следовательно, могут рассматриваться как имеющие примерно одинаковый линейный размер⁸. Применение множественного регрессионного анализа к используемым данным (с параметрами регрессии l , q_0 , b и n) позволило автору оценить величину $l \sim 5/h$ пк (линейный размер стандартной линейки; здесь h – безразмерная постоянная Хаббла в единицах 100 км/с/Мпк), $q_0 = 0.16 \pm 0.71$, $b = 0.26 \pm 0.03$ и $n = -0.30 \pm 0.90$. Автор отмечает сходство показателя b с “традиционным” для килопарсековых масштабов значением $b_{крс} = 0.3$ (характерным правда для радиогалактик, а не квазаров). Для обнаруженной зависимости линейного размера от красного смещения автор приводит несколько возможных ее источников, оставляя выбор между последними будущим наблюдениям:

- 1) внутренняя космологическая эволюция размеров радиоисточников;
- 2) зависимость размера от частоты излучения;
- 3) эффект расширения размера радиоисточника при рассеянии.

В недавней работе [13] использовалась ограниченная по потоку РСДБ-выборка 271 источников на частоте 5 ГГц (со спектральным индексом $\alpha \leq 0.5$ ⁹). В качестве характерного углового размера использовалась ширина на уровне

⁸ Стоит сразу отметить тот факт, что наблюдаемые светимости радиоисточников из неглубоких РСДБ-выборок могут являться результатом существенного доплеровского уярчения.

⁹ Спектральный индекс определяется зависимостью $F\nu \sim \nu^{-\alpha}$.

половины максимума (FWHM) большей оси гауссианы, моделирующей РСДБ-ядро. Автор также отмечает, что на зависимости “линейный размер – радиосветимость” источники с $z \geq 0.5$ образуют статистически “стабильное” по отношению к линейному размеру облако, и в то же время источники с $z \leq 0.5$ обладают большой дисперсией линейных размеров и светимостей. Следуя [10], автор работы [13] также использует в анализе только объекты с $z \geq 0.5$. После исключения из выборки некоторых источников с наиболее вытянутой морфологией РСДБ-ядра автор получает значение $l = 2.94/h$ пк и $\Omega_M = 0.24^{+0.46-0.13}$.

3. VLBA-выборка радиисточников

В качестве примера, мы рассмотрели ограниченную по потоку выборку из 250 радиисточников на частоте 15 ГГц из работы [14], состоящую из радиисточников с плоским спектром. В качестве характерного углового размера мы, вслед за авторами [13], использовали величину большой полуоси гауссианы, моделирующей РСДБ-ядро. Моделирование РСДБ-структуры радиисточников было проведено авторами [14] в uv -домене¹⁰: измеренная функция видности была представлена двумя эллиптическими гауссианами, соответствующими РСДБ-ядру и внутренней части РСДБ-выброса. Так как авторы [14] представили данные для нескольких эпох наблюдений, то для анализа были выбраны данные на эпоху, соответствующую наибольшему неразрешенному потоку¹¹ S_{unres} . Следует отметить, что такое поведение неразрешенного потока со временем может быть связано с рождением нового компонента и, таким образом, увеличением размера большой полуоси РСДБ-ядра. Из 197 источников с представленными в работе [14] красными смещениями, для 186 объектов имеются оценки размера большой оси РСДБ-ядра.

Мы нанесли на плоскость “угловой размер – красное смещение” соответствующие величины характерного углового размера, предварительно усреднив данные по оси “красное смещение” в группах с примерно одинаковым объемом (≈ 20 объектов в группе). На рис. 1 представлена получившаяся зависимость. Сплошной линией показан результат МНК-подгонки линейной функцией сгруппированных по оси z данных с учетом ошибок: $\theta(z) = (0.003 \pm 0.017)z + (0.283 \pm 0.021)$, т.е. $\theta = 0.28$ мсек.дуги $\approx \text{const}$). Штриховой линией показано поведение

¹⁰ Величины u, v — пространственные частоты.

