Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и
ордена Трудового Красного знамени
государственный университет им. М.В.Ломоносова

Физический факультет

Кафедра астрофизики и звездной астрономии

И. В. Чилингарян

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ЭНЕРГИИ В СПЕКТРЕ.

Допущен к защите Заведующий кафедрой астрофизики и звездной астрономии, профессор, чл.-корр. РАН	Дипломная работа студента 6 курса И. В. Чилингаряна Научный руководитель Зав. ЛСВФО САО РАН
А. М. Черепащук “ ” декабря 2002 года	С. Н. Додонов

Москва 2002

Оглавление

Введение и постановка задачи

Последнее десятилетие ознаменовалось гигантским прорывом в наблюдательной астрофизике. Проведение крупных обзоров (SDSS, 2MASS, 2dF и др.) дало такое количество высококачественного наблюдательного материала, что на его анализ уйдут годы и десятилетия. Эти данные включают информацию о самых различных типах астрономических объектов, как принадлежащих нашей Галактике, так и лежащих далеко за ее пределами.

Обычно для классификации объекта, достаточно проанализировать его спектр в широком диапазоне длин волн, например в оптической области. Спектроскопическая классификация - наиболее надежный метод, но в некоторых случаях его применение сильно затруднено. В случае обзорной задачи при современном состоянии астрономической светоприемной техники возможно получить фотометрические данные высокого качества для нескольких тысяч объектов в нескольких светофильтрах за один наблюдательный сет при помощи CCD-приемника. За такое же время, на том же телескопе можно получить спектры нескольких десятков, в случае применения специальных методов, до сотни объектов. При этом предельная звездная величина для фотометрических наблюдений будет на $3^m - 4^m$ глубже, чем для спектральных. Возникает вопрос – возможно ли классифицировать наблюдаемые объекты, используя только данные, получаемые при анализе прямых снимков? *Под фотометрической классификацией будем понимать определение принадлежности объекта к тому или иному типу и определения ряда его основных параметров (спектральный класс и класс светимости для звезд, красное смещение и тип для внегалактических объектов).* С классификацией тесно связана проблема фотометрической селекции объектов, то есть выбора наиболее интересных объектов для более детального исследования из больших выборок.

Историческая справка

Впервые проблема фотометрической классификации была затронута в 60-х годах.

В 1962-м году Баум [1] разработал метод для фотометрического измерения красных смещений. Он использовал фотоэлектрический фотометр в 9 спектральных полосах от 3730Å до 9875Å. В данной фотометрической системе он пронаблюдал 6 ярких эллиптических галактик из скопления Девы и построил спектральные распределения энергии для них. Затем он пронаблюдал 3 эллиптические галактики в другом скоплении (CL0925+2044, также известном как Abell 0801). При построении среднего распределения энергии в спектре для первой и второй выборок на одном графике, где длина волны задана в логарифмическом масштабе, он измерил "продольный" сдвиг распределения для второй выборки по оси длин волн, и определил красное смещение скопления Abell 0801. Его значение $z=0.19$ очень хорошо совпало со спектральными измерениями ($z=0.192$), что позволило ему расширить его метод на более далекие скопления галактик, наиболее удаленное из которых оказалось на $z=0.46$. Метод использовал только одну заметную спектральную деталь – скачок на длине волны 4000Å, что позволяло применять его только к галактикам ранних хаббловских типов.

Работы, посвященные фотометрическому определению красных смещений квазаров при помощи двуцветных диаграмм, начали появляться с 1963 года, практически одновременно с выходом работы Баума [2]. На диаграммах выделялись области локализации квазаров и строились линии одинаковых красных смещений (изо-z линии). В 1985 году появилась работа Ку [3], в которой помимо определения красного смещения проводилось определение типа галактики. Ее принципиальными отличиями от [1] являются использование фотопластинок вместо фотометра, что позволило измерить красные смещения сразу для большого числа галактик, использование 4-х фильтров вместо 9 (примерно соответствуют UB(VR)I-системе) и использование теоретических моделей галактик различных типов вместо построения эмпирических распределений энергии по близким объектам.

Первая крупная работа, касающаяся классификации звезд фотометрическими методами, вышла в 1974 году под названием "Введение в звездную фотометрию" (М. Голэ). В ней дается обзор фотометрических систем того времени. Вскоре после нее вышла в свет великолепная монография В. Страйжиса "Многоцветная фотометрия звезд" [4], в которой впервые подробно рассмотрен процесс расчета, создания и практического применения фотометрической системы (вильнюсская среднеполосная система) для конкретной задачи – детальной спектральной классификации звезд. Здесь подробно рассматривается классификация звезд как с помощью двуцветных диаграмм, так и при использовании Q-параметров, которые свободны от межзвездной экстинкции.

В 1986 году появилась работа [5], в которой изложен подход, являющийся основой для метода, используемого в данной работе. Ло и Спиллар использовали CCD-детектор и набор из 6 нестандартных фильтров в диапазоне 4000Å - 9500Å. Они получили фотометрические красные смещения для нескольких сотен галактик около скопления 0024+1654. При этом использовалась библиотека шаблонных (далее по тексту template) спектров, содержащая спектры звезд и галактик различных типов. Каждый из объектов отождествлялся либо как галактика какого-либо типа с каким-либо красным смещением, либо как звезда. Для сравнения наблюдаемых потоков с template-потоками использовался метод минимизации χ^2. В настоящее время общепринятым названием для данного метода является SED-fitting. Из наблюдавшихся объектов для 34-х были известны спектроскопические красные смещения. Для них стандартное отклонение $(z_{phot} - z_{spec})$ составило 0.12.

В 90-х годах произошел очередной всплеск интереса к фотометрическим методам классификации, в частности методам фотометрической селекции кандидатов в далекие объекты, что было связано с появлением новых обзорных задач. Стали активно развиваться методы, позволяющие наиболее достоверно проводить классификацию. Выделилось несколько научных коллективов, каждый из которых развивает свои подходы к ней.

Группа немецких исследователей из Института Астрофизики им. Макса Планка в 90-е годы проводила обзор CADIS (Calar Alto Deep Imaging Survey) [6, 7], который являлся главным астрофизическим проектом института. Общая площадь обзора составила около 0.3□° в 10 полях. Предельная звездная величина обзора - около 24^m. Набор фильтров в проекте включал 3 широкополосных (B, R, K), до 13 среднеполосных ($R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 15...50$) и эталон Фабри-Перо, с помощью которого делались "сканы" со спектральным разрешением $R \sim 450$. Обзор выполнялся на 2.2 и 3.5 метровых телескопах обсерватории Калар-Альто. Главной задачей обзора являлся поиск слабых эмиссионных галактик на средних (0.2 ... 1.4) и очень больших (4.7, 5.7, 6.5) красных смещениях, а его многоцветный характер сделал возможным детектирование и классификацию сотен галактик ранних типов, слабых квазаров и предельно слабых звезд нашей галактики. Исследователи применяли методы фотометрической классификации с помощью двуцветных диаграмм. Недостатком обзора является его направленность на поиск далеких объектов со строго определенными красными смещениями. В результате было обнаружено несколько десятков квазаров, около половины из которых имеет $z > 2$, несколько кандидатов в $Ly\alpha$ эмиттеры на z=5.7. Помимо этого по результатам обзора CADIS вышло несколько работ, посвященных фотометрическим красным смещениям и классификации объектов, а также глубоким подсчетам объектов различных типов [8].

В середине 90-х годов международной научной группой в составе американских, австралийских и английских исследователей был проведен Глубокий Многоцветный обзор (Deep Multicolor Survey) [9, 10, 11]. Они использовали 4-х метровый телескоп обсерватории Китт-Пик для получения изображений области неба размером 0.83□° в 6 фильтрах от 3000Å до 10000Å с предельной звездной величиной от 22.1 до 23.8. Для селекции кандидатов в далекие объекты использовались двуцветные диаграммы, но в дополнение к общепринятому методу, когда на них наносятся точки, соответствующие известным объектам, были добавлены модельные значения цветов квазаров, полученные с использованием средних спектров квазаров. Первым результатом явилось открытие сразу более 40 слабых квазаров, один из которых имел $z > 4$. Обратило на себя внимание значительное превышение наблюдаемого количества квазаров по сравнению с предсказываемым в работах Крона и Ку конца 80-х.

В конце 1995 года на Космическом телескопе им. Хаббла был проведен обзор, получивший название Hubble Deep Field (Глубокое поле) [12]. Он включал в себя глубокие (до 30^m) прямые снимки области северного неба, в которой отсутствуют яркие звезды, полученные в 4 широких фильтрах в ближнем УФ и оптическом диапазонах с помощью камеры WFPC2, и снимки соседней площадки в ближнем ИК диапазоне, полученные с инфракрасной камерой NICMOS. Через 3 года обзор был продолжен на южном небе (HDFS) , при этом, помимо изображений в 4-х фильтрах на WFPC2 и глубоких снимков в 3-х фильтрах с NICMOS [13], была проведена ультрафиолетовая спектроскопия квазара $z = 2.24$, находящегося неподалеку, с помощью STIS. Несмотря на относительно небольшую площадь, охватываемую Глубокими полями, данные представляют огромную научную ценность, поскольку они получены с очень высоким угловым разрешением (0.1 arcsec), недоступным при наблюдениях с Земли. Анализ результатов обзора проводится по сей день несколькими группами исследователей. На результатах одной из них, включающей K. Lanzetta, A. Yahil, A. Fernandez-Soto, H.-W. Chen из Нью-Йоркского университета Стоуни Брук, стоит остановиться подробнее.

В 1998 году появилась работа этой команды, посвященная открытию пары галактик с $z = 5.34$ на HDF [14]. Объекты были отобраны для спектроскопии по цветовому критерию – показатель цвета V-I составлял около 2.5^m при относительно плоском SED в синих фильтрах. Фотометрическое красное смещение составило 5.7. Спектры галактик были получены на 10-метровом телескопе им. Кека, и очень большое красное смещение подтвердилось. Как будет показано ниже, наличие данных в ближнем ИК диапазоне спектра сильно облегчает фотометрическую классификацию. Поэтому широкое поле для фотометрических методов открыл NICMOS-участок HDF-S (1.01 sq arcmin), который впоследствии был снят в U,B,V,R,I фильтрах на 8-метровом телескопе VLT. Используя совместно данные HDF и VLT, был составлен каталог фотометрических красных смещений объектов в этом поле, который включал 335 слабых объектов [15]. 21 галактика имеет $z_{phot} > 5$, 8 - $z_{phot} > 10$ и всего

11 галактик E/S0, 5 из которых имеют $z_{phot} > 1$. Кандидаты в галактики с $z > 10$ не подтверждены до сих пор, так как в настоящее время не представляется возможным получить спектр объекта 27-й величины на длине волны 1.6 мкм. При фотометрическом определении z использовалось представление данных в виде SED и метод максимального правдоподобия для их сравнения с модельными данными.

Стоит отметить, что на настоящее время примерно треть всех галактик с $z > 5$, которых известно около двух десятков, открыто в HDF(S).

В конце 90-х годов стартовал очень крупный обзорный проект, в котором предполагается получить прямые снимки в 5 цветах до 22-й звездной величины и спектры выделенных объектов до 19 величины для четверти всей небесной сферы вокруг северного полюса Галактики и трех полос в районе южного полюса с более глубоким пределом. Проект получил название Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [16]. Общая площадь неба, которую предполагается охватить, составляет около 10000 квадратных градусов. Организатором проекта является коллаборация из более чем 150 астрономических институтов и обсерваторий со всего мира. Окончание обзора планируется в 2006 году.

Система фильтров SDSS разрабатывалась специально для облегчения фотометрической классификации. Она содержит 5 фильтров: u', аналогичный фильтру U Джонсоновской системы; g', широкий фильтр с центральной длиной волны около 4700Å; r', аналогичный фильтру R и два фильтра i' и z', кривые пропускания которых представляют из себя "разделенную" на две части кривую для фильтра I. Данный набор фильтров специально разрабатывался для быстрого выбора объектов, представляющих особый интерес для спектроскопии. За последние годы вышел ряд работ, посвященных фотометрической классификации объектов в SDSS, при этом используется метод двуцветных диаграмм для нескольких комбинаций цветов. Разделение фильтра I на 2 части позволяет в значительной степени избавиться от проблем классификации, связанных с разделением далеких квазаров и красных звезд. Однако в некоторых случаях, как, например, при открытии квазара на $z = 6.2$, привлекаются дополнительные данные. На настоящий момент обзор еще не закончен, но по данным SDSS уже открыто несколько десятков квазаров с $z > 4$, один из которых с $z = 6.2$ на настоящий момент является самым далеким из известных. Он был открыт с использованием данных другого крупного обзора – 2MASS. Помимо поиска далеких квазаров в SDSS очень успешно идет программа поиска слабых звезд нашей Галактики – коричневых карликов.

Примерно в одно время с SDSS начался инфракрасный обзор всего неба 2MASS (The 2 Micron All Sky Survey) [17], целью которого было получение прямых снимков всего неба в трех фотометрических полосах в ближней ИК области – J (1.25 мкм), H (1.65 мкм) и K_s (2.17 мкм). Предельная величина этого обзора на $2.5^m - 3^m$ ниже, чем у SDSS, но совместное использование данных этих двух обзоров открывает широкие возможности для селекции и классификации объектов фотометрическими методами в первую очередь благодаря широкому спектральному диапазону, покрываемому системами фильтров SDSS и 2MASS.

Постановка задачи

В настоящее время для решения задач фотометрической классификации методом SED-fitting существует свободно распространяемый программный пакет HyperZ [18], написанный на языке программирования Фортран, первая версия HyperZ вышла в 1995 году. Он обладает рядом существенных недостатков, кратко описанных ниже.

- Язык и стиль программирования, а также большие размеры исходных текстов делают весьма трудоемким процесс любой модификации и модернизации алгоритмов работы пакета.

- В библиотеке template-спектров, используемых для моделирования распределения энергии в спектрах объектов при создании гипер-куба, отсутствуют звезды, все типы галактик с активными ядрами, а все имеющиеся спектры для нормальных галактик являются модельными.

- Алгоритмы работы пакета не оптимизированы под работу с большими объемами данных.
- Отсутствует возможность удобного представления результатов работы пакета.

Первой из основных задач данной работы является создание легкомодернизируемого и переносимого пакета программ для фотометрической классификации объектов. Она включает в себя:

1) *создание наиболее полной библиотеки template-спектров и как следствие разработка и реализация алгоритмов создания композитных спектров;*
2) *создание высокопроизводительных алгоритмов SED-fitting, оптимизированных для работы с большими объемами данных, и реализация их в виде платформенно-независимого программного пакета на языке IDL с удобным пользовательским интерфейсом;*
3) *разработка наглядного способа отображения результатов классификации;*
4) *тестирование программного пакета на модельных и реальных данных.*

Результаты фотометрической классификации нуждаются в экспериментальной проверке с помощью спектроскопии.

Для ряда задач, в том числе для массовой спектроскопии предельно-слабых объектов, в ЛСВФО САО РАН был создан многощелевой блок для многофункционального редуктора светосилы SCORPIO. С его помощью на 6-метровом телескопе САО РАН возможно одновременно получать спектры до 16 объектов 24-й величины в поле 6'x4'.

Вторая основная задача данной работы – разработка методики подготовки и проведения наблюдений в многощелевом варианте работы SCORPIO:

1) *создание и реализация алгоритмов расстановки щелей;*
2) *создание программного обеспечения для расчета коррекций позиций щелей во время наблюдений, который необходим в связи с недостаточной*

точностью наведения телескопа, как следствие – создание программы для быстрой автоматической астрометрической калибровки прямых снимков;

Третьей основной задачей является проведение фотометрической классификации объектов в поле Q2203+29 методом SED-fitting и анализ полученных результатов.

В первой главе данной работы содержится развернутое описание математического и статистического аппарата, используемого для решения задач фотометрической классификации. Во второй главе дано описание библиотеки template-спектров, используемой в классификации и алгоритмов построения композитных спектров. Третья глава описывает программный пакет SED-fitting. Четвертая глава посвящена методике проведения наблюдений с использованием многофункционального редуктора светосилы SCORPIO в режиме многощелевой спектроскопии. В пятой главе содержатся результаты фотометрической классификации объектов в поле Q2203+29. В заключительной главе содержатся основные выводы.

Глава 1

Математический аппарат классификации

Математический и статистический подход к классификации объектов по фотометрическим данным можно разделить на три уровня. Под первым уровнем будем понимать способ использования фотометрических данных, под вторым – алгоритм, применяемый для работы с данными, а под третьим – дополнительную коррекцию результатов, проводимую за счет привлечения дополнительных сведений. Выбор верного пути по этим уровням в значительной мере определяет успех классификации.

1.1 Первый уровень обработки фотометрических данных – способы представления данных

Данные, получаемые в результате обработки наблюдений, представляют из себя потоки излучения от объектов в каждом фильтре. Существует несколько вариантов представления этих данных для дальнейшей обработки.

1. Первый вариант – вычисление показателей цвета объектов, то есть разностей звездных величин, получаемых из потоков в каждом фильтре. Общепринятым в настоящее время является использование так называемых AB-величин, предложенных Oke [19]. В этом случае применяются F_ν-потоки. Звездная величина в фильтре вычисляется по формуле:

$$AB = -2.5 \lg \frac{\int F_\nu(\nu) D(\nu) d\nu}{\int D(\nu) d\nu} - 48.61 \tag{1.1}$$

где F_ν выражено в $erg \cdot cm^{-2}s^{-1}Hz^{-1}$, а $D(\nu)$ – кривая пропускания фильтра.

Группа немецких исследователей из института им.Макса Планка (обзор CADIS), которая работает с показателям цветов объектов, использует звездные величины, получаемые из потоков от объектов, выраженных в $\gamma \cdot m^{-2}s^{-1}\text{Å}^{-1}$, как принято в рентгеновской астрономии.

Далее можно строить двуцветные диаграммы для различных комбинаций показателей цвета и пытаться разделять различные типы объектов по областям локализации на этих диаграммах. Такие работы проводятся с начала 60-х годов. Сейчас этот подход развивает вышеупомянутая группа немецких исследователей. Он же используется при выборе объектов для спектроскопии в обзоре SDSS. Как показано в работах [6, 7], при помощи анализа значений показателей цвета в ситуации с большим числом фильтров, становится возможным довольно точное определение красного смещения для внегалактических объектов (ошибка в определении z меньше 0.1).

В настоящее время в связи с мощным и быстрым развитием вычислительных средств становится возможным строить классификацию объектов в многомерном пространстве цветов при помощи методов кластерного анализа, когда каждому типу объектов соответствуют свои области связности.

Серьезным недостатком подхода, использующего показатели цвета, можно считать увеличение ошибок при их нахождении за счет того, что обе звездные величины, используемые в расчетах, известны с ошибками, соответственно взятие их разности увеличивает абсолютную и относительную ошибки значения показателя цвета.

2. Второй вариант, который в настоящее время активно используется значительной частью научных коллективов, работающих по данной тематике, заключается в построении зависимостей потока (AB-величины, показателя цвета) от длины волны или частоты, и дальнейшем анализе этой зависимости. В случае использования потоков данная зависимость называется

распределением энергии в спектре объекта (Spectral Energy Distribution, SED) и представляет собой, по сути, низкодисперсионный спектр объекта. После этого производится сравнение SED классифицируемых объектов с SED объектов известного типа и красного смещения, либо с модельными данными. Первым исследователем, применивших этот метод для поиска внегалактических объектов, был Баум в 1962 году (см гл. 1).

Теперь можно рассмотреть, в каком виде лучше представлять данные при работе с распределениями энергии в спектрах:

(a) Первый способ – представление данных в виде потоков в фильтрах, то есть непосредственное использование выходных данных фотометрии прямых изображений. В этом случае при сравнении распределений энергии в спектрах для объектов разной яркости необходимо найти нормировочный коэффициент, который достаточно просто определяется при использовании метода минимизации χ^2 или максимального правдоподобия (см. ниже). При этом данный способ наиболее удобен с точки зрения расчетов.

