

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Обзоры неба и глубокие поля наземных  
и космических телескопов

В.П. Решетников

*Описаны крупнейшие наблюдательные проекты последних лет по обзорам неба (DSS, 2MASS, 2dF, SDSS) и исследованию сверхглубоких площадок (HDF, GOODS, HUDF и др.), а также отдельные результаты этих работ. Современные обзоры дают информацию о характеристиках и пространственном распределении миллионов галактик. Глубокие поля позволяют изучать галактики в процессе формирования и проследить их эволюцию на протяжении миллиардов лет. Колоссальные объемы наблюдательных данных меняют облик современной астрономии — изменяются подходы к постановке и решению задач, происходит пересмотр всего ранее известного во всех ее областях (от исследований объектов Солнечной системы и звезд до предельно далеких галактик и квазаров).*

PACS numbers: 95.80. + p, 98.62. – g, 98.65. – r

Содержание

1. Введение (1163).
  2. Общие характеристики обзоров и глубоких полей (1165).
  3. Обзоры неба (1167).
    - 3.1. Фотографические обзоры. 3.2. APM. 3.3. DSS и DPOSS. 3.4. 2MASS. 3.5. 2dF и 6dF. 3.6. SDSS.
  4. Глубокие поля (1170).
    - 4.1. WHDF. 4.2. HDF. 4.3. CDF. 4.4. FDF. 4.5. SDF и SXDS. 4.6. COMBO-17. 4.7. GOODS. 4.8. HUDF. 4.9. Другие проекты.
  5. Некоторые результаты (1175).
    - 5.1. Подсчеты галактик. 5.2. Распределение галактик. 5.3. Эволюция функции светимости. 5.4. Эволюция структуры галактик. 5.5. Предельно далекие галактики. 5.6. История звездообразования во Вселенной.
  6. Заключение (1180).
- Список литературы (1182).

1. Введение

Человек всегда стремился узнать, что представляет собой окружающий его мир. До нашего времени дошли многочисленные рисунки и планы, на которых люди пытались упорядочить свои знания о мироздании, — начиная с географических карт и кончая чисто умозрительными схемами строения Вселенной ([1], рис. 1).

**В.П. Решетников.** Астрономический институт им. В.В. Соболева, Санкт-Петербургский государственный университет, 198504 Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский просп. 28, Российская Федерация  
Тел. (812) 428-41-68  
Факс (812) 428-71-29  
E-mail: resh@astro.spbu.ru

Статья поступила 5 апреля 2005 г.

Уже очень давно человечество включило в сферу своих интересов и небо с многочисленными "неподвижными" звездами, планетами, Солнцем и Луной. Вероятно, первый систематический обзор того, что видно глазом на небесной сфере, был выполнен во II веке до н.э. Гиппархом. Им был составлен каталог звездного неба, включавший около 850 звезд. Спустя почти 2000 лет — в конце XVIII века — французский астроном Шарль Мессье опубликовал первый каталог, содержащий не звезды, а звездные скопления и туманности, около трети которых составляли, как мы сейчас знаем, внегалактические объекты — галактики. Однако Шарля Мессье не интересовали обнаруженные им слабые туманные пятнышки. Его главным научным интересом были кометы, и именно для того, чтобы не путать их с неподвижными туманностями, Мессье и составил свой каталог.

Вильям Гершель (1738–1822, "сломавший засовы небес") впервые поставил задачу глобальных обзоров неба с целью изучения строения и развития Вселенной за пределами Солнечной системы [2]. При обзоре звездного неба он применил оригинальный метод "черпков" (подсчет числа звезд в избранных площадках неба<sup>1</sup>) и статистический анализ данных. Это позволило ему установить общую форму нашей Галактики и правильно оценить ее сжатие (~ 1/5). Другой величайшей заслугой Гершеля является первый систематический обзор слабых туманностей и попытка обнаружения закономерностей их крупномасштабного распределения. Им было открыто более 2,5 тысяч туманностей и звездных скоплений, около 80 % из которых составляют другие галак-

<sup>1</sup> Это был один из очень немногих случаев, когда астроном, в полном соответствии с обыденным мнением о своем роде занятий, действительно "считал звезды", глядя в телескоп.

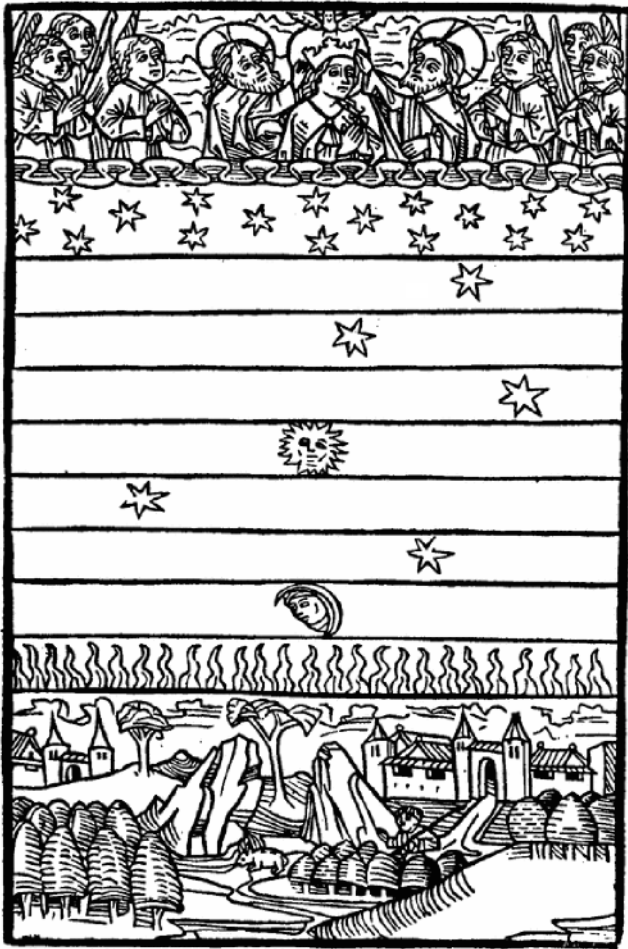


Рис. 1. Структура Вселенной согласно представлениям середины XIV века [1]. В нижней части рисунка показаны земля, вода, воздух и то, что из них создано. Далее горизонтальными слоями снизу вверх изображены: сфера огня, сферы семи "планет" (Луна, Меркурий, Венера, Солнце, Марс, Юпитер, Сатурн), сфера неподвижных звезд и полностью скрытые от наблюдений непрозрачными облаками божественные небеса.

тики. Вильям Гершель впервые попытался оценить размеры слабых туманностей и расстояния до них. Из его очень приближенных оценок возникла картина Вселенной, в которой Млечный Путь — лишь рядовая звездная система из бесчисленного множества других галактик. В XIX веке работы Вильяма Гершеля по поиску и изучению "млечных туманностей" были продолжены его сыном Джоном Гершелем (1792–1871). Джон Гершель расширил исследования своего отца на южное полушарие, удвоил число известных слабых туманностей и продолжил исследование их распределения по небесной сфере.

В середине XIX века был открыт фотографический процесс, и это позволило отказаться от визуальных наблюдений в телескоп и перейти к фотографическим обзорам. В конце XIX века Э. Барнард (1857–1923) начал систематическое фотографирование неба и выполнил первый фотографический обзор Млечного Пути. Большую роль в изучении структуры и динамики нашей Галактики сыграл и проект "избранных площадок" Я. Каптейна (1851–1922). Для выполнения своего проекта Каптейн призвал астрономов всего мира выполнить

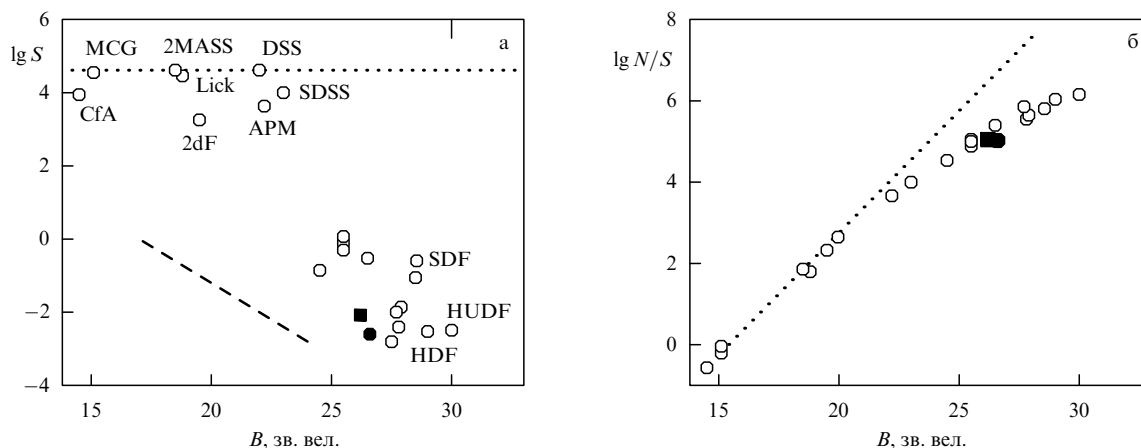
фотографирование и детальное исследование звезд (включая их подсчеты, измерение видимых звездных величин, собственных движений и т.д.) в 206 площадках, равномерно распределенных по всему небу. Этот проект наглядно продемонстрировал плодотворность международного сотрудничества при решении трудоемких наблюдательных задач и предвосхитил некоторые черты крупных современных наблюдательных программ.

После открытия Э. Хабблом (1889–1953) внегалактической природы слабых туманностей стало ясно, что Вселенная гораздо больше, чем это представлялось ранее. Для того чтобы изучить крупномасштабную структуру Вселенной и выяснить природу, происхождение и эволюцию ее основных оптических "кирпичиков" — галактик, потребовалось составить и проанализировать большие выборки внегалактических объектов. Эта работа была начата самим Хабблом [3], а также рядом других исследователей (Шепли, Эймс, Хьюмсон, Лундмарк, Бок и др.).

В конце 20-х — начале 30-х годов Хаббл выполнил трудоемкий обзор более 40000 галактик в 1283 площадках, расположенных в обоих небесных полушариях [4]. Основные результаты работы Хаббла были таковы: число галактик продолжает возрастать вплоть до предельной величины проведенного обзора; количественно этот рост согласуется с однородным распределением галактик в пространстве (позднее Хаббл обнаружил, что при переходе к более слабым объектам интегральные подсчеты галактик растут медленнее, чем это должно быть при их однородном распределении); существует сильная зависимость наблюдаемого числа галактик на единицу площади небесной сферы от галактической широты (это связано с поглощением в Галактике); распределение числа галактик на квадратный градус ( $N$ ) после приведения всех пластинок к стандартным условиям имеет нормальное (гауссово) распределение по  $\lg N$ , а не по  $N$ . Это последнее открытие было одним из первых указаний на тенденцию галактик к "скупиванию" [5]. Результаты Хаббла сильно отличались от подсчетов звезд: при подсчетах звезд мы достигаем границы нашей звездной системы, в то время как наблюдения галактик не дают указаний, что существует граница внегалактического мира.

На протяжении всей дальнейшей истории XX века основные достижения в проведении обзоров неба и в детальном исследовании избранных площадок были обусловлены "технологическими" успехами — вводом в строй новых специализированных и крупных телескопов, применением все более чувствительных фотоэмульсий, а затем ПЗС-матриц и компьютеров, развитием методов мультиобъектной спектроскопии и т.п. Каждый такой "технологический" шаг сопровождался все более глубоким проникновением во Вселенную.

Одним из важнейших этапов в развитии техники наблюдений стало изобретение эстонским оптиком Бернхардом Шмидтом (1879–1935) новой системы телескопа — широкоугольного телескопа-рефлектора. Применение коррекционной пластины, устанавливаемой перед объективом телескопа, позволяет скомпенсировать большинство аберраций главного зеркала. Это дает возможность строить светосильные телескопы с большим ( $\sim 10^\circ$ ) неискаженным полем зрения. Наиболее известный телескоп системы Шмидта (диаметр



**Рис. 2.** Характеристики современных наблюдательных проектов (см. текст). Пунктирной линией на рис. а показана полная площадь небесной сферы. Черными квадратом и кружком отмечены характеристики работ, выполненных на 6-метровом телескопе CAO РАН (см. раздел 4.9).

коррекционной пластины 122 см, диаметр объектива 183 см) установлен в обсерватории Маунт-Паломар в Калифорнии. Его поле зрения равно  $6,6^\circ$ . В 1950–1958 годах на этом телескопе был выполнен знаменитый Паломарский обзор неба (см. об этом далее). Самый большой телескоп системы Шмидта (диаметр коррекционной пластины 137 см, диаметр зеркала 200 см) установлен в Германии близ Йены. Крупнейший на территории бывшего СССР телескоп этого типа с 1960 года работает в Бюраканской обсерватории (Армения) (диаметр коррекционной пластины 102 см, диаметр объектива 132 см, поле зрения  $4^\circ$ ). На нем был выполнен широко известный обзор галактик с сильным избытком ультрафиолетового излучения (так называемых галактик Маркаряна).

В последние 10–15 лет осуществлен ряд крупных международных проектов, результаты которых очень сильно изменили облик современной астрономии. Объем наблюдательного материала о структуре нашей и других галактик увеличился в десятки и в сотни раз. Впервые стало возможным изучать эволюцию галактик и образуемых ими крупномасштабных структур почти от момента их формирования до настоящего времени. Нередко можно встретить утверждения, что сейчас наступила "золотая эра" для исследований в области формирования и эволюции галактик. Царящее среди астрономов и физиков (в особенности, теоретиков) настроение отчасти характеризует название состоявшегося несколько лет назад в Калтехе коллоквиума — "Образование галактик: конец дороги!" [6].

Насколько оправдан этот оптимизм, покажет время, но, несомненно, что внегалактическая астрономия и наблюдательная космология переживают сейчас период, сравнимый, может быть, лишь с двадцатыми годами прошлого века, когда были открыты существование других галактик и расширение Вселенной. В этой статье я попытаюсь сделать краткий обзор избранных наблюдательных проектов последних лет. Ввиду необъятности материала я ограничусь в основном лишь *оптическими* и *внегалактическими* работами.

Все зависящие от расстояния величины будут приведены для космологической модели с  $\Omega_m = 0,3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0,7$  и  $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ .

## 2. Общие характеристики обзоров и глубоких полей

Обзоры неба и так называемые "глубокие поля" — это разные стратегии исследования объектов, находящихся за пределами Земли. Четких критериев, по которым можно разделить обзоры и детальное исследование избранных площадок, не существует. На основе анализа характеристик наиболее известных проектов можно предложить следующие эмпирические определения.

К *обзорам неба* относятся проекты, в ходе которых производятся фотометрические и/или спектральные наблюдения существенной части небесной сферы (площадь охвата  $\geq 10^4 \square^\circ$ ). Эффективная глубина обзоров составляет  $z \sim 0,1$  (здесь и далее  $z$  означает красное смещение) или несколько сотен мегапарсек (Мпк). Современные обзоры неба выполняются в течение нескольких лет, причем, как правило, на специализированных телескопах средних размеров.

*Глубокие поля* — это проекты детального изучения относительно небольших участков небесной сферы (характерная площадь полей составляет  $10^{-3} - 10^1 \square^\circ$ ). Поля по сравнению с обзорами имеют гораздо большую глубину ( $z \geq 0,5$ ), и их наблюдения проводятся на крупных телескопах. Типичные времена экспозиции при наблюдениях глубоких площадок составляют  $10^{-3} - 10^{-1}$  года.

На рисунке 2 приведено положение "интегральных" характеристик ряда современных наблюдательных проектов, о многих из которых будет подробно рассказано далее, на плоскостях  $B - \lg S$  (а) и  $B - \lg(N/S)$  (б), где  $B$  — предельная видимая звездная величина (т.е. видимая звездная величина самых слабых галактик, найденных в этом обзоре или поле) в фильтре  $B^2$ ,  $S$  — площадь на небесной сфере (в квадратных градусах) и  $N$  — число обнаруженных галактик.

Рисунок 2а наглядно иллюстрирует введенное выше формальное разделение на обзоры и глубокие поля — характеристики современных проектов, в основном,

<sup>2</sup> В ряде случаев значение предельной звездной величины было приближенно пересчитано из данных в других цветовых полосах.

концентрируются в областях с  $S \leq 1 \square^\circ$  и с  $S \geq 1000 \square^\circ$ . Такая ситуация, естественно, является временной, и можно представить себе относительно недалекое будущее, когда с помощью полностью автоматизированных больших оптических телескопов удастся измерить характеристики галактик с  $B \approx 25^m - 30^m$  на большей части небесной сферы (верхний правый угол на рис. 2а).

