

Определение Ω_Λ и H_0 по фотометрическим данным радиогалактик

О.В.Верходанов¹, Ю.Н.Парийский¹, А.А.Старобинский²

¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167, Россия

² Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Москва

Поступила в редакцию 23.07.2004; принята к печати 15.09.2004.

По фотометрическим данным наблюдений эллиптических галактик, среди которых есть как радиогалактики, так и радиоспокойные объекты, проведено исследование зависимости красное смещение – возраст звездной системы (dz/dt). С помощью этой зависимости оцениваются космологические параметры $H(z)$ и Ω_Λ . Возраст звездных систем определяется в рамках эволюционных моделей синтетических спектров PEGASE и GISSEL по фотометрическим данным. Данный подход является модельно независимым хронометрированием объектов ранней Вселенной. Описывается построение объединенной выборки, содержащей 220 объектов из разных популяций эллиптических галактик, для которых проведен анализ верхней границы возраста формирования звездных систем. По этим данным оценены границы определения космологических параметров H_0 и Λ -члена: $H_0 = 72 \pm 10$, $\Omega_\Lambda = 0.8 \pm 0.1$ в модели GISSEL и $H_0 = 53 \pm 10$, $\Omega_\Lambda = 0.8 \pm 0.1$ в модели PEGASE.

Ключевые слова: фотометрия радиогалактик, космологические параметры

DETERMINATION OF Ω_Λ AND H_0 FROM PHOTOMETRIC DATA OF RADIOGALAXIES, by O.V. Verkhodanov, Yu.N. Parijskij, A.A. Starobinsky. From photometric observations of elliptical galaxies, among which are both radio galaxies and radio-quiet objects, an investigation was carried out of the relationship ‘redshift – age of the stellar system’ ($\Delta z/\Delta t$). By means of this relationship cosmological parameters $H(z)$ and Ω_Λ are estimated. Ages of stellar systems are determined within the framework of evolution synthetic model spectra PEGASE and GISSEL. This approach can be considered as time study of objects of the early Universe independent of other cosmological models. Construction of a pooled sample is described, containing 220 objects from different populations of elliptical galaxies, for which an analysis of the upper limit of the age of formation of stellar systems was performed. These data were used to estimate the boundaries of determination of the cosmological parameters H_0 and Λ -term: $H_0 = 72 \pm 10$, $\Omega_\Lambda = 0.8 \pm 0.1$ in the GISSEL model and $H_0 = 53 \pm 10$, $\Omega_\Lambda = 0.8 \pm 0.1$ in the PEGASE model.

Key words: cosmological parameters – radio continuum: galaxies – galaxies: photometry

1. Введение

Существенным моментом при определении космологических параметров является независимость методики от ставших уже классическими методов, таких как глубокие трехмерные обзоры галактик и скоплений, наблюдения сверхновых Ia типа (см., например, Ляйбундгут, 2001) или реликтового излучения (например Ифстафиоу и др., 2002).

Один из независимых методов основывается на датировках, связанных с возрастом галактик (на-

пример Саини и др., 2000). Первые попытки оценить Ω_Λ с использованием возраста звездных систем делались несколько лет назад (см., например, Парийский, 2001). Новый подход был предложен Хименесом и Лоубом (2002). Он основан на датировках, связанных с вариациями возраста галактик, определяемого спектроскопическим методом. Таким способом можно построить независимую хронологическую шкалу, применимую для ранних этапов эволюции Вселенной. Этот подход основывается на измерениях разностей возрастов

Δt двух пассивно эволюционирующих галактик, которые формируются в одно время, но разделены небольшим интервалом Δz . Тогда можно определить конечную разность $\Delta z/\Delta t \approx dz/dt$. По предлагаемой Хименесом и Лоубом методике все отобранные галактики должны иметь схожие металличности и низкие темпы звездообразования (т.е. красные цвета), а средний возраст системы должен значительно превышать разность возрастов галактик Δt . Применяя такой дифференциальный метод, Хименес и Лоуб (2002) предлагают напрямую измерять $H(z)$ и $w_Q(z)$ на основе первых и вторых производных ($\Delta z/\Delta t$) и ($\Delta^2 z/\Delta t^2$):

$$H(z) = -\frac{1}{(1+z)} \frac{dz}{dt}, \quad (1)$$

$$H_0^{-2} \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{[H_0^{-1}(dz/dt)]^2}{(1+z)} \left[\frac{5}{2} + \frac{3}{2} w_Q(z) \right] - \frac{3}{2} \Omega_m(0)(1+z)^4 w_Q(z). \quad (2)$$

Предлагая этот дифференциальный метод, авторы отмечают, что необходимо как увеличить выборку галактик, так и улучшить отношение сигнал/шум.

Мы использовали метод, подобный методу Хименеса и Лоуба (2002), но с другим типом датировки возраста, а именно используя датировку по фотометрическим данным и выбор оптимального соответствия наблюдаемым потокам распределения энергии в спектре (SED), зависящего от возраста. Такая методика, ставшая уже стандартной, хотя и может дать ошибку возраста до 2 гигаlet, работает достаточно устойчиво для чистой выборки эллиптических галактик (см., например, Верходанов и др., 1999).

Методы с использованием цветовых и спектральных возрастов галактик основаны на хронометрировании темпов расширения Вселенной по физическим процессам, не относящимся к космологии: по темпам ядерных реакций в звездах, знания о которых для стандартных звезд типа Солнца достаточно точны и в последние десятилетия получили многочисленные прямые и косвенные подтверждения, включая самые последние достижения акустической томографии недр Солнца. Поэтому предлагаемый способ хронометрирования эволюции Вселенной напоминает методы хронометрирования на Земле по данным радиоактивного распада и в любом случае является независимым от других.

Отметим, что гигантские эллиптические галактики с высокой радиосветимостью и со старым звездным населением являются наиболее подходя-

щими объектами для оценки возраста звездных систем. Современные модели предсказывают достаточно быстрое формирование (в течение 1 миллиарда лет) таких систем уже на $z \sim 4$ (Пипино, Маттеучи, 2004), что позволяет применить фотометрические методы для их исследования. Эффективность селекции таких галактик, начиная с умеренных красных смещений ($z > 0.5$), с помощью радиоастрономических методов подтверждена несколькими группами исследователей (Педади, 2003). Комбинированная диаграмма Хаббла “ $K-z$ ” для радиогалактик и галактик поля (Ярвис и др., 2001; Де Брюк и др., 2002) показывает, что радиогалактики имеют наибольшую светимость на любом красном смещении из интервала $0 < z < 5.2$ (Рюланд и др., 2003). Кроме того, радиогалактики имеют сформировавшиеся сверхмассивные черные дыры, масса которых обычно пропорциональна массе звездного балджа ($M_{BH} \sim 0.006 M_{buldge}$, Маггориан и др., 1998), и этот факт является дополнительным свидетельством присутствия сформировавшегося звездного населения. Формирование радиогалактик на красных смещениях $z \sim 3-5$ дает уже сформировавшиеся звездные популяции на $z \sim 2-4$ в Λ CDM-моделях. Таким образом, отбирая далекие радиогалактики, мы достаточно эффективно находим гигантские эллиптические галактики, которые можно использовать для оценки возраста (Парийский, 2001; Верходанов, Парийский, 2003; Старобинский и др., 2004).