(b) Второй способ – представление потоков от объектов в звездных величинах. В этом случае, в связи с логарифмическим характером звездных величин, коэффициент нормировки превращается в аддитивную константу. В этом случае упрощаются расчеты в случае использования многомерного полиномиального приближения модельных данных, но появляются проблемы, связанные со слабыми объектами, когда поток близок к нулю и соответственно звездная величина будет иметь большие ошибки, либо вовсе не будет определена в случае отрицательного значения потока. Выход из этой ситуации заключается в использовании так называемых asinh-величин [20].

(c) Третий способ – использование показателей цвета от объектов, в данном случае – разностей звездных величин в соседних фильтрах. По сути это численное дифференцирование SED, полученного вторым способом. В этом случае зависимости показателей цвета от длины волны для объектов с различной яркостью, но одинаковым видом спектра, будут совпадать с точностью до ошибок определения показателей цвета. Тогда мощные эмиссионные/абсорбционные детали в спектре будут приводить к скачкам показателей цвета в соседних точках через ноль. Основной недостаток такого представления, уже отмеченный выше - это увеличение ошибок при определении показателей цвета для слабых объектов.

В целом с математической точки зрения все три способа были бы идентичны при высоком отношении сигнал/шум, но на практике в случае предельно слабых объектов (малое отношение сигнал/шум) лучше использовать первый способ представления, при средних отношениях сигнал/шум возможно использование второго способа, а при высоких – третьего. В данной работе используется первый способ, то есть работа с распределениями энергии в спектрах ведется в терминах потоков (F_λ). Это позволяет работать во всем диапазоне отношений сигнал/шум, что необходимо для успешной классификации объектов в глубоких полях.

1.2 Второй уровень обработки фотометрических данных – математический и статистический аппарат

Данный раздел содержит описание математических и статистических алгоритмов, предназначенных для второго варианта представления фотометрических данных. Все математические выкладки для методов аппроксимации распределений энергии в спектрах будут приведены для представления данных в виде потоков (F_λ). Они могут быть достаточно просто преобразованы к виду, использующему данные в любой из двух оставшихся форм.

1.2.1 Методы минимизации χ^2 и максимального правдоподобия

В качестве входных данных мы имеем значения потоков от объекта в N фильтрах, их ошибки, шаблонный (template) спектр и кривые пропускания используемых светофильтров. Обозначим наблюдаемые потоки как F_i, их ошибки как ΔF_i, кривые пропускания фильтров как $D_i(\lambda)$, распределение энергии в template-спектре как $S(\lambda)$, модельные потоки как T_i. Предполагается, что наблюдаемые потоки исправлены за спектральную чувствительность приемника.

Тогда

$$T_i = \int\limits_0 S(\lambda)D_i(\lambda)d\lambda \tag{1.2}$$

Критерий χ^2 вычисляется следующим образом:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N} \frac{(\alpha T_i - F_i)^2}{\Delta F_i^2} \tag{1.3}$$

Где нормировочный множитель α можно вычислить, исходя из соображений о минимуме χ^2, при фиксированных значениях потоков, продифференцировав выражение для χ^2 по α и приравняв значение производной 0, откуда получаем:

$$\alpha = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N} \frac{T_i F_i}{\Delta F_i^2}}{\sum\limits_{i=1}^{N} \frac{T_i^2}{\Delta F_i^2}} \tag{1.4}$$

Вычислив значение χ^2 легко вычислить критерий значимости:

$$P(\chi^2) = \frac{\int\limits_{\chi^2} e^{-t} t^{\frac{N}{2}-1} dt}{\int\limits_0 e^{-t} t^{\frac{N}{2}-1} dt} \tag{1.5}$$

В качестве наиболее простого примера рассмотрим попытку проклассифицировать объект как звезду. Для этого необходимо построить модельные потоки для звезд из какой-либо библиотеки звездных спектров, например Pickles, взятых в определенной последовательности, скажем по спектральным классам. Тогда после вычисления значения χ^2 для каждого типа спектра будет получена зависимость критерия значимости каждого такого определения от спектрального класса и класса светимости, что позволит сделать вывод, что, к примеру, объект N классифицируется как звезда K4V с погрешностью 1 спектральный подкласс с вероятностью 70%.

Входные данные для метода максимального правдоподобия такие же, как и в предыдущем случае, но вместо минимизации χ^2 вычисляется значение и производится максимизация так называемой функции правдоподобия L:

$$-\ln L + const = \sum_{i=1}^{N} \frac{(\alpha T_i - F_i)^2}{2\Delta F_i^2} \tag{1.6}$$

С математической точки зрения данная процедура абсолютно идентична минимизации χ^2, различие заключается лишь в обозначениях.

1.2.2 Методы многомерной полиномиальной аппроксимации

Принципиально другим является подход к фотометрической классификации объектов, использующий так называемые тренировочные наборы данных, то есть фотометрические данные для объектов известного типа (в частном случае красного смещения) в тех же фильтрах. В качестве тренировочного набора данных можно брать результаты моделирования. Вначале неким образом производится параметризация распределений энергии в спектрах объектов из тренировочного набора. Затем производится аппроксимация зависимости искомых параметров объекта (типа объекта, красного смещения, спектрального класса и т.п.) от этих распределений, обычно с помощью многомерного полиномиального фиттинга. В результате можно определить искомые параметры для неизвестного объекта, подставив параметризацию его SED в аппроксимацию данной зависимости.

Математически данная задача довольно сложна, и в настоящее время один из наиболее популярных подходов к ее решению заключается в использовании искусственных нейронных сетей [23, 24].

Нейронные сети неоднократно успешно использовались в астрономии, в частности, для морфологической классификации галактик [25], для морфологического разделения звезд и галактик [21, 22] и спектральной классификации звезд [26, 27, 28]. С математической точки зрения нейронная сеть представляет собой нелинейный оператор, действуя которым на входные данные, можно получить результат определенного вида на выходе. Обычно нейронные сети для наглядности представляют как совокупность нескольких уровней – входного, одного или более скрытых и выходного. При этом каждый узел сети соединен со всеми узлами предыдущего уровня и со всеми узлами следующего уровня. Архитектура нейронной сети может быть описана соотношением $N_{in} : N_1 : N_2 : \ldots : N_{out}$, где N_{in} – число входных узлов, N_i – число узлов на i-м скрытом уровне и N_{out} – число выходов. Каждая связь между узлами имеет вес и все они для каждого из уровней образуют вектор весовых коэффициентов.

Рассмотрим процесс поиска красного смещения для внегалактических объектов. На вход нейронной сети подаются потоки или AB-величины в каждом из фильтров, на выходе получается значение красного смещения. Перед использованием нейронных сетей для получения корректных результатов необходимо провести так называемый процесс тренировки сети. Для этого на вход подаются данные их тренировочного набора, а на выход – известное z. Тогда в процессе тренировки нейронной сети производится ее оптимизация при помощи минимизации остаточной функции:

$$E = \frac{1}{2}\sum_k [z_k - F(w, x_k)]^2 \tag{1.7}$$

где функция $F(w, x_k)$ задается сетью. Передаточная функция g_p, заданная в каждом узле p, берет в качестве аргумента

$$u_p = \sum_j w_j x_j \tag{1.8}$$

где сумма берется по всем входным узлам для узла p. Она обычно выбирается таким образом, чтобы входной аргумент мог принимать произвольные значения, а выходные значения лежали бы в строго ограниченном диапазоне. По аналогии с биологией в качестве передаточной функции обычно используют какую-либо из сигмоидных функций, к примеру $g_p(u_p) = 1/[1 + \exp(-u_p)]$, то есть функцию, график которой похож на букву S. Комбинация g_p по всей сети формирует функцию $F(w, x_k)$. В процессе тренировки нейронной сети необходимо делать проверку работоспособности с помощью выборки данных из тренировочного набора, имеющих те же статистические характеристики, что и данные, используемые для тренировки; при этом веса связей замораживаются [24].

Как показано в работах [23, 24] применение нейронных сетей для метода, использующего тренировочные наборы данных, дает результаты не хуже методов минимизации χ^2, а зачастую намного лучше.

Если необходимо производить вероятностные оценки, то есть, например, получить плотность вероятности от красного смещения, необходимо построить нейронную сеть с большим количеством выходов, каждый из которых будет соответствовать шагу по z. Во время тренировки необходимо задавать "1" только на выходе, соответствующем правильному красному смещению, а на всех остальных "0". Тогда в результате применения нейронной сети к входным данным на каждом из выходов будет получаться соответствующее значение плотности вероятности.

У метода использующего нейронные сети есть один достаточно большой недостаток – даже при использовании современных вычислительных средств время, затрачиваемое на тренировку нейронной сети, достигает нескольких часов, в отличие от метода минимизации χ^2, при правильной реализации которого несколько тысяч объектов будут обработаны меньше, чем за минуту.

1.3 Третий уровень обработки фотометрических данных – использование дополнительных сведений

После проведения второго этапа обработки может оказаться, что часть объектов примерно равновероятно классифицируется по различным типам и/или красным смещениям. При этом в ряде случаев некоторые варианты можно отбросить, если привлечь дополнительные сведения.

Например, если объект 18-й звездной величины равновероятно классифицируется как квазар с красным смещением 4.0 и эллиптическая галактика с красным смещением 3.9, то второй вариант физически не реализуем, если принять во внимание расстояние, определяемое по значению z, и диапазон светимостей квазаров и галактик. Здесь дополнительной информацией служат функции светимости соответствующих типов объектов.

Другим видом дополнительной информации является морфология объекта. Если объект на прямом снимке имеет протяженный вид, а классифицируется либо как звезда спектрального класса K, либо как галактика с небольшим красным смещением, то первый вариант отбрасывается, так как звезда должна быть точечным объектом, то есть ее форма не может сильно отличаться от средней PSF по полю.

Наиболее неоднозначной является ситуация, когда слабый объект класси-

Таблица 1.1: Нижние пределы на яркость звезд, наблюдаемых на высоких галактических широтах

Sp,Lum	M	R,kpc	m_{lim}	Sp,Lum	M	R,kpc	m_{lim}
OI-V	-4..-9	0.5	4	FV-VI	5..1	0.5	13
BI-V	0..-8	0.5	8	GV-VI	7..3	25	24
AI-IV	-1..-8	0.5	7	KV-VI	9..5	25	26
FI-IV	0..-7	25	17	MV-VI	17..8	25	>30
GI-IV	2..-7	25	19	LV	>17	25	>30
KI-IV	4..-7	25	21	WD	16..8	25	>30
MI-IV	4..-7	25	21	PLN*	8..0	25	25
AV-VI	3..-1	0.5	11				

фицируется как звезда и как квазар либо галактика с большим красным смещением. Здесь морфологический критерий не работает, функции светимости далеких объектов известны не очень хорошо. Но в случае если наблюдается поле на высоких галактических широтах, можно наложить ограничения на яркость звезд поля, принимая во внимание звездное население, которое присутствует на данных направлениях в Галактике. Здесь приводится таблица 1.1 , в которой содержится информация о различных типах звезд, которые можно встретить на высоких галактических широтах. В первой колонке содержится информация о спектральном классе и классе светимости звезд, во второй – диапазон абсолютных звездных величин в фильтре V, в третьей – максимальное расстояние, на котором можно встретить данные звезды, и в четвертой – минимальную яркость, которую они могут иметь.

Используя данные из таблицы, в некоторых случаях можно уверенно отделить звезды от далеких галактик и квазаров. К примеру, если объект классифицируется примерно равновероятно как далекий объект и как звезда, и при этом его яркость существенно слабее значения из третьей колонки таблицы, то предпочтение отдается первому варианту классификации.

Глава 2

Библиотека template-спектров

В задаче классификации объектов по распределениям энергии в спектрах одним из ключевых этапов является создание библиотеки template-спектров, максимально широко охватывающих многообразие наблюдаемых объектов. Она должна включать данные как для внегалактических объектов, так и для объектов нашей Галактики, в первую очередь, звезд.

2.1 Звездные template-спектры

В настоящее время наиболее полная библиотека звездных спектров собрана в работе [29]. Главное ее назначение – использование для популяционного синтеза спектров. Библиотека Pickles была полностью включена в набор template-спектров, используемый в данной работе.

В связи со спецификой задач, на которые рассчитана библиотека Pickles, и сравнительно давним временем появления в ней отсутствуют данные для некоторых типов звезд, присутствие которых необходимо в наборе спектров, предназначенного для проведения фотометрической классификации объектов. В первую очередь, это слабые красные карлики спектрального класса L и позднего M, форма спектра которых довольно сильно отличается от M6V, которым "завершается"главная последовательность в библиотеке Pickles. В 2000-м году вышла работа группы английских авторов, содержащая набор спектров маломассивных красных звезд [30]. Ряд спектров из этой библиотеки, по одному для каждого спектрального класса, был добавлен к набору Pickles.

Таким образом в текущем наборе звездных спектров отсутствуют только белые карлики. Это не создает дополнительных проблем с отделением звезд от внегалактических объектов в процессе классификации, так как форма спектров белых карликов в диапазоне длин волн 3000Å-10000Å не сильно (не более 5%) отличается от спектров горячих звезд главной последовательности. Это не позволит их отделить от нормальных звезд при помощи математических методов, лишь привлечение дополнительных сведений о яркости объектов (таблица 1.1) разрешает данную проблему.

2.2 Template-спектры внегалактических объектов

Template-спектры внегалактических объектов описаны в большом количестве работ, но наиболее полно они представлены в работе Kinney et al. [32], вышедшей в 1996 году. Библиотека спектров, представленная в ней содержит спектры всех типов нормальных галактик по классификации Хаббла, template-спектр балджа, 6 спектров галактик со вспышкой звездообразования с различной величиной внутригалактического поглощения, а также спектры активных галактик – LINER, Сейферт 2, Сейферт 1 и квазар. В дополнение к этому представлен модельный спектр сейфертовской галактики NGC 1068. С помощью данных, представленных в этой работе, возможна классификация внегалактических объектов в диапазоне красных смещений от 0 до 2, так как спектры с ультрафиолетового конца обрывались в районе линии $Ly\alpha$, которая появляется в оптическом диапазоне, начиная с $z = 2$. Ультрафиолетовый диапазон template-спектров из [32] оставляет желать лучшего с точки зрения отношения сигнал/шум, поэтому было решено построить композитные спектры в этом диапазоне с использованием доступных данных космической UV-спектроскопии. В настоящее время публично доступны все данные с IUE (International Ultraviolet Explorer) и HUT (Hopkins Ultraviolet Telescope) по адресу http://archive.stsci.edu/.

Спектры квазаров имеют довольно широкие диапазоны наклонов степенного континуума и эквивалентных ширин эмиссионных линий, из-за чего было решено построить сетку композитных спектров. Для построения далекой уль-

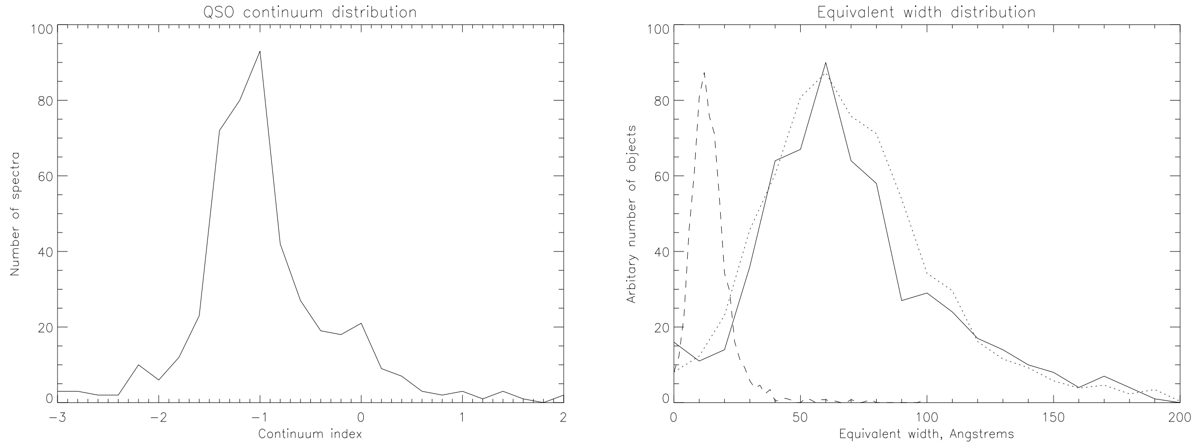

Рис. 2.1: Распределения спектров квазаров по наклону степенного континуума (слева) и эквивалентным ширинам эмиссионных линий (справа). На правом рисунке сплошной график соответствует $Ly\alpha$, штриховой – $CIII$. Точечный график соответствует распределению по эквивалентным ширинам $CIII$, растянутому по абсциссе в 5 раз.

трафиолетовой части спектров (короче 1700Å) использовались данные IUE и HUT, для более длинноволнового диапазона помимо данных IUE были использованы открытые данные из архива SDSS – всего около 2000 оптических спектров далеких квазаров с красными смещениями от 0.5 до 3.0.

Для того, чтобы создать сетку template-спектров, наиболее хорошо отражающую все разнообразие спектров квазаров, были построены распределения имеющихся индивидуальных спектров по наклонам континуума и эквивалентным ширинам эмиссионных линий (рис. 2.1). В результате вся выборка была разделена на 9 частей: 3 вида спектров по эквивалентным ширинам линий и 3 по наклонам континуума. Количество индивидуальных спектров каждого типа приведено в таблице 2.1. В далекой ультрафиолетовой области в качестве критерия отбора использовалась эквивалентная ширина $Ly\alpha + NV$, в более длинноволновом диапазоне – эквивалентная ширина линии $CIII, \lambda = 1909$Å. Распределения спектров по эквивалентным ширинам этих линий практически совпадают по форме с точностью до отношения 5, что проиллюстрировано рисунком 2.1

Таблица 2.1: Количество спектров каждого типа, использовавшихся для построения сетки композитных спектров квазаров.