Штриховой прямой на рис. 2а изображена простейшая наблюдательная стратегия, при которой  $E_{\text{lim}}/S = \text{const}$  ( $E_{\text{lim}}$  — освещенность от предельно слабых объектов, детектируемых при наблюдениях). Такую зависимость между  $E_{\text{lim}}$  и площадью можно ожидать, если наблюдения проводятся на одном инструменте с фиксированным полем зрения и при фиксированном полном времени наблюдений. Если рассматривать только современные проекты с  $B \geq 18^m$ , то для них на плоскости  $B - \lg S$  обнаруживается более крутая зависимость, объясняемая тем, что при наблюдениях более слабых объектов применяются более крупные инструменты с меньшим, в среднем, полем зрения.

На рисунке 2б изображена зависимость поверхностной плотности галактик (число галактик, приходящихся на один квадратный градус) от предельной видимой звездной величины проекта. (При интерпретации этой зависимости следует помнить, что значения предельных величин в разных работах определяются несколько по-разному.) Как видно на рисунке, число галактик на единицу площади продолжает возрастать вплоть до  $B \approx 30^m$ . Также очевиден полученный еще Хабблом [7] результат — наблюдаемое число галактик растет с изменением предельной видимой звездной величины медленнее, чем это должно быть в случае однородного распределения в евклидовом пространстве (пунктирная прямая на рис. 2б). Причины такого поведения подсчетов — расширение Вселенной и эволюция свойств галактик со временем.

Рисунок 2б позволяет оценить доступное наблюдением число галактик во Вселенной. Как видно на рисунке, число галактик с  $B \leq 30^m$  составляет  $\approx 1,5 \times 10^6 / \square^\circ$  (одна галактика на участок небесной сферы размером  $3'' \times 3''$ ). Следовательно, полное число галактик с  $B \leq 30^m$  составляет  $\sim 10^{11}$ .

Реальный объем Вселенной, охватываемый обзором или полем, определяется, помимо их глубины и площади, функцией селекции — набором критериев, по которым выделяются объекты. Самые распространенные методы выделения объектов таковы [8].

1. *Выделение всех объектов с плотностью потока, большей фиксированного предела.* Предел детектирования, как правило, задается в долях стандартного отклонения флуктуаций яркости фона ночного неба. Простота этого метода позволяет легко рассчитать охваченный наблюдениями объем пространства. Максимальное красное смещение ( $z_{\text{max}}$ ), при котором объект со светимостью  $L$  в собственной (покоящейся) системе координат еще обнаружим при заданном пределе детектирования  $E_{\text{lim}}$ , может быть найдено с помощью выражения  $L = E_{\text{lim}} 4\pi D_L^2$ , где  $D_L$  — так называемое фотометрическое расстояние, зависящее от  $z_{\text{max}}$ . Тогда объем обзора (поля)

$$V_{\text{max}}(z, L) = S \int_0^{z_{\text{max}}} Q(z, \Omega_m, \Omega_\Lambda) dz,$$

где функция  $Q$  зависит от принятой космологической модели ( $\Omega_m$  и  $\Omega_\Lambda$  — относительные вклады в полную плотность Вселенной вещества и энергии вакуума).

Необходимо отметить, что на практике отбор происходит не на основе наблюдаемых плотностей потоков, а в большей степени по поверхностным яркостям галактик. Например, часто принимается, что объект обнаружен, если в нескольких соседних элементах ПЗС-кадра поток в несколько раз превышает флуктуации фона. Естественно, такая процедура приводит к исключению из выборки объектов с низкой поверхностной яркостью.

2. *Отбор по показателям цвета.* При отборе объектов учитывается не только наблюдаемый поток, но и показатели цвета, т.е. принимается во внимание относительное распределение энергии в спектрах галактик. Этот метод активно применяется для выделения предельно далеких галактик, поскольку в их спектрах наблюдается резкий скачок в области лаймановского предела ( $912 \text{ \AA}$ ) [9]. Ранее подобный подход оказался необычайно эффективным при обнаружении галактик с ультрафиолетовым избытком излучения (галактик Маркаряна) и галактик с активными ядрами (см., например, [10]). Расчет функции селекции и, соответственно, охваченного наблюдениями объема пространства в этом методе сильно зависит от точного знания распределения энергии в спектрах выделяемых объектов.

3. *Выделение объектов по наблюдениям в узкополосных фильтрах.* Суть метода состоит в отборе галактик, которые при наблюдениях в узкополосных фильтрах показывают избыток потока по сравнению с наблюдениями в широкополосных фильтрах. Таким методом ищутся объекты с эмиссионными линиями (галактики со вспышкой звездообразования, с активными ядрами). Наблюдения проводятся с фильтрами, вырезающими участки спектра шириной  $\leq 100 \text{ \AA}$  (для повышения контраста эмиссионного объекта над фоном неба) и центрированными на то красное смещение, при котором ожидается найти эмиссионную линию (например,  $L_\alpha$ ) далекого объекта. Очевидно, что в этом случае функция селекции определяется эквивалентной шириной эмиссионной линии галактики.

Недостатком такого подхода является то, что галактики ищутся лишь в очень узком интервале  $z$  и составленные таким образом выборки объектов относительно невелики. Кроме того, выделяется только небольшая часть всех галактик в данном интервале  $z$  (только галактики с большими эквивалентными ширинами линий). Все это затрудняет получение статистически значимых результатов об общих свойствах далеких галактик.

После приведенных выше общих комментариев перейдем к описанию отдельных проектов. Работы, подобные обсуждаемым далее, выполняются в настоящее время во многих обсерваториях мира. Ежегодно публикуются десятки и сотни статей, посвященных как новым, так и старым обзорам и глубоким площадкам. В этом многообразии проектов очень легко запутаться (тем более, что многие из них имеют сходные сокращенные названия). Поэтому я опишу лишь основные, этапные проекты, играющие большую роль в современной астрономии.

Основная цель последующего "технического" описания (разделы 3 и 4) — дать представление об очень быстро растущей наблюдательной основе современной

астрономии. Отличительная особенность последних лет состоит в том, что накапливаемый наблюдательный материал в большинстве случаев является открытым и через WWW страницы проектов доступен всему научному сообществу.

### 3. Обзоры неба

#### 3.1. Фотографические обзоры

Огромное влияние на развитие астрономии оказали выполненные на телескопах системы Шмидта фотографические обзоры [11]. В 50-х годах прошлого века на 1,2-метровом телескопе Паломарской обсерватории было проведено фотографирование всей доступной для наблюдений из Калифорнии области небесной сферы ( $\delta > -33^\circ$ ). В ходе этого обзора была получена почти тысяча пар пластинок (в голубой и красной областях спектра), каждая из которых покрывала область неба размером  $6,5^\circ \times 6,5^\circ$ . Копии Паломарского обзора (в виде стеклянных копий пластинок или отпечатков с них) были распространены среди большинства астрономических организаций мира, и они сыграли очень большую роль в развитии всех без исключения разделов астрономии — от исследований Солнечной системы до изучения далеких галактик и квазаров [11]. На отпечатках Паломарского обзора выделяются объекты с  $B$  вплоть до  $\sim 20^m$ , а у десятков тысяч галактик с  $B \leq 15^m$  можно изучать особенности структуры. В частности, на основе Паломарского обзора (его стандартное название Palomar Observatory Sky Survey I, или POSS-I) были составлены активно используемые и в настоящее время каталоги галактик Цвикки [12] и Воронцова-Вельяминова (MCG на рис. 2а) [13]. Именно с изучения копий этого обзора началось систематическое исследование систем галактик — от взаимодействующих [14] и двойных [15] до их скоплений [12, 16].

Успех Паломарского обзора стимулировал проведение в 70-х годах аналогичных обзоров южного неба с помощью 1,2-метрового английского телескопа системы Шмидта (Англо-австралийская обсерватория (ААО), Австралия) и 1,0-метрового телескопа системы Шмидта Европейской южной обсерватории (ЕСО) в Чили. Благодаря значительному прогрессу в области телескопостроения и улучшению качества фотографических эмульсий предельная видимая звездная величина этих обзоров (ЕСО/SERC) примерно на  $1,5^m$  слабее, чем у POSS-I. Это, в свою очередь, привело к тому, что в конце 80-х годов была начата работа по перефотографированию северного неба на модернизированном Паломарском телескопе Шмидта с использованием улучшенных эмульсий, но уже не в двух, а в трех (включая ближнюю инфракрасную область спектра с  $\lambda_{\text{eff}} \approx 8500 \text{ \AA}$ ) фильтрах. Этот обзор получил название POSS-II [17]. Предельная видимая звездная величина POSS-II для звездобразных объектов составляет  $B \approx 22,5^m$ .

Одна фотографическая пластинка с большого телескопа системы Шмидта может содержать  $10^5 - 10^6$  изображений звезд и галактик. Это ограничивало ранние работы простым визуальным просмотром ярчайших объектов или детальным изучением лишь небольших областей исходной пластинки. Эффективное извлечение информации, содержащейся на шмидтовских пластинках, стало возможным лишь после появления высоко-

скоростных измерительных машин, позволяющих перенести дискретизированное изображение на электронный носитель информации и обрабатывать его на компьютере. Именно таким образом на рубеже 90-х годов появились первые цифровые обзоры неба АРМ и DSS.

#### 3.2. АРМ

В ходе этого проекта на микроденситометре АРМ (Automatic Plate Measuring machine) в английском Кембридже были просканированы 185 фотопластинок (шаг сканирования —  $0,5''$ ), полученных на 1,2-метровом телескопе системы Шмидта Англо-австралийской обсерватории (Австралия) в области южного галактического полюса [18]. Пластинки обзора покрывают  $\sim 4300 \square^\circ$  на небесной сфере, и на них было обнаружено около  $20 \times 10^6$  объектов с  $B \leq 22^m$ . Для каждого объекта обзора были определены координаты, видимая звездная величина, а также более десятка других параметров, характеризующих распределение яркости и форму. На основе анализа фотометрических профилей объектов была выполнена их классификация и сформирована практически полная выборка внегалактических объектов, содержащая примерно  $2 \times 10^6$  галактик с  $B \leq 20,5^m$ .

Распределение галактик АРМ обзора в области размером  $\sim 50^\circ \times 100^\circ$  показано на рис. 3. Очевидно, что спроецированное распределение галактик далеко от однородного. На рисунке 3 хорошо заметны области повышенной и пониженной концентрации галактик, вытянутые структуры. На основе АРМ обзора был выполнен ряд важных исследований крупномасштабного распределения галактик (см., например, [19]), составлен первый объективный каталог скоплений [20].

Результаты АРМ обзора и его расширений (в частности, на северное полушарие) легли в основу одного из самых интересных проектов последних лет — 2dF обзора красных смещений галактик (см. раздел 3.5).

Кроме АРМ можно упомянуть ряд более поздних проектов по сканированию пластинок Паломарских и ЕСО/SERC обзоров: например, APS (США) [21], COSMOS и SuperCOSMOS (Англия) [22, 23]. Эти обзоры отличаются охватом небесной сферы, а также использованием пластинок в разных цветовых полосах.

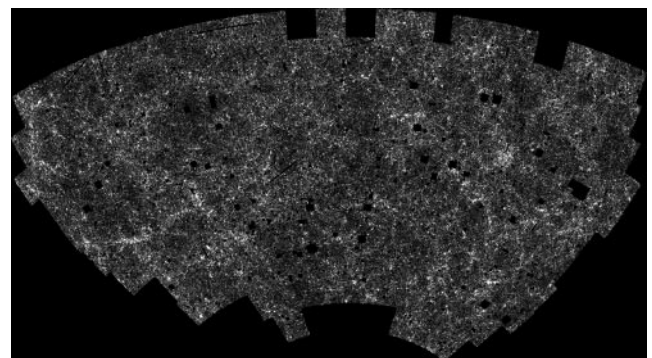


Рис. 3. Видимое распределение галактик АРМ обзора.

#### 3.3. DSS и DPOSS

DSS (Digitized Sky Survey) — это первое высококачественное и общедоступное цифровое изображение *всей небесной сферы* в оптическом диапазоне. DSS обзор возник из проекта Института космического телескопа (STScI) по

созданию каталога звезд, который можно использовать для точного наведения Космического телескопа Хаббла (HST) на требуемый объект и гидирования во время наблюдений [24]. Для создания такого каталога было начато сканирование "голубых" фотографических пластинок POSS-I и SERC обзоров. Шаг сканирования составлял  $1,7''$ . Вскоре было понято, что значение оцифрованных изображений выходит далеко за пределы исходной задачи, и было решено сделать их доступными для широкой научной общественности. Полный объем исходной версии обзора (DSS-I) достигал 600 Гб и, конечно, столь значительный объем информации в первой половине 90-х годов не мог быть легко транспортируем. Однако после специального десятикратного сжатия данных цифровой обзор уместился на 102-х компакт-дисках, которые с 1994 года стали распространяться через Тихоокеанское астрономическое общество (США) [25]. Позднее свободный доступ к DSS-I был открыт через WWW страницу STScI (<http://archive.stsci.edu/dss/>). Сейчас удаленный доступ к этому обзору осуществляется через ряд сайтов как в США и Канаде, так и в ряде европейских стран и в Японии.

Обзор DSS-II возник как естественное развитие работы над DSS-I на данные второго Паломарского обзора (POSS-II) [26]. С шагом  $1,0''$  были просканированы фотографические пластинки POSS-II для северного неба, а также SERC и других обзоров для южного неба. В цифровую форму были переведены пластинки в трех цветовых полосах, что дало возможность сравнивать изображения участков небесной сферы в разных спектральных диапазонах. Суммарный объем DSS-II составляет  $\sim 5$  Тб, и удаленный доступ к нему производится, как правило, через те же WWW страницы, что и для DSS-I.

С момента своего возникновения DSS стал одним из наиболее полезных и востребованных инструментов современной астрономии. Возможность за несколько секунд считать изображение любого участка неба очень сильно упростила процесс подготовки и планирования наблюдений. С использованием изображений из DSS было опубликовано огромное количество работ, посвященных изучению отдельных галактик и их групп, исследованию их крупномасштабного распределения и геометрических характеристик, оптическому отождествлению объектов, наблюдаемых в разных спектральных диапазонах, и т.п.

Проект DPOSS (Digitized Palomar Observatory Sky Survey; <http://dposs.caltech.edu/>) также основан на сканировании фотографических пластинок POSS-II обзора в трех цветовых полосах, однако последующие процедуры обработки и калибровки данных отличаются от использованных в DSS [27]. Этот обзор охватывает все северное небо с  $\delta > -3^\circ$ . Для фотометрической калибровки данных были предприняты обширные ПЗС-наблюдения на Паломарской обсерватории. DPOSS состоит из базы данных сканированных с шагом  $1,0''$  изображений ( $\sim 3$  Тб) и ряда построенных на их основе каталогов. Конечной целью DPOSS является создание каталога PNCS (Palomar Norris Sky Catalog), включающего все обнаруженные в обзоре объекты вплоть до предельной видимой звездной величины  $B \approx 22^m$ . Для каждого источника в каталоге будут приведены более сотни измеренных параметров, а для объектов с  $B \leq 21^m$  будет выполнена классификация на звезды и галактики. Ожи-

дается, что в PNCS войдут данные для более чем  $50 \times 10^6$  галактик (включая  $\sim 10^5$  квазаров) и более  $10^9$  звезд.

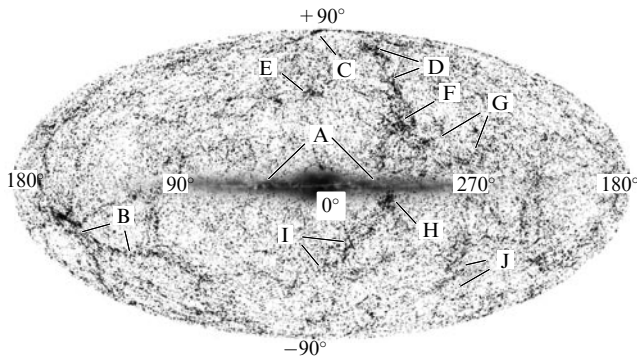
Упомянутые ранее обзоры основаны на фотографических наблюдениях и, естественно, им присущи стандартные недостатки фотоэмульсий (низкая чувствительность, ограниченный динамический диапазон, нелинейность). Все проекты (как обзоры, так и глубокие поля), о которых пойдет речь дальше, являются по-настоящему цифровыми, поскольку в качестве детекторов излучения в них использованы твердотельные приемники.

### 3.4. 2MASS

Одним из наиболее известных цифровых обзоров в диапазоне, близком к оптическому, является 2MASS (Two Micron All Sky Survey), ставший результатом совместных усилий университета Массачусетса и Центра обработки и анализа инфракрасных данных Калифорнийского технологического института (<http://www.ipac.caltech.edu/2mass/>). 2MASS — это чисто фотометрический обзор, в ходе которого было построено изображение всей небесной сферы в фильтрах  $J$  ( $1,25$  мкм),  $H$  ( $1,65$  мкм) и  $K_s$  ( $2,17$  мкм) [28]. Наблюдения были проведены в период с июня 1997 г. по февраль 2001 г. на двух автоматизированных 1,3-метровых телескопах (в Аризоне, США, и в Чили). Каждый телескоп был оборудован трехканальной камерой, позволяющей одновременно наблюдать в трех спектральных диапазонах с помощью матриц из  $256 \times 256$  твердотельных ИК-детекторов (размер одного элемента матрицы —  $2,0''$ ).