¹¹ См. работу [14] для определения S_{unres} .

стандартной линейки размером 1.5 пк в космологической модели $H_0 = 70$ км/с/Мпк, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $\Omega_M = 0.3$.

3.1. Корреляция “линейный размер – светимость”

Прежде всего, отметим, что первая точка, соответствующая малым величинам красного смещения z , лежит значительно ниже модельной кривой. Более того, очевидно, что постоянная величина углового размера, не зависящая от красного смещения, более соответствует данным наблюдений. Как уже упоминалось, авторы некоторых работ (см., например, [13, 15]) избегают этого вывода, отбрасывая данные, соответствующие $z \leq 0.5$. Делается это следующим образом. На плоскости “линейный размер–светимость” обнаруживается положительная корреляция (см., например, рис. 2 в [13]). Так в работе [15] множественный регрессионный анализ данных для 337 источников с характерными угловыми размерами, определявшимися по величине компактности, обнаружил зависимость линейного размера от светимости вида $\lg(\text{размер}) \sim (0.26 \pm 0.03) \lg(\text{светимость})$ (см. раздел 2 настоящей работы).

Автор работы [15] утверждает, что источники с $z \geq 0.5$ обладают меньшей дисперсией светимости, поэтому их размеры могут рассматриваться более “стандартными”. Однако автор не упоминает, что наблюдаемые светимости могут являться результатом доплеровской фокусировки и иметь мало общего с действительными величинами светимостей выбросов. Авторы работы [19], рассматривая зависимость линейного размера от светимости в диапазоне $z \leq 0.5$ и отсутствие такой зависимости для источников с $z \geq 0.5$, считают это результатом перехода радиоисточника из нерелятивистского в релятивистский режим с установившейся постоянной внутренней светимостью. Однако, как нам кажется, ситуацию с зависимостью “линейный размер–светимость” можно объяснить иным образом.

На рис. 2 представлена подобная зависимость для 186 источников из работы [14] (та же выборка, что и на рис. 1). Здесь линейные размеры и светимости получены из характерных угловых размеров и потоков ядра с использованием тех же стандартных космологических параметров, а светимости исправлены за k -поправку (было использовано значение спектрального индекса $\alpha = 0$, соответствующего излучению ядерных областей). Источники, лежащие в различных диапазонах красных смещений ($z \leq 0.5$ и $z \geq 0.5$), обозначены различными символами. Как видно, существует положительная корреляция между размером и свети-

мостью для источников с $z \leq 0.5$, а источники с большими красными смещениями образуют “облако” на диаграмме. Здесь же представлена кривая, соответствующая радиоисточнику постоянного углового размера 0.28 мсек. дуги (это значение взято в результате линейной подгонки зависимости “ $\theta - z$ ” для этой же выборки) и потока 1 Ян, взятого из рассмотрения зависимости “светимость – красное смещение” (см. далее рис. 3) для данной выборки. Таким образом, можно предположить, что эта кривая моделирует неразрешенный источник в рассматриваемой нами выборке.

Как видно из зависимости “линейный размер – светимость” (рис. 2), постоянный угловой размер согласуется с наблюдаемыми данными. А это означает, что причиной возникновения корреляции, отмеченной авторами [13, 15], может являться инструментальный, а не физический эффект – а именно, ограниченное угловое разрешение РСДБ-сети. Другими словами, выбранный характерный угловой масштаб θ_{char} , являющийся в данном случае большой полуосью эллиптической гауссианы, подогнанной к функции видности, представляет собой не какой-либо физический линейный размер, а соответствующую примерно постоянному разрешению РСДБ-сети структуру выброса радиоисточника, содержащую различные линейные масштабы (от сотых парсека и меньше до нескольких парсек).