C_{idx}, $W_{Ly\alpha}$	$W_{Ly\alpha} \le 70$Å	70Å$\le W_{Ly\alpha} \le 150$Å	$W_{Ly\alpha} \ge 150$Å
$C_{idx} \le -1.5$	768	610	178
$-1.5 \le C_{idx} \le -0.6$	329	531	63
$C_{idx} \ge -0.6$	67	136	87

2.3 Построение композитных спектров внегалактических объектов

Основным преимуществом использования ультрафиолетовых данных, вместо оптических для объектов подобного типа, например квазаров, находящихся на значительных красных смещениях, когда ультрафиолетовый диапазон попадает в оптическую область спектра, является отсутствие межгалактического поглощения на длинах волн короче 1216Å($Ly\alpha$-forest), поскольку появляется возможность использовать данные для сравнительно близких объектов (Рис. 2.2). Наличие межгалактического поглощения для объектов с большими красными смещениями при построении композитного спектра вызывает ошибку в определении отношений потоков в линиях (в случае эмиссионного спектра), если одна из линий имеет длину волны, короче чем $Ly\alpha$, либо является $Ly\alpha$. *В случае эмиссионных спектров нормировка потока обычно делается на саму $Ly\alpha$ [31, 34], что при использовании спектров далеких объектов вызывает систематическое завышение отношения потоков для всех линий с длинами волн больше 1216Å и занижение для линий с длинами волн короче 1216Å.*

2.3.1 Предварительная обработка УФ-спектров

Предварительная обработка блока спектров IUE и HUT заключается в учете поглощения внутри Галактики для каждого объекта, приведении длин волн к покоящейся системе отсчета (далее по тексту restframe), отметке непригодных к использованию диапазонов длин волн в каждом спектре и рассортировке

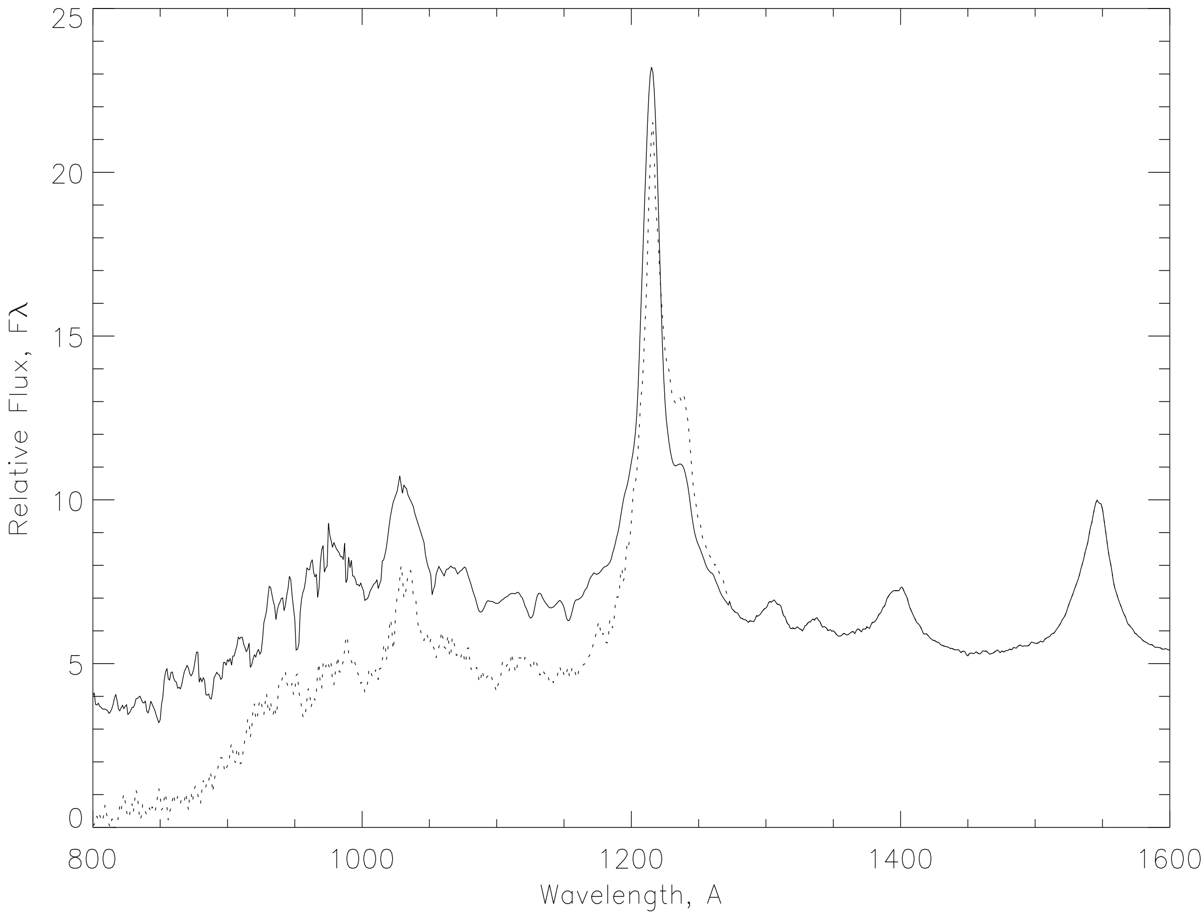

Рис. 2.2: Сравнение композитного спектра квазара в далекой ультрафиолетовой области, полученного в рамках этой работы по данным космической UV-спектроскопии (сплошной график), со спектром из работы [34], построенным на основе оптических спектров далеких квазаров (пунктирный график).

спектров по типам объектов.

Недостатком ультрафиолетовых спектров, полученных из околоземного пространства, является наличие мощных эмиссионных линий в ультрафиолетовом диапазоне, возникающих в верхних слоях земной атмосферы. Области спектра объекта, куда они попадают, обычно оказываются непригодными к использованию и должны исключаться из процесса создания композитного спектра.

Учет влияния Галактики на каждый из объектов производился согласно параметризации Фицпатрика [35] для закона поглощения, при этом использовалось значение экстинкции E_{B-V} в направлении на объект, рассчитанное по картам излучения пыли, полученным в результате обзора IRAS [36], было выбрано общепринятое в настоящее время значение $R_V = 3.1$.

При чтении заголовка FITS-файла со спектром производится обращение в совмещенную базу данных LEDA + Véron AGN and QSO [37] по координатам и имени объекта, при этом определяется лучевая скорость объекта либо красное смещение и морфологический тип, либо тип активности в случае активного ядра. В случае, если объект не отождествлялся по базе данных, он исключался из выборки. Затем записывается файл со спектром объекта, где длины волн приведены к restframe, при этом диапазоны длин волн, на которые попадают ионосферные эмиссионные линии, интенсивность которых обычно в сотни раз превосходит интенсивность спектра объекта в данной области, отмечаются специальным флагом, устанавливающий им нулевой вес при формировании композитного спектра. Наиболее яркая линия в ионосфере – $Ly\alpha$, что создает большие трудности при построении спектра в этой области. Но наличие различных лучевых скоростей у объектов выборки позволяет корректно построить область в районе $Ly\alpha$ в покоящейся системе отсчета, хотя с меньшим отношением сигнал/шум. Ширина ионосферной $Ly\alpha$ такова, что красного смещения $z = 0.01$ достаточно, чтобы $Ly\alpha$ объекта с ней разделялась. Вся эта процедура выполняется полностью автоматически.

2.3.2 Алгоритм сложения спектров

Для создания композитных спектров был разработан специальный алгоритм, позволяющий использовать данные даже с низким отношением сигнал/шум в большинстве случаев с улучшением отношения сигнал/шум результирующего спектра.

Алгоритм реализован в среде IDL, на каждом шаге построения композитного спектра возможен графический вывод, что позволяет контролировать процесс его формирования.

Сущность алгоритма заключается в следующем:

1) для каждого спектра выбирается вес равный отношению сигнал/шум на заданном участке спектра (производится робастная оценка дисперсии континуума), либо произведению отношения сигнал/шум и отношения потока текущего спектра к первому спектру из выборки в данном диапазоне, кроме этого веса можно задавать вручную;

2) при добавлении очередного спектра для него строится вектор весов, равный значению, определенному в 1), во всех точках, где нет пометки об исключении данных (например, в местах расположения ионосферных эмиссионных линий) и нулю в точках, где пометка есть; таким образом,добавляемый спектр зануляется в областях, помеченных как "плохие";

3) вектора весов суммируются параллельно со спектрами, а в качестве окончательного варианта композитного спектра берется отношение суммарного спектра к суммарному весовому вектору. Этим достигается сохранение формы спектра в тех частях, где отсутствуют данные в некоторых спектрах, то есть добавление нового спектра увеличивает отношение сигнал/шум в области, где он определен, и не ухудшает там, где он не определен.

4) Дополнительно возможен второй проход алгоритма по списку, когда с использованием уже построенного спектра определяется взвешенная оценка

отличия на данной длине волны использованных индивидуальных спектров от полученного композитного.

На простом примере процесс создания композитного спектра проиллюстрирован на рис. 2.3.

При добавлении каждого спектра возможно произвести его сглаживание скользящим средним с заданным окном. Все композитные спектры, используемые в данной работе были построены со сглаживанием окном 5Å.

Текущая реализация алгоритма несколько отличается от описанного тем, что нормировка на весовой вектор производится при добавлении каждого спектра с целью визуального контроля за процессом формирования спектра.

Все спектры для каждого из типов создаваемых композитов (всего около 6000 в двух диапазонах) были просмотрены визуально для исключения ошибок отождествления по базам данных, тестовых спектров и др. Благодаря этому были исключены не применимые для задачи спектры (порядка 2-3% от общего числа), к примеру, с малыми временами накопления, со сбоями в системе регистрации и неверным отождествлением, которые невозможно отделить, анализируя FITS-шапки.

2.3.3 Краткие характеристики построенных спектров

Для построения спектров нормальных галактик использовалось от 30 (S0-галактики) до 120 (эллиптические галактики) отдельных спектров галактик каждого морфологического типа в каждом из диапазонов длин волн IUE + все имеющиеся данные с HUT. Для построения спектра сейфертовской галактики второго типа было использовано 78 индивидуальных IUE-спектров, 6 спектров HUT в дальней УФ-области (800Å– 1970Å) и 49 спектров в ближней УФ-области (1850Å– 3300Å) объектов, классифицированных как S2 либо S1h в каталоге Véron and Véron-Cetty [37], для построения спектра LINER с широкими линиями было использовано порядка 35 спектров в каждой области. Наиболее обширная выборка была использована при построении спектра Сейферт-1 (около 2000 в дальней и около 1200 в ближней УФ-области) и спектра квазара в области длин волн короче 1300Å (около 400), чем и объясняется

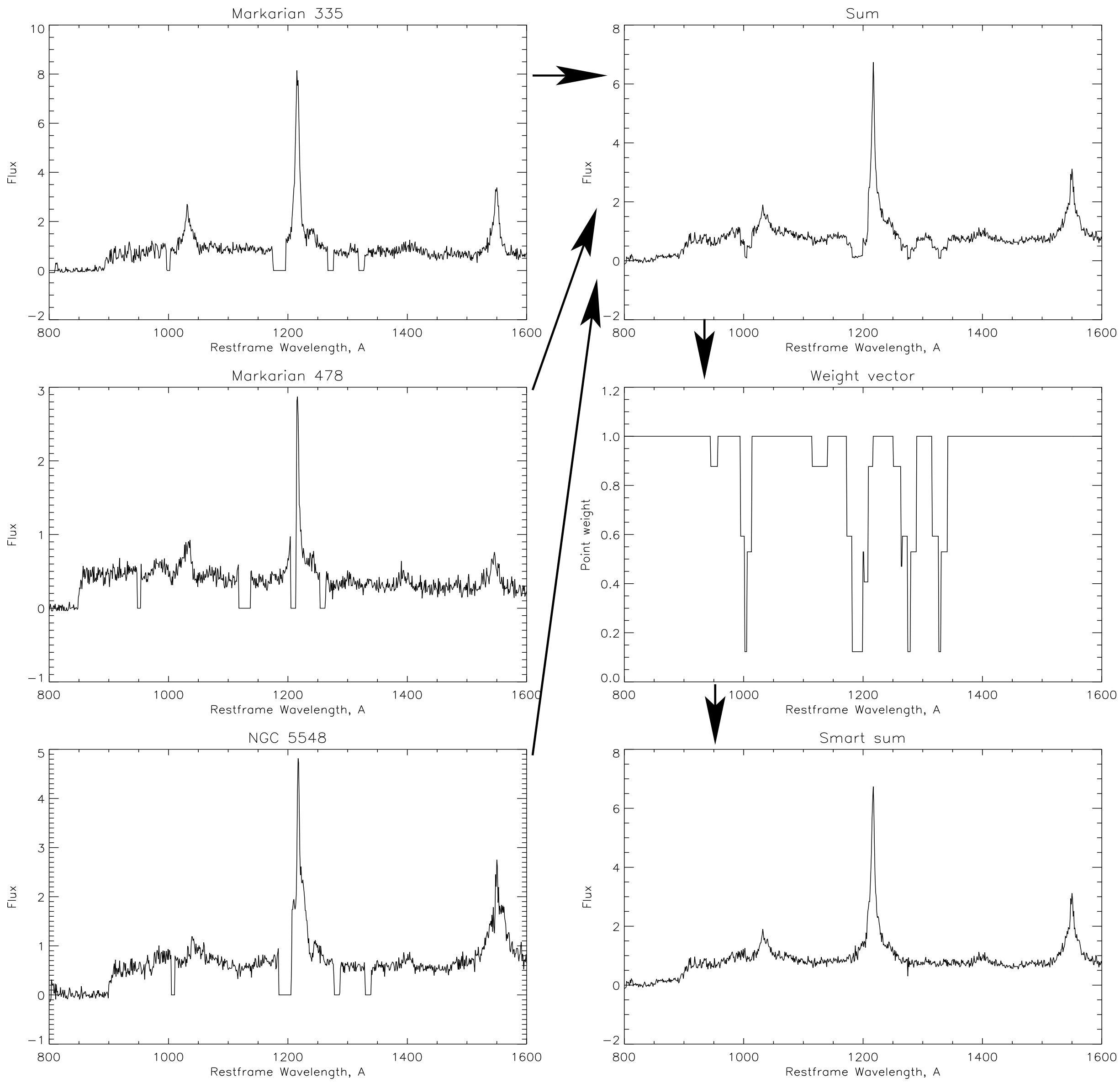

Рис. 2.3: Построение композитного спектра на примере использования данных, полученных на Hopkins Ultraviolet Telescope. Три графика слева – индивидуальные спектры сейфертовских галактик первого типа с провалами в местах присутствия ионосферных эмиссионных линий. Правый верхний график – их взвешенная сумма, средний – весовой вектор, нижний – отношение суммы и весового вектора – окончательный композитный спектр. Потоки указаны в относительных единицах ($F\lambda$). Мощная эмиссионная линия вблизи центра диапазона – $Ly\alpha$

очень высокое отношение сигнал/шум в этих спектрах.

В результате получены композитные ультрафиолетовые спектры нормальных галактик различных морфологических типов: E, S0, Sa, Sb, Sc, 2 спектра галактик со вспышкой звездообразования – с сильным и слабым внутригалактическим поглощением в диапазоне длин волн 912Å– 3200Å, спектры активных ядер типа LINER с широкими линиями, Сейферт-2 и Сейферт-1, а также сетка спектров квазаров в диапазоне длин волн 900Å– 3820Å. Наилучшее отношение сигнал/шум имеет спектр активного ядра типа Сейферт-1 в области от 1216Å до 1950Å (коротковолновая камера IUE), где оно превосходит 400 в континууме.

Оптическая часть всех спектров, за исключением Сейферт-1 и квазаров, заимствована из работы [32]. Template-спектр слабо активного ядра типа LINER в работе [32] представляет собой спектр галактики M81. С целью увеличения ширины диапазона в качестве красного продолжения данного спектра были использованы спектры объектов из "атласа спектров близких галактик"[33], классифицированных как S3b в каталоге активных объектов Véron and Véron-Cetty [37]. Спектры галактик со вспышками звездообразования построены с использованием спектров только тех объектов, которые присутствуют в списках "SB1" и "SB6" в работе [32].

В работе [32] спектр активного ядра типа Сейферт-1 (NGC 5548) отсутствует в диапазоне длин волн больше 7100Å, в связи с чем в ночь с 6 на 7 июня 2002 года на 6-м телескопе был снят спектр типичного представителя Сейферт-1 – галактики Markarian 279, в диапазоне 3700Å– 10000Å, что соответствует длинам волн 3670Å– 9900Å при приведении спектра к restframe. Наблюдения проводились на спектрографе SCORPIO в длинощелевом режиме с решеткой 300 штр/мм. Спектр интегрировался по всей части галактики, попавшей в щель шириной 2 arcsec. Отношение сигнал/шум составляет 70 в континууме в районе $H\alpha$, убывает до 15 на длине волны 9900Å. Эти данные были использованы, чтобы расширить диапазон template-спектра из [32] в красную область спектра.

На рисунках 2.4 – 2.16 представлены композитные спектры нормальных

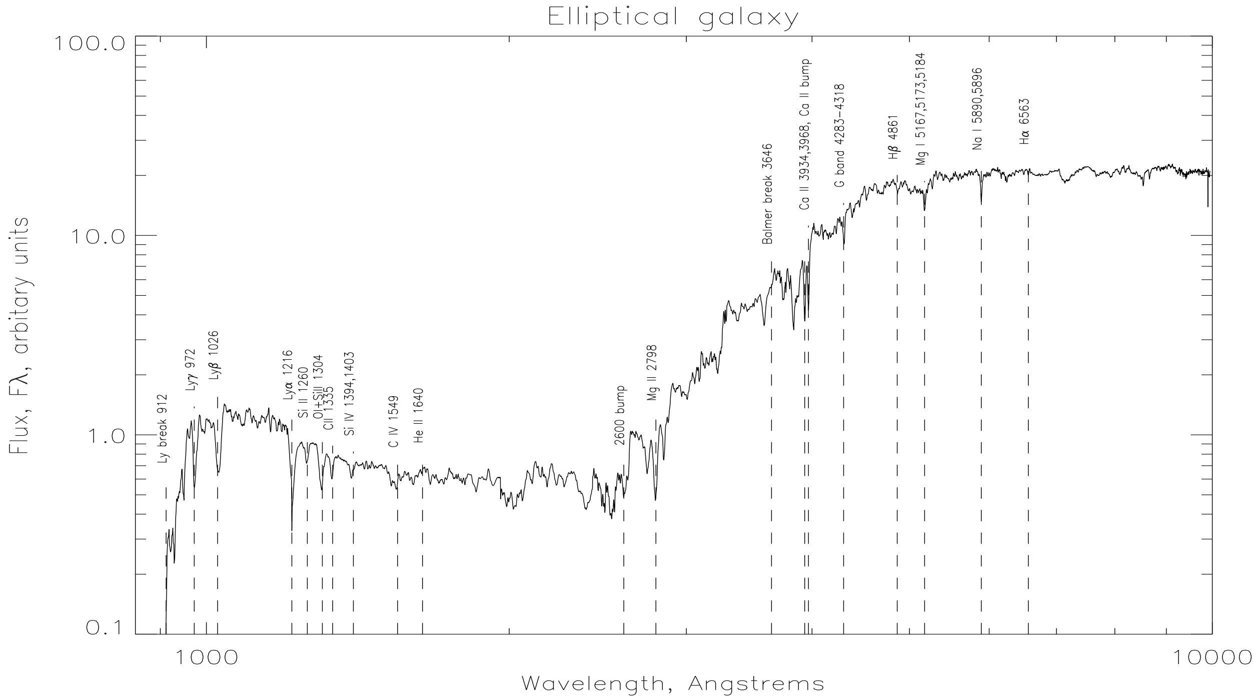

Рис. 2.4: Композитный спектр эллиптической галактики.

и активных галактик, ультрафиолетовая часть которых получена вышеописанным методом. Все рисунки приведены в логарифмической шкале по обеим осям, на спектрах отмечены основные эмиссионные и абсорбционные детали.

Спектры квазаров приведены в диапазоне 900Å–10000Å, область с длинами волн более 3820Å взята из работы [34] и совпадает у всех спектров. Девять спектров представлены на трех рисунках – 2.14, 2.15 и 2.16, каждый из которых содержит по три спектра с одинаковыми диапазонами эквивалентных ширин, но разными наклонами континуума.

Спектральное разрешение всех спектров плавно изменяется от $R \sim 120...150$ (7Å-10Å) в ультрафиолетовой части спектра до 250-300 (35Å-40Å) в красной части ($\lambda \sim 1\mu m$). Исключение составляет спектр эллиптической галактики в диапазоне 2000Å-2400Å, который был сглажен с окном 25Å с целью улучшения отношения сигнал-шум.

В таблицах 2.2, 2.3 приведены основные параметры спектров нормальных галактик, представляющих из себя амплитуды "скачков" в распределении энергии в спектре, в виде отношения потоков на заданных интервалах длин

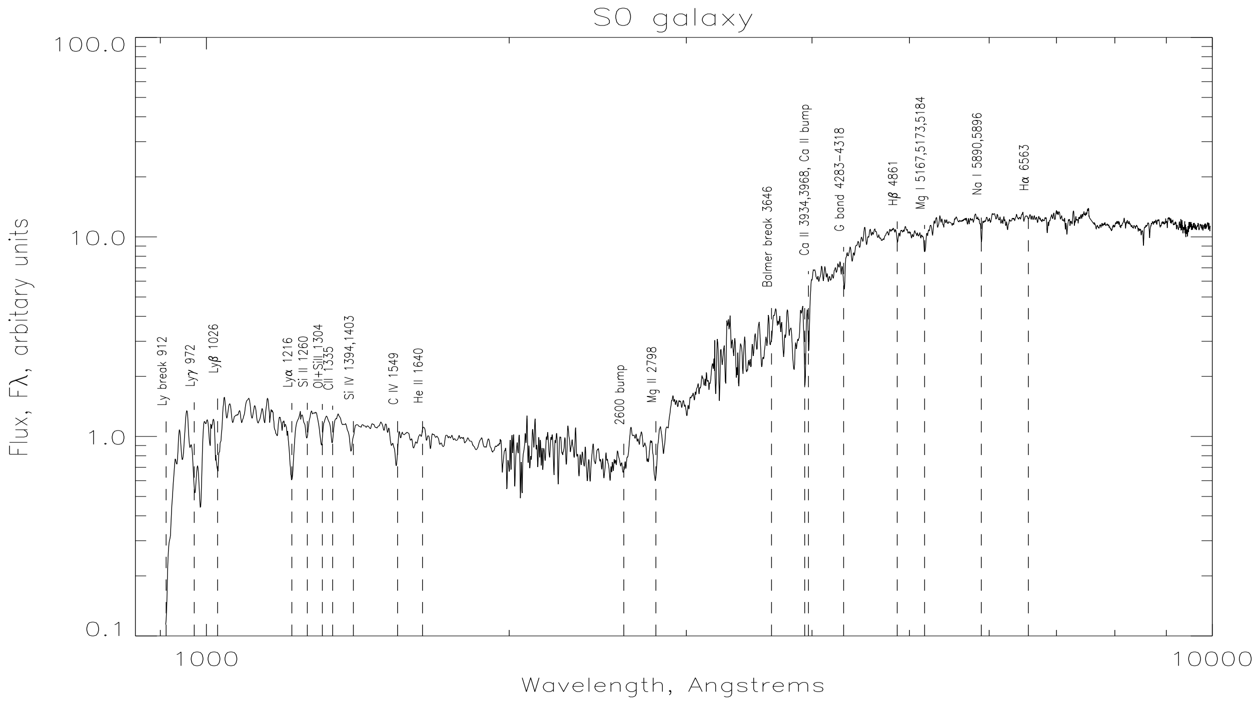

Рис. 2.5: Композитный спектр линзовидной галактики.