Результаты обзора представляют собой более 10 Тб изображений и составленных на их основе каталогов объектов. Прокалиброванные изображения любого участка небесной сферы в полосах  $J$ ,  $H$  и  $K_s$  можно считать через ряд сайтов (например, <http://irsa.ipac.caltech.edu/>). Опубликован атлас изображений 864 галактик в близкой инфракрасной области спектра [29]. Каталог точечных источников (PSC) содержит координаты и результаты фотометрии для примерно 500 млн объектов (в основном, звезд Млечного Пути). Каталог протяженных источников (XSC) включает данные для  $\sim 1,65$  млн объектов с угловыми размерами  $\geq 10'' - 15''$  [30]. Более 98% этих объектов являются галактиками (остальные источники — это области НП, звездные скопления, планетарные туманности и т.п.). Предельные видимые звездные величины протяженных объектов в каталоге XSC составляют  $\approx 13,5^m$  ( $2,9$  МЯн) и  $15,0^m$  ( $1,6$  МЯн) в полосах  $K_s$  и  $J$  соответственно. На рисунке 4 приведено распределение объектов из XSC в галактических координатах (буквами на рисунке отмечены скопления и сверхскопления галактик, протяженное образование в центре — видимый "с ребра" звездный диск Млечного Пути) [31].

За несколько лет после его завершения 2MASS обзор уже успел оказать очень большое влияние на развитие астрономии. Так, согласно Astrophysics Data System (ADS: <http://adsabs.harvard.edu/>) [32], число опубликованных статей, использовавших данные обзора, в начале 2005 года уже достигло тысячи. Основные направления исследований, наиболее сильно выигравшие с появлением данных 2MASS, — это исследование крупномасштабной структуры Млечного Пути и распределения галактик в ближайшей области Вселенной (в оптике подобные работы очень сильно ограничены поглоще-



**Рис. 4.** Распределение объектов 2MASS обзора на небесной сфере (галактические координаты): А — Млечный Путь, В — сверхскопление Персей–Рыбы, С — скопление Волосы Вероники, D — скопление Девы/Локальное сверхскопление, E — сверхскопление Геркулес, F — концентрация Шепли/Abell 3558, G — сверхскопление Гидра–Центавр, H — Великий Аттрактор/Abell 3627, I — сверхскопление Павлин–Индеец, J — сверхскопление Часы–Сетка.

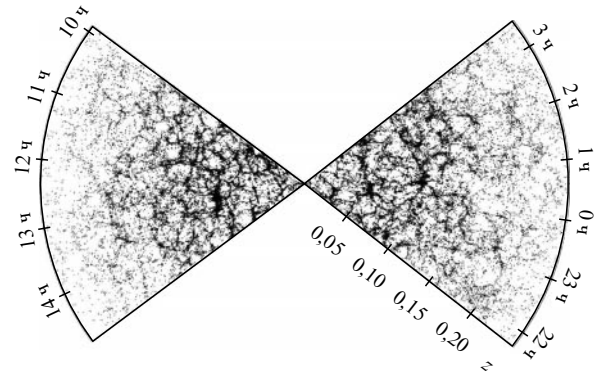
нием в межзвездной среде нашей Галактики), а также поиск и изучение новых типов астрономических объектов (например, маломассивных звезд и коричневых карликов, "красных" квазаров).

### 3.5. 2dF и 6dF

2dF (полное название — 2 degree Field Galaxy Redshift Survey, или 2dFGRS) — это спектроскопический обзор  $\sim 5\%$  ( $\sim 2000 \square^\circ$ ) небесной сферы, выполненный английскими и австралийскими астрономами на 3,9-метровом телескопе ААО [33, 34]. (По своему охвату этот проект выпадает из предложенной в разделе 2 статьи классификации и наглядно иллюстрирует условность деления современных проектов на обзоры и глубокие поля.) Выборка объектов для наблюдений была сформирована на основе каталога источников расширенного АРМ обзора (см. раздел 3.2) и включала галактики ярче  $B \approx 19,5^m$  в областях северного и южного полюсов Галактики. Для наблюдений использовался специальный мультиобъектный спектрограф, позволяющий получать спектры 400 объектов одновременно в поле размером  $2^\circ$ . Наблюдения по проекту заняли 272 ночи в период с 1997 по 2002 годы.

Открытые для свободного использования результаты проекта включают (<http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/>): фотометрический каталог объектов, отобранных для спектроскопического исследования; спектроскопический каталог 245591 объекта, содержащий красные смещения и спектральные типы (221414 галактик из этого каталога имеют надежные оценки  $z$ ); специальное программное обеспечение, позволяющее извлекать как fits-файлы со спектрами, так и подвыборки объектов в соответствии с задаваемыми критериями.

В момент завершения 2dF обзора он стал крупнейшим обзором красных смещений галактик (число измеренных значений  $z$  впервые превысило  $10^5$ ), позволяющим исследовать трехмерную структуру окружающей области Вселенной с недоступной ранее детальностью. Медианное красное смещение обзора составляет  $z = 0,11$ , чему соответствует фотометрическое расстояние  $\sim 500$  Мпк. Для примера на рис. 5 приведено распределение 63000 галактик обзора в пределах тонких (толщиной  $3^\circ$ ) слоев в областях северного (слева) и



**Рис. 5.** Распределение галактик в области 2dF обзора.

южного (справа) галактических полюсов [35]. В отличие от рис. 3 и 4, на которых показано распределение галактик в проекции на небесную сферу, на этом рисунке видно их распределение вдоль луча зрения. Уменьшение числа галактик с ростом  $z$  — это результат существования ограничения выборки по видимой звездной величине, из-за чего среди более далеких объектов в выборку попадают только галактики, имеющие наибольшую светимость. Основные элементы крупномасштабной структуры Вселенной — скопления и сверхскопления, волокна, пустоты ("войды") ясно видны на рис. 5.

2dF обзор играет в современной астрономии очень большую роль, как один из основных источников информации о пространственном распределении галактик и о плотности вещества во Вселенной. Например, данные обзора позволили получить верхний предел на полную массу нейтрино ( $m_{\nu, \text{tot}} < 1,8$  эВ) [36] и в комбинации с данными о реликтовом излучении уточнить основные космологические параметры Вселенной [37].

Самостоятельным подпроектом в рамках 2dF является 2dF QSO Redshift Survey (2QZ) — обзор красных смещений квазаров в областях северного и южного галактического полюсов (полная площадь  $\sim 700 \square^\circ$ ) [38]. В ходе работы над 2QZ получены спектры 23338 квазаров, 12292 звезд нашей Галактики (в том числе около 2000 белых карликов) и 4558 галактик с эмиссионными линиями. Данные об объектах, включая их фотометрию, красные смещения, а также fits-файлы со спектрами доступны на сайте <http://www.2dfquasar.org/>.

6dF (6dF Galaxy Survey, или 6dFGS) — это обзор красных смещений и peculiar скоростей галактик, отобранных для исследования, в основном, из каталога XSC 2MASS обзора (см. раздел 3.4) [39]. Отбор галактик по данным в инфракрасном диапазоне, в котором влияние межзвездного поглощения в плоскости Млечного Пути гораздо слабее, чем в оптике, позволяет существенно полнее изучить распределение объектов на низких галактических широтах. Для наблюдений используется 1,2-метровый телескоп системы Шмидта Англо-австралийской обсерватории, оснащенный мультиобъектным спектрографом, позволяющим одновременно получать спектры 150 объектов в 6-градусном поле телескопа. Планируется получить красные смещения для примерно 150000 галактик. Обзор охватит практически все южное небо с  $\delta < 0^\circ$  (площадь обзора  $\approx 17000 \square^\circ$ ) и даст подробную информацию о распределении галактик в близкой ( $z \approx 0,05$ ) области Вселенной. В

настоящее время (начало 2005 года) доступны данные примерно для половины исходной выборки галактик (см. <http://www-wfau.roe.ac.uk/6dFGS/>).

Важнейшей задачей 6dF является изучение крупномасштабных отклонений скоростей галактик от однородного Хаббловского расширения. Распределение таких отклонений — уникальный способ исследования распределения массы во Вселенной, не зависящий от предположения, что галактики отслеживают истинное распределение массы. Для примерно 15000 галактик ранних морфологических типов, равномерно распределенных по всему южному небу, методом Фундаментальной Плоскости (Фундаментальная Плоскость — трехпараметрическая зависимость, объединяющая фотометрические и кинематические характеристики галактик (см., например, [40])) будут найдены не зависящие от  $z$  расстояния. Затем, сравнивая эти расстояния с вычисленными по наблюдаемым значениям  $z$ , можно будет оценить пекулярные скорости галактик, связанные с существованием неоднородностей в распределении массы. (Именно таким способом было обнаружено существование Великого Аттрактора (Great Attractor) массой  $\sim 5 \times 10^{16} M_{\odot}$  в относительно близкой области Вселенной [41].)

### 3.6. SDSS

SDSS (Sloan Digital Sky Survey; <http://www.sdss.org/>) часто характеризуют как один из самых грандиозных астрономических проектов в истории. С конца 80-х годов прошлого века над его осуществлением работают более сотни исследователей из США, Японии и ряда стран Европы [42, 43].

Целью SDSS является фотометрическое и спектральное исследование четверти ( $\approx 10000 \square^{\circ}$ ) небесной сферы. Обзор охватывает одну большую область в районе северного галактического пояса и три полосы (их суммарная площадь  $740 \square^{\circ}$ ) в южном полушарии. Наблюдения проводятся на специально построенном для этой цели 2,5-метровом телескопе (модифицированная система Ричи–Креггана, поле зрения  $3^{\circ}$ ) в Нью-Мексико (США). Телескоп оборудован ПЗС-камерой для фотометрических наблюдений и парой идентичных мультиобъектных спектрографов, позволяющих с помощью волоконной оптики одновременно получать спектры 640 объектов. Вспомогательные работы выполняются также на нескольких других телескопах.

Основная цель фотометрических наблюдений — создание базы данных для  $\sim 10^8$  галактик и  $\sim 10^8$  звезд, содержащей точные ( $\leq 0,1''$ ) координаты, фотометрию и другие характеристики. Наблюдения проводятся в пяти широкополосных фильтрах в спектральном диапазоне от 3500 до 9100 Å. Предельная видимая звездная величина фотометрического обзора составляет  $B \approx 23^m$  для точечных объектов.

В ходе спектральных наблюдений планируется получить спектры примерно  $10^6$  галактик,  $10^5$  квазаров и  $10^5$  звезд, отобранных из фотометрического обзора. Выборка галактик состоит из двух частей:  $\sim 900000$  галактик с  $B \lesssim 19^m$  и  $\sim 100000$  объектов с большими показателями цвета ("красные" галактики) и  $B \lesssim 20,5^m$ . Кандидаты в квазары отобраны на основе наблюдаемых показателей цвета. Звездообразные объекты с радиоизлучением также включены в выборку кандидатов в квазары.

Систематические наблюдения по проекту начались в апреле 2000 года и будут завершены летом 2005 года. По мере выполнения наблюдений очередная порция обработанных данных становится доступной через Интернет на WWW странице обзора. С начала 2005 года в открытом доступе находятся результаты примерно половины обзора. Эти данные включают:  $\sim 6$  Тб изображений, фотометрический и астрометрический каталоги для  $1,41 \times 10^8$  объектов, спектры 528640 объектов (среди них 374767 — галактики, 51027 — квазары, 71174 — звезды) [44]. Окончательные результаты SDSS будут представлены в 2006 году.

SDSS еще не завершен, однако на его основе уже опубликовано огромное количество работ (согласно ADS более тысячи). Эти работы охватывают все области оптической астрономии — от исследований астероидов (в рамках SDSS их открыто уже несколько десятков тысяч) до квазаров (квазары обзора впервые преодолели барьер  $z = 6$ ) [45]. Данные SDSS, а также 2dF в десятки и сотни раз увеличили объем наблюдательных данных о структуре, спектральных характеристиках и пространственном распределении галактик в близкой ( $z \lesssim 0,2$ ) области Вселенной. В настоящее время происходит пересмотр и уточнение почти всего, что было известно ранее о галактиках, в частности об их пространственном распределении и функции светимости, о зависимости свойств галактик и темпа звездообразования от пространственного окружения (см. раздел 5).

## 4. Глубокие поля

В этом разделе статьи будут описаны некоторые из наиболее примечательных проектов по изучению относительно небольших сверхглубоких площадок — глубоких полей (см. правый нижний угол рис. 2а). Я ограничусь лишь работами последних десяти лет. Ссылки на более ранние работы можно найти, например, в обзорах Ко и Крона [46], Сэндиджа [47] и Эллиса [48].

### 4.1. WHDF

WHDF (William Herschel Deep Field) — самое глубокое наземное изображение небольшой площадки, выполненное с помощью телескопа среднего класса. Наблюдения области размером  $7' \times 7'$  с координатами  $\alpha(2000) = 00^h 22^m 33^s$  и  $\delta(2000) = +00^{\circ} 21'$  были проведены в 1994–1997 гг. на 4,2-м телескопе Вильяма Гершеля (Обсерватория Рока-де-лос-Мучачос, Испания) [49]. В каждом из четырех фильтров ( $U$ ,  $B$ ,  $R$  и  $I$ ) было получено по несколько десятков ПЗС-кадров, суммарные времена экспозиции составили 34, 28, 8 и 5 ч соответственно. Тщательная обработка и суммирование кадров позволили достичь предельной видимой звездной величины для неразрешаемых объектов  $B \approx 28^m$ . Число галактик, обнаруженных в WHDF, составляет около шести тысяч. Наблюдения этого поля были позднее дополнены данными в близкой инфракрасной области спектра с других телескопов.

Результаты, полученные при исследовании WHDF, были использованы для анализа зависимости числа галактик от их видимой звездной величины (это дает возможность получить информацию о ранней космологической эволюции галактик), для определения поверхностной (угловой) корреляционной функции галактик, а также для выделения с помощью показателей цвета (см.



раздел 2) кандидатов в предельно далекие объекты [49, 50].

#### 4.2. HDF

Глубокие поля HST (их стандартные названия Hubble Deep Field North (HDF-N) и Hubble Deep Field South (HDF-S)) — одни из самых изученных участков небесной сферы. Их исследование привело к ряду важнейших открытий, касающихся структуры и эволюции далеких галактик [51].

Наблюдения на Космическом телескопе Хаббла (диаметр главного зеркала 2,4 м, система Ричи–Кретьена) в первой половине 90-х годов показали, что этот телескоп действительно разрешает структуру далеких галактик и что эти галактики выглядят по-другому, чем при  $z \approx 0$ . Возникла идея использовать часть времени из резерва директора STScI (тогда им был Роберт Вильямс) для получения беспрецедентно глубокого изображения одной типичной площадки на высоких галактических широтах [52]. Выбор площадки для наблюдений был произведен очень тщательно — в направлении на нее межзвездное поглощение в Млечном Пути должно быть мало, площадка не должна содержать очень ярких (во всех спектральных диапазонах) объектов, в ней должны отсутствовать относительно близкие скопления галактик и т.д. В итоге была отобрана область в пределах созвездия Большая Медведица.

Наблюдения этой северной площадки (HDF-N) были проведены в декабре 1995 года с помощью WFPC-2 (Wide-Field Planetary Camera 2) в четырех широкополосных фильтрах, центрированных на 3000 Å (фильтр F300W), 4500 Å (F450W), 6060 Å (F606W) и 8140 Å (F814W). В каждом из фильтров было сделано от полусотни до сотни отдельных кадров, причем каждый из кадров снимался при чуть смещенном положении телескопа (при этом один и тот же объект попадал на разные элементы ПЗС-матрицы). Такая техника наблюдений позволила избавиться от дефектов приемника и построить суммарные изображения глубокого поля с шагом 0,04", что меньше, чем исходный размер одного элемента камеры. Площадь HDF-N равна примерно 5,3 □', причем поле имеет не прямоугольную форму. Суммарное время экспозиции в каждом из фильтров составило от одних до почти двух суток. В последующие годы наблюдения HDF-N были дополнены данными в близкой инфракрасной области спектра.