Стоит отметить, что разрешение в случае конкретного источника будет зависеть не только от частоты и используемой РСДБ-сети, но и от заполнения *uv*-плоскости, достигнутого в процессе наблюдений данного источника и существенно зависящего от продолжительности наблюдения и величины склонения источника. Кроме того, в случае использования априорных моделей распределения яркости (как, например, при моделировании структуры интенсивности или функции видности гауссианами) синтезированное разрешение будет зависеть от величины потока (точнее от отношения сигнал/шум [20]). Именно поэтому на построенных зависимостях могут наблюдаться отклонения от модельных кривых.

Рассматривая зависимость “светимость–красное смещение” ($P - z$), можно понять причины возникновения рассматриваемой корреляции. Эта зависимость, представленная на рис. 3, четко демонстрирует селекцию в ограниченной по потоку выборке (так называемый “Malmquist bias”). В таких выборках, в связи с сильным наклоном функции радио светимости, светимость P однозначно связана с красным смещением z . Таким образом, “облако” точек на зависимости “линейный размер–светимость” с красными смещениями $z \geq 0.5$, соответствует ис-

точникам с высокой ($\lg P = 27-29$ Вт/Гц) наблюдаемой светимостью. Из зависимости $P - z$ (рис. 3) видно, что этому диапазону наблюдаемой светимости P ввиду нелинейности зависимости соответствует достаточно широкий диапазон красных смещений z ($0.75 \leq z \leq 4$). В стандартной космологической модели угловое расстояние слабо зависит от z в этом диапазоне красных смещений, т.е. все источники с $z \geq 0.75$ сжимаются в относительно узкую область $\lg P = 27-29$ Вт/Гц на диаграмме “линейный размер – светимость”, образуя таким образом “облако” точек.

Конечно, как уже упоминалось, представленные здесь величины наблюдаемых светимостей (и вообще все светимости, представленные в цитированных работах) могут не соответствовать внутренним светимостям (в собственной системе отсчета выброса). Последние же могут быть связаны тем или иным способом с параметрами выбросов из центральных машин рассматриваемых радиоисточников. Доплеровское уярчение, связанное с релятивистским объемным движением излучающего вещества, существенно искажает собственные светимости (в δ^p раз, где δ – доплер-фактор объемного движения выброса, а $p = 2+\alpha$ или $p = 3+\alpha$ (см. ниже) в зависимости от модели выброса; α – спектральный индекс). Например, авторы работы [21] представляют статистическую оценку максимальной внутренней светимости MOJAVE VLBA-выборки радиоисточников на 15 ГГц как $\sim 10^{25+26}$ Вт/Гц.

Таким образом, “стандартный размер” $\approx 3/h$ пк, обнаруженный в работе [13], представляет собой линейный размер, соответствующий разрешению наземной РСДБ-сети на частоте 5 ГГц на красном смещении $z \geq 0.5$ (точное значение не так важно, так как в стандартной модели угловое расстояние слабо зависит от z в этой области). Он примерно в 3 раза больше стандартного линейного размера $\approx 1/h$ пк, возникающего в использовавшейся нами выборке из работы [14] на частоте 15 ГГц (рис. 1), в соответствии с отношением частот наблюдений 15 ГГц/5 ГГц. Следует напомнить, что ставшая уже общепринятой модель неоднородного выброса [22] обладает следующей особенностью: РСДБ-ядро, неразрешенное на какой-либо одной частоте, оказывается неразрешенным на любой другой частоте. Это связано с тем, что размер РСДБ-ядра (поверхности оптической толщины $\tau = 1$ в модели неоднородного выброса) в этой модели обратно пропорционален частоте наблюдений ν . А угловое разрешение прямо пропорционально ν . Таким образом, в контексте поиска космологических стандартных линеек в ультракомпактных радиоисточниках, по-видимому, имеет смысл уве-

личивать разрешение путем использования бóльших баз – например, орбитальной РСДБ.