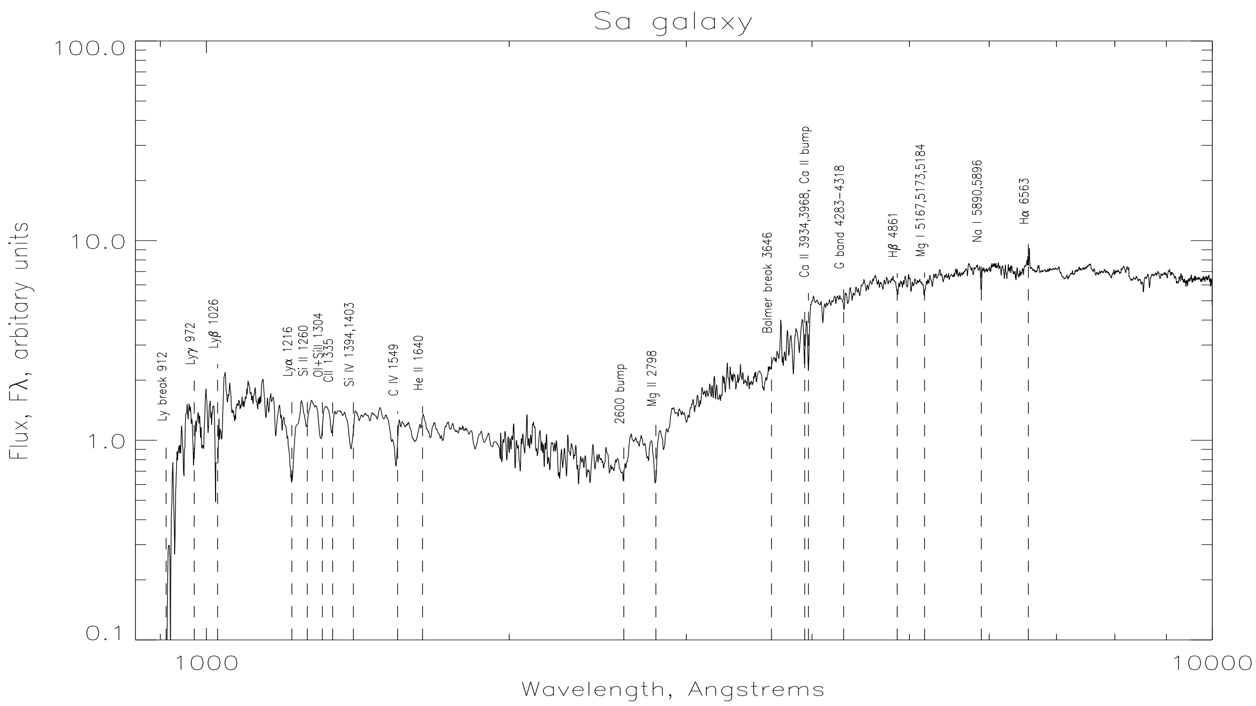

Рис. 2.6: Композитный спектр галактики типа Sa/SBa.

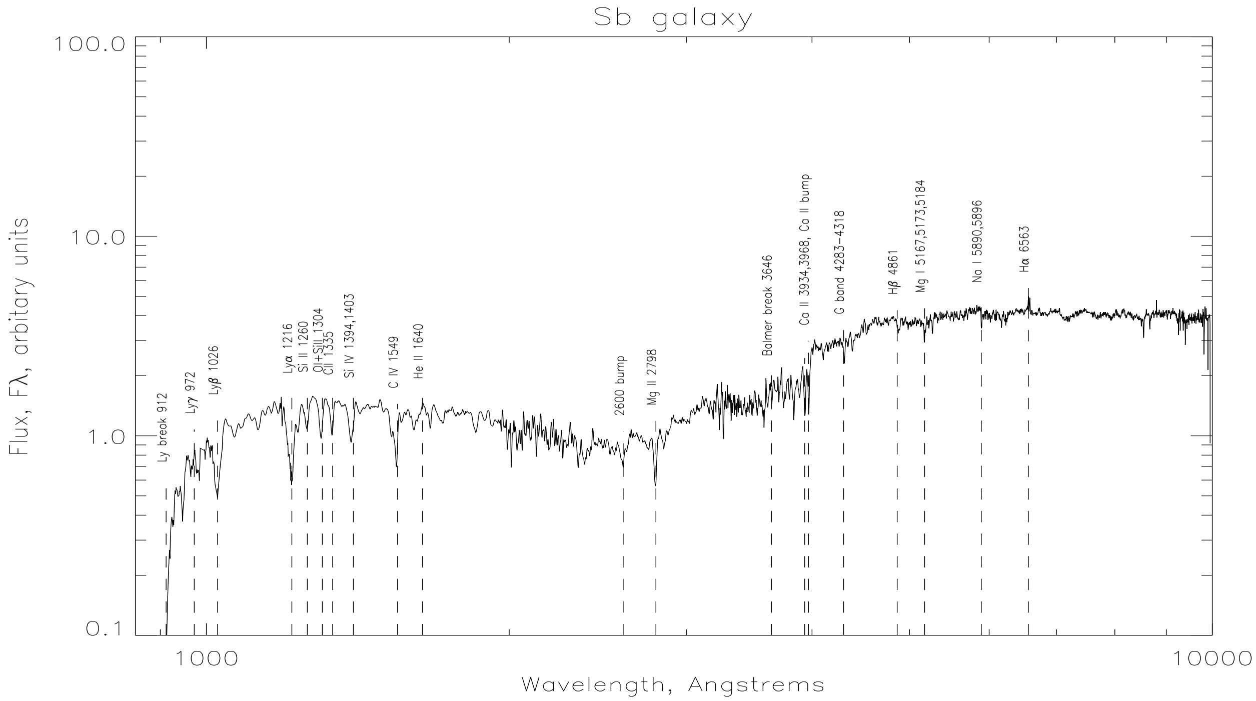

Рис. 2.7: Композитный спектр галактики типа Sb/SBb.

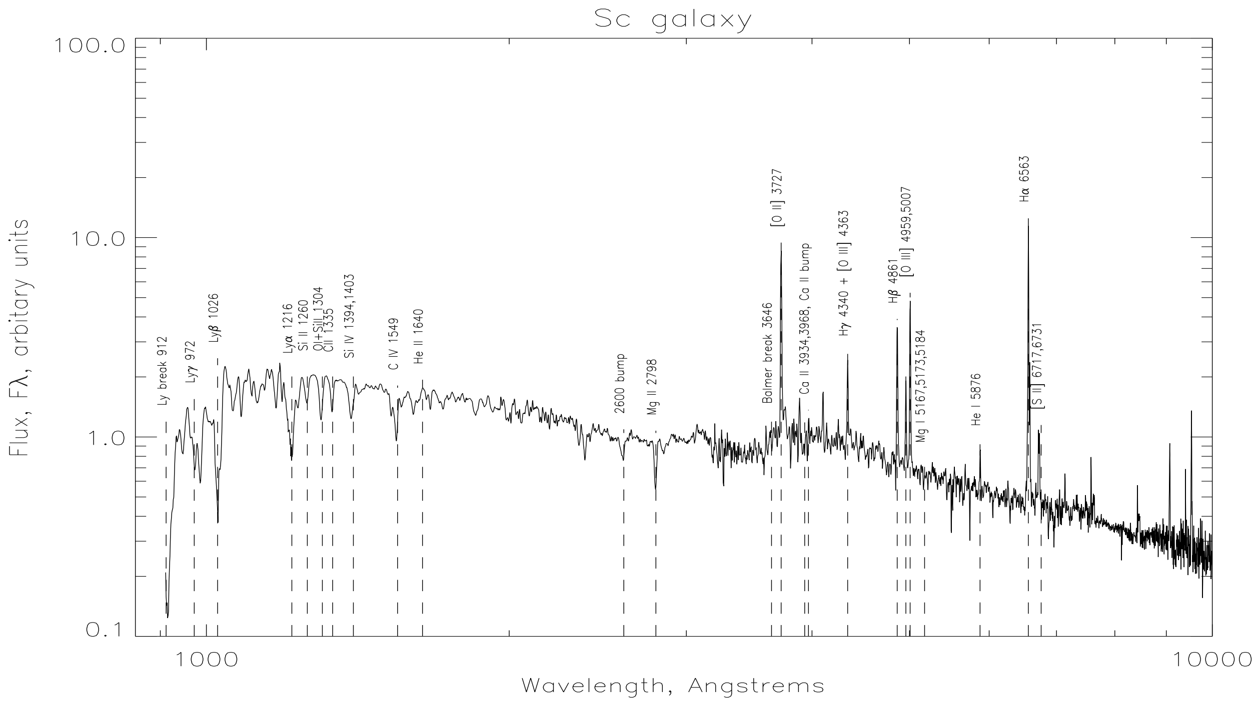

Рис. 2.8: Композитный спектр галактики типа Sc/SBc/Scd/SBcd.

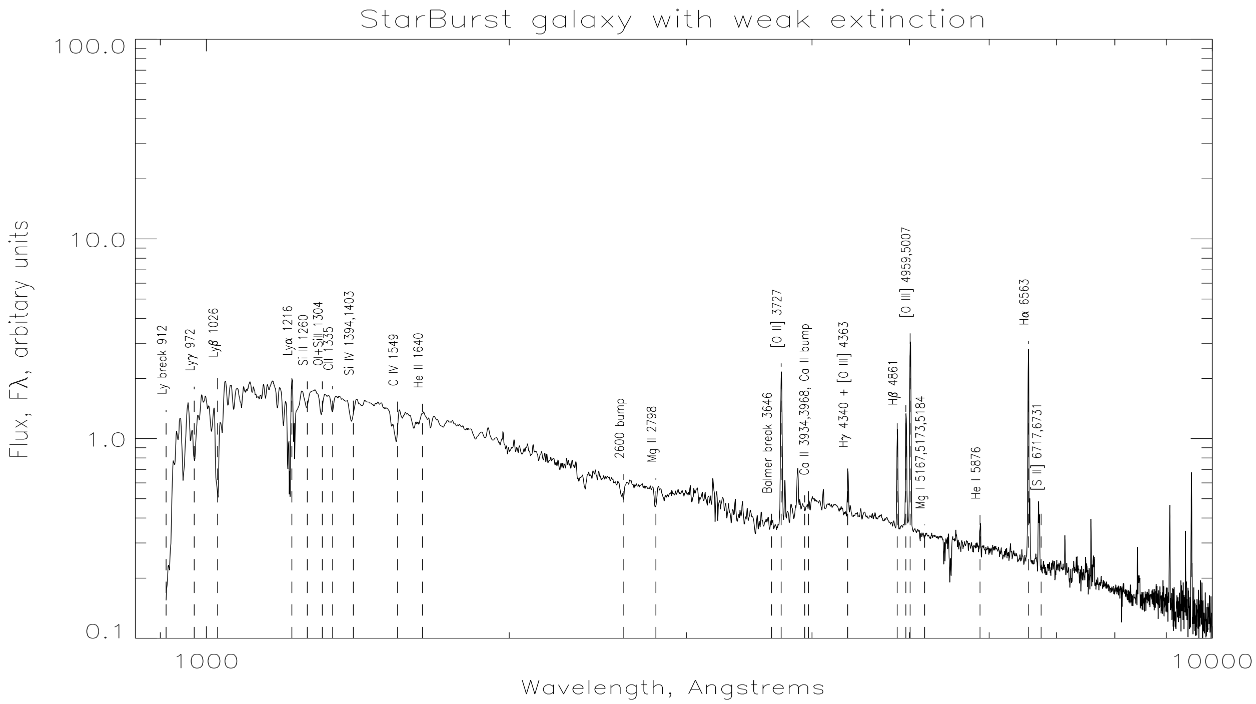

Рис. 2.9: Композитный спектр галактики со вспышкой звездообразования со слабым внутренним поглощением.

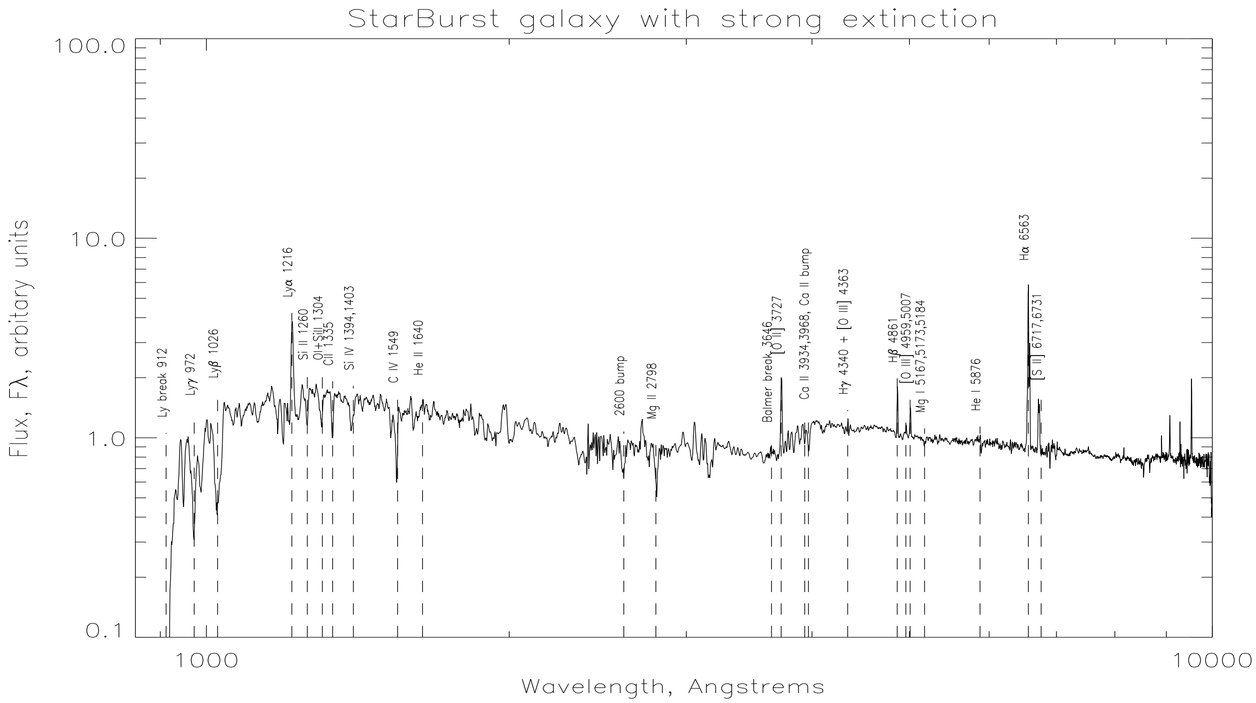

Рис. 2.10: Композитный спектр галактики со вспышкой звездообразования с сильным внутренним поглощением.

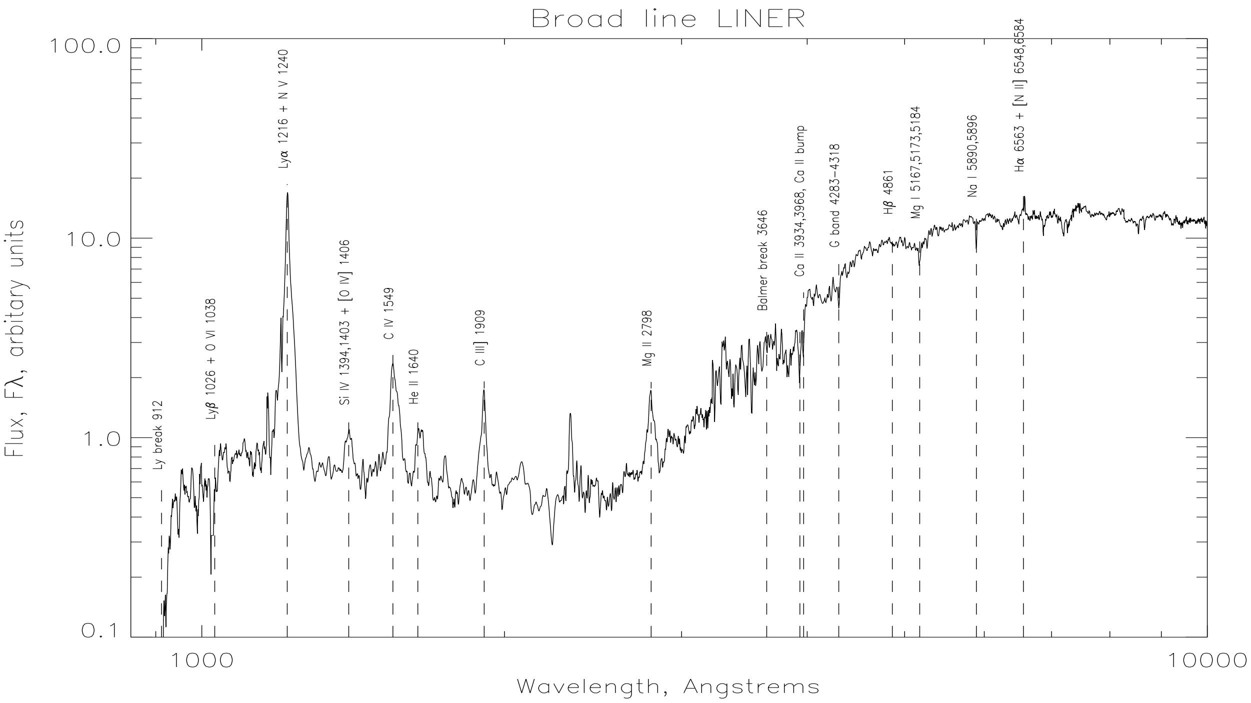

Рис. 2.11: Композитный спектр галактики со слабо активным ядром типа LINER с широкими эмиссионными линиями.