В середине января 1996 г., сразу после окончания первичной обработки кадров, изображения глубокой площадки были выставлены в прямой доступ на странице STScI (<http://www.stsci.edu/ftp/science/hdf/hdf.html>). На этой странице кроме оригинальных кадров приведено также детальное описание наблюдений, их обработки и калибровки. Как оказалось, в HDF-N можно выделять галактики вплоть до  $B \sim 29^m$ . Всего в зависимости от критериев детектирования в этом поле обнаруживают до 2000–3000 галактик (для сравнения — в поле найдено лишь несколько десятков звезд нашей Галактики). Главным достоинством глубокого поля HST является, конечно, гораздо более высокое, чем это возможно при наземных наблюдениях, угловое разрешение ( $\approx 0,1''$ ). Такое угловое разрешение позволяет изучать наблюдаемую структуру далеких ( $z \geq 1$ ) галактик с линейным разрешением  $\leq 1$  кпк. Основной недостаток поля — малый угловой размер (при  $z = 1$  его размер

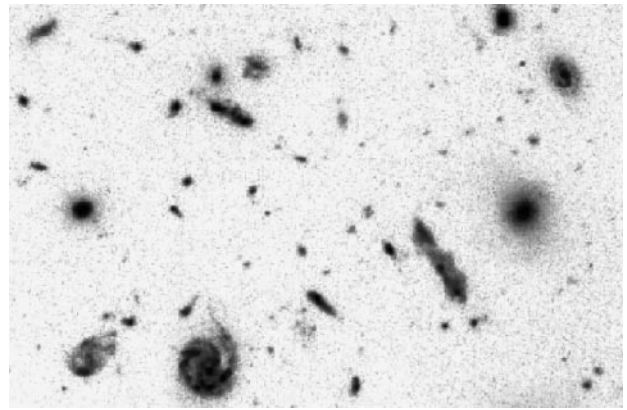


Рис. 6. Фрагмент ( $\sim 20'' \times 30''$ ) HDF-N.

составляет лишь  $\approx 2$  Мпк в сопутствующей (comoving) системе отсчета), из-за чего любая статистика объектов в поле не является представительной.

Первые репродукции HDF-N (см. пример на рис. 6) наглядно показали, что несколько миллиардов лет назад Вселенная была другой. Далекие галактики выглядят гораздо более асимметричными, среди них очень часто встречаются взаимодействующие и неправильные системы. Поле Хаббла дало богатейший материал для изучения эволюции морфологии и размеров галактик, для исследования их глубоких подсчетов, для поиска предельно далеких ( $z \geq 5$ ) объектов и т.д.

Очевидный успех HDF-N стимулировал выполнение аналогичного проекта в южном полушарии [53]. Наблюдения южной площадки (она находится в области созвездия Тукал) были проведены в октябре 1998 года. Проект HDF-S имеет два важных отличия от HDF-N: в этом поле находится умеренно далекий квазар с  $z = 2,24$  и наблюдения площадки проводились одновременно с помощью нескольких инструментов. В ходе наблюдений было сделано следующее: 1) с помощью WFPC-2 было получено глубокое изображение площадки (в тех же фильтрах и по той же методике, что и HDF-N); 2) выполнена спектроскопия квазара в диапазоне от 1150 до 3560 Å, построено сверхглубокое изображение небольшой области вокруг квазара с помощью STIS (Space Telescope Imaging Spectrograph) и 3) получено изображение небольшой площадки на длинах волн 1,1, 1,6 и 2,2 мкм (для этого использован прибор NICMOS — Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer). Все три использованных инструмента имеют отличающиеся поля зрения, и поэтому при ссылках на HDF-S необходимо учитывать, поле какого инструмента имеется в виду. Как и в случае HDF-N, полностью редуцированные наблюдения этого поля в конце ноября 1998 года были выставлены в открытый доступ (см. <http://www.stsci.edu/ftp/science/hdfsouth/hdfs.html>).

Политика свободного доступа к данным, а также их уникальность (на протяжении ряда лет оба поля оставались самыми глубокими "проколами" во Вселенную) привела к их огромной популярности и востребованности. Области двух HDF наблюдались десятки раз как с Земли, так и из космоса и во всех спектральных диапазонах — от рентгеновского до радио. Согласно ADS на начало 2005 года данные этих полей использованы по крайней мере в полутора тысячах опубликованных статей.

### 4.3. CDF

Глубокими полями Чандры (Chandra Deep Fields) называется серия глубоких ( $\sim 10 - 20$  дней экспозиции) изображений небольших площадок, полученных на космической рентгеновской обсерватории Чандра (CXO). Самыми известными из них являются Северное и Южное поля (CDF-N и CDF-S). Наблюдения CDF-S (оно находится в области созвездия Печь) были проведены в 1999–2000 гг. Суммарное время экспозиции составило около  $10^6$  с. Площадь CDF-S равна  $0,109 \square^\circ$ , размер одного элемента изображения  $1''$ . В Южном поле Чандры обнаружено 346 источников в интервале энергий  $0,5 - 7$  кэВ [54, 55]. Большая часть из этих источников — внегалактические объекты (в основном, активные ядра галактик и галактики со вспышками звездообразования).

CDF-N — самое глубокое рентгеновское изображение участка неба (площадь поля равна  $0,124 \square^\circ$ , полное время наблюдений близко к  $2 \times 10^6$  с), полученное к началу 2005 г. Координаты Северного поля Чандры близки к координатам оптического поля HDF-N (см. раздел 4.2), площадь CDF-N во много раз превышает площадь HDF-N (рис. 7). В CDF-N обнаружено около 600 источников рентгеновского излучения в диапазоне  $0,5 - 8$  кэВ [56, 57]. Двадцать из этих источников лежат в пределах HDF-N (см. рис. 7).

Спектроскопическое изучение оптических объектов, отождествленных с рентгеновскими источниками в CDF-S и CDF-N, показало, что они находятся на  $z \sim 1$ , причем отдельные источники имеют  $z > 3$  (см., например, [57]). Данные глубоких полей Чандры впервые позволили оценить эволюцию с  $z$  функции рентгеновской светимости активных галактических ядер и исследовать рентгеновские свойства нормальных галактик на больших  $z$  [58].

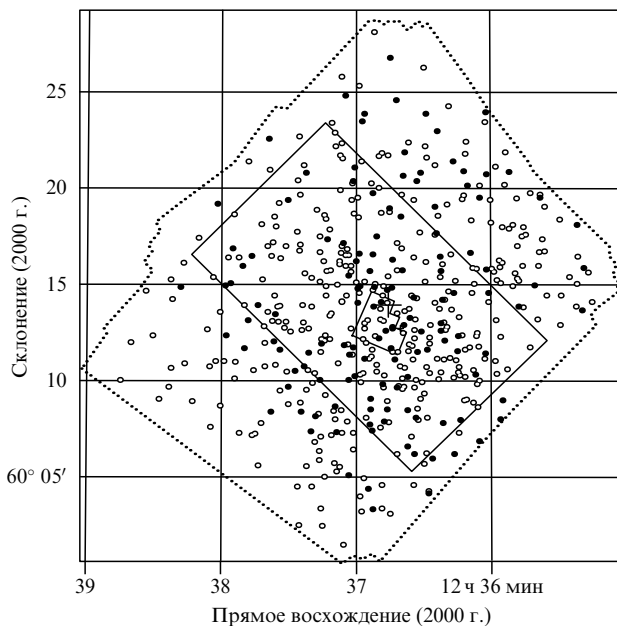


Рис. 7. Распределение источников рентгеновского излучения в пределах CDF-N (границы этого поля отмечены пунктирной линией). Незаполненные кружки — источники, обнаруженные при экспозиции  $10^6$  с, черные кружки — более слабые источники, появившиеся при увеличении экспозиции до  $2 \times 10^6$  с. Небольшой многоугольник в центре — область HDF-N.

### 4.4. FDF

FORS Deep Field (FDF) — это проект детального фотометрического и спектроскопического изучения области размером  $\sim 7' \times 7'$  в районе южного галактического полюса с помощью Focal Reducer/low dispersion Spectrograph (FORS) на 8,2-метровом телескопе ESO-VLT [59]. Основные фотометрические наблюдения поля были проведены в 1999–2000 гг. на телескопе ESO-VLT UT1 (Antu) в пяти широкополосных фильтрах (от  $\sim 3700$  до  $\sim 8000 \text{ \AA}$ ). В каждом из фильтров было получено по несколько десятков кадров, а в фильтре  $R$  — более сотни. Суммарное время экспозиции в зависимости от цветовой полосы варьировалось от 6 до 12 ч. Качество изображения на суммарных изображениях лучше  $1''$  в каждом из фильтров. Оптические данные были дополнены наблюдениями в близкой ИК-области (фильтры  $J$  и  $K$ ) на телескопе ESO-NTT.

В ходе тщательной обработки на итоговых изображениях FDF было выделено почти 10000 объектов, подавляющее большинство из которых являются галактиками (в поле обнаружено лишь около 50 звезд). Как оказалось, предельная видимая звездная величина поля FORS в фильтре  $B$  сравнима с HDF (см. раздел 4.2), а в других фильтрах уступает HDF лишь  $\sim 1^m$ . На ESO-VLT начат спектральный обзор объектов FDF, и в настоящее время опубликованы красные смещения для нескольких сотен галактик этого поля (см., например, [60]).

Работа с FDF — дополнительные наблюдения, анализ полученных данных — еще продолжается. Некоторые предварительные результаты, касающиеся физических свойств далеких ( $z > 3$ ) галактик, эволюции их функции светимости, истории звездообразования во Вселенной и др., приведены в [61].

### 4.5. SDF и SXDS

Основной целью японского проекта Subaru Deep Field (SDF) является выделение и исследование большой выборки далеких ( $z > 4$ ) галактик. На 8,3-метровом телескопе Subaru ("Плеяды" в переводе с японского) с 1999 г. проводятся многоцветные фотометрические и спектральные наблюдения области размером  $34' \times 27'$  в районе северного галактического полюса. Фотометрические данные были получены в пяти широкополосных фильтрах ( $B, V, R, i'$ ) и в двух узкополосных в близкой ИК-области спектра (с центральными длинами волн  $8150$  и  $9196 \text{ \AA}$ ) [62]. Центральная часть SDF размером  $2' \times 2'$  наблюдалась также в полосах  $J$  и  $K$  [63]. Суммарное время экспозиции в каждой из цветных полос составило примерно 10 ч, предельная видимая звездная величина близка к  $28,5^m$  в фильтре  $B$  и к  $23,5^m$  в  $K$ . В глубоком поле Subaru обнаружено более 150000 объектов (в основном, галактик). Обработанные изображения SDF и каталоги объектов во всех фильтрах находятся в открытом доступе на сайте <http://soaps.naoj.org/sdf/>.

С помощью SDF было получено много важных результатов, касающихся свойств и пространственного распределения далеких галактик. В частности, в этом поле обнаружено несколько объектов с  $z \geq 6$  (их возраст составляет лишь несколько сотен миллионов лет), в том числе самый далекий на данный момент спектроскопически подтвержденный  $L\alpha$ -излучающий объект с  $z = 6,60$  [64].

Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) — многоволновой обзор небольшой ( $\sim 1,3 \square^\circ$ ) площадки с по-

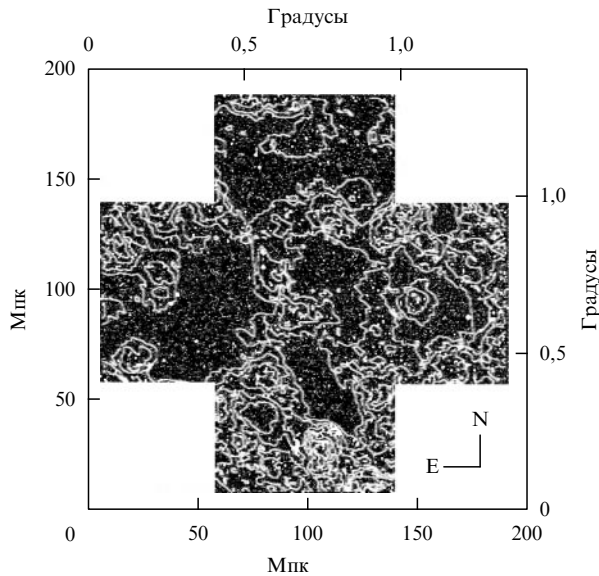


Рис. 8. Распределение  $L\alpha$ -излучающих объектов с  $z = 5,7 \pm 0,05$  в области SXDS (светлые контурные линии).

мощью ряда наземных и космических инструментов (Subaru, UKIRT, XMM-Newton, VLA, GALEX, JCMT) (см., например, [65]). Координаты центра SXDS:  $\alpha(2000) = 2\text{ ч } 18\text{ мин } 00\text{ с}$  и  $\delta(2000) = -5^{\circ}00'00''$ . SXDS является менее глубоким (в смысле предельной видимой звездной величины) проектом, чем SDF, но он охватывает в несколько раз большую площадь и, кроме того, позволит исследовать объекты в разных спектральных диапазонах.

В конце 2003 г. на телескопе Subaru были выполнены фотометрические наблюдения области SXDS с узкополосным фильтром, центрированным на  $\lambda = 8150 \text{ \AA}$ . С помощью специальной методики, основанной на сравнении плотностей потоков объектов в разных спектральных полосах, в этой области было обнаружено более 500 кандидатов в галактики с  $z = 5,7 \pm 0,05$  [66]. Спектральные наблюдения подтвердили, что большинство этих объектов должно находиться на данном  $z$ . При анализе пространственного распределения галактик авторы [66] пришли к заключению о существовании первичной крупномасштабной структуры галактик (с протяженными волокнами, пустотами и даже с двумя формирующимися скоплениями (см. рис. 8)) при  $z = 5,7$  (!).

#### 4.6. COMBO-17

COMBO-17 (Classifying Objects by Medium-Band Observations in 17 filters) — многоцветный фотометрический обзор пяти площадок (включая CDF-S, южный галактический полюс и сверхскопление Abell 901/902) размером  $\sim 0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$  каждая на 2,2-метровом телескопе MPG/ESO в Чили [67, 68]. Главной особенностью этого проекта является то, что наблюдения были проведены в 17 фильтрах (пяти широкополосных ( $U, B, V, R, I$ ) и 12 среднеполосных), охватывающих диапазон 3500–9300  $\text{\AA}$ . Столь подробная фотометрия позволяет построить для каждого объекта своего рода спектр низкого разрешения, который можно использовать как для спектральной классификации, так и для относительно точной ( $\sigma_z \approx 0,03$ ) оценки красного смещения. Следо-

вательно, сравнительно небольшая глубина COMBO-17 ( $B \approx 25,5$  [68]) компенсируется большой площадью, а также возможностью оценить тип и  $z$  объекта без дополнительных спектральных наблюдений. Эти преимущества COMBO-17 делают его удобным инструментом для исследования галактик методом слабого гравитационного линзирования друг на друге [69].

Наблюдательные результаты проекта для области Южного поля Чандры, включающие каталог 63501 объекта, опубликованы недавно в [70] (см. также [http://www.mpia.de/COMBO/combo\\_index.html](http://www.mpia.de/COMBO/combo_index.html)).

#### 4.7. GOODS

В январе 2004 года вышел специальный выпуск *Astrophys. J. Lett.*, целиком посвященный предварительным результатам проекта GOODS (Great Observatories Origins Deep Survey) [71]. GOODS — это проект следующего по сравнению с HDF поколения, объединяющий глубокие многоволновые наблюдения ряда космических (HST, SIRTf, CXO, XMM-Newton) и наземных (ESO-VLT, ESO-NTT, KPNO 4-м и др.) телескопов. Основные научные цели GOODS — оценка звездных и динамических масс ярких галактик вплоть до  $z \sim 5$ , измерение темпа звездообразования в полных выборках галактик на разных  $z$ , исследование происхождения хаббловской последовательности, измерение относительных вкладов звезд и активных ядер галактик в глобальную энергетику Вселенной, изучение вклада отдельных источников в межгалактическое фоновое излучение во всех спектральных диапазонах.

Наблюдения проводятся в двух областях площадью  $\sim 160 \text{ \AA}'$  каждая. Центр одного из этих полей почти совпадает с HDF-N (см. раздел 4.2), а второго — с CDF-S (см. раздел 4.3).

Наблюдения полей на HST были проведены с помощью установленной в 2002 г. на телескопе Advanced Camera for Surveys (ACS) в четырех широкополосных фильтрах F435W ( $B$ ), F606W ( $V$ ), F775W ( $i$ ), F850LP ( $z$ ) (три цифры в названии фильтра указывают центральную длину волны в нанометрах). Как и в случае HDFs, в каждом из фильтров получены десятки экспозиций, причем каждый кадр снимался при чуть смещенном положении телескопа. Наблюдения в полосах  $V, i$  и  $z$  были выполнены в течение пяти эпох, разнесенных на 40–50 дней. (Такая методика наблюдений была выбрана для облегчения поиска далеких, "космологических" сверхновых. В итоге в рамках GOODS открыто более 40 сверхновых, причем шесть SN Ia с  $z > 1,25$  [72].)

После первичных редуцированных и совмещения отдельных кадров были построены суммарные изображения площадок во всех фильтрах с шагом  $0,03''$  (реальное угловое разрешение этих изображений  $\approx 0,1''$ ). Предельная видимая звездная величина протяженных объектов, выделяемых в этих полях, на  $0,5^m - 0,8^m$  хуже, чем в предыдущих глубоких полях HST, однако полная площадь GOODS в 30 раз больше, чем у HDF-N и HDF-S вместе взятых. Исходные и редуцированные кадры Космического телескопа доступны на WWW странице проекта GOODS: <http://www.stsci.edu/science/goods/>.