3.2. Компактность и характерный угловой размер

Может возникнуть вопрос: как могут оставаться неразрешенными источники, например, из работы [15], если соответствующее значение компактности для них $\Gamma \ll 1$ (см. рис. 4 в цитированной работе)? Ведь для неразрешенного источника $\Gamma = 1$, и соответствующий угловой размер $\theta_{char} = 0$. Дело в том, что наличие в таких источниках неразрешенного ядра приводит к ситуации, когда угловой размер, определяемый через компактность, практически не меняется с удалением источника и, таким образом, мимикрирует неразрешенный источник. Так, на рис. 3 (слева) показано распределение интенсивности и соответствующие функции видности для источника с ультракомпактным ядром, размер которого составляет 5% от размера протяженной компоненты, а поток – 30% от потока протяженной компоненты¹². Обе компоненты (протяженная компонента и “неразрешенное” ядро) представлены гауссианами. На рисунке l – угол на небесной сфере и $u = 1/l$ – пространственная частота.

При удалении источника фиксированного линейного размера его наблюдаемый угловой размер меняется в соответствии с зависимостью углового расстояния от красного смещения для избранной космологической модели. Так, на рис. 4 тремя различными кривыми показано относительное расположение наблюдаемых распределений интенсивности и видности источника одного и того же линейного размера на разных красных смещениях в стандартной космологической модели. Например, для протяженной компоненты размеры моделирующих распределение интенсивности гауссиан на уровне половины мощности (FWHM) составляют 1, 1.20 и 1.76 единиц l для красных смещений $z = 1, 0.5$ и 0.25 , соответственно. Размеры ядер всегда полагаются равными 5% от размеров протяженных компонент (и равны 0.05, ~ 0.06 и ~ 0.09 единиц l , соответственно). Измерения угловых размеров по величинам компактности ($\Gamma(u) = V(u)/V(0)$) для $u = 4$ дало бы соответственно $\theta_{char} = 0.168, 0.171$ и 0.183 единиц l . Для $u = 3$ получаем $\theta_{char} = 0.220, 0.222$ и 0.231 единиц l (при расположении источника на красных смещениях $z = 1, 0.5$ и 0.25 , соответственно). Как видно, характерный

¹² Эта модель более соответствует источникам из выборки [15], чем из выборки [14]. Дело в том, что в связи с более крутым спектром выброса, ядро доминирует в общем излучении, в основном, на высоких частотах, а выброс - на низких.

угловой размер, определяемый по величине компактности при наличии неразрешенного ядра (т.е. при не слишком высоких исследуемых пространственных частотах¹³ u), практически постоянен при удалении источника. Таким образом, угловые размеры, определяемые по величинам компактности, не всегда могут служить статистическим представлением характерного размера для выборки источников.

Для выборки, использовавшейся в работе [15], мы также построили зависимость “угловой размер – красное смещение”, аналогично предварительно сгруппировав данные. Результат представлен на рис. 5. Здесь сплошной кривой представлена зависимость $\theta = (-0.20 \pm 0.06)z + (1.91 \pm 0.10)$, полученная подгонкой линейной функцией с учетом ошибок, а штриховой кривой – поведение стандартной линейки размером 7 пк в космологической модели $H_0 = 70$ км/с/Мпк, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $\Omega_M = 0.3$. Это примерно соответствует обнаруженному автором работы [15] в результате регрессионного анализа “типичному размеру излучающей области” $(4.79 \pm 0.92)/h$ пк. Как видно, в случае углового размера, определяемого по величине компактности, угловой размер уменьшается с z , однако это уменьшение скорее связано с обнаруженным выше поведением углового размера, определяемого через компактность. Используя постоянную величину углового размера $\theta = 1.5$ мсек. дуги, а также величину потока компактной компоненты 0.1 Ян (взятой из анализа рис. 3 в работе [15]), мы построили зависимость “линейный размер–светимость”, представленную на рис. 6. На рисунке различными символами представлены источники с измеренными значениями компактностей и источники с верхними их пределами (соответственно с верхними пределами на линейный размер и светимость компактной компоненты). Как видно из этого рисунка, корреляция “линейный размер – светимость” также может быть связана с наличием неразрешенного компактного компонента.