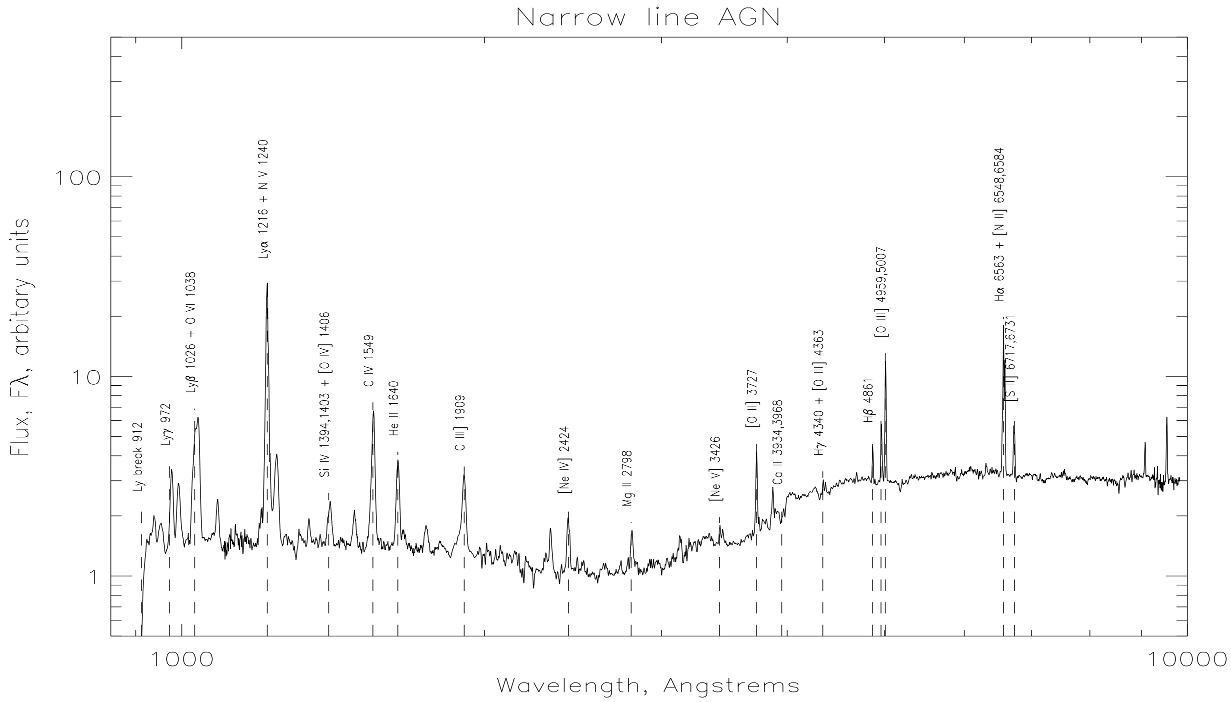

Рис. 2.12: Композитный спектр активной галактики типа Сейферт-2.

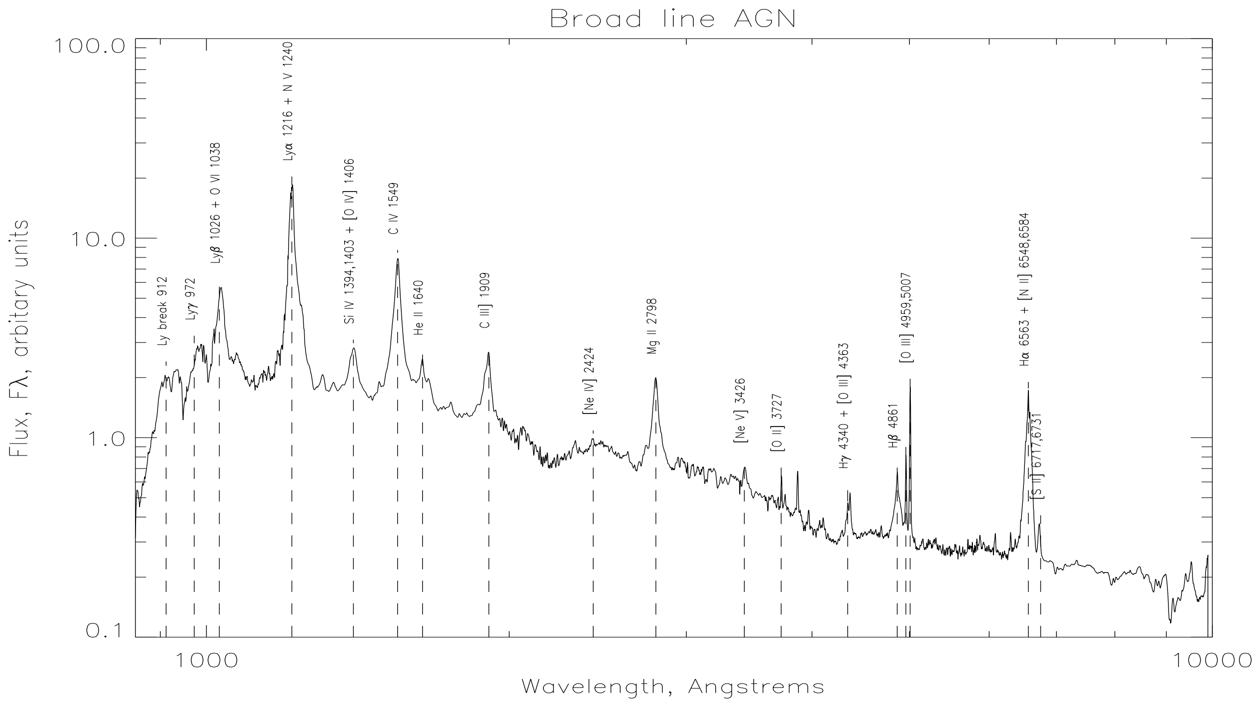

Рис. 2.13: Композитный спектр активной галактики типа Сейферт-1.

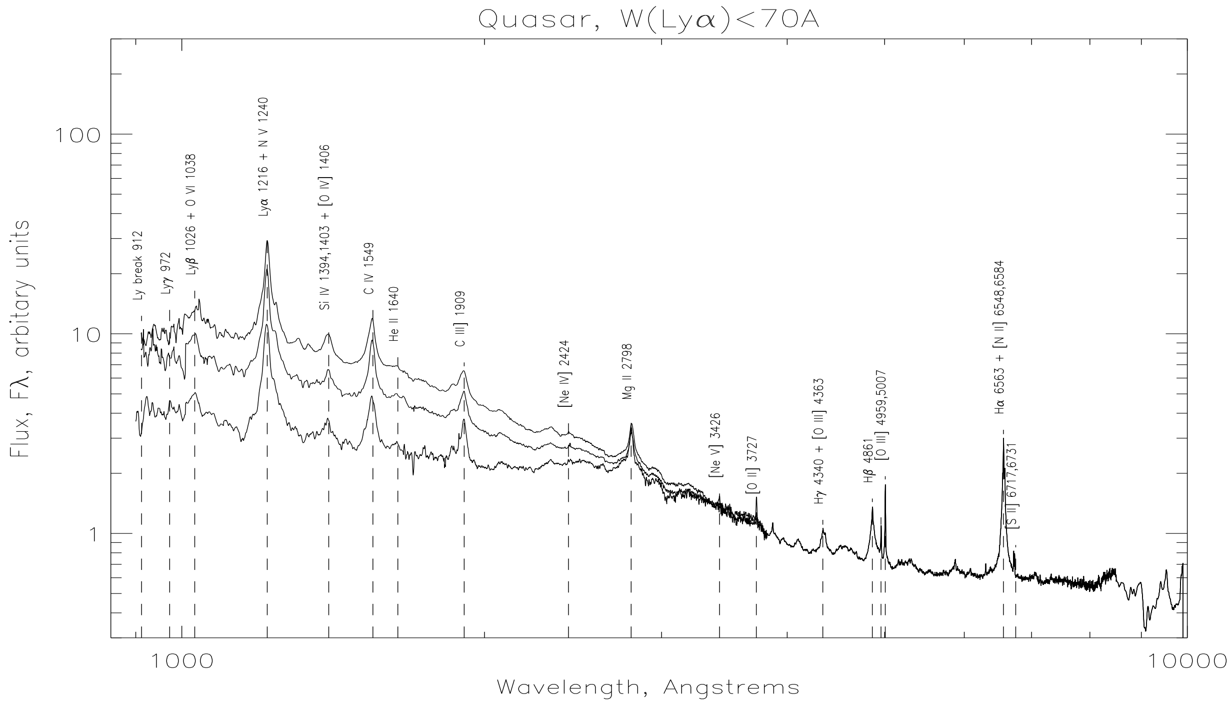

Рис. 2.14: Композитные спектры квазаров с наименьшими эквивалентными ширинами эмиссионных линий.

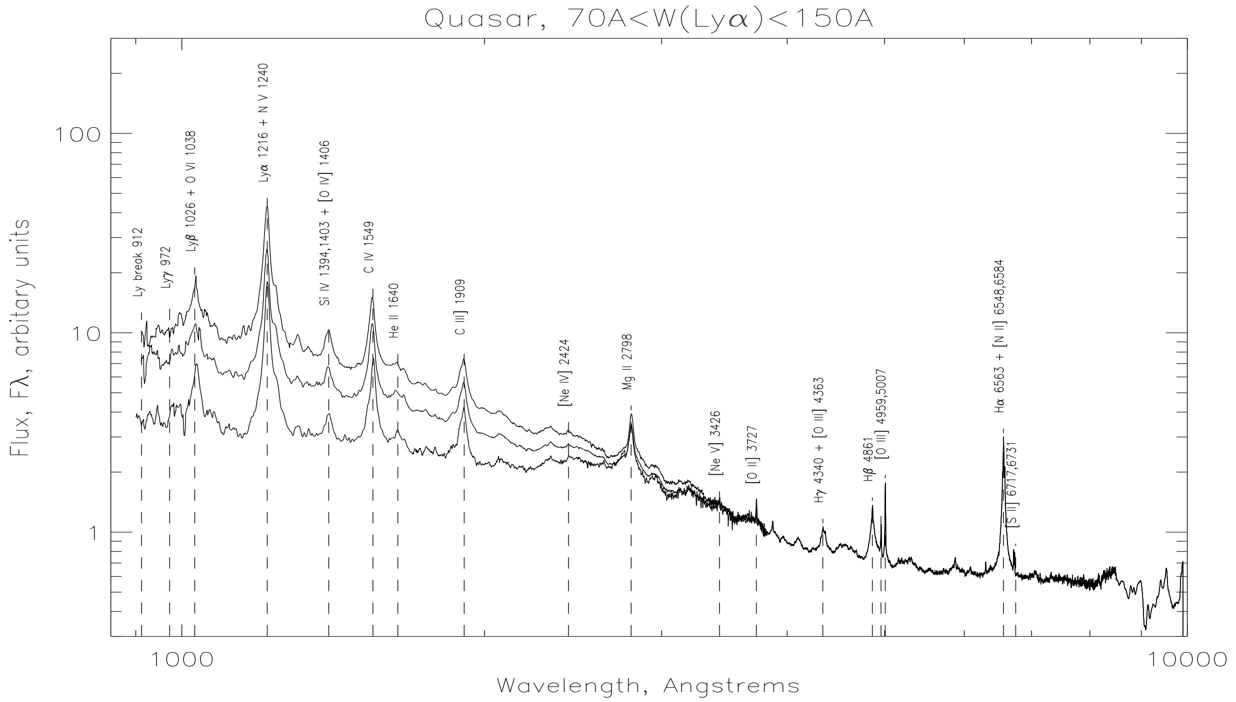

Рис. 2.15: Композитные спектры квазаров с эквивалентными ширинами 70Å$\leq W_{Ly\alpha} \leq$ 150Åи 14Å$\leq W_{CIII} \leq$ 30Å.

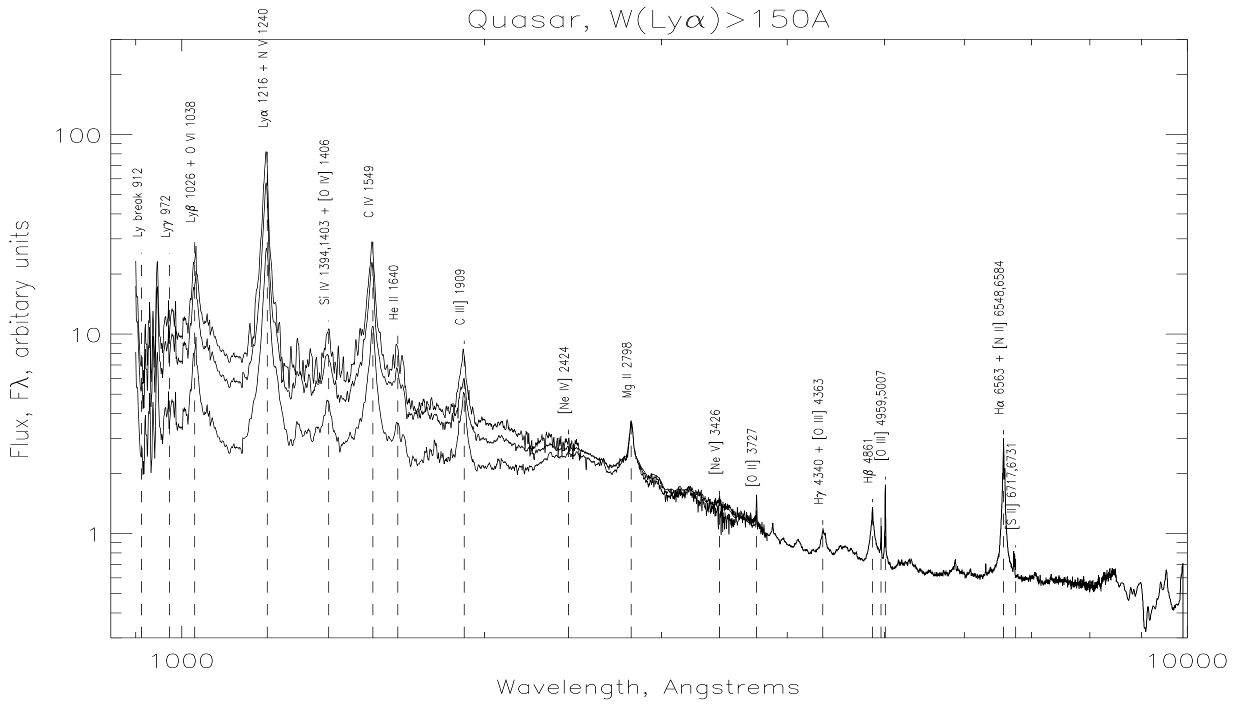

Рис. 2.16: Композитные спектры квазаров с наибольшими эквивалентными ширинами эмиссионных линий.

волн и разности звездных величин. Различие между двумя таблицами заключается в использовании различных представлений для спектра. В таблице 2.2 даны параметры для спектра, представленного в виде спектральной плотности потока на интервал частот F_ν. При этом отношение потоков вычисляется по формуле 2.1:

$$D_\lambda = \frac{(\lambda_2^- - \lambda_1^-) \int\limits_{\lambda_1^+}^{\lambda_2^+} F_\nu(\lambda) d\lambda}{(\lambda_2^+ - \lambda_1^+) \int\limits_{\lambda_1^-}^{\lambda_2^-} F_\nu(\lambda) d\lambda} = \frac{(\lambda_2^- - \lambda_1^-) \int\limits_{\lambda_1^+}^{\lambda_2^+} \lambda^2 F_\lambda(\lambda) d\lambda}{(\lambda_2^+ - \lambda_1^+) \int\limits_{\lambda_1^-}^{\lambda_2^-} \lambda^2 F_\lambda(\lambda) d\lambda} \tag{2.1}$$

Помимо отношения потоков в таблице дается разность AB-величин. В таблице 2.3 даны параметры для спектра, представленного в виде спектральной плотности потока на интервал длин волн F_λ. При этом отношение потоков вычисляется по формуле 2.2:

$$B_\lambda = \frac{(\lambda_2^- - \lambda_1^-) \int\limits_{\lambda_1^+}^{\lambda_2^+} F_\lambda(\lambda) d\lambda}{(\lambda_2^+ - \lambda_1^+) \int\limits_{\lambda_1^-}^{\lambda_2^-} F_\lambda(\lambda) d\lambda} \tag{2.2}$$

Различие для спектров имеет порядок λ^2, чем вызываются меньшие значения для данных отношений, поскольку $\lambda^+ > \lambda^-$. В дополнение к отношениям потоков в таблице даны разности ST-величин.

Для каждого спектра измерены 4 отношения потоков – отношение потока в оптическом диапазоне к потоку в далеком УФ-диапазоне ($Opt./FUV$ в таблицах), амплитуда скачка около 4000Å (D_{4000}, B_{4000}), амплитуда бальмеровского скачка (H_{lim}) и амплитуда скачка в районе 2630Å (D_{2630}, B_{2630}). В таблице, в заголовках колонок ΔAB и ΔST приведены длины волн $(\lambda_2^+ + \lambda_1^+)/2$ и $(\lambda_2^- + \lambda_1^-)/2$. Диапазоны интегрирования составляют 200Å для D_{4000}, B_{4000} (общепринятое определение, [38]) и 10Å для остальных скачков.

В таблицах 2.4-2.9 приведены параметры основных эмиссионных деталей в спектрах активных объектов. Они включают в себя: эффективную длину волны, "начало" и "конец" спектральной детали, принимавшееся в качестве пределов интегрирования для определения потоков, отношение потока в данной спектральной детали, исключая континуум, к соответствующему потоку

Таблица 2.2: Параметры основных деталей в композитных спектрах нормальных галактик и галактик со вспышкой звездообразования. Burst1 и Burst2 – галактики со вспышкой звездообразования со слабым и сильным внутренним поглощением соответственно. Представление спектра в виде $F_\nu(\lambda)$.

	Opt./ FUV	ΔAB 1490Å–5000Å	D_{4000}	ΔAB 3850Å–4150Å	H_{lim}	ΔAB 3600Å–3720Å	D_{2630}	ΔAB 2600Å–2660Å
E	229	5.9	2.4	0.9	1.5	0.4	1.6	0.5
S0	82.2	4.8	2.4	1.0	1.3	0.3	1.3	0.3
Sa	44.8	4.1	1.8	0.6	1.8	0.6	1.4	0.4
Sb	31.8	3.8	1.9	0.7	1.1	0.1	1.3	0.3
Sc	13.4	2.8	1.1	0.1	3.9	1.5	1.2	0.2
Burst1	8.9	2.4	1.1	0.1	2.4	1.0	1.2	0.2
Burst2	8.1	2.3	1.3	0.3	1.5	0.4	1.3	0.3

Таблица 2.3: То же, что в таблице 2.2 для представления спектра в виде $F_\lambda(\lambda)$.

	Opt./ FUV	ΔST 1490Å–5000Å	B_{4000}	ΔST 3850Å–4150Å	H_{lim}	ΔST 3600Å–3720Å	B_{2630}	ΔST 2600Å–2660Å
E	20.3	3.3	2.0	0.8	1.4	0.3	1.6	0.5
S0	7.3	2.2	2.1	0.8	1.2	0.2	1.3	0.3
Sa	4.0	1.5	1.6	0.5	1.7	0.6	1.3	0.3
Sb	2.8	1.1	1.7	0.5	1.1	0.1	1.2	0.2
Sc	1.2	0.2	0.9	-0.1	3.6	1.4	1.2	0.2
Burst1	0.8	-0.3	1.0	-0.0	2.3	0.9	1.1	0.1
Burst2	0.7	-0.4	1.1	0.2	1.4	0.4	1.3	0.2

Таблица 2.4: Параметры ряда деталей композитного спектра галактики со слабо активным ядром типа LINER.

λ_{eff}	Start	End	Rel.Flux	eq.W	W_σ	Identification
1217.0	1186	1286	100.0	337.41	10.64	$Ly\alpha$ + N V
1127.3	1018	1054	0.2	1.22	–	$Ly\beta$ + O VI
1397.6	1353	1454	3.5	14.17	9.00	Si IV + O IV]
1552.1	1452	1602	23.6	108.62	19.38	C IV
1909.6	1828	1976	12.1	61.38	20.25	C III]
2781.3	2650	2916	7.8	26.51	13.00	Mg II
3722.2	3712	3742	8.9	12.34	7.03	[O II]

для $Ly\alpha$+N V, умноженное на 100 (Rel.Flux), эквивалентную ширину, рассчитанную формально для континуума, проведенного сплайном по узлам, лежащим в свободных от ярких эмиссионных деталей областях (eq.W), ширину спектральной детали по формально вписанному гауссову контуру (W_{sigma}) и ее идентификацию. Наиболее полезной информацией для фотометрической классификации являются относительный поток по сравнению с $Ly\alpha$ и эквивалентная ширина. Ширины линий по вписанному гауссову контуру приводятся для возможности проведения сравнения с работами [31, 34].

2.3.4 Сравнение построенных спектров с эмпирическими и теоретическими результатами других авторов

Было проведено сравнение полученных спектров с композитными спектрами из работы [32] и синтетическими спектрами галактик, полученных методом эволюционного синтеза с помощью системы PEGASE [39].