Наблюдения в рамках проекта GOODS на других телескопах (включая, в частности, Keck и Gemini) либо уже проведены, либо находятся в процессе выполнения. Сведения об этих наблюдениях можно найти в работе [71], а также на WWW странице проекта.

#### 4.8. HUDF

Hubble Ultra Deep Field (HUDF) — самое глубокое из когда-либо полученных оптических изображений участка небесной сферы (рис. 9). Авторы проекта предполагают, что оно останется таковым и в последующие несколько лет, и, следовательно, это поле еще долго будет оставаться основным источником информации о предельно далеких объектах Вселенной [73].

HUDF расположено в пределах Южного поля Чандры (CDF-S) и тем самым в области проекта GOODS. Точные координаты центра HUDF таковы:  $\alpha(2000) = 3\text{ ч } 32\text{ мин } 39\text{ с}$  и  $\delta(2000) = -27^\circ 47' 29,1''$ . Основные наблюдения были проведены на HST с сентября 2003 г. по январь 2004 г. с помощью широкоугольной камеры (WFC) ACS в тех же четырех фильтрах, что и наблюдения в рамках GOODS. Площадь поля относительно невелика —  $11,5 \square'$ . В фильтрах *B* и *V* было получено более 100 отдельных кадров с суммарным временем экспозиции  $\sim 40$  ч. Наблюдения в полосах *i* и *z* состоят из почти трехсот кадров с полным временем экспозиции  $\sim 100$  ч в каждом из фильтров.

Итоговые прокалиброванные изображения HUDF с шагом  $0,03''$  (размер изображения в одном фильтре составляет 430 Мб) и каталог обнаруженных объектов можно найти на WWW странице проекта: <http://www.stsci.edu/hst/udf>. HUDF примерно на одну звездную величину глубже HDF. В этом поле обнаружено около 10000 галактик вплоть до  $B \sim 30^m$  ( $\sim 5 \times 10^{-9}$  Ян!).

Для того, чтобы сделать данные, полученные на ACS более полезными, центральная часть HUDF также наблюдалась на HST с помощью NICMOS (Near-Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer) в фильтрах F110W (*J*) и F160W (*H*). Эти наблюдения также беспрецедентны по глубине — предельные видимые звездные величины в полосах *J* и *H* составляют  $\approx 27,5^m$  ( $\sim 1,5 \times 10^{-8}$  Ян) [74]. Наличие столь качественных дан-

ных в близкой ИК-области спектра делает HUDF исключительно ценным полем для выделения и изучения предельно далеких объектов. Уже первые исследования HUDF позволили обнаружить ряд кандидатов в галактики с  $z \sim 7-8$  (см., например, [74]).

Одновременно с основными наблюдениями область HUDF изучалась с помощью других инструментов HST — STIS (Space Telescope Imaging Spectrograph) и WFPC-2 (Wide-Field Planetary Camera 2). Описания этих наблюдений и их результаты суммированы на сайте STScI: <http://www.stsci.edu/hst/udf>.

#### 4.9. Другие проекты

Выше были приведены краткие описания ряда типичных или в чем-то уникальных проектов. Этим перечнем далеко не исчерпываются все значимые работы по изучению глубоких полей, однако описать их сколь-нибудь подробно не представляется возможным. Далее для полноты картины я совсем коротко перечислю еще несколько интересных проектов.

LCRS (Las Campanas Redshift Survey) — спектроскопический обзор  $\sim 2600$  галактик на 2,5-метровом телескопе обсерватории Лас-Кампанас (Чили) [75]. Обзор охватывает примерно  $700 \square^\circ$  и состоит из шести вытянутых областей размером  $1,5^\circ \times 80^\circ$ .

NTDF (NTT Deep Field) — глубокая ( $B \leq 27,5^m$ ) многоцветная фотометрия небольшой ( $\sim 5 \square'$ ) площади на 3,6-метровом телескопе ESO-NTT [76].

CNOC2 (Canadian Network for Observational Cosmology) — обзор  $\sim 1,5 \square^\circ$  небесной сферы на 3,6-метровом телескопе CFHT [77]. Целью обзора является определение красных смещений для  $\sim 6000$  галактик с видимой звездной величиной  $R \leq 21,5^m$  и многоцветная фотометрия  $\sim 40000$  галактик с  $R \leq 23^m$ .

MUNICS (Munich Near-Infrared Cluster Survey) — фотометрическое и спектроскопическое изучение нескольких тысяч галактик с  $K \leq 19,5^m$  в ряде площадок суммарной площадью  $\sim 1 \square^\circ$  [78]. Фотометрические данные были получены на 2,2- и 3,5-метровом телескопах обсерватории Калар Альто (Испания), для спектральных наблюдений также использованы телескопы Хобби-Эберли (9,2-метровом, США) и ESO-VLT.

K20 — спектроскопический обзор полной выборки галактик с видимой звездной величиной  $K < 20^m$  (примерно 550 объектов) в двух полях площадью  $\sim 52 \square'$  на ESO-VLT [79].

DEEP2 (Deep Extragalactic Evolutionary Probe 2) — спектроскопический обзор  $\sim 3,5 \square^\circ$  небесной сферы, проводимый на 10-метровом телескопе Кека II с помощью мультиобъектного спектрографа [80]. В ходе выполнения проекта будут определены красные смещения для  $\sim 60000$  далеких ( $z > 0,7$ ) галактик.

GEMS (Galaxy Evolution from Morphologies and SEDs) — самое большое изображение ( $\sim 28' \times 28'$ ), полученное к настоящему времени на Космическом телескопе Хаббла [81]. Наблюдения поля выполнены в двух фильтрах (F606W и F850LP). Итоговое изображение представляет собой мозаику из примерно 60 полей WFC ACS. Центр поля GEMS совпадает с центром CDF-S и включает в себя область проекта GOODS. Размеры и положение GEMS почти совпадают с COMBO-17. Данные GEMS дают возможность изучить структуру и морфологию  $\sim 10000$  галактик.

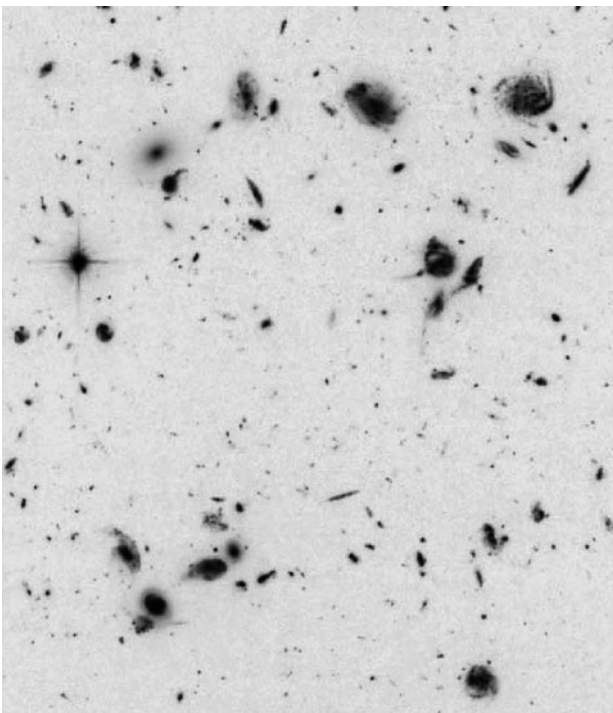


Рис. 9. Фрагмент ( $\sim 50'' \times 55''$ ) HUDF.

VVDS (VIMOS-VLT Deep Survey) — фотометрический и спектроскопический обзор  $\sim 100000$  галактик в нескольких глубоких полях площадью  $\sim 16 \square^\circ$  с помощью VISIBLE Multi-Object Spectrograph (VIMOS) на ESO-VLT [82, 83].

OACDF (Capodimonte Deep Field) — многоцветный (9 цветовых полос) фотометрический обзор  $\sim 50000$  галактик в поле площадью  $\sim 0,5 \square^\circ$  на ESO/MPG 2,2-метровом телескопе [84].

Приведенный список опять-таки далеко не полон. В частности, не упомянуты многие чисто спектроскопические обзоры галактик в небольших полях (ссылки на большинство из них можно найти в цитированных выше статьях).

Как видно из описаний проектов, в изучении глубоких полей принимают участие — в качестве основных или вспомогательных инструментов — практически все крупнейшие наземные инструменты. Крупнейший российский 6-метровый телескоп САО РАН (БТА) не является исключением. Уже вскоре после открытия БТА (1976 г.) на нем были выполнены работы по глубоким подсчетам галактик в области северного галактического полюса [85]. Эти подсчеты (черный квадрат на рис. 2а, б) были прослежены до  $B \approx 26^m$ , что являлось одним из лучших результатов тех лет.

Возможности БТА хорошо иллюстрируются работой [86], в которой приведены результаты четырехцветной фотометрии небольшой ( $3,6' \times 3'$ ) площадки, центрированной на гамма-всплеск GRB 000926. В этой площадке было найдено около 300 объектов с  $B \leq 26,6^m$  (черный кружок на рис. 2а, б). Как результаты дифференциальных подсчетов галактик, так и их общие характеристики оказались в хорошем согласии с данными других глубоких полей. Анализ изображений ярких ( $M(B) < -18^m$ , где  $M(B)$  — абсолютная звездная величина в фильтре  $B$ ) спиральных галактик позволил сделать заключение об

отсутствии сильной эволюции их линейных размеров при  $z \leq 1$  (рис. 10) [86].

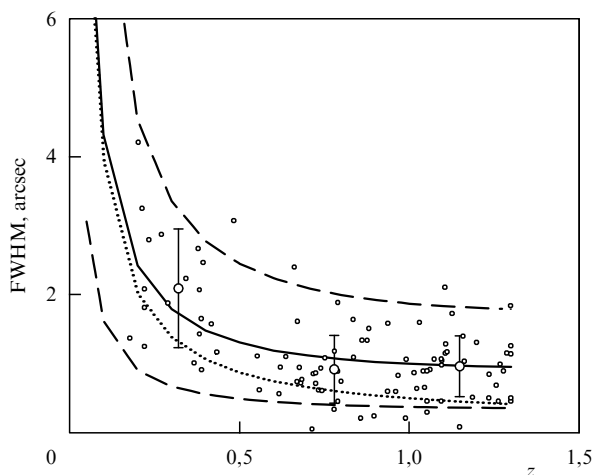
## 5. Некоторые результаты

В этом разделе кратко изложены отдельные результаты, полученные в ходе выполнения описанных ранее проектов. В основном речь пойдет о самых общих *наблюдательных* результатах, касающихся усредненных характеристик галактик.

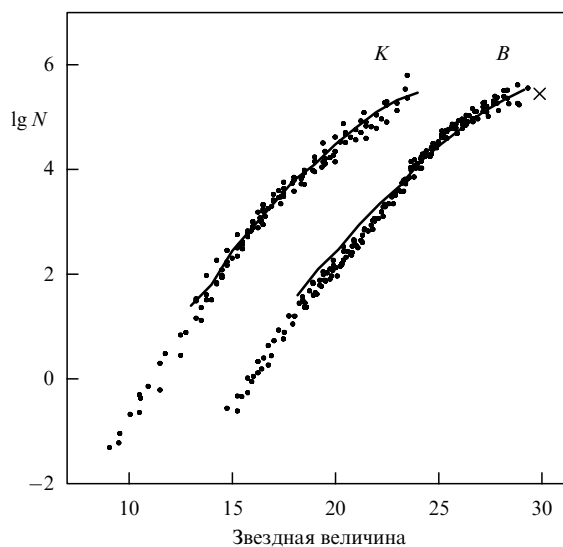
### 5.1. Подсчеты галактик

В течение длительного времени подсчеты галактик, т.е. зависимость числа наблюдаемых галактик от предельной видимой звездной величины, рассматривались как важный космологический тест. В частности, Хаббл в 30-х годах прошлого века пытался применить его для оценки кривизны пространства. Позднее стало ясно, что применение этого теста на практике сопряжено со столь большими трудностями (фотометрические ошибки, учет  $k$ -поправки, эволюция свойств галактик со временем и т.п.), что "любые попытки сделать это были бы лишь напрасной тратой времени" [87]. В настоящее время глубокие подсчеты рассматриваются не как космологический тест, а, скорее, как тест моделей формирования и эволюции галактик.

На рисунке 11 суммированы результаты современных работ по дифференциальным подсчетам галактик согласно данным, приведенным на странице <http://star-www.dur.ac.uk/~nm/pubhtml/counts/counts.html>. На рисунке показаны лишь данные, полученные начиная с 1995 г. В каждом из фильтров суммированы результаты примерно двух десятков проектов (включая 2MASS, SDSS, HDF, CDF, NDF и т.п.), в полосе  $B$  добавлены подсчеты в полях SDF, VVDS и HUDF. На рисунке видно, что результаты разных работ находятся в хорошем согласии. Например, при  $B \approx 25^m$  разброс подсче-



**Рис. 10.** Зависимость углового размера ярких спиральных галактик от  $z$  (точки). Кружки с барирами — средние значения и соответствующие дисперсии для трех интервалов  $z$ . Штриховые линии — линии постоянных линейных размеров (нижняя кривая соответствует линейному размеру 3 кпк, верхняя — 15 кпк). Непрерывная кривая — зависимость линейного размера от  $z$  для галактики с  $\text{FWHM} = 8$  кпк ( $\text{FWHM}$  — полная ширина, измеренная на уровне, соответствующем половине максимальной яркости). Пунктирная кривая — ожидаемое изменение наблюдаемого углового размера галактики для предсказываемого некоторыми моделями закона: размер  $\propto (1+z)^{-1}$ .



**Рис. 11.** Дифференциальные подсчеты галактик (нормированное на  $1 \square^\circ$  число галактик в пределах фиксированного интервала звездных величин) в полосах  $B$  и  $K$  (точки). Данные в фильтре  $B$  найдены в интервалах по  $0,5^m$ , в  $K$  — по  $1,0^m$ . Крест — подсчеты галактик в HUDF. Непрерывными линиями изображены предсказания модели формирования галактик, описанной в [88].

тов составляет лишь около 10% (с учетом ошибок фотометрии, разных процедур отбора галактик и т.п. этот разброс должен быть еще меньше), что наглядно иллюстрирует однородность и изотропность распределения галактик на больших масштабах. При переходе к более ярким (и в среднем к более близким) объектам разброс подсчетов растет из-за увеличивающегося влияния крупномасштабной структуры. На подсчеты предельно слабых объектов сильно влияют ошибки фотометрии и другие факторы.

Непрерывные линии на рис. 11 соответствуют предсказаниям и полуаналитической модели формирования галактик согласно [88] (модель "LC" в указанной работе). Как эта модель, так и другие (см., например, [89] и ссылки там же) способны удовлетворительно описать наблюдательные данные. Однако из-за обилия параметров, характеризующих галактики и эволюцию их характеристик с  $z$  (включая эволюцию пространственной плотности), предсказания моделей не вполне однозначны. Для дальнейшего прогресса в этой области требуются как увеличение точности наблюдательных данных, так и развитие представлений об эволюции галактик.

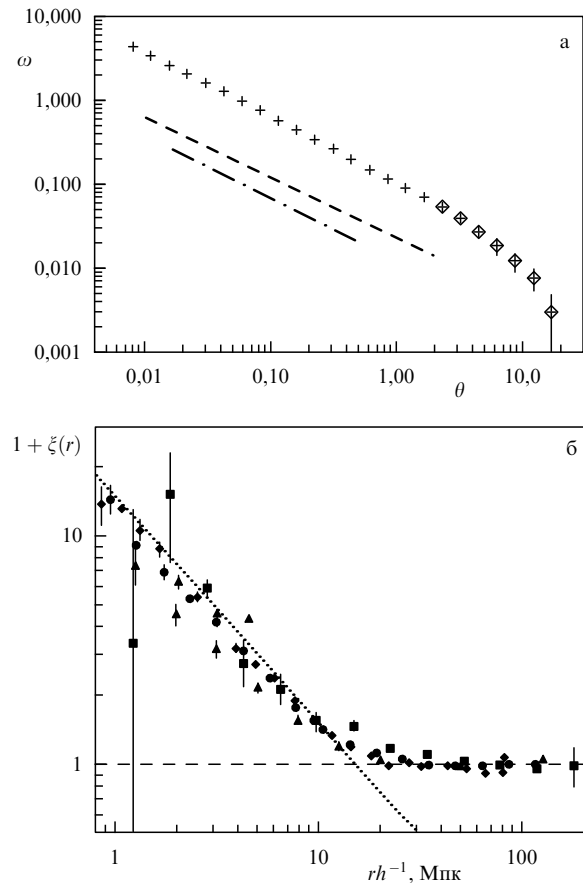
## 5.2. Распределение галактик

Распределение галактик в близкой к нам области Вселенной сильно неоднородно (см. рис. 3, 4). При переходе к масштабам сотен мегапарсек флуктуации плотности сглаживаются и распределение становится более однородным (см. рис. 5).