Данная работа описывает подходы, методы и результаты получения оценок космологических параметров по выборкам эллиптических галактик. Сначала мы обсудим проблемы, связанные с использованием эволюционных синтетических моделей спектров галактик, потом приведем результаты первых попыток коррекции стандартной космологической модели с холодной темной материей (SCDM) при помощи возрастных оценок родительских галактик, ответственных за возникновение мощных радиогалактик на больших красных смещениях, по данным эксперимента “Большое Трио” (Парийский и др., 1996, 2000а, 2000б; Парийский, 2001; Соболева и др., 2000; Копылов и др., 1995; Верходанов и др., 2002) и других авторов (Верходанов и др., 1999). Далее мы дадим сводку попыток оценки зависимости возраста галактик от их красного смещения по текущим эволюционным моделям звездного населения эллиптических галактик для более широкого интервала красных смещений, включая близкие, с $z < 1$, объекты. Затем мы обсудим попытку использования данных многоцветной фотометрии галактик, составляющих население большого числа скопленных галактик.

2. Фотометрическая датировка

2.1. Эволюционные модели спектров

В конце 80-х — начале 90-х годов были сделаны попытки использовать цветовые характеристики радиогалактик для оценки красных смещений и возраста звездных систем родительских галактик. Были предложены многочисленные эволюционные модели, которые приводили к сильно отличающимся результатам при сравнении с наблюдательными данными (Аримото, Йоши, 1987; Чемберс, Шарлот, 1990; Лилли, 1987, 1990; Парийский и др., 1996). В последние годы широкое распространение получили модели PEGASE: Project de'Etude des Galaxies par Synthèse Evolutive (Фиок, Рока-Волмеранж, 1997) и GISSEL'98: Galaxy Isochrone Synthesis Spectral Evolution Library (Брузуал, Шарлот, 1993; Бользонелла и др., 2000), в которых устранены недостатки предыдущих моделей.

В эксперименте “Большое Трио” (Парийский и др., 1996) мы также пытались применить эти методы для далеких объектов RC-каталога с крутыми спектрами, для которых нами были измерены звездные величины в четырех фильтрах (BVRI). Использовалась процедура сглаживания, позволяющая промоделировать и предсказать поток в данном фильтре на заданном SED с учетом кривой пропускания этого фильтра, а также с учетом эффекта влияния красного смещения. Эти изменения в методике позволили сделать результаты более надежными по сравнению с предыдущей работой.

Предварительно (Верходанов и др., 1999) мы исследовали применимость новых моделей к популяции далеких ($z > 1$) радиогалактик с известными красными смещениями, для которых нам удалось найти в литературе более или менее надежные данные многоцветной фотометрии в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах не менее, чем в трех фильтрах. В частности, показано, что можно оценивать красные смещения с точностью до 25–30 % при $1 < z < 4$, имея измеренные звездные величины более чем в 3-х фильтрах. А если имеется, по крайней мере, одна оценка блеска в инфракрасной области, то достаточно использовать измерения в 3-х фильтрах. Оценки проводились для двух эволюционных моделей.

В качестве одной из моделей SED (Spectral Energy Distribution) использовалась эволюционная модель PEGASE (Фиок, Рока-Волмеранж, 1997) для галактик хаббловской последовательности как со звездообразованием, так и эволюционирующих пассивно. Одно из основных достоинств этой модели состоит в расширении к ближнему инфракрасному (NIR) диапазону атласа синтетических

спектров Рока-Волмеранжа и Гуидердони (1988) с пересмотренной звездной библиотекой, включающей параметры холодных звезд. Модель охватывает диапазон от 220Å до 5 микрон. Алгоритм модели, согласно авторам, позволяет отслеживать быстрые эволюционные фазы, такие как фазы красного сверхгиганта или AGB в ближнем IR-диапазоне. Мы использовали из этой модели широкий набор кривых SED в диапазоне возрастов от 7×10^6 лет до 19×10^9 лет для массивных эллиптических галактик.

Мы использовали расчеты для эллиптических галактик из библиотеки синтетических спектров модели GISSEL'98 (Бользонелла и др., 2000), построенной с помощью эволюционных моделей Брузуала и Шарлота (1993, 1996). Библиотека синтетических спектров эллиптических галактик построена с учетом следующих параметров звездообразования: простого звездного населения (SSP — simple stellar population), продолжительности процесса вспышечного звездообразования — 1 млрд. лет, затухание вспышечной активности звездообразования идет по экспоненциальному закону. В модели использовалась солнечная металличность. Начальная функция масс (IMF) с верхним пределом 125 солнечных масс взята из работы Миллера и Скало (1979). Как показано в работе Бользонеллы и др. (2000), на точности определения красных смещений выбор IMF не сказывается. Модельные треки рассчитаны в диапазоне длин волн от 200 до 95800Å. Для наших расчетов мы использовали диапазон, заданный пределом красных смещений от 0 до 6.

Используемые наборы эволюционных моделей доступны на сервере <http://sed.sao.ru> (Верходанов и др., 2000).

2.2. Процедура оценки возраста и красного смещения

Перед использованием модельных кривых мы провели сглаживание их фильтрами, применяя следующий алгоритм (Верходанов и др., 2002):

$$S_{ik} = \frac{\sum_{j=0}^n s_{i-n/2+j} f_{jk}(z)}{\sum_{j=0}^n f_{jk}(z)}, \quad (3)$$

где s_i — исходная модельная кривая SED, S_{ik} — сглаженная k -ым фильтром модельная кривая SED, $f_k(z)$ — кривая пропускания k -ого фильтра, “сжатая” в $(1+z)$ раз при “движении” вдоль оси длин волн кривой SED, $j = 1, n$ — номер пиксела в кривой пропускания фильтра. Из сформированных таким образом k кривых SED мы построили

двумерный массив (λ , фильтр) сглаженных синтетических звездных спектров для дальнейших вычислений.