Для примера на рисунке 2.17 приведено сравнение трех template-спектров эллиптической галактики. Обращает на себя внимание, что спектр из работы [32] имеет систематическое отличие в сторону увеличения потока в диапазоне длин волн 2000Å-2200Å, что может быть связано с малой выборкой объектов, использованных для его создания, и тем фактом, что этот диапазон на спектрах IUE имеет наименьшее отношение сигнал/шум по сравнению

Таблица 2.5: Параметры ряда деталей композитного спектра AGN типа Sy2.

λ_{eff}	Start	End	Rel.Flux	eq.W	W_σ	Identification
1215.8	1200	1230	100.0	144.01	4.08	$Ly\alpha$ + N V
1033.8	1018	1054	27.2	35.55	4.91	$Ly\beta$ + O VI
1549.9	1530	1570	32.9	53.64	6.39	C IV
1903.8	1850	1960	22.4	38.98	14.71	C III]
2803.9	2785	2825	5.5	11.34	7.82	Mg II
3729.2	3710	3745	16.3	20.64	6.02	[O II]
4866.1	4840	4885	8.7	6.35	4.62	$H\beta$
4962.8	4942	4976	21.1	15.71	6.07	[O III]
5011.3	4986	5044	62.8	46.41	7.02	[O III]
6563.5	6390	6680	185.9	126.09	31.81	$H\alpha$+[N II]
6722.3	6680	6800	28.8	19.54	1.97	[S II]

Таблица 2.6: Параметры ряда деталей композитного спектра AGN типа Sy1.

λ_{eff}	Start	End	Rel.Flux	eq.W	W_σ	Identification
1219.5	1186	1286	100.0	204.16	14.00	$Ly\alpha$ + N V
1034.4	1018	1054	17.5	31.13	7.91	$Ly\beta$ + O VI
1399.8	1353	1454	8.1	18.03	12.08	Si IV + O IV]
1548.1	1452	1602	56.0	142.69	20.60	C IV
1900.1	1828	1976	14.1	44.51	21.81	C III]
2793.4	2650	2916	18.4	100.07	33.52	Mg II
3730.3	3712	3742	0.5	4.14	3.17	[O II]
4943.0	4704	5112	14.2	183.79	69.12	$H\beta$
4959.9	4942	4976	2.2	28.40	7.04	[O III]
5008.4	4986	5044	5.9	78.57	8.17	[O III]
6556.5	6390	6680	33.8	531.99	48.98	$H\alpha$+[N II]
6727.4	6680	6800	1.5	23.54	20.03	[S II]

Таблица 2.7: Детали композитного спектра квазара $W(Ly\alpha) \leq 70$Å.

λ_{eff}	Start	End	Rel.Flux	eq.W	W_σ	Identification
1218.1	1186	1286	100.0	51.89	13.87	$Ly\alpha$ + N V
1030.9	1018	1054	15.1	7.44	7.67	$Ly\beta$ + O VI
1396.4	1353	1454	7.5	4.73	4.92	Si IV + O IV]
1547.0	1452	1602	45.4	35.31	20.39	C IV
1899.0	1828	1976	20.1	13.81	25.11	C III]
2795.8	2650	2916	17.9	29.90	33.84	Mg II
3728.4	3712	3742	1.2	4.05	7.55	[O II]
4916.1	4704	5112	16.1	80.57	68.21	$H\beta$
4958.2	4942	4976	1.7	8.68	7.68	[O III]
5009.2	4986	5044	3.9	20.10	10.38	[O III]
6562.4	6390	6680	36.2	210.74	44.81	$H\alpha$+[N II]
6717.3	6680	6800	1.7	10.14	20.88	[S II]

Таблица 2.8: Детали композитного спектра квазара 70Å$\leq W(Ly\alpha) \leq 150$Å.

λ_{eff}	Start	End	Rel.Flux	eq.W	W_σ	Identification
1218.0	1186	1286	100.0	80.36	14.30	$Ly\alpha$ + N V
1033.6	1018	1054	15.6	10.46	8.48	$Ly\beta$ + O VI
1397.9	1353	1454	7.4	7.02	9.25	Si IV + O IV]
1546.5	1452	1602	44.0	49.31	19.70	C IV
1901.3	1828	1976	19.6	28.96	22.00	C III]
2794.5	2650	2916	15.5	37.34	33.80	Mg II
3728.7	3712	3742	0.7	3.53	6.85	[O II]
4916.1	4704	5112	11.3	80.57	68.21	$H\beta$
4958.2	4942	4976	1.2	8.68	7.67	[O III]
5009.2	4986	5044	2.7	20.10	10.38	[O III]
6562.4	6390	6680	25.5	210.74	44.81	$H\alpha$+[N II]
6717.3	6680	6800	1.2	10.14	20.88	[S II]

Таблица 2.9: Детали композитного спектра квазара $W(Ly\alpha) \geq 150$Å.

λ_{eff}	Start	End	Rel.Flux	eq.W	W_{σ}	Identification
1214.0	1186	1286	100.0	231.22	13.04	$Ly\alpha$ + N V
1032.9	1018	1054	16.6	25.57	7.73	$Ly\beta$ + O VI
1391.0	1353	1454	6.5	14.35	15.10	Si IV + O IV]
1543.2	1452	1602	52.3	124.81	20.63	C IV
1904.2	1828	1976	9.1	31.35	18.92	C III]
2795.2	2650	2916	6.9	38.88	33.84	Mg II
3725.1	3712	3742	0.3	2.86	6.90	[O II]
4916.1	4704	5112	4.9	80.59	68.20	$H\beta$
4958.2	4942	4976	0.5	8.68	7.68	[O III]
5009.2	4986	5044	1.2	20.11	10.38	[O III]
6562.4	6390	6680	11.1	210.74	44.81	$H\alpha$+[N II]
6717.3	6680	6800	0.5	10.14	20.88	[S II]

со всем остальным диапазоном (1250Å-3200Å), так как он находится около границы разделения диапазонов спектрографа IUE. Аналогичная ситуация наблюдается для всех типов нормальных галактик при сравнении трех видов template-спектров.

Как видно на рисунке 2.17, композитный спектр, построенный в данной работе вышеописанными алгоритмами существенно превосходит по отношению сигнал/шум "эмпирический" template-спектр, приведенный в работе [32], что по-видимому связано с публичной доступностью данных HUT.

Построенные ультрафиолетовые участки композитных спектров имеют гораздо большие отношения сигнал/шум, чем спектры в работе [32].

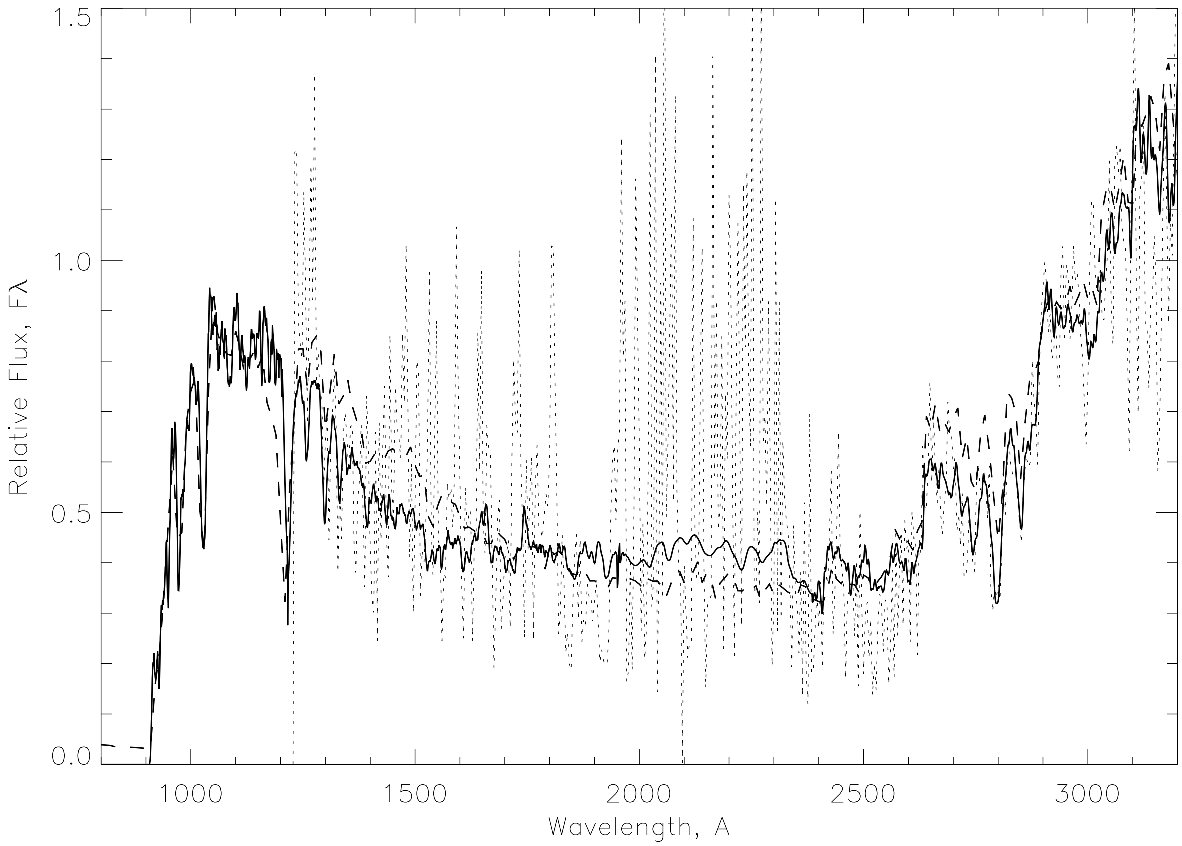

Рис. 2.17: Сравнение композитного спектра эллиптической галактики, построенного в данной работе (сплошной график), теоретического спектра эллиптической галактики возрастом 12 Гигалет, синтезированного с помощью системы PEGASE (штриховой график) и спектра из работы Kinney et al. [32] (пунктирный график).

Глава 3

Программный пакет SED

Как было упомянуто во введении, доступное на текущий момент программное обеспечение для проведения фотометрической классификации не удовлетворяет ряду требований, предъявляемых к подобному программному продукту. В связи с этим был создан легкомодернизируемый и платформеннонезависимый пакет программ для фотометрической классификации. В качестве программной платформы для его создания была выбрана среда IDL.

3.1 Задачи, решаемые с помощью программного пакета

Программный пакет SED предназначен для решения следующих задач:

1) Загрузка с диска и обеспечение удобного отображения большого объема многоцветных фотометрических данных.

2) Быстрое преобразование всего объема фотометрических данных между видами $AB\text{-}mag \Leftrightarrow F_\nu \Leftrightarrow F_\lambda \Leftrightarrow ST\text{-}mag$.

3) Расчет модельных потоков в произвольной фотометрической системе, набираемой из отдельных фильтров, для template-спектров, имеющихся в библиотеке (см. главу 2) для заданного диапазона красных смещений для внегалактических объектов, при этом вносится поправка за среднее поглощение для длин волн короче $Ly\alpha$ ($Ly\alpha$-forest) согласно работе Madau [40].

4) Проведение классификации объектов с помощью процедуры SED-fitting с использованием минимизации chi^2 для произвольного набора template-

спектров. При этом используется представление многоцветных данных для объектов в виде SED F_λ. В результате формируется трехмерный массив вероятностей $P(type, (z|Sp), N_{obj})$.

5) Проведение статистического анализа результатов классификации.

6) Наглядное отображение результатов классификации и ее статистического анализа как для каждого объекта, так и для всего объема входных данных.

3.2 Структура и краткое описание программного пакета SED

Программный пакет SED содержит более 4000 строк кода в основной и дополнительных частях, обширные библиотеки template-спектров и кривых пропускания светофильтров. В связи с этим для облегчения процесса модификации пакета в связи с добавлением новых данных и алгоритмов необходимо построить грамотную структуру как программного кода, так и данных используемых в процессе работы программ.

Построение программного пакета наглядно отражено в структуре его файлового дерева:

1. **./** Главная директория пакета. Содержит IDL-сценарии для запуска пакета в командном режиме (startsed.pro) и режиме с оконным интерфейсом (startsed_w.pro), варианты сохраненного содержимого форм оконного интерфейса (widget_sed.form_QSO)

2. **data/** Директория, содержащая многоцветные фотометрические данные для использования в пакете в текстовых файлах следующего формата: первая строка содержит два целых числа – общее количество объектов в выборке и количество фильтров в фотометрической системе, дальнейшие строки содержат идентификатор объекта (натуральное число) по списку и значения потоков и их ошибок в формате чисел с плавающей точкой, либо экспоненциальной форме (всего 2N чисел, где N – число фильтров в системе). Если значение ошибки установлено в 0, данная точка из расчетов исключается. Дополнительной возможностью является задание во

второй строке файла объекта с идентификатором "0", потоки и ошибки которого равны и являются средней дисперсией фона неба в данном фильтре.

3. **filters/** Директория, содержащая отдельные файлы с кривыми пропускания светофильтров в текстовом формате: $\lambda(\text{Å})$ - пропускание в каждой строке, и текстовые файлы описания фотометрических систем, в первой строке содержащие количество используемых фильтров, а в последующих – имена файлов с кривыми пропускания.

4. **templates/** Директория, содержащая template-спектры. В настоящее время включает, помимо спектров, описанных в предыдущей главе, данные из работ [32, 33], теоретические спектры PEGASE, и композитные спектры квазаров из работ [31, 34]. Для классификации реально используются только спектры, перечисленные во второй главе.

5. **tmp_fluxes/** Директория содержит предварительно рассчитанные потоки в различных системах фильтров от выбранных template-спектров в двоичном формате. При этом template-потоки для внегалактических объектов могут быть построены для заданного диапазона красных смещений.

6. **sed.lib/** Директория содержит непосредственно программный код и набор дополнительных модулей. Рассмотрим ее содержимое более подробно.

   - **addons/** Поддиректория, содержащая дополнения к пакету SED, по большей части представляющие из себя небольшие программы для удобного и наглядного отображения результатов обработки конкретных списков объектов, программы для простой обработки UV-спектров и создания композитных спектров (см. главу 2) и модули для создания модельных данных на основе использования текущей библиотеки template-спектров.

   - **batch/** Поддиректория, содержащая сценарии IDL для работы программного комплекса SED в пакетном режиме.

- **sed.pro** Главный модуль программного пакета, вызывающий все основные функции, за исключением вывода результатов и создания template-потоков для звездной библиотеки спектров. Работает с конкретным template-спектром, либо потоками для него.

- **sed_list.pro** Дополнительный модуль для работы программного пакета сразу с несколькими template-спектрами.

- **sed_w.pro** Основное окно пользовательского интерфейса программного пакета.

  create_stt_w.pro Дополнительное окно в интерфейсе пакета для создания template-потоков по списку звезд в данной фотометрической системе.

  plot_out_w.pro Дополнительное окно в интерфейсе пакета для вывода результатов классификации в вид, удобный для печати.

- **set_filters.pro** Загрузка фотометрической системы.

  comp_filtc.pro Расчет положений центров фильтров и их ширин (для дальнейшего отображения данных).

- Функции работы с template-спектром и расчета template-потоков:

  readsed.pro Чтение спектра в 2-колоночном текстовом формате (λ(Å) Flux).

  readsedfits.pro Чтение спектра из 1D FITS файла.

  readspec.pro Чтение спектра в 3-колоночном текстовом формате (λ(Å) Flux Error).

  compute_flux.pro Расчет потоков от текущего template-спектра в данной системе фильтров.

  zcomp.pro "Смещение" template-спектра на данное z.

  lyalpha_forest.pro Введение в спектр поправки за межгалактическое поглощение согласно работе [40].

  create_templ_fluxes.pro Создание массива template-потоков от внегалактического объекта для данного диапазона красных смещений либо загрузка его из двоичного файла с помощью модуля **load_model_fluxes.pro**.

read_stdesc.pro Чтение списка template-спектров звезд.

create_star_templates.pro Расчет template-потоков от звезд.

save_model_fluxes.pro Сохранение массива template-потоков в двоичный файл.

- Работа с многоцветными фотометрическими данными:

  read_fluxes.pro Чтение массива многоцветных фотометрических данных из текстового файла.

  get_obj_by_id.pro Получение идентификатора объекта по номеру в списке.

  get_id_by_obj.pro Получение номера объекта в списке по его идентификатору.

- Процедура SED-Fitting:

  find_z_list.pro Определение фотометрического красного смещения либо принадлежности к звездам определенного спектрального класса для массива фотометрических данных. В качестве результата берется значение с максимальным критерием значимости (вероятностью). Использует **find_z.pro**.

  find_z_obj.pro То же, что в предыдущем модуле, но для конкретного объекта из массива. Использует **find_z.pro**.

  find_z.pro Непосредственное проведение минимизации χ^2.

  find_koeff_a.pro Вычисление вектора коэффициентов нормировки для вычисления χ^2.

  chi2_comp_a.pro Вычисление вектора значений χ^2.

  criter.pro Расчет критерия значимости для вектора χ^2.

- **save_result.pro** Сохранение результатов классификации (трехмерного массива вероятностей) в виде FITS-файла.

- **plot_all.pro** Широкий набор процедур для отображения результатов работы пакета и представления фотометрических данных в удобной для восприятия форме.

  readlinetable.pro Чтение таблицы линий для отображен идентификации поверх спектров.

- Служебные и системные функции:

  disp_family.pro Возвращение типа графического дисплея IDL в зависимости от операционной системы.

  read_asc.pro Чтение ASCII-таблицы произвольного размера. Любезно предоставлено Алексеем Моисеевым.

7. **outputdir/** Директория для хранения результатов работы пакета.

8. **doc/** Директория, содержащая описание пользовательского интерфейса пакета.

9. **testsuite/** Директория, содержащая набор реальных данных для тестирования пакета, чему будет посвящен один из следующих разделов данной главы.

При создании пакета ставилась цель добиться максимальной производительности при реализации алгоритмов. При использовании интерпретируемых языков, в частности IDL, максимальная потеря производительности происходит при использовании циклов. В связи с этим в программном пакете "SED"во всех местах, где это возможно, циклы заменены на операции с векторами и матрицами в виде срезов массивов, что безусловно ведет к дополнительным затратам оперативной памяти, но резко повышает производительность. Для примера, текущая скорость работы пакета более чем в 1000 раз превосходит скорость работы первого варианта программ.

Одна из особенностей реализации алгоритма SED-fitting в данном программном пакете заключается в возможном использовании информации о фоне неба в данном фильтре при учете значения вклада потока в нем в χ^2. Это выражается в следующем: при выставлении определенного флага при начале работы программного пакета все значения потоков от объектов, которые не превышают $n\sigma$ над фоном неба (обычно 1-3), устанавливаются в $\sigma/2$ с ошибкой $\sigma/2$. Это предотвращает ухудшение классификации объектов, отсутствующих в некоторых фильтрах (дроп-аут), для которых формально измерен отрицательный поток, что очень важно для селекции и классификации предельно слабых объектов с большими красными смещениями, когда зачастую объект не виден в широких фильтрах синей области спектра, зато виден и хорошо измеряем даже в среднеполосных фильтрах красного и ближнего-ИК диапазонов.

3.3 Тестирование предложенной методики и ее реализации на экспериментальных данных

Существует очевидный способ тестирования предложенного в работе метода фотометрической классификации. Реализуется он следующим образом:

а) в качестве входных данных берется выборка спектров объектов различных типов с различными красными смещениями, в том числе звезд нашей Галактики;

б) производится определение потоков в фильтрах заданной фотометрической системы для каждого из спектров;

в) производится фотометрическая классификация объектов по полученным данным;

г) результаты фотометрической классификации сравниваются с результатами спектроскопической.

Главный момент в данном способе тестирования – создание репрезентативной выборки исходных спектров. В данной работе подобная выборка была составлена из спектров объектов, полученных в процессе проведения Sloan Digital Sky Survey. Для тестирования были отобраны:

- все доступные из базы данных SDSS спектры объектов с красными смещениями больше 0.5 – всего 2000 спектров;

- 500 случайным образом выбранных спектров объектов с красными смещениями меньше 0.5.

Данная выборка обладает довольно существенным недостатком, заключающемся в неглубоком пределе обзора SDSS, что приводит к полному отсутствию в выборке галактик с $z > 0.8$. Практически вся "high-z" часть выборки состоит из квазаров. Преимуществом данной выборки является большое разнообразие квазаров на различных красных смещениях, вплоть до $z = 5.1$. В "low-z" части содержатся как звезды нашей Галактики, так и относительно близкие галактики, в том числе со вспышками звездообразования, AGN различных типов и квазары.