Тенденцию галактик к сгущению обычно описывают на языке двухточечных корреляционных функций  $\xi(r)$  и  $\omega(\theta)$ , где первая функция определяет совместную вероятность найти две галактики на расстоянии  $r$  друг от друга, а вторая характеризует совместную вероятность обнаружить два объекта на взаимном угловом расстоянии  $\theta$  [90]. Для нахождения  $\xi(r)$  необходимо знать пространственные расстояния между галактиками, и поэтому на практике удобнее измерять угловую (поверхностную) двухточечную корреляционную функцию  $\omega(\theta)$ . Затем по  $\omega(\theta)$  можно оценить и  $\xi(r)$ , поскольку обе функции связаны между собой через интегральное уравнение Лимбера. Если  $\xi(r)$  может быть представлена в виде степенного закона  $\xi(r) = (r/r_0)^{-\gamma}$ , то угловая корреляционная функция также следует степенному закону в виде  $\omega(\theta) \propto \theta^{1-\gamma}$  [90].

На рисунке 12а изображена угловая корреляционная функция для  $\sim 0,5$  млн галактик из 2MASS обзора [91]. В диапазоне  $1' < \theta < 2,5''$  эта функция хорошо описывается степенным законом с  $1 - \gamma = -0,79 \pm 0,02$ . Амплитуда  $\omega(\theta)$  зависит от глубины выборки — для более ярких и близких галактик амплитуда сгущения выше (этим, в частности, объясняется систематический сдвиг между данными разных обзоров на рис. 12).

На рисунке 12б показана корреляционная функция  $\xi(r)$ , полученная по результатам разных работ (на рисунке  $h$  — значение постоянной Хаббла, выраженное в долях  $100 \text{ км}^{-1} \text{ с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ ). При  $0,1 \text{ Мпк} \leq r \leq 20 \text{ Мпк}$  эта функция следует степенному закону с показателем степени  $\gamma \approx 1,7-1,8$ , а затем становится близкой к нулю. Характерный масштаб сгущения (корреляционная длина)  $r_0$  для галактик в близкой области Вселенной примерно равна 7 Мпк. Корреляционная длина зависит от свойств галактик (их светимости, морфологического типа) (см., например, [93]), но не

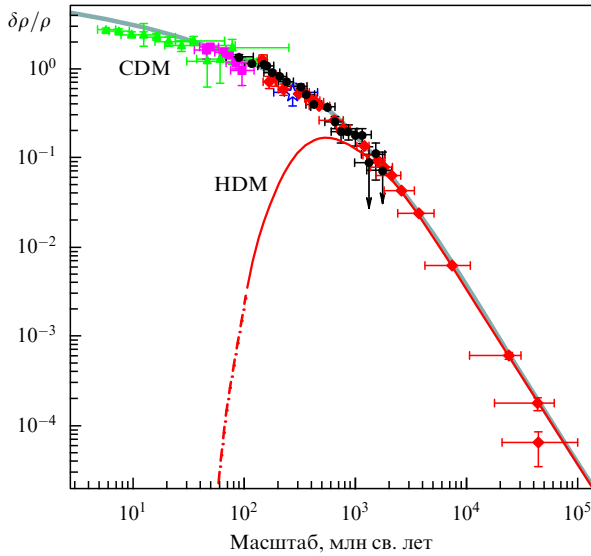


**Рис. 12.** (а) Двухточечная угловая корреляционная функция  $\omega(\theta)$  (угол  $\theta$  на рисунке измеряется в градусах) для галактик 2MASS обзора (кресты и ромбы). Штриховой и штрихпунктирной прямыми показаны линейные аппроксимации данных, полученных по APM и SDSS обзорам соответственно [91]. (б) Двухточечная корреляционная функция  $\xi(r)$  по данным разных обзоров (включая APM, LCRS и др.) [92].

зависит от глубины выборки (см. обсуждение этого вопроса в [92]).

Данные современных обзоров позволяют построить зависимость флуктуаций плотности во Вселенной от масштаба усреднения (рис. 13). (Спектр мощности галактик SDSS обзора, использованный для построения этого рисунка, основан на данных о  $2 \times 10^5$  галактиках [95].) Как видно на рис. 13, данные разного рода — от флуктуаций плотности галактик до анизотропии реликтового излучения — образуют единую плавную зависимость, описываемую в рамках CDM модели.

Завершенные недавно обзорные работы позволили изучить особенности распределения галактик в близкой области Вселенной с недоступной ранее детальностью. В частности, 2MASS обзор дал возможность исследовать распределение галактик в "зоне избегания" — области вблизи плоскости Млечного Пути ( $|b| < 10^\circ$ ), где межзвездное поглощение скрывает находящиеся за нашей Галактикой объекты [96]. Данные о распределении галактик обзоров 2MASS, 2dF и APM привели к выводу о дефиците ярких галактик в южном галактическом полушарии по сравнению с северным (примерно на 30%) [97]. Авторы считают, что наблюдаемый дефицит является следствием существования колоссальной "дыры" (ее линейный размер может превышать 200 Мпк)



**Рис. 13.** Зависимость флуктуаций плотности  $\delta\rho/\rho$  от масштаба [94] ( $\blacktriangle$  — сгущение облаков межгалактического газа,  $\blacksquare$  — гравитационное линзирование,  $\bullet$  — галактики SDSS обзора,  $\star$  — скопления галактик,  $\blacklozenge$  — реликтовое излучение). Непрерывная линия, отмеченная буквами CDM, — предсказание плоской CDM модели (модель с "холодной скрытой массой"). Буквами HDM отмечена характерная зависимость для модели с "горячей скрытой массой".

в локальном распределении галактик. Столь значительная локальная неоднородность, а также возможное существование выраженной крупномасштабной структуры при  $z \sim 6$  ([66], см. раздел 4.5; [98]) могут создать определенные проблемы для объяснения в рамках стандартной CDM модели. Отметим, что неоднородности сравнимого масштаба ( $\geq 200$  Мпк) отмечены и в распределении квазаров 2QZ проекта (см. раздел 3.5) [99].

### 5.3. Эволюция функции светимости

Функция светимости (ФС) — зависимость числа галактик в единице объема от их светимости — одна из важнейших интегральных характеристик галактик. Знание ФС позволяет оценить среднюю плотность светимости во Вселенной, форма ФС — один из главных тестов моделей формирования галактик. Стандартным представлением ФС является так называемая функция Шехтера [100]:

$$\phi(L) dL = \phi_* \left(\frac{L}{L_*}\right)^\alpha \exp\left(-\frac{L}{L_*}\right) d\left(\frac{L}{L_*}\right),$$

где  $\phi(L) dL$  — число галактик со светимостью от  $L$  до  $L + dL$  в единице объема, а  $\phi_*$ ,  $L_*$  и  $\alpha$  — параметры. Параметр  $\phi_*$  дает нормировку ФС,  $L_*$  — характеристическая светимость, а параметр  $\alpha$  определяет наклон слабого крыла ( $L < L_*$ ) ФС: при  $\alpha = -1$  слабое крыло ФС является плоским, при  $\alpha < -1$  ФС растет с уменьшением  $L$ , а при  $\alpha > -1$  уменьшается. Функция Шехтера хорошо описывает реальные ФС галактик поля и скоплений и обладает удобными аналитическими свойствами.

Локальная ФС галактик в настоящее время относительно хорошо изучена. Согласно данным многочисленных работ (включая 2dF и SDSS обзоры) в диапазоне абсолютных звездных величин  $-15^m \geq M(B) \geq -22^m$  (фильтр  $B$ ) ФС может быть описана следующими значениями параметров:  $\alpha \approx -(1,1-1,2)$ ,  $M_*(B) \approx -20,2^m$

( $L_*(B) = 1,9 \times 10^{10} L_{\odot, B}$ ) и  $\phi_* \approx (0,5-0,7) \times 10^{-2}$  Мпк $^{-3}$  (см., например, [101]). Следовательно, при  $z = 0$  плотность светимости галактик

$$\rho_L(B) = \phi_* L_* \Gamma(\alpha + 2) \approx 1,3 \times 10^8 L_{\odot, B} \text{ Мпк}^{-3}$$

и характерная пространственная плотность галактик

$$\rho = \frac{\rho_L}{L_*} = \phi_* \Gamma(\alpha + 2) \sim 10^{-2} \text{ Мпк}^{-3}.$$

ФС локальных галактик зависит от их морфологического типа и от пространственного окружения [102].

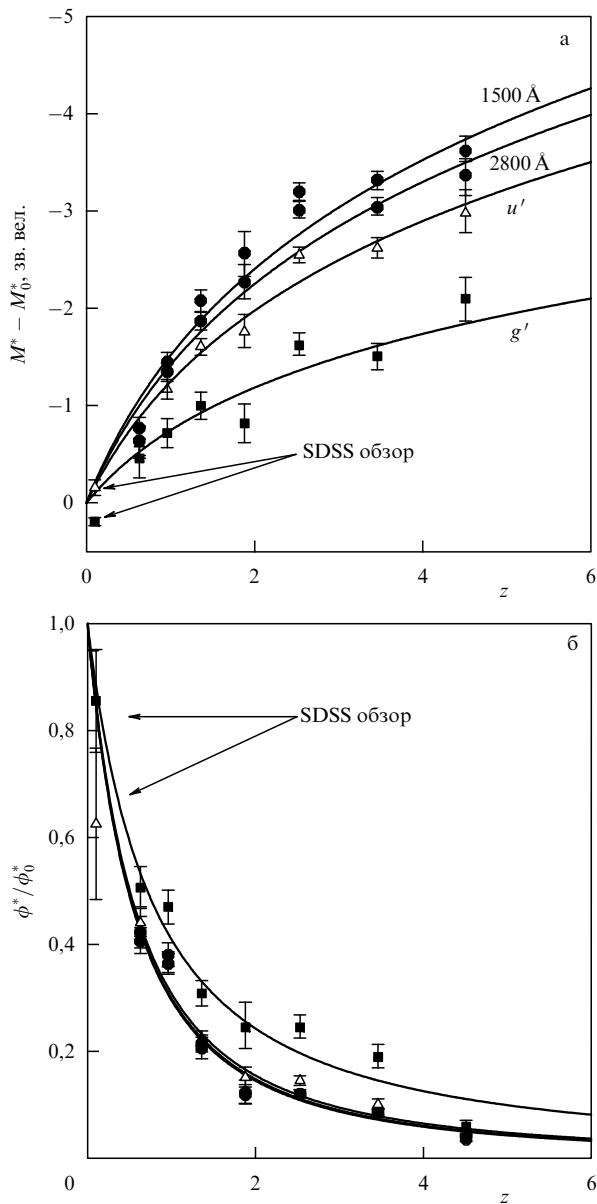
Многочисленные работы по изучению глубоких полей, проведенные в последнее десятилетие, позволили исследовать эволюцию ФС галактик с  $z$ . При решении этой задачи для предельно далеких и слабых галактик вместо спектроскопических  $z$  используются так называемые "фотометрические красные смещения", оцениваемые по результатам многоцветной фотометрии (данные такой фотометрии позволяют построить своего рода спектр низкого разрешения, по которому и можно оценить  $z$ ). Фотометрические оценки  $z$  имеют точность  $\approx 10-20\%$ , что вполне достаточно для определения ФС по большим выборкам галактик.

Наблюдения свидетельствуют о существовании дифференциальной (зависящей от типа галактики и от цветовой полосы) эволюции ФС. Результаты разных работ несколько отличаются, но качественная картина выглядит так: с ростом  $z$  светимость  $M_*$  увеличивается, а  $\phi_*$  уменьшается (рис. 14). Согласно [103] к  $z \sim 5$  значение  $M_*$  в фильтре  $B$  становится больше на  $1^m-2^m$ , а  $\phi_*$  уменьшается в 5–10 раз. Эволюция наклона ФС ( $\alpha$ ) выражена гораздо слабее, хотя некоторые авторы отмечают уменьшение  $\alpha$  с ростом  $z$ . Если рассматривать объекты разных типов по отдельности, то к  $z \sim 1$  пространственная плотность эллиптических галактик и спиральных галактик ранних типов остается почти постоянной либо немного уменьшается, а эволюция их ФС может быть описана как эволюция светимости галактик (их уярчение). Пространственная плотность спиральных галактик поздних типов и галактик с активным звездообразованием, наоборот, заметно увеличивается к  $z \sim 1$  [104, 105]. Изменение ФС галактик приводит и к эволюции создаваемой ими плотности светимости — от  $z = 0$  к  $z \sim 3$  значение  $\rho_L$  увеличивается, причем наиболее сильный рост происходит в УФ-области спектра (примерно в 5 раз [106]).

### 5.4. Эволюция структуры галактик

Одна из основных целей исследования галактик в глубоких полях — изучение происхождения и эволюции хаббловской последовательности. В локальной Вселенной оптическая морфология подавляющего большинства ярких галактик может быть описана в рамках простой классификации, предложенной Хабблом [3]. Лишь примерно 5% близких объектов не вписываются в эту классификацию, и их относят к неправильным или взаимодействующим галактикам [107, 108].

Глубокие поля HST позволили впервые взглянуть на структуру далеких галактик. Первые же исследования показали, что при переходе к слабым и более далеким объектам растет доля галактик, не вписывающихся в хаббловскую схему [109]. При  $z \sim 1$  (этому красному смещению соответствует возраст Вселенной, равный примерно половине хаббловского времени) доля таких



**Рис. 14.** Зависимость параметров функции светимости галактик  $M_*$  (а) и  $\phi_*$  (б) от  $z$  [103]. Значками показаны данные для разных цветовых полос, непрерывные линии — аналитические аппроксимации наблюдательных данных. Стрелками указаны параметры ФС согласно SDSS обзору.

галактик достигает 30–40 % (см. примеры на рис. 6 и 9). Отсутствие удобной классификации для далеких галактик стимулировало развитие методов анализа их изображений и построение объективных схем классификации с использованием таких характеристик, как индексы асимметрии и концентрации (например, [109, 110]).

Статистика объектов в ряде глубоких полей свидетельствует также, что доля взаимодействующих галактик и галактик в стадии слияния увеличивается с ростом  $z$ . Если аппроксимировать этот рост законом  $(1+z)^m$ , то данные наблюдений приводят к значению  $m \approx 2-4$  для  $z \sim 1$  [111, 112]. Эволюция темпа слияний, вероятно, зависит от массы галактик — она сильнее выражена для наиболее массивных объектов [112].

Для объектов на  $z \geq 1$  конкретные выводы об эволюции структуры становятся гораздо менее определенными

из-за растущего влияния  $k$ -поправки, космологического ослабления яркости и деградации разрешения [113]. Поучительной иллюстрацией этому является история с изучением баров у далеких галактик. Первые морфологические исследования галактик в HDF приводили к выводу о резком уменьшении доли спиральных галактик с барами при  $z > 0,5$ , однако последующие работы показали, что эта доля остается примерно постоянной ( $\sim 40\%$ ), по крайней мере, вплоть до  $z = 1,1$  [114, 115].

Если перейти от того, как выглядят далекие галактики, к тому, как меняются характеристики их крупномасштабных подсистем, то в этой области также накоплен значительный наблюдательный материал. Например, установлено, что к  $z \sim 1$  поверхностная яркость дисков спиральных галактик увеличивается на  $\sim 1^m$ , а показатели цвета уменьшаются (диски становятся более "голубыми") [116, 117]. При  $z \leq 1$  обнаружена эволюция наклона соотношения Талли–Фишера (зависимость между максимальной скоростью вращения и светимостью для спиральных галактик) [118]. Это изменение наклона, как полагают, является следствием дифференциальной эволюции спиральных галактик: маломассивные спирали к  $z \sim 1$  становятся ярче на  $1^m-2^m$ , а массивные практически не меняют своей светимости. Диски видимых "с ребра" спиральных галактик при  $z \sim 1$  имеют большую относительную толщину (отношение вертикального и радиального масштабов распределения яркости) и чаще, чем близкие объекты, демонстрируют вертикальные деформации своих плоскостей (изгибы) [119, 120]. Спектральные исследования спиральных галактик свидетельствуют об эволюции их химического состава: от  $z = 0$  к  $z = 1$  металличность газовых подсистем галактик уменьшается [121].