Оценка возрастов и красных смещений радиогалактик проводилась методом выбора на кривых SED оптимального положения фотометрических величин, полученных в различных фильтрах при наблюдениях радиогалактик. Мы использовали уже рассчитанные и заданные в виде таблиц кривые SED для разных возрастов. Алгоритм выбора оптимального положения точек на кривой состоял (Верходанов, 1996) в вариации положения точек вдоль осей длин волн и интенсивности кривых SED. При этом определялось такое положение, при котором сумма квадратов отклонений точек от соответствующих сглаженных кривых минимальна, т.е. фактически вычислялся минимум χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^{N \text{ filters}} \left(\frac{F_{obs,k} - p \cdot SED_k(z)}{\sigma_k} \right)^2, \quad (4)$$

где $F_{obs,k}$ — наблюдаемая звездная величина в k -ом фильтре, $SED_k(z)$ — модельная звездная величина для заданного спектрального распределения в k -ом фильтре на заданном z , p — свободный коэффициент, σ_k — ошибка измерения. Красное смещение определялось по сдвигу положения наблюдаемых величин при наилучшем расположении их на кривых SED относительно положения “rest frame” (положения при $z = 0$). Из общего набора кривых для разных возрастов мы выбирали такие, на которых сумма квадратов невязок для данных наблюдений радиогалактик получалась минимальной.

Правильность оценки возраста (и красного смещения) мы проверяли двумя способами. В первом случае использовались модельные данные, полученные при сглаживании фильтрами разных кривых SED для разного возраста. В результате этой процедуры моделировались наблюдения с ПЗС-матрицей для 5-ти фильтров, и запускался механизм прогонки. Были выбраны точки, соответствующие фильтрам VIJHK, на красном смещении $z = 0.539$. Использовалась модель GISSEL с кривыми SED на 1015.1 и 5000 млн. лет. Для каждого возраста проводились по 2 теста: с фиксированным $z = 0.539$ и нефиксированным красным смещением. Из результата прогонки можно сделать вывод: и возраст и красное смещение определяются уверенно, но возможно попадание на соседнюю кривую возраста, что дает точность 200 млн. лет, и при нефиксированном z на результат оказывает влияние дискретизация по длине волны λ в кривых SED (ошибка z до 6%).

Во втором случае для исследования возможностей метода определения красных смещений и возрастов звездного населения родительских галактик по данным многоцветной фотометрии мы отобрали около 40 далеких радиогалактик с известными красными смещениями, для которых в литературе приведены звездные величины не менее чем в трех фильтрах (Верходанов и др., 1998b, 1999). Сначала по собранным фотометрическим данным с использованием моделей PEGASE и GISSEL'98 были определены только возрасты звездного населения родительских галактик при фиксированном известном красном смещении, после чего был осуществлен поиск оптимальной модели кривой SED одновременно для красного смещения и возраста звездного населения, а затем сравнение полученных значений. Таким методом мы оценивали как возраст галактики, так и красное смещение в рамках заданных моделей (см. также Верходанов и др., 1998a, 1999). Из общих соображений ясно, что надежность результата при больших красных смещениях существенно зависит от наличия инфракрасных данных (вплоть до K-диапазона), т.к. при подгонке мы перекрываем область быстрого изменения спектра (скачок) перед оптическим диапазоном SED и тем самым можем уверенно, с хорошо выделяющимся максимумом на кривой правдоподобия, определять положение наших данных. Действительно, при проверке надежности процедуры с помощью имеющихся измерений при сохранении только 3-х точек, одна из которых находится в K-диапазоне, мы получаем тот же результат на кривой зависимости невязок, что и для 4-х или 5-ти точек. Если же не использовать инфракрасный диапазон, то результат получается более неопределенным. Однако, как показано в работе Верходанова и др. (1999), вариант близкого расположения 4-х фильтров, как в нашем случае BVRI-фотометрии, дал в контрольной выборке из 6-ти объектов хороший результат, совпадающий с результатом, полученным при использовании всех фильтров, включая инфракрасный диапазон.

3. Выборка объектов

Следует сказать, что выбор эллиптических галактик в качестве объектов для нашего исследования не случаен. Их можно рассматривать как наиболее оптимальные объекты среди звездных систем, имеющие достаточно однородное звездное население. Хотя такие объекты тоже имеют (умеренные) градиенты металличности (Фриака, Терлевич, 1998), моделирование показало (Хименес, Лобуб, 2002), что изменение вклада металличностей приводит к неопределенности оценок возраста в пределах 0.1 гигаlet, что лежит внутри диапазона

неопределенности подобных оценок.

В данном исследовании также использованы радиогалактики, которые, как правило, отождествляются с гигантскими эллиптическими галактиками (gE) и являются хорошими “фонарями” и представителями далеких звездных систем. Стандартная точка зрения последних десятилетий — мощные радиогалактики связаны со старыми крупными звездными системами типа gE, имеющими красный цвет. Опыт использования шаровых скоплений в нашей Галактике для оценки возраста Вселенной подсказывает, что поиск самых старых звездных систем на больших красных смещениях может быть полезным для хронометрирования темпов расширения Вселенной на любых расстояниях, на которых еще существовали мощные радиогалактики. Как показали исследования многих групп, включая проект “Большое Трио” (Ролингс и др., 1996; Ван Брюгель и др., 1999; Соболева и др., 2000), мощные радиогалактики появились на красных смещениях $z \approx 5$. Весь интервал $0 < z < 5$ потенциально может быть исследован уже сегодня, так как чувствительность радио- и оптических телескопов достаточна для изучения этих мощных радио- и оптических объектов. При этом, в отличие от квазаров, излучение звездного населения можно легко отделить от излучения газовой компоненты.

Заметим, однако, что в случае радиогалактик возникают неопределенности при фотометрическом определении возраста из-за различных факторов (см., например, Мой, Рока-Волмеранж, 2002), таких как ионизация или просвечивание синхротронного излучения от ядра, взаимодействие облаков и джета и т.п. Кроме того, галактики на ранних стадиях могли быть взаимодействующими, что изменяет звездное население. Тем не менее, радиогалактики остаются пока единственным простым средством изучения эллиптических галактик на больших красных смещениях.

3.1. Данные по радиогалактикам из каталога “Холод”

Данная выборка радиогалактик типа FR II, обнаруженных в обзоре “Холод”, проведенном на РАТАН-600 (Парийский и др., 1991, 1992), создана с привлечением данных многоцветной фотометрии для оценки цветовых красных смещений и возрастов звездных систем родительских галактик (Парийский и др., 1996; Верходанов и др., 2002). Позднее для 20-ти объектов были проведены спектральные наблюдения на БТА с прибором SCORPIO (Афанасьев и др., 2002), которые подтвердили с высокой точностью (коэффициент корреля-

ции 0.92) фотометрические оценки.

В программе “Большое Трио” были измерены BVRI-цвета около 60-ти радиогалактик и обнаружено, что хотя их цветовой возраст имеет большую дисперсию, можно достаточно уверенно сказать, что верхняя граница возраста является функцией красного смещения (чем больше z , тем меньше максимальный возраст). На малых и очень больших красных смещениях галактик это не противоречит Λ CDM-модели без космологической постоянной Λ , но в интервале $0.7 < z < 2$ имеются объекты с цветовым возрастом больше возраста Вселенной на соответствующем красном смещении. Это расхождение, как известно (см., например, Сахни и Старобинский, 2000), устраняется в Λ CDM-моделях. Действительно, возраст такой Вселенной не отличается от возраста в Λ CDM-модели ни на очень малых, ни на очень больших красных смещениях, что видно из формул, приведенных в упомянутой работе.