При вычислении потоков в фильтрах всем значениям была была приписана дисперсия, соответствующая отношению сигнал/шум 10, если формально вычисленная дисперсия не превышала данное значение.

Еще одной необходимой деталью для проверки предложенной методики классификации является выбор фотометрической системы. В данной работе тестировались 2 набора фильтров, составленных из широкополосных и среднеполосных фильтров универсального спектрографа SCORPIO 6-метрового телескопа САО РАН.

В 2001 году с целью поиска объектов с большими красными смещениями С.Н.Додоновым была предложена фотометрическая система, состоящая из двух широких фильтров – B и R, и шести среднеполосных фильтров с центральными длинами волн 7070Å– 9670Å (рис. 3.1).

Как известно, спектры объектов, находящихся на космологических расстояниях, испытывают сильное ослабление потока на длинах волн короче $Ly\alpha$, вызванное поглощением на более близких водородных облаках, лежащих на луче зрения. Согласно работе [40], среднее поглощение в спектре объекта с $z = 5$ по сравнению с близким объектом на участках $Ly\alpha - Ly\beta$ и $< Ly\beta$ составит 1.4^m и 1.9^m соответственно, а для $z = 6$ эти значения увеличатся до 2.4^m и 3.2^m (около 20 раз). Таким образом, распределение энергии в спектре далекого объекта будет иметь "завал" на длинах волн короче $Ly\alpha$. При красном смещении $z = 3.5$ длина волны $Ly\alpha$ составит величину около

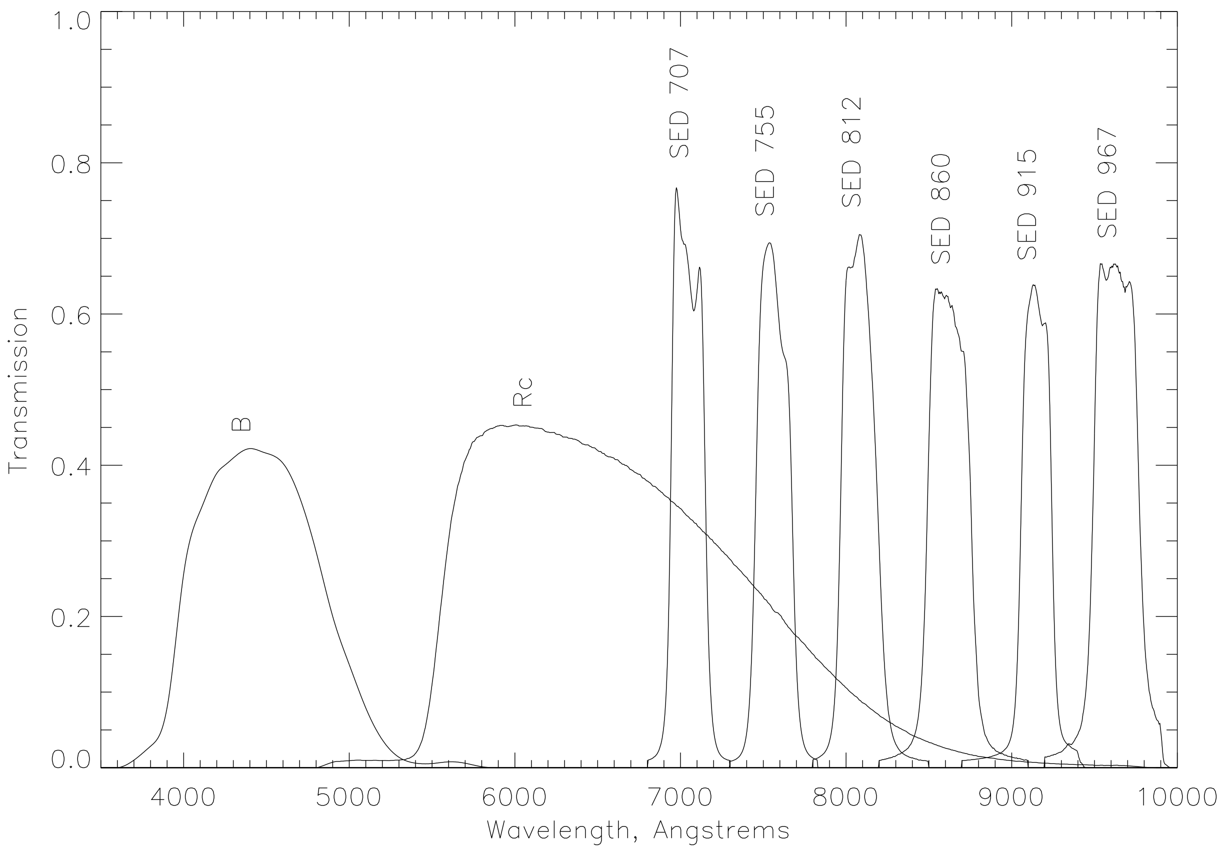

Рис. 3.1: Комбинированная система фильтров, предназначенная для поиска объектов с большими красными смещениями.

5500Å. Соответственно при $z > 3.5$ в фильтр B будет попадать только поглощенный участок спектра объекта. При этом для достаточно слабых объектов возможна ситуация, когда объект будет виден в фильтре R, и находиться вне пределов обнаружения в фильтре B, чему способствует сильное поглощение ионизирующих фотонов с длинами волн короче 912Å (лаймановский предел) внутри самого объекта. При красном смещении $z > 4.5$ Ly-break смещается на край кривой пропускания фильтра B, что делает невозможным обнаружение объекта в данном фильтре. В то же время объект будет виден в более "красных" фильтрах фотометрической системы. Данная ситуация имеет название "дроп-аут"(dropout). Возникает вопрос – почему бы не поставить в синюю часть спектра набор среднеполосных фильтров? Ответ заключается в основной задаче, для которой предназначен данный набор фильтров: для выделения объектов с большими красными смещениями необходимо иметь хорошее ограничение сверху на потоки в "синих" фильтрах, которое будет тем лучше, чем больше света будет попадать на приемник, при этом совершенно не обязательно определять распределение энергии в участке спектре объекта с длинами волн короче $Ly\alpha$, достаточное количество информации для классификации будет содержаться в "красных" среднеполосных фильтрах. Данная фотометрическая система позволяет осуществлять поиск и селекцию объектов с большими красными смещениями при разумных затратах наблюдательного времени.

Данная фотометрическая система была выбрана для тестирования в первую очередь, поскольку осенью 2001 года на 6-метровом телескопе САО РАН были получены глубокие прямые снимки поля Q2203+29, о работе с которыми пойдет речь в главе 5. Ограничение по длинам волн спектров SDSS не позволяет использовать все 8 фильтров, в связи с чем фильтр "SED 967" был исключен из рассмотрения. Результаты тестирования методики в применении к фотометрическим красным смещениям приведены на рисунке 3.2 слева. Обращает внимание неопределенность красных смещений в диапазоне 0-3, что связано с отсутствием среднеполосных фильтров в синей области спектра. Однако, для $z_{spec} > 3.5$ ситуация существенно улучшается. Стан-

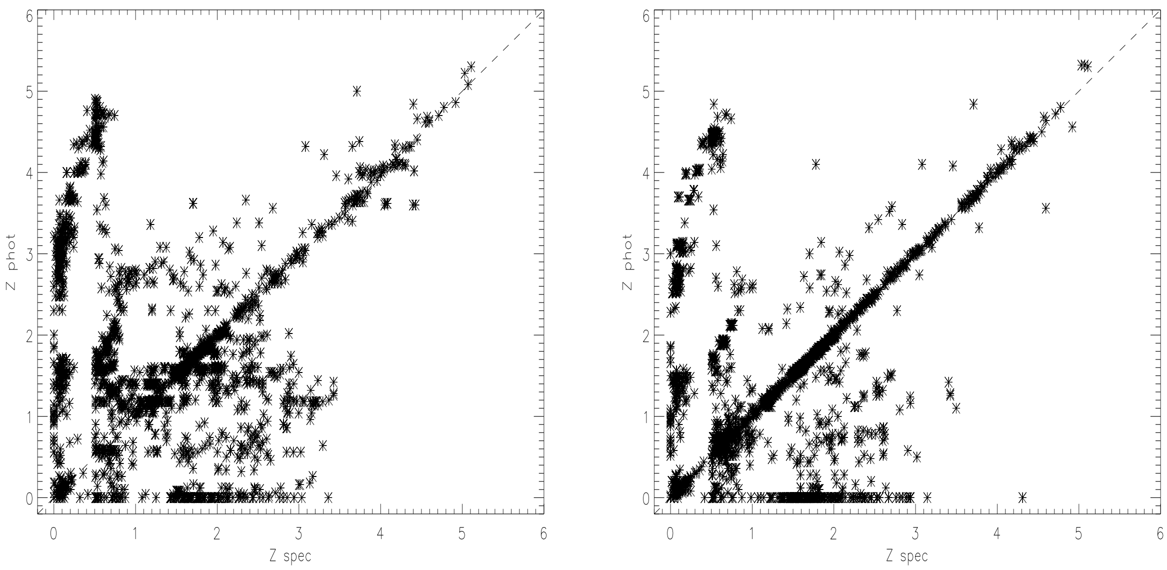

Рис. 3.2: Фотометрической определение красных смещений с использованием комбинированной системы из 7 фильтров (слева) и полной системы из 14 среднеполосных фильтров (справа).

дартное отклонение $\sigma(z_{spec} - z_{phot}, z_{spec} > 3.5) = 0.19$. Величина достаточно большая, однако видно, что методика хорошо выделяет далекие объекты. Наличие большого количества близких объектов, для которых неправильно определяется красное смещение (сильно завышено) объясняется особенностями формы спектра нормальных галактик ранних типов. Наличие резкого падения потока в спектре при уменьшении длины волны с 4000Å до 3500Å (в случае эллиптической галактики почти на 3^m) по амплитуде примерно совпадает с DA параметром Мадау для $z = 3...4$. Данный факт проиллюстрирован на рисунке 3.3.

Для оценки эффективности селекции вычисляется следующий критерий:

$$Eff(z) = \frac{N(z_{phot} > z, z_{spec} > z)}{N(z_{spec} > z)}, \tag{3.1}$$

где $N(z_{phot} > z, z_{spec} > z)$ – количество объектов со спектроскопическими и фотометрическими красными смещениями больше z, а $N(z_{spec} > z)$ – количество объектов со спектроскопическими красными смещениями больше z. Результаты представлены на рисунке 3.4 слева, откуда следует, что при фотометрическом определении красных смещений и включении в выборку для

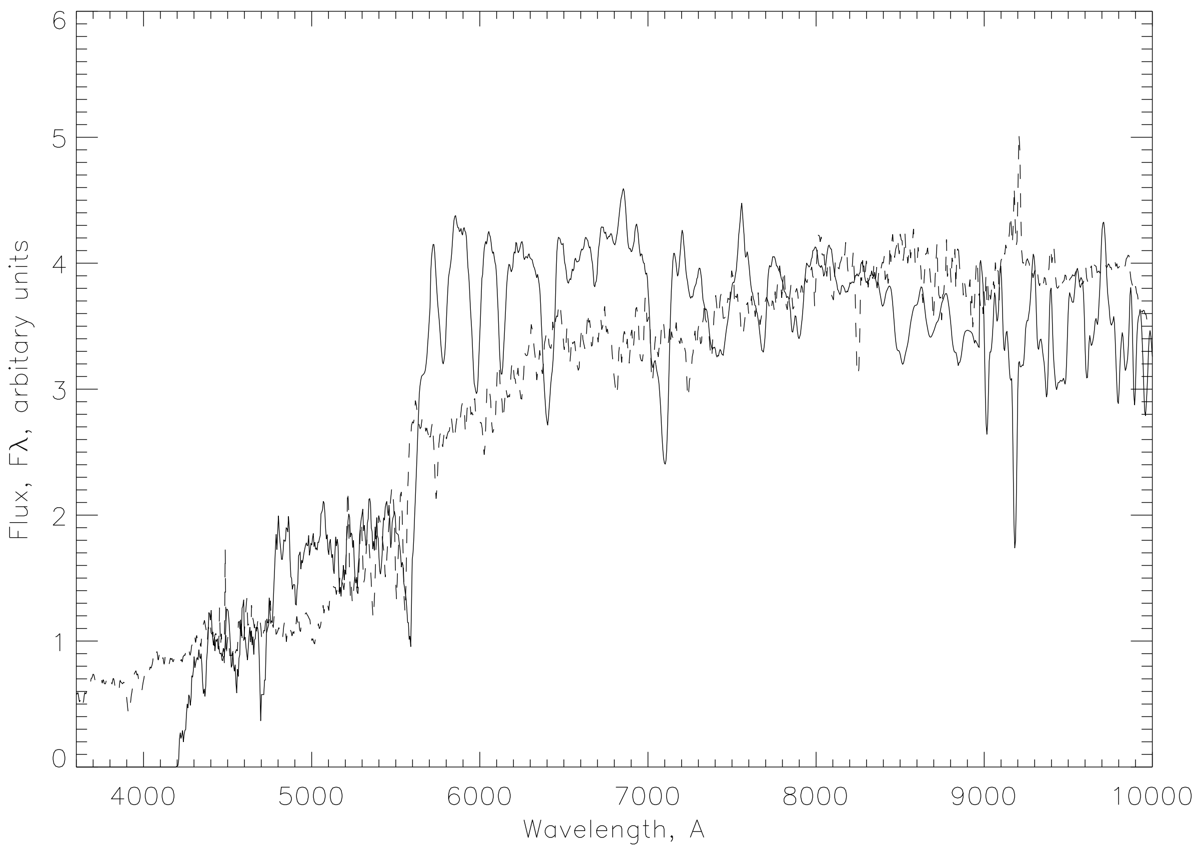

Рис. 3.3: Сравнение видов спектра нормальной галактики типа Sa на красном смещении z=0.4 (штриховой график) и z=3.6 с введением среднего поглощения согласно работе [40] (сплошной график).

дальнейшего исследования объектов с $z_{phot} > 3.5$, в нее попадет более 95% от общего числа объектов с $z_{spec} > 3.5$, а для объектов $z_{spec} > 4.6$ эта величина составит 85%.

Еще одной очень важной величиной, характеризующей качество классификации, является "эффективность наблюдений"

$$Eff_{obs}(z) = \frac{N(z_{phot} > z, z_{spec} > z)}{N(z_{phot} > z)}, \qquad (3.2)$$

которая определяет реальную долю далеких объектов среди выбранных кандидатов. В связи с упомянутой выше трудностью фотометрического разделения близких и далеких галактик, на $z_{spec} > 3.5$ эффективность не превосходит 20% (рис. 3.5, слева, штриховой график). Более того, это значение сильно завышено, что связано с неоднородностью выборки SDSS на $z_{spec} < 1$, поскольку были отобраны все объекты с $z_{spec} \geq 0.5$ и лишь малая часть с $z_{spec} < 0.5$.

Ситуация разрешается благодаря применению морфологического критерия. Принимая во внимание современную космологическую модель ($\Omega = 1, \Omega_M = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$), нетрудно оценить, какие будут фотометрические параметры у галактик с красным смещением $z = 0.7$.

Для определения минимальной светимости, с которой галактика с данным красным смещением будет обнаруживаться на прямых снимках данной глубины, используется понятие яркостного расстояния (luminocity distance) [41]

$$d_{\mathrm{L}}(z_1) = \frac{\mathrm{sinn}\left\{|\Omega_{\mathrm{k}}|^{1/2}\int\limits_0^{z_1}[(1+z)^2(1+\Omega_{\mathrm{M}}z) - z(1+z)\Omega_\Lambda]^{-1/2}dz\right\}}{H_0(1+z)|\Omega_{\mathrm{k}}|^{1/2}}, \qquad (3.3)$$

где "sinn"определен как sh для открытой Вселенной ($\Omega_{\mathrm{k}} > 0$) и как sin для закрытой Вселенной ($\Omega_{\mathrm{k}} < 0$). Для случая плоской Вселенной – общепринятой в настоящее время концепции – sinn исчезает, остается только интеграл. Таким образом, если рассчитать, какие галактики на $z = 0.7$ ($d_{\mathrm{L}} = 4300$ Мпк) будут ярче 25^m в фильтре R, окажется что их светимость соответствует $M_B = -18^m$, то есть это будут средние или гигантские галактики, либо компактные галактики со вспышкой звездообразования. В любом случае, трудно предположить, что размер таких галактик будет меньше 8-10 кпк. Если взять

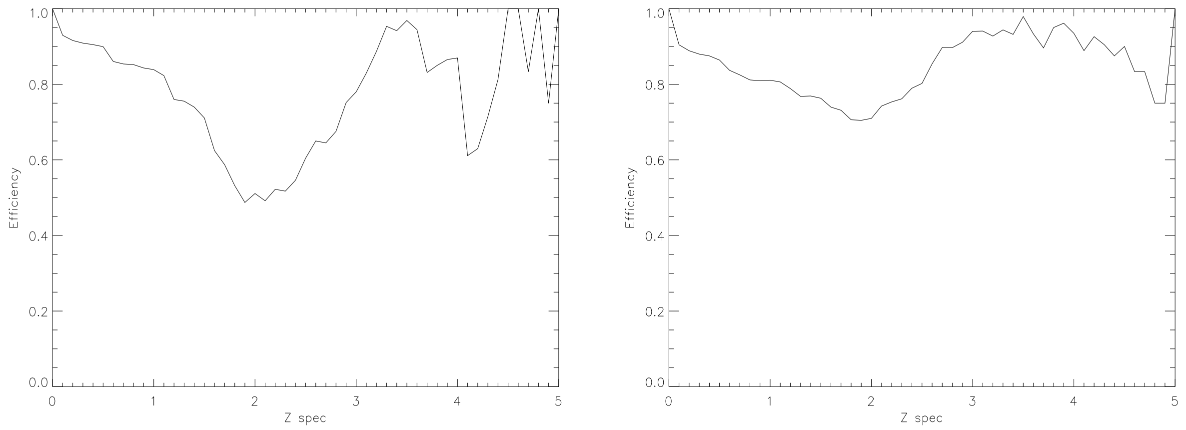

Рис. 3.4: Эффективность выделения далеких объектов для комбинированной системы из 7 фильтров (слева) и полной системы из 14 среднеполосных фильтров (справа).

для примера галактики местной группы, то похожие параметры имеет ММО – карликовая галактика с интенсивным звездообразованием.

Для определения углового размера объекта с заданным красным смещением вводится понятие углового расстояния, которое связано с расстоянием по светимости следующим соотношением $d_{\mathrm{A}} = d_{\mathrm{L}}/(1+z)^2$. Вычислив это расстояние, легко убедиться, что объект с линейным размером 8 кпк будет иметь размер около 1.1", то есть на прямых снимках, полученных при секундных изображениях, он будет протяженным.

Зависимость эффективности наблюдений от красного смещения с учетом данного факта приведена на рисунке 3.5 сплошной линией. Видно, что для $z_{spec} = 3.5$ эффективность увеличивается до 90%.

Для проверки работоспособности методики для спектральной классификации звезд была построена модельная выборка, состоящая из 11400 звезд (по 100 звезд каждого спектрального класса из имеющихся в библиотеке template-спектров). Все данные были зашумлены до отношения сигнал/шум 10. После этого была произведена классификация списка модельных объектов со звездными template-спектрами. Большой спектральный диапазон template-спектров позволил использовать данные для фильтра "SED 967".