4. Выводы

В работе показано, что корреляция “светимость–линейный размер” для ультракомпактных радиоисточников (РСДБ-ядер радиогромких квазаров и радиогалактик) может иметь другую, в отличие от похожей корреляции для радиоисточников на масштабах в несколько угловых секунд (килопарсек), природу. А

¹³ Имеются в виду частоты, много меньшие $1/l_{core}$, где l_{core} – характерный угловой размер компактной компоненты, т.е. реального РСДБ-ядра. Так в нашем случае $1/l_{core} \approx 10-20$.

именно, это может являться следствием ограниченного разрешения наземных РСДБ-сетей и селекции в ограниченной по потоку выборке. Это – по сути, тривиальный факт, если учесть, что РСДБ-ядра часто являются неразрешенными. Космические базы со спутником HALCA (Япония) [23] продемонстрировали, что некоторые РСДБ-ядра, наблюдаемые на наземных базах, обладают структурой [24]. Таким образом, до тех пор, пока не будет достигнут некоторый, независимый от используемого разрешения угловой масштаб (например, поверхность “настоящего” оптически толстого ядра), имеет смысл увеличение разрешения РСДБ-сетей с помощью внеземных баз. Характерный угловой размер, определяемый по величине компактности, также не всегда соответствует какой-либо реальной компоненте в распределении интенсивности источника и не отражает ее поведение с изменением удаленности объекта. Таким образом, к выводам работ, использующих наземные РСДБ-наблюдения для оценки космологических параметров в тесте “угловой размер–красное смещение”, следует относиться с осторожностью, помня о возможных инструментальных эффектах.

В заключении хотелось бы процитировать высказывание известного специалиста по РСДБ-наблюдениям Д.К. Габузды, особенно актуальное в связи с возросшим интересом к использованию РСДБ в наблюдательной космологии: “Наше развивающееся понимание ядерных областей приближает нас к факту, одновременно очевидному и ускользающему: наблюдаемое “РСДБ-ядро” будет соответствовать оптически толстому основанию выброса, только если наблюдения обладают угловым разрешением, достаточным для значимой и достоверной оценки параметров ядра. Если же размер оптически толстого ядра значительно меньше, чем синтезированное в наблюдениях разрешение, наблюдаемое “ядро” на самом деле будет представлять собой смесь излучения собственно ядра и излучения внутреннего выброса.”[24, с. 63].

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-кандидатов наук МК-2839.2009.2. Авторы благодарят Н.С. Кардашева и Б.В. Комберга, обративших их внимание на существующие проблемы в поисках стандартных размеров в РСДБ и за полезные замечания и ссылки, а также Л.И. Гурвица за критические замечания. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке со стороны

Министерства образования и науки в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры России 2009-2013", ГК № 16.740.11.0155.

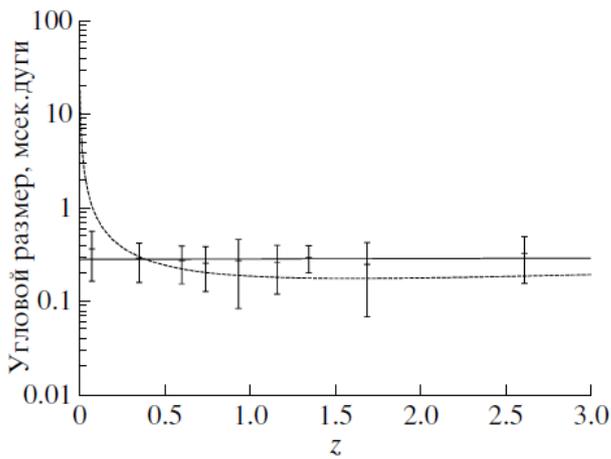


Рис.1 Зависимость “угловой размер – красное смещение” для 186 источников из работы [14], сгруппированных по оси z .