Однако в интервале красных смещений $z = 1 - 2$ различие может достигать 1–2 млрд. лет, что уже близко к возможностям эксперимента. Простая теория с $\Lambda \neq 0$ для пространственно плоской изотропной космологической модели дает зависимость положения максимума отклонений от Λ CDM-модели на оси красных смещений от величины космологической постоянной. Первые попытки оценки значения космологической постоянной по данным программы “Большое Трио” были сделаны в 1999 г. (Парийский, 2001). В связи с неуверенностью в количественных оценках возраста галактик по измеренному красному смещению было найдено число галактик, возраст которых формально превышает возраст Вселенной в Λ CDM-модели с $\Lambda = 0$ и построена гистограмма распределения количества этих галактик относительно z (рис.1).

По положению максимума была оценена доля “темной энергии” (Ω_Λ), которая оказалась близкой к величине, полученной по сверхновым типа Ia: $1\Omega_\Lambda = 0.8 - 0.6$ (рис.2).

Этот успех стимулировал наши дальнейшие шаги в использовании возрастных характеристик звездного населения. На рис. 3 приведены все данные по радиогалактикам с крутыми спектрами, собранные группой “Большое Трио” в 2001 г. Видно, что присутствуют объекты с большими z , а на $z < 2$ дисперсия возрастов велика. Но чем больше красное смещение, тем меньше возраст самого старого объекта, как и следовало ожидать, во всех эволюционных моделях Вселенной. Выбрав популяцию объектов, возраст которых меньше возраста Вселенной в Λ CDM-модели не более, чем на 2 млрд. лет, получим зависимость $z(t)$, подобную изображенной на рис.4. Зависимость такого типа

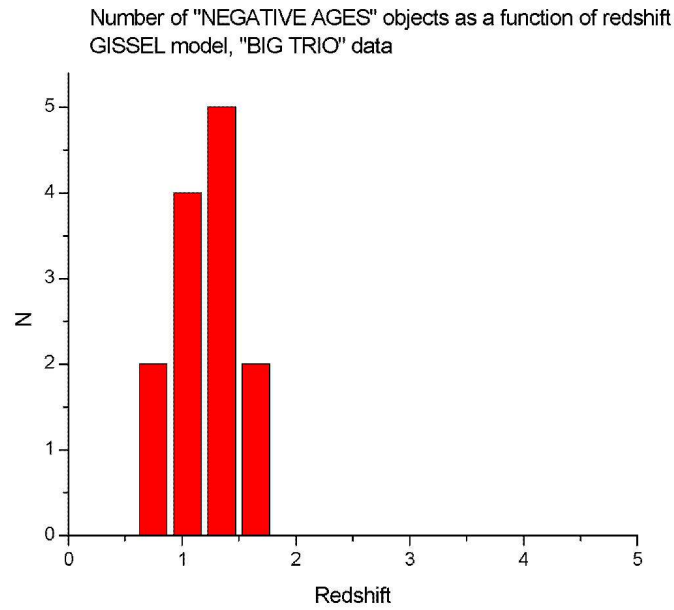


Рис. 1: Гистограмма распределения галактик от z с формальным возрастом больше возраста Вселенной.

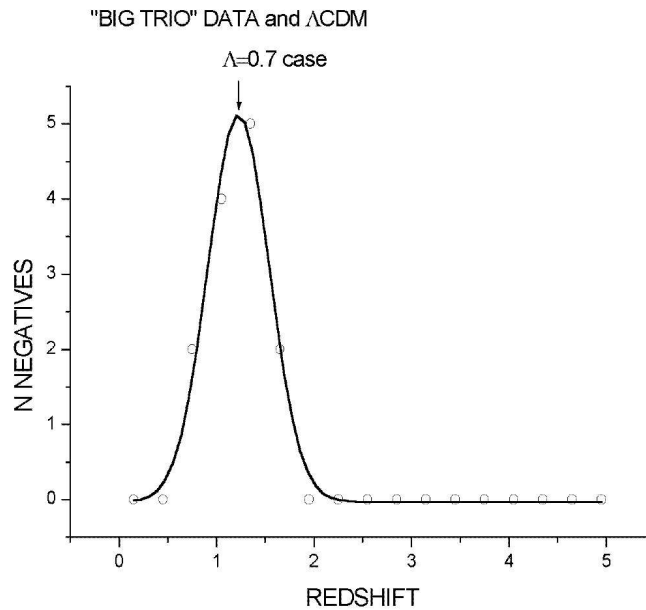


Рис. 2: Оценки Ω_Λ по объектам проекта "Большое Трио".

уже может служить основой для оценки $R(t)$.

3.2. Данные по исследованным радиогалактикам с $z > 1$

Как говорилось выше, для проверки методики и оценки красных смещений и возраста звездных систем мы построили выборку радиогалактик FR II с

красными смещениями вплоть до $z = 3.80$ (Верходанов и др., 1998b, 1999) по данным, полученным другими авторами.

Необходимо отметить, что литературные фотометрические данные очень неоднородны. Они получены не только разными авторами, но и на различных инструментах, с разными фильтрами. Измерения для одного и того же объекта не всегда

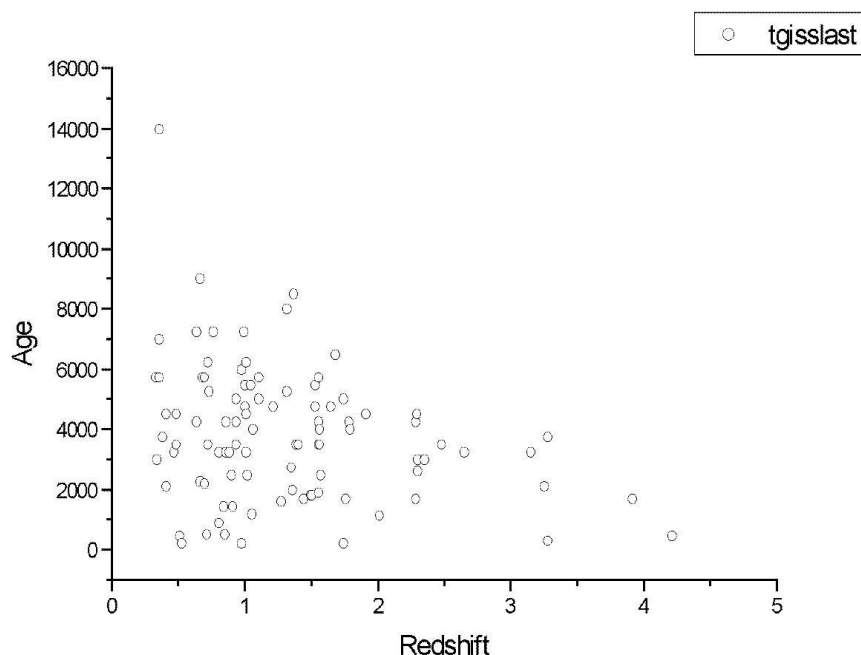


Рис. 3: Зависимость $t(z)$ для радиогалактик с большим z и крутыми радиоспектрами, взятых из различных опубликованных работ. Видно, что на $z < 2$ дисперсия возрастов велика.