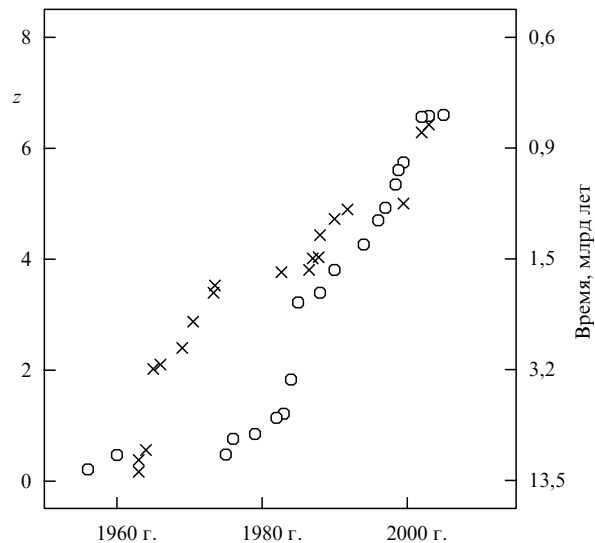
В ряде работ исследовались фотометрические и кинематические характеристики эллиптических галактик поля и скоплений вплоть до  $z \sim 1$  (см., например, [122, 123]). Обнаружено отклонение параметров далеких галактик ранних типов от Фундаментальной Плоскости (ФП), задаваемой близкими объектами. Это отклонение объясняется так называемой "пассивной" эволюцией их светимости и, соответственно, отношения масса–светимость (см. подробнее в [40, 124]).

### 5.5. Предельно далекие галактики

Поиск и исследование самых далеких объектов во Вселенной — одно из самых интересных и важных направлений астрономии. Предельно далекие и, следовательно, очень молодые галактики являются важнейшими тестами моделей формирования галактик, а также позволяют исследовать процессы в относительно ранней Вселенной.

Историю открытия самых далеких галактик можно проследить на рис. 15. Как видно на этом рисунке, в течение почти трех десятилетий самыми далекими объектами оставались квазары. (Даже само слово "квазары" зачастую использовалось как синоним предельно далеких объектов.) Это легко объяснимо, поскольку квазары — это, как правило, очень яркие галактики, в спектрах которых наблюдаются мощные и широкие эмиссионные линии. Яркость квазаров, а также линий в их спектрах приводит к тому, что их гораздо легче наблюдать на космологических расстояниях, чем обычные галактики (см. пример спектра далекого квазара на рис. 16). На рубеже столетий появились методики, позволяющие





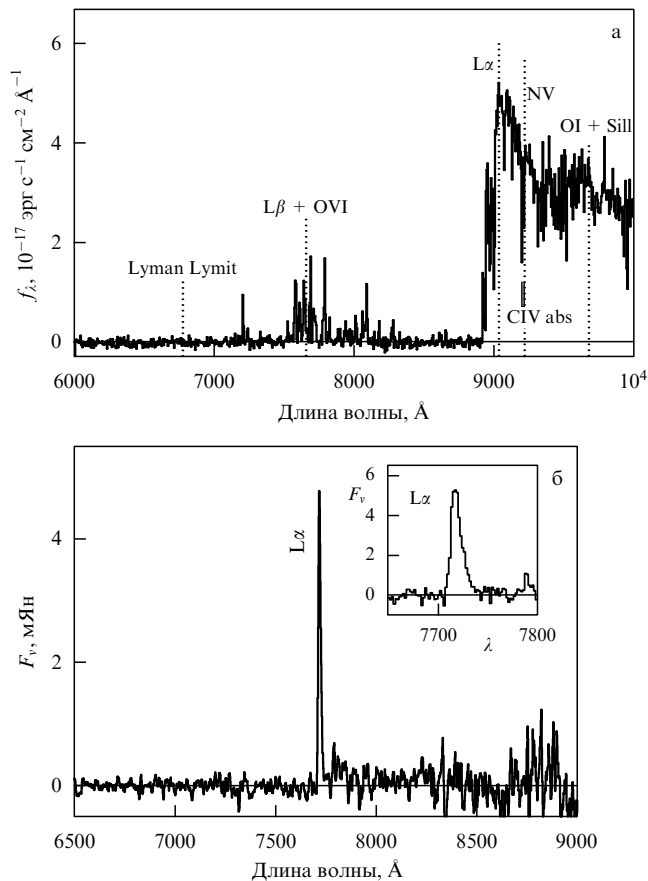
**Рис. 15.** История обнаружения самых далеких объектов Вселенной (кружки — галактики, крестики — квазары). По горизонтальной оси отложены годы, когда были открыты объекты. По вертикальной оси слева отложены красные смещения, а справа — время в млрд лет от начала космологического расширения. Рисунок построен по данным обзора [125], дополненным результатами последних лет.

очень эффективно выделять обычные галактики на больших  $z$ , и с этого времени (и по настоящее) именно галактики, а не квазары, являются самыми далекими известными объектами Вселенной (см. рис. 15).

Существует несколько методов выделения галактик на больших  $z$ . Один из наиболее эффективных способов отбора кандидатов в такие объекты — анализ широкополосных показателей цвета с целью обнаружения галактик с необычными цветами (см. раздел 2). В первую очередь этот метод нацелен на поиск галактик со скачком распределения энергии в области лаймановского континуума (912 Å), ожидаемым у галактик с активным звездообразованием [9]. Из-за поглощения в облаках  $L\alpha$ , проецирующихся на луч зрения, у далеких галактик также "выедается" излучение в непрерывном спектре между 912 Å и линией  $L\alpha$ . Это создает дополнительную спектральную особенность, позволяющую выделять далекие галактики по их широкополосным показателям цвета. С помощью такого подхода уже обнаружено более 1000 объектов с  $z > 2,5$ , которые часто называют Lyman-Break Galaxies или просто LBGs (см. подробный обзор в [9]).

Второй часто используемый метод — это поиск галактик с сильной эмиссионной линией  $L\alpha$  с помощью глубокой узкополосной фотометрии площадок на небесной сфере и с последующим спектральным изучением обнаруженных объектов (подробнее см. раздел 2). Найденные таким образом объекты часто называют  $L\alpha$ -излучателями ( $L\alpha$  emitters или LAEs). Именно этим методом были открыты самый далекий известный на данный момент объект ( $z = 6,60$ ), а также признаки существования крупномасштабного распределения у галактик с  $z = 5,7$  (см. раздел 4.5).

В настоящее время открыто уже свыше трех десятков галактик с надежными спектроскопическими  $z > 5$  [64, 128] (см. пример спектра на рис. 16). Возраст таких объектов не превышает  $\sim 10\%$  возраста Вселенной (см.



**Рис. 16.** (а) Спектр квазара с  $z = 6,4$  [126], (б) спектр галактики с  $z = 5,34$  [127].

рис. 15). Далекие галактики открывались как в глубоких полях, так и вблизи фоновых скоплений галактик, усиливающих благодаря гравитационному линзированию потоки от объектов, расположенных далеко за скоплениями.

Основные наблюдательные особенности галактик с  $z > 5$  (см., например, [64, 129]):

- как правило, это морфологически пекулярные, асимметричные, компактные (характерный размер 1–5 кпк) объекты;

- для таких галактик характерны очень высокие поверхностная яркость и светимость (исправленные на космологическое ослабления яркости и влияние  $k$ -поправки);

- эквивалентные ширины линии  $L\alpha$  в системе отсчета, связанной с галактиками,  $W(L\alpha) \sim 20–100 \text{ \AA}$ ;

- темп звездообразования, оцененный по светимости в линии  $L\alpha$ , составляет  $\sim 5–10 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$  (по светимости в УФ-континууме этот темп в несколько раз выше).

Приведенные характеристики в очень сильной степени искажены самой процедурой отбора галактик, и поэтому не ясно, в какой степени они отражают свойства всех объектов, реально существующих при  $z > 5$ . Наблюдаемые объекты могут быть "строительными блоками", из которых впоследствии за счет взаимных слияний и аккреции вещества извне вырастут окружающие нас галактики. С другой стороны, некоторые из этих объектов могут представлять собой формирующиеся балджи массивных спиралей или эллиптические галактики.

В ряде работ исследовалось скучивание LBGs и LAEs. Для ярких галактик ( $L \geq L_*$ ) масштаб скучивания  $r_0$  не показывает заметной эволюции от  $z = 0$  до  $z = 5$  [130, 131]. Напротив, "параметр смещения"  $b$  (bias parameter), характеризующий различие пространственных распределений галактик и темных гало, увеличивается к  $z = 5$  в несколько раз [131]. В рамках проектов GOODS и HUDF получены указания на эволюцию размеров галактик: от  $z \sim 2$  к  $z \sim 6$  их средние линейные размеры уменьшаются примерно вдвое [132, 133]. Как эволюция скучивания галактик, так и изменение их размеров находят объяснение в рамках CDM модели формирования галактик.

Спектры предельно далеких галактик и квазаров дают возможность взглянуть на раннюю историю межгалактической среды. В частности, так называемый эффект Ганна–Петерсона [134] (депрессия в спектрах далеких объектов в области длин волн, меньших  $L\alpha$ , из-за поглощения в облаках нейтрального водорода, расположенных между наблюдателем и объектом) позволяет оценить красное смещение, при котором закончилась эпоха вторичной ионизации (реионизации) Вселенной [135]. С одной стороны, обнаружение этого эффекта в спектрах квазаров с  $z > 6$  (см. рис. 16) и его отсутствие для объектов с  $z \leq 6$  показало, что эпоха реионизации (т.е. ионизации межгалактической среды излучением областей звездообразования и активных ядер) закончилась к  $z \sim 6$  [136, 126]. С другой стороны, данные об анизотропии реликтового излучения свидетельствуют о начале вторичной ионизации при  $z \sim 20$  (см., например, обзор [137]). Сочетание этих данных привело к заключению о сложной, возможно, состоящей из двух этапов истории вторичной ионизации межгалактической среды [138].

### 5.6. История звездообразования во Вселенной

Один из наиболее интересных результатов, полученных в последние годы с помощью обзоров неба и глубоких полей, — это реконструкция глобальной истории звездообразования во Вселенной от  $z \sim 6$  до наших дней. Количественно результаты разных авторов несколько отличаются, но общий ход зависимости темпа рождения звезд в единице сопутствующего объема от красного смещения (эту зависимость иногда называют диаграммой Мадо — Madau diagram/plot [139]), по-видимому, уже установлен (см. пример на рис. 17).

Существуют два подхода к построению этой диаграммы. Первый связан с детальным моделированием истории звездообразования близких галактик по их спектрам. Второй — более прямой — подход предполагает исследование полных выборок галактик, наблюдаемых на разных  $z$ . Основными проблемами этого метода являются относительно небольшие объемы выборки далеких галактик (это связано с небольшими размерами глубоких полей), а также плохо известная поправка на внутреннее поглощение, которое может заметно ослабить наблюдаемую светимость далеких объектов. Тем не менее оба подхода дают в целом согласующиеся результаты (см., например, [141]).

Как видно на рис. 17, удельный темп звездообразования быстро растет от  $z = 0$  к  $z \sim 1$ , демонстрирует глобальный максимум при  $z \sim 1-2$ , затем начинает спадать, оставаясь, впрочем, значительным вплоть до предельного  $z$  ( $\sim 6$ ), для которого возможны его современные оценки. Анализ истории звездообразования во

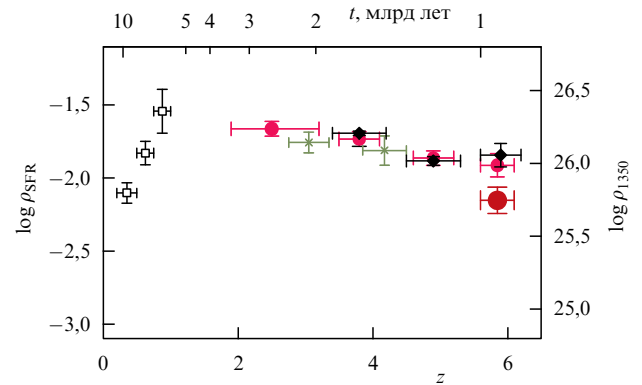


Рис. 17. История звездообразования во Вселенной [140]. По оси слева отложен удельный темп звездообразования в единицах  $M_{\odot} \text{ год}^{-1} \text{ Мпк}^{-3}$ , а справа — плотность светимости на  $\lambda = 1350 \text{ \AA}$  в единицах  $\text{эрг с}^{-1} \text{ Гц}^{-1} \text{ Мпк}^{-3}$ . По верхней горизонтальной оси отложено время от начала космологического расширения.

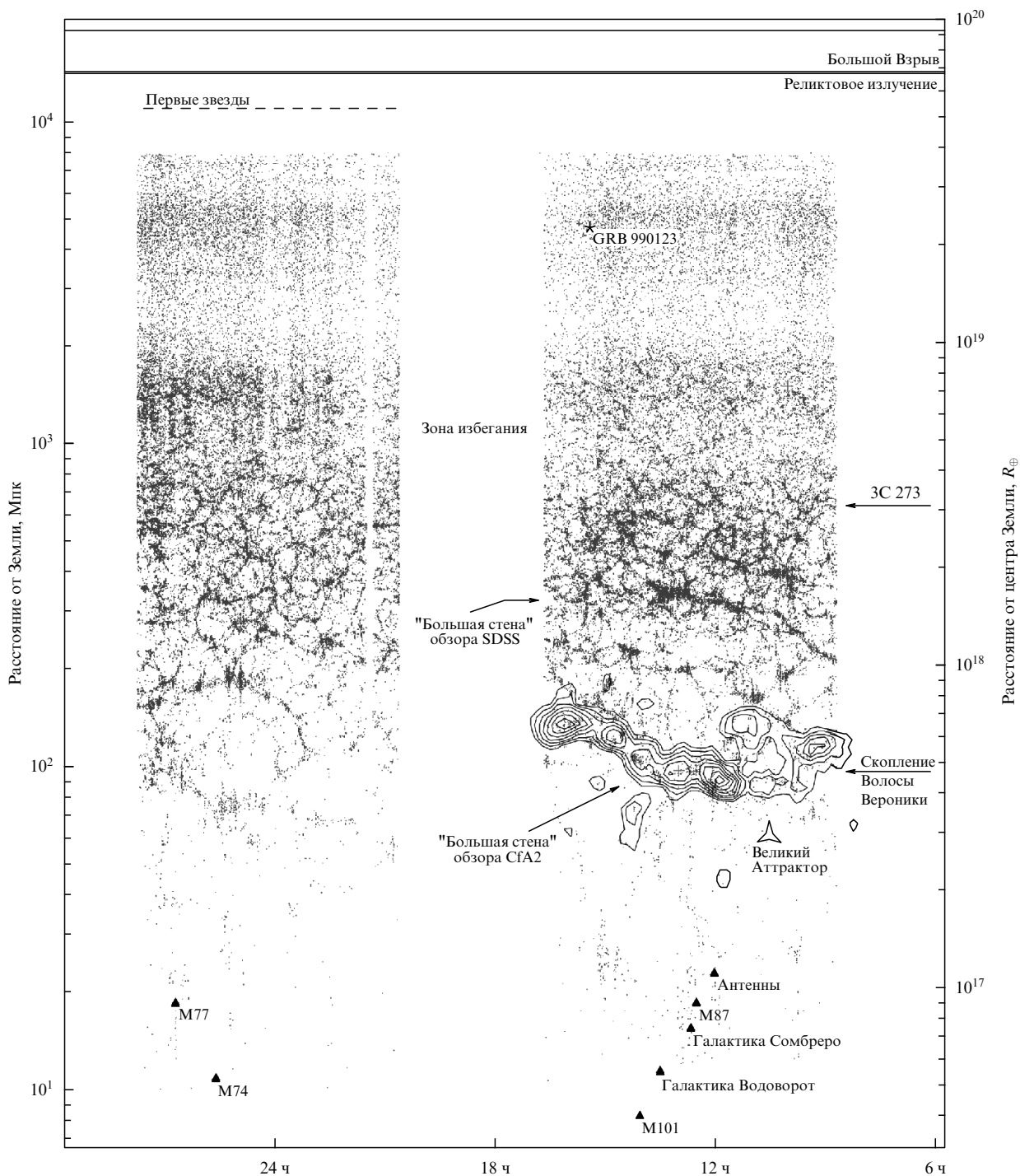
Вселенной приводит к выводу, что около 50 % всех существующих при  $z = 0$  звезд возникло при  $z \geq 1$ ,  $\sim 25\%$  звезд родилось при  $z \geq 2$ ,  $\sim 15\%$  — при  $z \geq 3$ , а  $\sim 5\%$  уже существовало при  $z = 5$  [142]. Еще один важный наблюдательный результат — число массивных звездных систем (с массами более  $10^{11} M_{\odot}$ ) уменьшается с ростом  $z$ , однако такие галактики, пусть и в относительно небольшом количестве, существуют и при  $z > 4$  [142].

## 6. Заключение

Столетия назад мы жили в карликовой Вселенной, состоящей из планет и ограниченной сферой неподвижных звезд (см. рис. 1). Сто лет назад доминировало представление о чисто звездной Вселенной, представляющей собой гигантское уплощенное звездное скопление — Млечный Путь, вблизи центра которого находится Солнце. В начале третьего тысячелетия доступная нашим наблюдениям область Вселенной состоит из сотен миллиардов "разлетающихся" галактик (рис. 18)<sup>3</sup>, окруженных гало из скрытой массы и погруженных в антигравитирующий космический вакуум [144]. Наша Вселенная уже прошла пик своей активности, и мы живем на "склоне" ее истории, когда закончилась эпоха активного звездообразования, а галактики разлетелись друг от друга и взаимодействуют и сливаются относительно редко.