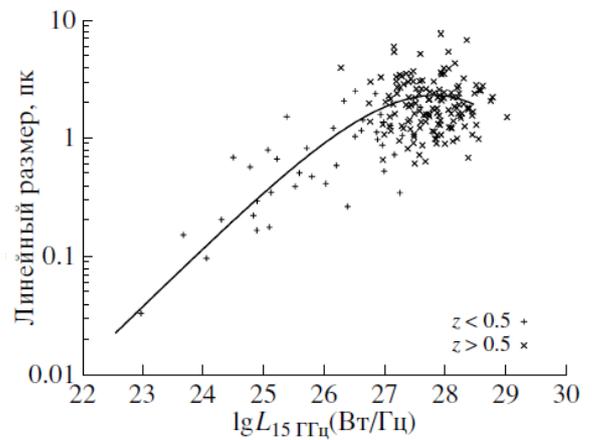


Рис. 2 Зависимость линейного размера, соответствующего характерному угловому размеру, от светимости РСДБ-ядра на частоте 15 ГГц, исправленной за k -поправку, для 186 источников из работы [14].

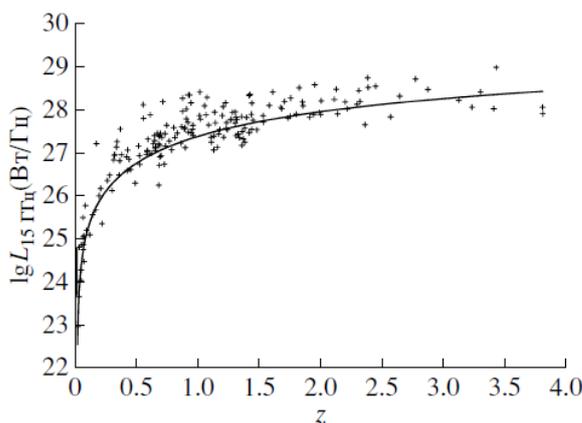


Рис. 3 Зависимость светимости РСДБ-ядра на частоте 15 ГГц от красного смещения радиисточника для выборки [14].

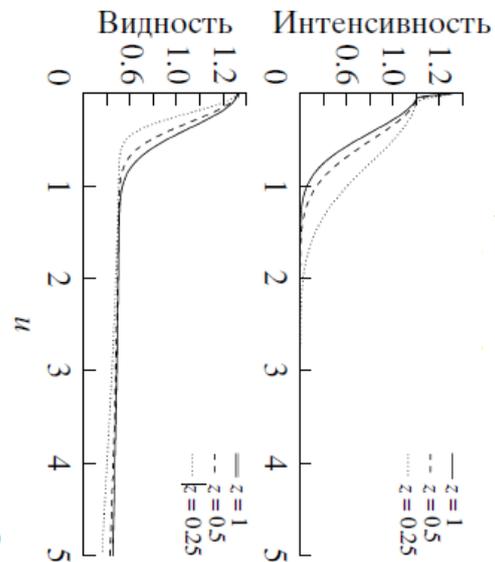


Рис. 4 Относительное расположение наблюдаемых распределений интенсивности и видности источника одного и того же линейного размера на разных красных смещениях в стандартной космологической модели в зависимости от l и u соответственно.

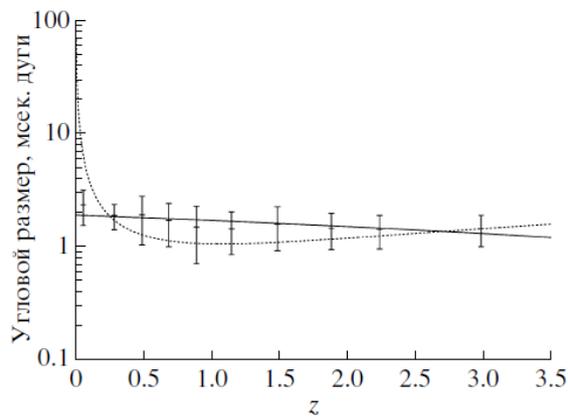


Рис. 5 Зависимость “угловой размер–красное смещение” для 310 источников из выборки [15], сгруппированных по оси z .