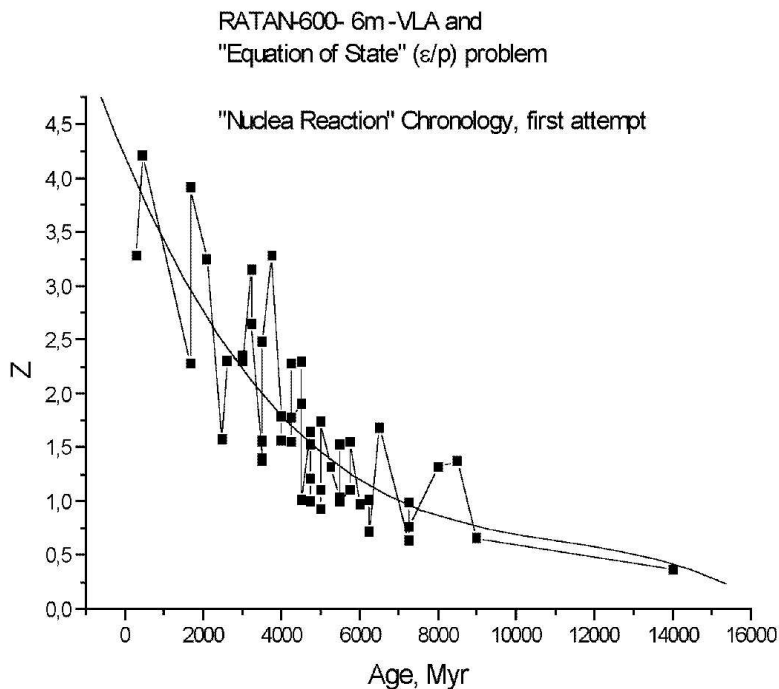


Рис. 4: Зависимость $z(t)$ для объектов с $t_{star\ form} - t_{Univer} \leq 2$ млрд.лет.

проводились в одинаковых апертурах и т.д. Поэтому после окончательной селекции из 300 радио-

галактик первичной выборки осталось только 42. Большая часть объектов осталась за пределами

Таблица 1: *Отобранные эллиптические галактики — члены скоплений. Приведены: галактические координаты и названия скоплений, номера выбранных галактик в данном скоплении согласно Стенфорду и др. (2002), красные смещения, использовавшиеся фильтры, K_{lim}*

RA+Dec(2000)	Имя	ID-номер галактики	z	Фильтры	K_{lim}
001631.2+791649	3C 6.1	14,18,33,34,43	0.840	KJIR	19.8
001833.5+162515	Cl 0016+16	8,9,15,17,22,27,35,40,42	0.545	KNJIV	19.1
002354.5+042313	GHO 0021+0406	9,12,15,24,29	0.832	HJIR	20.0
002635.7+170945	Cl 0024+16	3,4,5,8,9,10,16,26,33	0.391	KNJRg	18.8
004910.9-244043	Vidal 14	6,11,14,17,23,31,40,43	0.520	KJIV	18.0
005657.1-274030	J1888.16CL	7,17,23,45	0.560	KNJIV	19.2
011018.5+314719	3C 34	7,8,13,21,23,34,40	0.689	KNJiV	19.1
030619.1+171849	GHO 0303+1706	6,7,13,18,22,24,34,40	0.418	KNJRg	18.8
032001.4+153200	GHO 0317+1521	3,8,9,13,14,23,24	0.583	KJIV	19.2
041246.6-655055	F1557.19TC	20,25,30,37,39	0.510	KNJIV	19.1
045410.9-030057	MS 0451.6-0306	3,11,12,19,25,31,33,40	0.539	KNJiV	19.2
073924.3+702315	3C 184	3,4,8,12,15	0.996	KJI	20.3
084835.9+445337	RDCS 0848+4453	4,6,9,11,13,15	1.273	KNJIR	20.5
085809.9+275052	3C 210	3,6,13,15,16,17	1.169	KJI	20.5
093239.6+790632	3C 220.1	5,8,12,16,17,19,24,25	0.620	KNJIV	19.5
105659.5-033736	MS 1054.5-032	4,7,9,13,14,22,23,25,26,30	0.828	KNJiR	20.3
114022.2+660813	MS 1137.5+6625	3,8,10,11,12,15,16,17,20,21,24	0.782	KNJiR	20.0
132448.9+301138	GHO 1322+3027	2,5,8,10,17,18,20	0.751	KNJiR	20.3
141120.5+521210	3C 295	9,18,24,27,28,31,32,34,35,37	0.461	KNJiV	18.8
151100.0+075150	3C 313	6,12,13,21,33	0.461	KJiV	18.5
160312.2+424525	GHO 1601+4253	4,6,17,18,19,22,43	0.539	KNJiV	19.2
160424.5+430440	GHO 1603+4313	5,15,17,36,40	0.895	KNJiR	20.3
160436.0+432106	GHO 1604+4329	7,10,20,21,28,30,32	0.920	KNJiR	20.1
205621.2-043753	MS 2053.7-0449	35,39,51,89	0.582	KJIV	19.2
220403.9+031248	GHO 2201+0258	10,11,13,14,17,25,29,35,38	0.640	KJIV	19.3

выборки, потому что они имеют свойства квазаров, что сильно затрудняет использование процедуры SED для стандартных эллиптических галактик. Полученное медианное значение возраста для данной выборки — 5 гигаlet для модели GISSEL и 9 гигаlet для модели PEGASE.

3.3. Скопления галактик

Подвыборка эллиптических галактик из скоплений, предложенная А.И. Копыловым (2001), является наиболее представительной из исследуемой группы объектов (табл. 1). Для ее построения мы использовали данные из работы Стенфорда и др. (2002), содержащей выборку галактик из 45-ти скоплений галактик на красных смещениях $0.1 < z < 1.3$. Для всех объектов имеются фотометрические данные из оптического и ближнего инфракрасного диапазона. В среднем для каждой галактики приводятся звездные величины в полосах ВJHK. Мы отобрали по показателям цвета по 5–11 объектов — типичных эллиптических галактик из 25-ти скоплений.