Очень важную роль в создании крупномасштабной картины мира играют обзоры неба и проекты по изучению избранных глубоких полей, о некоторых из которых было рассказано в этой статье. Современные обзоры неба дают информацию о характеристиках и пространственном распределении миллионов галактик. Глубокие поля позволяют наблюдать галактики в процессе формирования и проследивать их эволюцию на протяжении миллиардов лет. По мнению некоторых исследователей, если текущий прогресс в области наблюдений будет продолжаться, то проблема образования и эволюции галактик будет решена в течение одного-двух

<sup>3</sup> Поучительно отметить определенное внешнее сходство рис. 18 и рис. 1.



**Рис. 18.** Карта Вселенной [143]. Показано распределение галактик в экваториальном разрезе ( $-2^\circ < \delta < 2^\circ$ ) небесной сферы. Вдоль горизонтальной оси отложено прямое восхождение объектов, левая вертикальная ось дает расстояние в мегапарсеках, правая — в радиусах Земли. На рисунке отмечен ряд известных близких галактик, квазаров, а также элементы крупномасштабной структуры.

десятилетий. В то время мы с ностальгией будем оглядываться на нынешние годы и вспоминать, как здорово было помогать писать историю [145].

Объемы наблюдательных данных, получаемых в ходе описанных в статье проектов, уже исчисляются десятками терабайт. Эти данные, как правило, находятся в открытом доступе, и их могут использовать через всемирную сеть как профессиональные исследователи, так и любители. Все крупные наземные и космические обсерватории также имеют архивы данных, где накапли-

ваются результаты проведенных наблюдений (архив наблюдений на БТА можно найти по адресу <http://www.sao.ru>).

Гигантское количество доступной информации о Вселенной меняет облик современной астрономии. (Текущий темп накопления наблюдательных данных в астрономии достигает  $\sim 1 \text{ Тб сут}^{-1}$  [146].) Множество важнейших задач — от статистических исследований Млечного Пути и изучения крупномасштабного распределения галактик до открытий новых типов объектов —

можно решать без дополнительных наблюдений на телескопах. Эти новые возможности, часто ускользающие от внимания даже профессиональных астрономов, выводят на первый план "технологические" проблемы — быстрый и удобный доступ к распределенным по всему миру и часто очень разнородным данным, их визуализация, анализ и т.п. Все это стимулировало появление концепции Виртуальной Обсерватории (<http://www.ivoa.net>), основной целью которой является повышение эффективности астрономических исследований в условиях колоссального объема информации [146]. Современные и будущие многоволновые обзоры неба создают своего рода "виртуальную Вселенную" в наших компьютерных, а Виртуальная Обсерватория станет, возможно, основным инструментом для ее изучения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 03-02-17152.

### Список литературы

- Heninger S K (Jr) *The Cosmographical Glass. Renaissance Diagrams of the Universe* (San Marino, Calif.: Huntington Library, 1977)
- Еремеева А И *Вселенная Гершеля* (М.: Наука, 1966)
- Hubble E P *Astrophys. J.* **64** 321 (1926)
- Hubble E *Astrophys. J.* **79** 8 (1934)
- Sandage A, in *The Hubble Deep Field* (Space Telescope Sci. Inst. Symp. Ser., Vol. 11, Eds M Livio, S M Fall, P Madau) (New York: Cambridge Univ. Press, 1998) p. 1
- Ellis R, in *Galaxies at High Redshift: Proc. of the XI Canary Islands Winter School of Astrophysics, Tenerife, Spain, November 15–26, 1999* (Eds I Pirez-Fournon et al.) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2003) p. 1
- Hubble E *Astrophys. J.* **84** 517 (1936)
- Rosati P, in *Modern Cosmology* (Eds S Bonometto, V Gorini, U Moschella) (Bristol: Institute of Physics Publ., 2002) p. 312
- Giavalisco M *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **40** 579 (2002)
- Маркарян Б Е, Липовецкий В А, Степанян Дж А *Астрофизика* **15** 549 (1979)
- Morgan D H, in *The Future Utilisation of Schmidt Telescopes: IAU Colloq. 148, 7–11 March 1994, Bandung, Indonesia* (Astron. Soc. of the Pacific Conf. Ser., Vol. 84, Eds J Chapman et al.) (San Francisco: Astron. Soc. of the Pacific, 1995) p. 137
- Zwicky F et al. *Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies Vol. I–VI* (Pasadena: California Institute of Technology, 1961–1968)
- Воронцов-Вельяминов Б А, Красногорская А А, Архипова В П *Морфологический каталог галактик: I–IV* (Труды ГАИШ, Т. 32, 32а, 33, 38) (М.: Изд-во МГУ, 1962–1968)
- Воронцов-Вельяминов Б А *Атлас и каталог взаимодействующих галактик* (М.: Изд-во МГУ, 1959)
- Караченцев И Д *Двойные галактики* (М.: Наука, 1987)
- Abell G O *Astrophys. J. Suppl.* **3** 211 (1958)
- Reid I N et al. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **103** 661 (1991)
- Maddox S J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **243** 692 (1990)
- Maddox S J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **242** 43P (1990)
- Dalton G B et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **271** L47 (1994)
- Pennington R L et al. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **105** 521 (1993)
- Yentis D J et al., in *Digitised Optical Sky Surveys: Proc. of the Conf., Edinburgh, Scotland, 18–21 June 1991* (Astrophys. and Space Sci. Library, Vol. 174, Eds H T MacGillivray, E B Thomson) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1992) p. 67
- Hambly N C et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **326** 1279 (2001)
- Lasker B M et al. *Bull. Inf. Centre Donnees Stellaires* **37** 15 (1989)
- Postman M *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **106** 108 (1994)
- Lasker B M et al., in *Astronomical Data Analysis Software and Systems V* (ASP Cnf. Ser., Vol. 101, Eds G H Jacoby, J Barnes) (San Francisco, Calif.: Astron. Soc. of the Pacific, 1996) p. 88
- Djorgovski S G et al., in *Wide Field Surveys in Cosmology: 14th IAP Meeting, May 26–30, 1998, Paris, France* (Eds S Colombi, Y Mellier) (Gif-sur-Yvette: Editions Frontiers, 1998) p. 89
- Skrutskie M F et al., in *The Impact of Large Scale Near-IR Sky Surveys* (Astrophys. and Space Sci. Library, Vol. 210, Eds F Garzon et al.) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1997) p. 25
- Jarrett T H *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **112** 1008 (2000)
- Jarrett T H et al. *Astron. J.* **119** 2498 (2000)
- Jarrett T *Publ. Astron. Soc. Austr.* **21** 396 (2004)
- Eichhorn G *Astron. Geophys.* **45** (3) 3.07 (2004)
- Colless M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **328** 1039 (2001)
- Colless M et al., astro-ph/0306581
- Colless M, in *Measuring and Modeling the Universe* (Cambridge Observatories Astrophys. Ser., Vol. 2, Ed. W L Freedman) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004) p. 196
- Elgarøy Ø et al. *Phys. Rev. Lett.* **89** 061301 (2002)
- Percival W J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **337** 1068 (2002)
- Croom S M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **349** 1397 (2004)
- Jones D H et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **355** 747 (2004)
- Решетников В П *Поверхностная фотометрия галактик* (СПб: Изд-во СПбГУ, 2003)
- Lynden-Bell D et al. *Astrophys. J.* **326** 19 (1988)
- York D G et al. *Astron. J.* **120** 1579 (2000)
- Stoughton Ch et al. *Astron. J.* **123** 485 (2002)
- Abazajian K et al. *Astron. J.* **129** 1755 (2005)
- Loveday J *Contemp. Phys.* **43** 437 (2002)
- Koo D C, Kron R G *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **30** 613 (1992)
- Sandage A, in *The Deep Universe* (Eds B Binggeli, R Buser) (Berlin: Springer, 1995) p. 1
- Ellis R S *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **35** 389 (1997)
- Metcalfe N et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **323** 795 (2001)
- McCracken H J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **318** 913 (2000)
- Ferguson H C, Dickinson M, Williams R *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **38** 667 (2000)
- Williams R E et al. *Astron. J.* **112** 1335 (1996)
- Williams R E et al. *Astron. J.* **120** 2735 (2000)
- Giacconi R et al. *Astrophys. J. Suppl.* **139** 369 (2002)
- Rosati P et al. *Astrophys. J.* **566** 667 (2002)
- Alexander D M et al. *Astron. J.* **126** 539 (2003)
- Barger A J et al. *Astron. J.* **126** 632 (2003)
- Lehmer B D et al. *Astron. J.* **129** 1 (2005)
- Heidt J et al. *Astron. Astrophys.* **398** 49 (2003)
- Noll S et al. *Astron. Astrophys.* **418** 885 (2004)
- Appenzeller I et al. *Messenger* (116) 18 (2004)
- Kashikawa N et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **56** 1011 (2004)
- Maihara T et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **53** 25 (2001)
- Taniguchi Y et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **57** 165 (2005)
- Kodama T et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **350** 1005 (2004)
- Ouchi M et al. *Astrophys. J.* **620** L1 (2005)
- Wolf C et al. *Astron. Astrophys.* **377** 442 (2001)
- Wolf C et al. *Astron. Astrophys.* **401** 73 (2003)
- Kleinheinrich M et al. *Astron. Astrophys.* (in press); astro-ph/0412615
- Wolf C et al. *Astron. Astrophys.* **421** 913 (2004)
- Giavalisco M et al. *Astrophys. J.* **600** L93 (2004)
- Riess A G et al. *Astrophys. J.* **607** 665 (2004)
- Beckwith S, Somerville R, Stiavelli M *Space Telescope Sci. Inst. Newslett.* **20** (4) 1 (2003)
- Bouwens R J et al. *Astrophys. J.* **616** L79 (2004)
- Shectman S A et al. *Astrophys. J.* **470** 172 (1996)
- Arnouts S et al. *Astron. Astrophys.* **341** 641 (1999)
- Yee H K C et al. *Astrophys. J. Suppl.* **129** 475 (2000)
- Drory N et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **325** 550 (2001)
- Cimatti A et al. *Astron. Astrophys.* **392** 395 (2002)
- Davis M et al. *Proc. SPIE* **4834** 161 (2002); astro-ph/0209419
- Rix H-W et al. *Astrophys. J. Suppl.* **152** 163 (2004)
- Le Fevre O et al. *Astron. Astrophys.* **417** 839 (2004)
- Le Fevre O et al. *Astron. Astrophys.* **439** 845 (2005) (in press); astro-ph/0409133
- Alcala J M et al. *Astron. Astrophys.* **428** 339 (2004)
- Караченцев И Д *Письма в Астрон. журн.* **6** 3 (1980)
- Фатхуллин Т А, Васильев А А, Решетников В П *Письма в Астрон. журн.* **30** 323 (2004)
- Sandage A *Astrophys. J.* **133** 355 (1961)
- Nagashima M et al. *Astrophys. J.* **578** 675 (2002)
- Gardner J P *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **110** 291 (1998)

90. Пиблс Ф Дж Э *Структура Вселенной в больших масштабах* (М.: Мир, 1983)
91. Maller A H et al. *Astrophys. J.* **619** 147 (2005)
92. Jones B J T et al. *Rev. Mod. Phys.* **76** 1211 (2004)
93. Budavari T et al. *Astrophys. J.* **595** 59 (2003)
94. Maroto A L, Ramirez J, astro-ph/0409280
95. Tegmark M et al. *Astrophys. J.* **606** 702 (2004)
96. Краан-Кортевег R C *Rev. Mod. Astron.* (in press); astro-ph/0502217
97. Frith W J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **345** 1049 (2003)
98. Stiavelli M et al. *Astrophys. J.* **622** L1 (2005)
99. Miller L et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **355** 385 (2004)
100. Schechter P *Astrophys. J.* **203** 297 (1976)
101. Norberg P et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **336** 907 (2002)
102. Croton D J et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **356** 1155 (2005)
103. Gabasch A et al. *Astron. Astrophys.* **421** 41 (2004)
104. Fried J W et al. *Astron. Astrophys.* **367** 788 (2001)
105. Pozzetti L et al. *Astron. Astrophys.* **402** 837 (2003)
106. Rudnick G et al. *Astrophys. J.* **599** 847 (2003)
107. Решетников В П, Согникова Н Я *Астрофизика* **36** 435 (1993)
108. Karachentsev I D, Makarov D I, in *Galaxy Interactions at Low and High Redshift* (Eds J E Barnes, D B Sanders) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1999) p. 109
109. Abraham R G et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **279** L47 (1996)
110. Conselice Ch J, Bershadsky M A, Jangren A *Astrophys. J.* **529** 886 (2000)
111. Reshetnikov V P *Astron. Astrophys.* **353** 92 (2000)
112. Conselice Ch J et al. *Astron. J.* **126** 1183 (2003)
113. Hibbard J E, Vacca W D *Astron. J.* **114** 1741 (1997)
114. Elmegreen B G, Elmegreen D M, Hirst A C *Astrophys. J.* **612** 191 (2004)
115. Jogee Sh et al. *Astrophys. J.* **615** L105 (2004)
116. Lilly S et al. *Astrophys. J.* **500** 75 (1998)
117. Barden M et al. *Astrophys. J.* (in press); astro-ph/0502416
118. Ziegler B L et al. *Astrophys. J.* **564** L69 (2002)
119. Reshetnikov V et al. *Astron. Astrophys.* **382** 513 (2002)
120. Reshetnikov V P, Dettmar R-J, Combes F *Astron. Astrophys.* **399** 879 (2003)
121. Kobulnicky H A, Kewley L J *Astrophys. J.* **617** 240 (2004)
122. van der Wel A et al. *Astrophys. J.* **601** L5 (2004)
123. Holden B P et al. *Astrophys. J.* **620** L83 (2005)
124. Treu T, in *Clusters of Galaxies: Probes of Cosmological Structure and Galaxy Evolution* (Carnegie Observatories Astrophys. Ser., Vol. 3, Eds J S Mulchaey, A Dressler, A Oemler) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004) p.178
125. Stern D, Spinrad H *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **111** 1475 (1999)
126. Fan X et al. *Astron. J.* **125** 1649 (2003)
127. Dey A et al. *Astrophys. J.* **498** L93 (1998)
128. Spinrad H, astro-ph/0308411
129. Решетников В П, Васильев А А *Письма в Астрон. журн.* **28** 3 (2002)
130. Ouchi M et al. *Astrophys. J.* **582** 60 (2003)
131. Ouchi M et al. *Astrophys. J.* **611** 685 (2004)
132. Ferguson H C et al. *Astrophys. J.* **600** L107 (2004)
133. Bouwens R J et al. *Astrophys. J.* **611** L1 (2004)
134. Gunn J E, Peterson B A *Astrophys. J.* **142** 1633 (1965)
135. Loeb A, Barkana R *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **39** 19 (2001)
136. Becker R H et al. *Astron. J.* **122** 2850 (2001)
137. Сажин М В *УФН* **174** 197 (2004)
138. Wyithe J S, Loeb A *Astrophys. J.* **586** 693 (2003)
139. Madau P et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **283** 1388 (1996)
140. Bouwens R J et al. *Astrophys. J.* **606** L25 (2004)
141. Heavens A et al. *Nature* **428** 625 (2004)
142. Drory N et al. *Astrophys. J.* **619** L131 (2005)
143. Gott J R et al. *Astrophys. J.* **624** 463 (2005)
144. Чернин А Д *УФН* **171** 1153 (2001)
145. Fall S M, in *Building Galaxies: from the Primordial Universe to the Present* (Eds F Hammer et al.) (Singapore: World Scientific, 2000) p. 463
146. Djorgovski S G, Williams R, astro-ph/0504006

### Sky survey and deep field projects using ground and space based telescopes

#### V.P. Reshetnikov

V.V. Sobolev Astronomical Institute of St. Petersburg State University,  
 Universitetskii prosp. 28, 198504 Petrodvorets, St. Petersburg, Russian Federation  
 Tel. (7-812) 428-41 68  
 Fax (7-812) 428-71 29  
 E-mail: resh@astro.spbu.ru

Work on and some results from major sky survey (DSS, 2MASS, 2dF, SDSS) and deep field (HDF, GOODS, UHDF, etc.) projects of recent years are reviewed. Modern sky surveys provide information on the characteristics and spatial distribution of millions of galaxies, whereas deep fields yield insight into the formation of galaxies and how they evolved for billions of years thereafter. The huge amounts of new observational information are changing the face of modern astronomy — leading to new approaches to problem formulation and problems solution and forcing astronomers to completely revise their knowledge of the Universe, from the solar system to the extremely distant galaxies and quasars.

PACS numbers: **95.80.+p**, **98.62.-g**, **98.65.-r**

Bibliography — 146 references

Received 5 April 2005

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **175** (11) 1163–1183 (2005)

*Physics–Uspekhi* **48** (11) (2005)