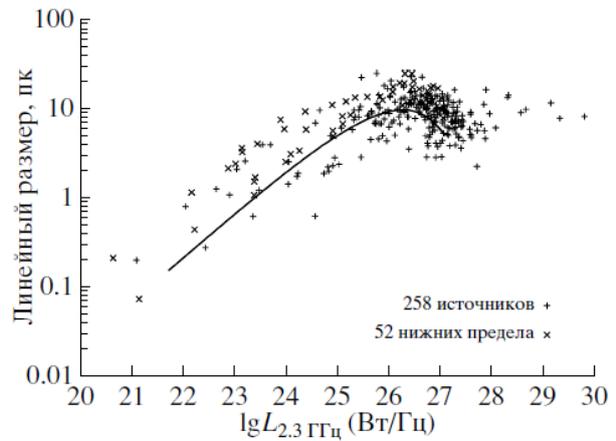


Рис. 6 Зависимость линейного размера, соответствующего характерному угловому размеру, от светимости компактной компоненты на частоте 2.3 ГГц, исправленной за k -поправку, для 310 источников из выборки [15].

Литература

1. K. Richard, A. C. Becker, D. Cinabro, *et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **185**, 32 (2009)
2. F. Hoyle, in: *Paris Symposium On Radio Astronomy*, Proc. IAU Symp.No. 9 and USRI Symp.No. 1, ed. R. N. Bracewell (Stanford: Stanford Univ. Press, 1959), p. 529
3. G. K. Miley, *Nature* **218**, 933 (1968)
4. T. H. Legg, *Nature* **226**, 65 (1970)
5. V. K. Kapahi, *Astron. J.* **97**, 1 (1989)
6. A. K. Singal, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **263**,139 (1993)
7. K. Nilsson, M. J. Valtonen, J. Kotilainen, and T. Jaakola, *Astrophys. J.* **413**, 453 (1993)
8. K. Blundell, S. Rawlings, and C. J. Willot, *Astron. J.* **117**, 677 (1999)
9. K. I. Kellerman, *Nature* **361**, 134 (1993)
10. L. I. Gurvits, K. I. Kellermann, and S. Frey, *Astron.and Astrophys.* **342**, 378 (1999)
11. E. M. Wilcots, *Astron. Nachr.* **330**, 1059 (2009)
12. R. C. Vermeulen and M. H. Cohen, *Astrophys. J.* **430**, 467 (1994)
13. J. C. Jackson, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **390**, L1 (2008)
14. Y. Y. Kovalev, K. I. Kellerman, M. L. Lister, *et al.*, *Astron. J.* **130**, 2473 (2005)
15. L. I. Gurvits, *Astrophys. J.* **425**, 442 (1994)
16. C.Nipoti, K.M. Blandell, and B. James, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **361**, 633 (2005)
17. B. L. Fanroff and J. M. Riley, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **167**, 31 (1974)
18. R. A. Preston, D. D Morabito, J. G. Williams, *et al.*, *Astron. J.* **90**, 1599 (1985)
19. J. C. Jackson, *J. Cosmol. and Astropart. Phys.* **11**, 7 (2004)
20. A. P. Lobanov, e-print arXiv:astro-ph/0503225 (2005)
21. M. H. Cohen, M. L. Lister, D. C. Homan, *et al.*, *Astrophys. J.* **658**, 232 (2007)
22. R. D. Blandford and A. Konigl, *Astrophys. J.* **232**, 34 (1979)
23. H. Hirabayashi, H. Hirose, H. Kobayashi, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* **52**, 955 (2000)
24. D. C. Gabuzda, in: *Radio Astronomy at the Fringe*, National Radio Astronomy Observatory, Green Bank, West Virginia, USA, eds J. A. Zensus, M. H. Cohen, E. Ros, *ASP Conf. Proc.* **300**, 57 (2003)