4. Процедура оценки параметров

В основе нашего подхода лежит анализ функции $t(z)$, построенной как

$$t(z) = \int_z^{\infty} \frac{dz}{(1+z)H(z)} \quad (5)$$

по данным возрастов радиогалактик в зависимости от красного смещения. В качестве функции $H(z)$ мы использовали выражение

$$H^2 = H_0^2[\Omega_m(1+z)^3 + A + B(1+z) + C(1+z)^2], \quad (6)$$

где $A + B + C = 1 - \Omega_m$.

Подгонка функции $t(z)$ под анализируемые данные проводилась с помощью вариации четырех параметров (H_0 , Ω_m , A , B). Для аппроксимации данных мы разбивали весь набор красных смещений на равные интервалы с шагом Δz и в каждом из интервалов использовали максимальное значение возраста. По сумме квадратов невязок строилась четырехпараметрическая функция правдоподобия. При значениях параметров $B=C=0$, т.е. при использовании упрощенной модели функции

$H(z)$, определяемой только двумя параметрами (H_0 , Ω_m), и $A = 1 - \Omega_m = \Omega_\Lambda$, имеются устойчивые решения для обеих моделей эволюции звездного населения. Результаты подгонки параметров приведены в табл. 2, в которой даны параметры аппроксимационных кривых для интервалов $\Delta z = 0.2$ и 0.3 для обеих моделей звездного населения, и на рис. 5.

Таблица 2: Двухпараметрическая подгонка космологических параметров по формулам (5) и (6) (когда $B = C = 0.0$) для аппроксимационных кривых в интервалах $\Delta z = 0.2$ и 0.3 для обеих моделей звездного населения

модель SED	Δz	Ω_m	Ω_Λ	H_0	ϵ [Млет]
GISSEL	0.2	0.2	0.8	77.7	1695
GISSEL	0.3	0.2	0.8	71.5	1367
PEGASE	0.2	0.2	0.8	65.4	4101
PEGASE	0.3	0.2	0.8	53.0	2748

4.1. Влияние ошибок на оценки параметров

Подобный метод определения параметров является достаточно устойчивым к входным параметрам и систематическим эффектам. Как показало моделирование, изменение начальной металличности приводит к изменению возраста на 0.1 гигалет (Хименес, Лоуб, 2002). Изменение начальной функции масс также практически не меняет модели SED (Бользонелла и др., 2000).

Ошибка определения возраста, которая может быть связана с неправильной классификацией типа галактики, а следовательно, и выбором SED, в данном случае играет в пользу описываемого подхода. Модели SED, соответствующие эллиптическим галактикам, дают самое старое звездное население среди всех спектров. Таким образом, если в галактике встречаются области звездообразования, дающие вклад в фотометрические данные, то выбор оптимальной модели смещается в сторону более молодого звездного населения, и галактика выпадает из нашей выборки, т.к. для построения $t(z)$ используются максимальные значения.

Для проверки влияния полноты выборки на результат мы использовали метод будстропа, заключающийся в размножении исходной выборки и построении новой с помощью случайного выбора объектов. Коэффициент размножения выборки брался равным 100, и для каждого интервала dz случайным образом выбиралось количество объектов, равное исходному. Таким образом, было про-

ведено 50 испытаний, и в каждом случае оценивались значения параметров. В результате были получены дисперсии оценок $H_0 = 72 \pm 7$ для модели GISSEL и $H_0 = 53 \pm 6$ для модели PEGASE в интервале $dz = 0.3$. Значение Ω_Λ при этом остается неизменным, что объясняется влиянием объектов на умеренных красных смещениях $z = 0.3 - 1.0$, имеющих сравнительно небольшой разброс возрастов.

Влиянием внутреннего самопоглощения в галактике (Соколов и др., 2001) мы пренебрегали из-за неоднозначности решений для малого количества используемых входных параметров (число фильтров) и необходимости определять большое число неизвестных параметров.

5. Обсуждение результатов

По результатам работы подтверждается то, во-первых, что мы живем в эволюционирующей Вселенной, во-вторых, что отличие от стандартной релятивистской плоской модели Λ CDM находится в пределах погрешностей метода. Для оценки квинт-эссенции $w_Q(z)$ точности пока не хватает.

Для объединенных данных из разных популяций эллиптических галактик, в том числе и для радиогалактик, проведен анализ верхней границы возраста формирования звездных систем. По этим данным оценены границы определения космологических параметров H_0 и Λ -члена, как $H_0 = 72 \pm 10$, и $\Omega_\Lambda 0.8 \pm 0.1$ в модели GISSEL и $H_0 = 53 \pm 10$, и $\Omega_\Lambda \pm 0.1$ в модели PEGASE. Отметим, что модели GISSEL имеют меньшую дисперсию возрастов для каждого интервала dz , т.е. более устойчивый результат и, возможно, как следствие, более надежное определение космологических параметров.

Говоря о применяемой методике, следует заметить, что одной из основных проблем является использование наблюдений радиогалактик, у которых наряду со стандартной эволюцией звезд на фотометрические измерения могут влиять и другие факторы. Тем не менее, уже появляются новые модели (например, PEGASE2: Ле Борнье, Рока-Волмеранж, 2002), позволяющие учитывать некоторые из этих факторов.

Заметим также, что:

1) использование возрастных характеристик галактик для независимых оценок космологических параметров, в принципе, нам кажется перспективным. Пример — оценка величины Λ -члена, которую можно улучшать, расширяя объем выборки и применяя более рафинированные модели;

2) первые пробы более глубокого использования данных “возраст — красное смещение” дали оценки, близкие к наиболее точным измерениям параметров по данным спутника WMAP (Спер-

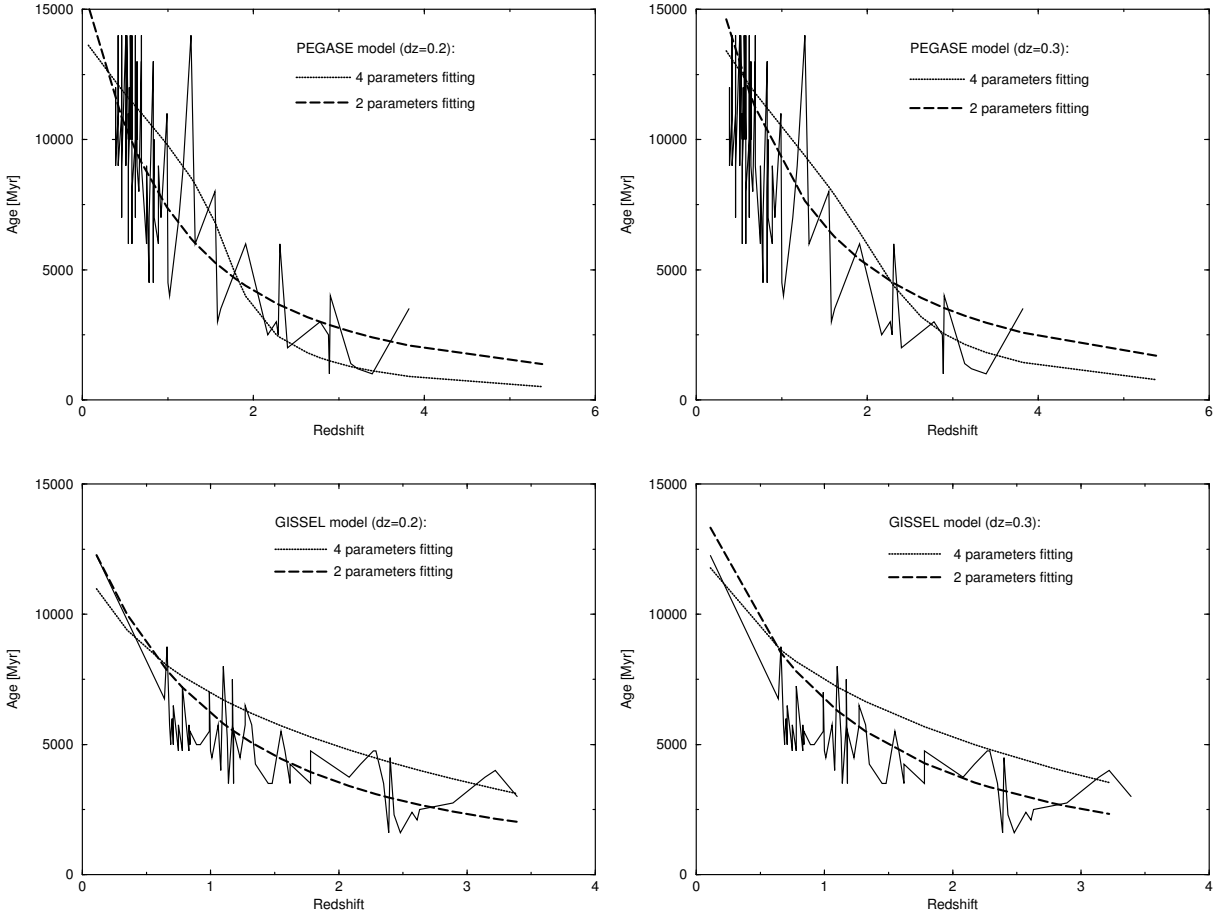


Рис. 5: Зависимость $t(z)$ для моделей, приведенных в табл. 2. Верхний ряд — оценка для модели PEGASE, нижний ряд — модели GISSEL. Слева — дискретизация $\Delta z=0.2$, справа — дискретизация $\Delta z=0.3$. Кривые построены для параметризации (5,6) по максимумам возрастов галактик в заданных интервалах красных смещений.

гель и др., 2003);

3) предварительная селекция кандидатов должна проводиться различными путями, так как ни один из известных нам не является идеальным. Относительно мощное радиоизлучение (отношение радиосветимости к оптической) указывает на то, что мы имеем дело с гигантской галактикой со сверхмассивной черной дырой в центре, на формирование которой требуется время. К сожалению, пока нет общепринятой теории их формирования. Предложение использовать объекты в хорошо изученных скоплениях кажется также привлекательным (Копылов, 2001), т.к. именно по скоплениям получены данные для $R(t)$ на малых красных смещениях. Осталось непонятным модельное различие для скоплений, которое не меньше, чем для радиогалактик. Использование верхних значений возраста в выборках на различных красных смещениях кажется

оправданным. Даже один самый старый объект в выборке является решающим в оценке нижнего предела возраста Вселенной на данном красном смещении, подобно тому, как единственная старая звезда в Галактике (или самое старое шаровое скопление) определяет минимальный возраст Вселенной сегодня. Самой сложной проблемой, на наш взгляд, является проблема теории эволюции распределения энергии в спектре галактик, и здесь пока имеются значительные разночтения.

Благодарности. ОВВ выражает благодарность РФФИ за частичную поддержку работы грантом № 02-7-90038, ЮНП — за поддержку грантами программ “Интеграция”, “Астрономия” и РФФИ. Особая благодарность А.И.Копылову за многочисленные критические замечания и предложение использовать новые данные по цветовым характеристикам эллиптических галактик в скоплениях. АС был частично поддержан грантами РФФИ 02-02-16817 и 00-15-96699, а также научной программой РАН “Астрономия”.

Список литературы

- Аримото и Йоши (Arimoto N., Yoshii Y.) 1997. *A&A*, **179**, 23
- Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Моисеев А.В., Верходанов О.В., Копылов А.И., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С., Темирова А.В., Желенкова О.П., Госс Уи.М., 2002, Препр. No 139 СПб, С.Петербург, Филиал САО, 1
- Брузуал и Шарлот (Bruzual G., Charlot S.), 1993. *Astrophys. J.*, **405**, 538
- Брузуал и Шарлот (Bruzual G., Charlot S.), 1996, anonymous@ftp://gemini.tuc.noao.edu/pub/charlot/bc96
- Бользонелла и др. (Bolzonella M., Miralles J.-M., Pelló R.) 2000, *Astron. Astroph.*, **363**, 476 (astro-ph/0003380)
- ван Брюгел (van Breugel W.J.M., De Breuck C., Stanford S.A., Stern D., Röttgering H., Miley G.K.), 1999, *ApJ*, 1999, **518**, 61
- Верходанов (Verkhodanov O.V.), 1996, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.*, **41**, 149
- Верходанов и др. (Verkhodanov O.V., Kopylov A.I., Parijskij Yu.N., Soboleva N.S., Temirova A.V.), 1998a, in "Modern problems of extragalactic astronomy", Puschino, May 25–29, Puschino Sci. Center, 24
- Верходанов и др. (Verkhodanov O.V., Kopylov A.I., Parijskij Yu.N., Soboleva N.S., Temirova A.V., Zhelenkova O.P.), 1998b, in "Prospects of Astronomy and Astrophysics For the New Millennium". Joint European and National Astronomical Meeting, JENAM'98. 7th Europ. & 65th Ann. Czech Astron. Conf., Prague, 9-12 Sept., 1998b, p.302
- Верходанов и др. (Verkhodanov O.V., Kopylov A.I., Parijskij Yu.N., Soboleva N.S., Temirova A.V.), 1999, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.*, **48**, 41 (astro-ph/9910559)
- Верходанов и др. (Verkhodanov O.V., Kopylov A.I., Zhelenkova O.P., Verkhodanova N.V., Chernenkov V.N., Parijskij Yu.N., Soboleva N.S., Temirova A.V.), 2000, *Astron. Astrophys. Trans.*, **19**, No 3-4, 662, (astro-ph/9912359, <http://sed.sao.ru>)
- Верходанов и др. (Verkhodanov O.V., Parijskij Yu.N., Soboleva N.S., Kopylov A.I., Temirova A.V., Zhelenkova O.P., W.M.Goss), 2002, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.*, **52**, 5 (astro-ph/0203522)
- Верходанов и Парийский (Verkhodanov O.V., Parijskij Yu. N.), 2003. *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.*, **55**, 66
- Де Брюк (De Breuck C., van Breugel W., Stanford S.A., Röttgering H., Miley G., Stern D.), 2002, *AJ*, **123**, 637
- Ифстафиоу и др. (Efsthathiou G., Moody S., Peacock J.A., Percival W.J., Baugh C., Bland-Hawthorn J., Bridges T., Cannon R., Cole S., Colless M., Collins C., Couch W., Dalton G., de Propris R., Driver S.P., Ellis R.S., Frenk C.S., Glazebrook K., Jackson C., Lahav O., Lewis I., Lumsden S., Maddox S., Norberg P., Peterson B.A., Sutherland W., Taylor K.) 2002. *MNRAS*, **330**, 29.
- Копылов А.И., Госс Уи.М., Парийский Ю.Н., Соболева Н.С., Темирова А.В., Желенкова О.П., Витковский В.В., Наугольная М.Н., Верходанов О.В., 1995. *Astron. Zh.*, **72**, 613
- Копылов А.И., 2001, частное сообщение
- Ле Борнье и Рока-Волмеранж (Le Borgne D., Rocca-Volmerange B.), 2002, *A&A*, **386**, 446
- Лилли (Lilly S.), 1987, *MNRAS*, 1987, **229**, 573
- Лилли (Lilly S.), 1990, "Evolution of the Universe" (ed. Kron R.G.), *Astron. Soc. Pacific*, 344
- Ляйбундгут (Leibundgut B.) 2001. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **39**, 67
- Лоуб и Баркана (Loeb A., Barkana R.), 2001. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **39**, 19
- Маггориан и др. (Magorrian J., Tremaine S., Richstone D., Bender R., Bower G., Dressler A., Faber S.M., Gebhardt K., Green R., Grillmair C., Kormendy J., Lauer T.), 2004. *AJ*, **115**, 2285
- Миллер и Скало (Miller G.E., Scalo J.M.), 1979, *A&A*, **41**, 513
- Мой и Рока-Волмеранж (Moy E., Rocca-Volmerange B.), 2002, *A&A*, **383**, 46
- Парийский (Parijskij Yu.N.), 2001. "Current Topics in Astrofundamental Physics: the Cosmic Microwave Background", *Proc. NATO Advanced Study Inst.*, (ed. Norma G. Sanchez) *Kluwer Acad. Publish*, 219
- Парийский и др. (Parijskij Yu.N., Bursov N.N., Lipovka N.M., Soboleva N.S., Temirova A.V.) 1991. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **87**, 1
- Парийский и др. (Parijskij Yu.N., Bursov N.N., Lipovka N.M., Soboleva N.S., Temirova A.V., Chepurinov A.V.) 1992. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **96**, 583
- Парийский и др. (Parijskij Yu. N., Goss W.M., Kopylov A.I., Soboleva N.S., Temirova A.V., Verkhodanov O.V., Zhelenkova O.P., Naugolnaya M.N.), 1996, *Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв.*, **40**, 5
- Парийский и др. (Parijskij Yu.N., Goss W.M., Kopylov A.I., Soboleva N.S., Temirova A.V., Verkhodanov O.V., Zhelenkova O.P.) 2000a, *Astron. Astrophys. Trans.*, **19**, 297
- Парийский Ю.Н., Соболева Н.С., Копылов А.И., Верходанов О.В., Темирова А.В., Желенкова О.П., Уинн Дж., Флетчер А., Берк Б. 2000b, *Pis'ma Astron. Zh.*, **26**, 493
- Педани (Pedani M.), 2003. *New Astronomy*, **8**, 805
- Пишино и Маттеучи (Pipino A., Matteucci F.), 2004. *MNRAS*, **347**, 968
- Рюланд и др. (Reuland M., van Breugel W., Röttgering H., de Vries W., Stanford S.A., Dey A., Lacy M., Bland-Hawthorn J., Dopita M., Miley G.), 2003, *ApJ*, **592**, 755
- Ролингс и др. (Rawlings S., Lacy M., Blundell K.M., Eales S.A., Bunker A.J., Garrington S.T.), 1996, *Nature*, **383**, p.502
- Рока-Волмеранж и Гуидердони (Rocca-Volmerange B., Guiderdoni B.), 1988, *A&AS*, **75**, 93
- Саини и др. (Saini Tarun Deep, Raychaudhury Somak, Sahni Varun, Starobinsky A. A.), 2002. *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 1162
- Сахни и Старобинский (Sahni Varun, Starobinsky A.A.), 2000, *Internat. Journ. Modern Phys. D*, **9**, 373
- Соболева Н.С., Госс Уи.М., Верходанов О.В., Желенкова О.П., Темирова А.В., Копылов А.И., Парийский Ю.Н., 2000, *Pis'ma Astron. Zh.*, **26**, 723
- Соколов и др. (Sokolov V.V., Fatkhullin T.A., Castro-

- Tirado A.J., Fruchter A.S., Komarova V.N., Kasimova E.R., Dodonov S.N., Afanasiev V.L., Moiseev A.V.) 2001. *A&A*, **372**, 438
- Спергель и др. (Spergel D.N., Verde L., Peiris H.V., Komatsu E., Nolte M.R., Bennett C.L., Halpern M., Hinshaw G., Jarosik N., Kogut A., Limon M., Meyer S.S., Page L., Tucker G.S., Weiland J.L., Wollack E., Wright E.L.). 2003. *ApJ*, **48**, 175 (astro-ph/0302209)
- Стэнфорд и др. (Stanford S.A., Eisenhardt Peter R., Dickinson Mark, Holden B.P., Roberto De Propriis), 2002, *ApJS*, **142**, 153 (astro-ph/0203498)
- Старобинский А.А., Парийский Ю.Н., Верходанов О.В., 2004, Труды Астрон. инст. им. Штернберга, т. **LXXV**, Тез. Всероссийской астрон. конф. ВАК-2004, "Горизонты Вселенной", МГУ, ISSN 0371-6769, 198
- Фиок и Рока-Волмеранж (Fioc M., Rocca-Volmerange B.) 1997, *A&A*, **326**, 950
- Фриака и Терлевич (Friaca A.C.S., Terlevich R.J.), 1998, *MNRAS*, **298**, 399
- Хименес и Лоуб (Jimenez R., Loeb A.), 2002, *ApJ*, **573**, 37 (astro-ph/0106145)
- Чэмберс и Шарлот (Chambers K., Charlot S.), 1990. *Astrophys. J. Lett.*, 1990, **348**, L1
- Ярвис и др. (Jarvis M.J., Rawlings S., Eales S., Blundell K.M., Bunker A.J., Croft S., McLure R.J., Willott C.J.) 2001. *MNRAS*, **326**, 1585