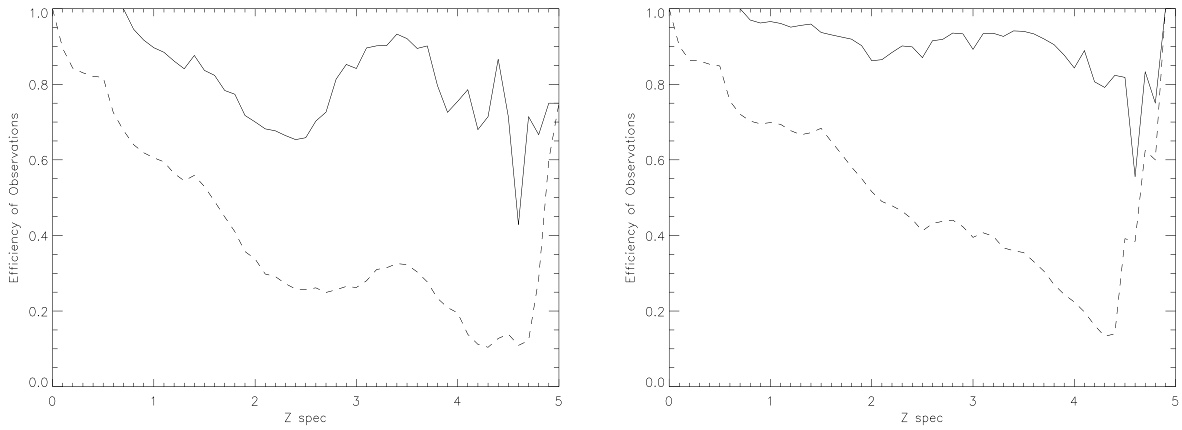

Рис. 3.5: Эффективность наблюдений при поиске далеких объектов для комбинированной системы из 7 фильтров (слева) и полной системы из 14 среднеполосных фильтров (справа). Штриховые графики – без применения морфологического критерия, сплошные – с применением.

Результаты тестирования представлены на рисунке 3.6 слева. По осям отложены задаваемый и получаемый в результате классификации типы звездных спектров. Для удобства восприятия типы спектров содержат 5 групп по классам светимости звезд (I-V), в каждой из которых произведена сортировка по спектральным классам и подклассам от O до L. Прямая с наклоном "1" соответствует правильному определению как спектрального класса, так и класса светимости. Ее толщина соответствует точности классификации и составляет $\sim$1-1.5 спектральных подкласса.

"Обрывки" кривых, симметрично заполняющие график соответствуют неправильному определению класса светимости. В сумме они содержат 53% точек, что говорит о дисперсии порядка 1.5 классов светимости. Данный факт свидетельствует о том, что при использовании комбинированной системы фильтров, предназначенной для поиска далеких объектов для звезд нельзя надежно определить класс светимости, но возможно уверенно определить спектральный класс с большой точностью. Кривизна участков на рисунке вызвана неоднородностью библиотеки template-спектров по спектральным классам и классам светимости: например, присутствуют всего 8 спектров звезд 2-го класса светимости (яркие гиганты), в то время как спектров кар-

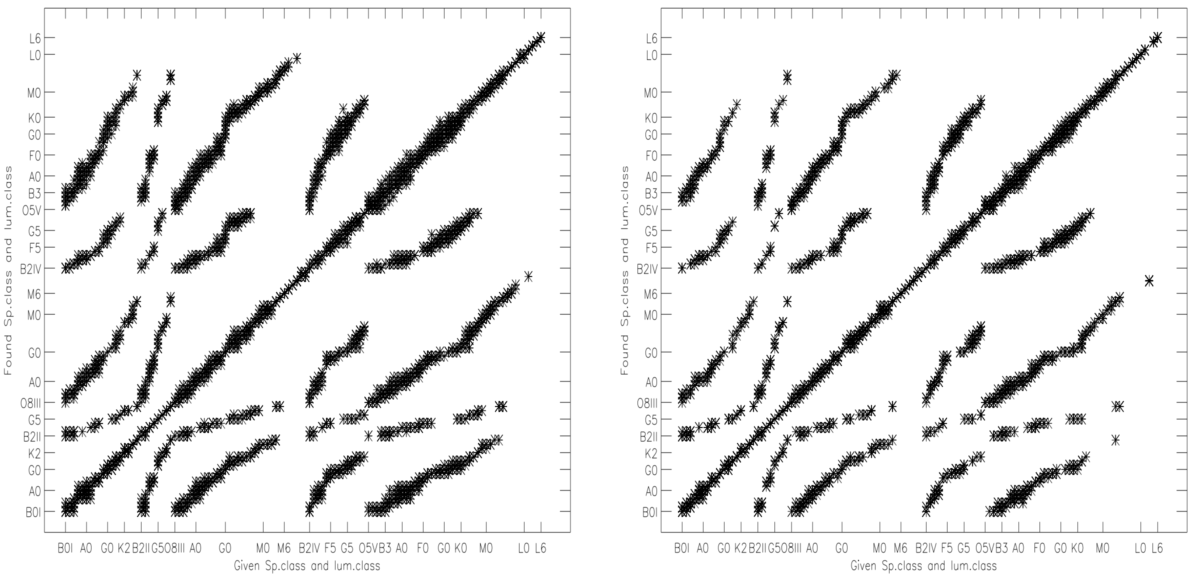

Рис. 3.6: Результаты тестирования методики для спектральной классификации звезд на модельных данных для комбинированной системы из 8 фильтров (слева) и полной системы из 15 среднеполосных фильтров (справа).

ликов (5-й класс светимости) в библиотеке более 40.

Вторым вариантом для тестирования была выбрана система из 15 среднеполосных фильтров редуктора SCORPIO с длинами волн больше 4000Å (рис. 4.2), как перспективный вариант для последующих наблюдений. Как и в предыдущем случае, фильтр "SED 967" был исключен из рассмотрения. Таким образом, в системе осталось 14 фильтров с центральными длинами волн 4150Å-9150Å.

Результаты тестирования показаны на рисунках 3.2, 3.4, 3.5, 3.6 справа. Полная система фильтров позволяет точнее определять красное смещение для далеких объектов: стандартное отклонение $\sigma(z_{spec} - z_{phot}, z_{spec} > 3.5) = 0.07$. Эффективность выбора далеких объектов и наблюдений также несколько выше. В случае теста на спектральную классификацию звезд результаты следующие: $\sigma(Sp) < 0.1$ подкласса, $\sigma(Lum) \sim 1$ класс светимости (в "боковых" ветвях 41% всех звезд).

Проведенное тестирование показывает состоятельность методики для целей фотометрической классификации и селекции объектов.

Глава 4

Многощелевой вариант спектрографа SCORPIO

В конце 2000 года на 6-метровом телескопе САО РАН вступил в строй многофункциональный редуктор светосилы SCORPIO (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometrical and Interferometrical Observations), предназначенный для получения прямых снимков, работе в режимах сканирующего эталона Фабри-Перо и длиннощелевого спектрографа. Уже первые наблюдения показали высокую эффективность данного прибора нового поколения, в 4-6 раз превосходящую эффективность аппаратуры главного фокуса БТА, используемой в настоящее время.

Для задач фотометрической классификации объектов в глубоких полях, в частности для поиска далеких квазаров и первичных галактик фотометрическими методами, был рассчитан и изготовлен набор среднеполосных светофильтров для многорежимного спектрографа SCORPIO, в настоящее время включающий 18 фильтров с центральными длинами волн от 3700Å до 9700Å и полуширинами от 100Å до 200Å (рис. 4.2). Помимо данного набора имеются широкополосные фильтры Джонсоновской системы B, V и Крон-Кузиновской системы R, I (рис. 4.1) и узкополосные фильтры для наблюдения галактик в районе линии $H\alpha$ со сканирующим интерферометром Фабри-Перо. На сегодняшний день набор фильтров SCORPIO по полноте охвата оптического диапазона и качеству фильтров не уступает лучшим мировым аналогам.

Летом 2002-го года В.Л.Афанасьевым был создан многощелевой блок для спектрографа SCORPIO. С его помощью стало возможным одновременное

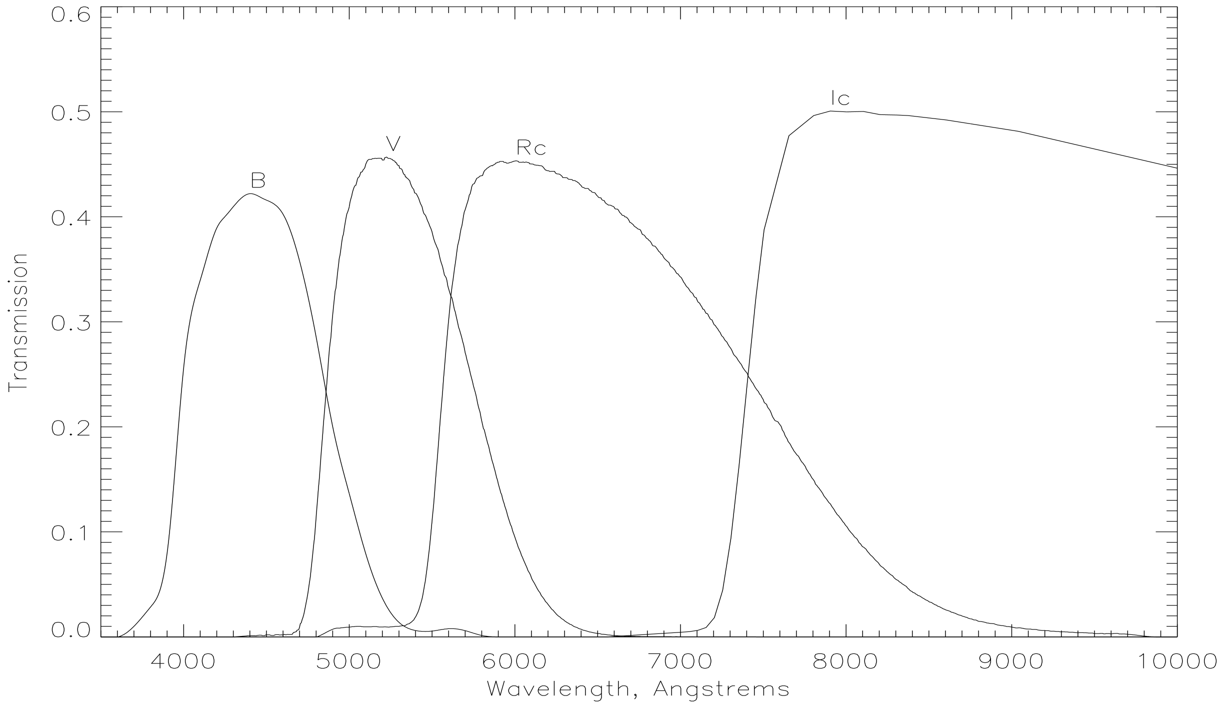

Рис. 4.1: Система широкополосных фильтров SCORPIO.

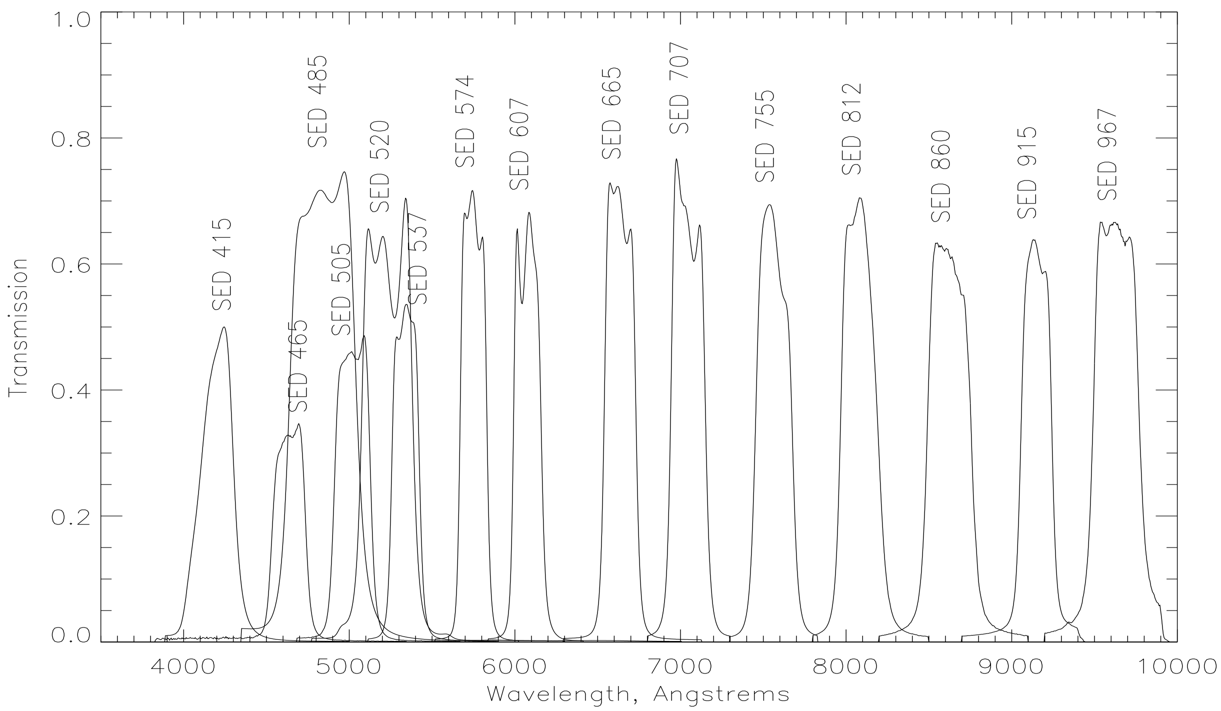

Рис. 4.2: Комбинированная система фильтров, предназначенная для поиска объектов с большими красными смещениями.

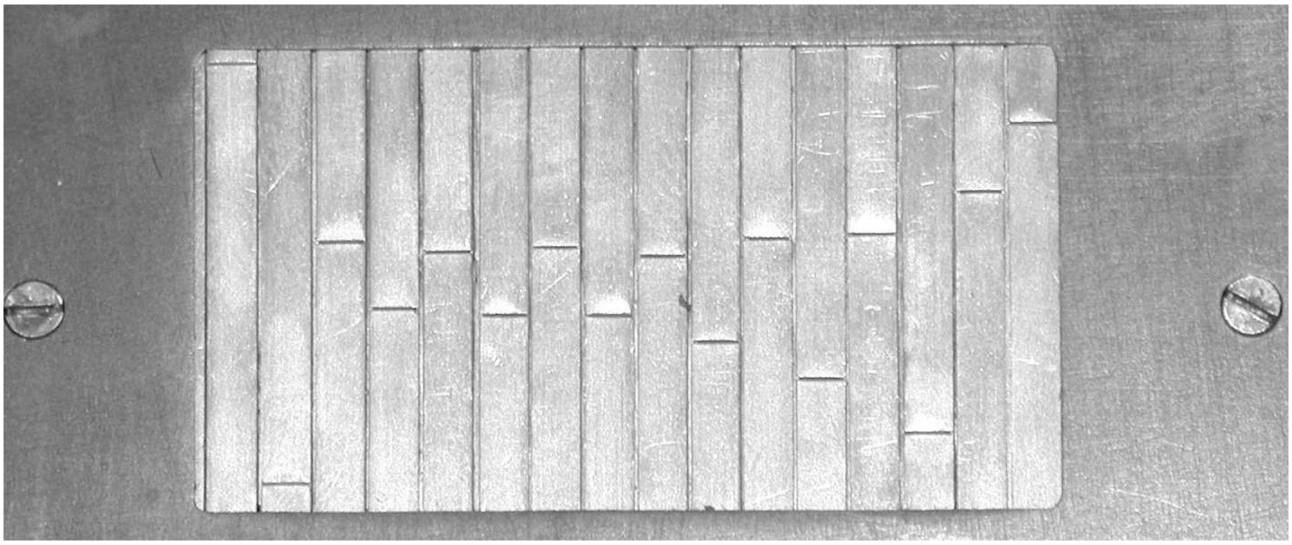

Рис. 4.3: Общий вид многощелевого блока.

получение до 16 спектров объектов до 24^m в поле $6' \times 4'$. Главным отличием от существующего мультиобъектного оптоволоконного спектрографа (MOFS) является существенно большая общая квантовая эффективность системы – до 35% в случае SCORPIO против 7%-8% в случае MOFS. К недостаткам мультищелевого варианта SCORPIO следует отнести малое количество объектов (до 16) по сравнению с MOFS (до 100) и меньшую свободу в допустимых конфигурациях объектов, объясняемую тем, что щели перемещаются только по одной координате – вдоль дисперсии. В настоящий момент задействованы только 13 щелей из 16, что связано с форматом используемого CCD-детектора (1024×1024 24-мкм пикселей). Общий вид многощелевого блока показан на рисунке 4.3.

Введение в эксплуатацию многощелевого блока играет первостепенную роль в экспериментальной проверке эффективности методики фотометрической классификации объектов, описанной в предыдущих главах.

При разработке методики подготовки и проведения наблюдений в многощелевом варианте учитывался опыт прошлых лет по работе с многощелевым спектрографом MSFS [42].

Многощелевой блок спектрографа SCORPIO представляет собой набор из 16 щелей, управляемых системой электромагнитов. Ход щелей вдоль дисперсии составляет величину около 20 мм, средняя высота щелей – 2 мм (24”), средняя ширина – 0.115 мм (1.3”), средний промежуток между соседними щелями – 0.5 мм.

В настоящее время для задач массовой спектроскопии слабых объектов существует 3 прозрачные дифракционные решетки – 150 штр/мм и 2 решетки 300 штр/мм с концентрацией блеска в разных участках спектра. Для решетки 150 штр/мм дисперсия составляет $\sim 14Å/px$, для решеток 300 штр/мм $\sim 7Å/px$ при наблюдениях с CCD-приемником TK1024.

Понятие методики проведения наблюдений включает в себя два основных этапа:

- первоначальную подготовку программы наблюдений – подготовку нескольких вариантов расстановки щелей и рекомендаций по наведению телескопа ($\alpha_{center}, \delta_{center}$, P.A.);
- расчет коррекций положения щелей непосредственно во время наблюдений после наведения телескопа по рекомендованным координатам.

В настоящее время физическая расстановка щелей осуществляется за несколько итераций в автоматическом режиме с помощью программ, написанных С.Н.Додоновым и А.В.Моисеевым. Полный цикл расстановки выполняется за 10-15 минут.

4.1 Алгоритм расстановки щелей

Задача оптимальной расстановки щелей математически чрезвычайно сложна из-за особенностей ограничения на параметры многощелевого блока. Литература по данной проблеме полностью отсутствует, все программные реализации являются коммерческими закрытыми продуктами, что вынудило автора разработать собственный алгоритм расстановки щелей.

При расстановке щелей необходимо уделять внимание следующим моментам:

1) объекты должны стоять как можно ближе к центрам щелей, не далее чем четверть высоты щели от центра, что связано с методикой проведения наблюдений – необходимо попеременно получать спектры объектов в

левых и правых частях щелей, чтобы была возможность учесть фринги (результат интерференции на CCD-детекторе в ближнем ИК диапазоне спектра);

3) необходимо выбрать расстановку с наибольшим числом объектов, попавших в щели;

2) существует ограничение на ход щелей вдоль дисперсии, вызванное конечными размерами приемника света: при сильном отклонении от нулевого положения часть спектра объекта может не попасть на приемник.

С учетом описанных требований, расстановка была формализована в виде минимизации функционала:

$$\mathcal{F}(\alpha_c, \delta_c, P.A.) = (N_{slits} - N_{used})^8 (\sum_i \mathcal{F}^2_{x_i} + \sum_i \mathcal{F}^2_{y_i}), \tag{4.1}$$

где N_{slits} – общее число щелей, N_{used} – число щелей, использованных в расстановке, суммы берутся по расставленным объектам,

$$\mathcal{F}_{x_i} = \begin{cases} \min|x_{obj_i} - x_{slit_i}|, & \min|x_{obj_i} - x_{slit_i}| > \frac{w_{slit_i}}{4} \\ \min|x_{obj_i} - x_{slit_i}|/10, & \min|x_{obj_i} - x_{slit_i}| \leq \frac{w_{slit_i}}{4} \end{cases}, \tag{4.2}$$

$$\mathcal{F}_{y_i} = \begin{cases} |y_{obj_i} - y_{slit_i}|, & |y_{obj_i} - y_{slit_i}| > \frac{h_{slit_i}}{2} \\ |y_{obj_i} - y_{slit_i}|/10, & |y_{obj_i} - y_{slit_i}| \leq \frac{h_{slit_i}}{2} \end{cases}, \tag{4.3}$$

w_{slit_i} и h_{slit_i} – ширины и высоты щелей соответственно, расстояния $|x_{obj_i} - x_{slit_i}|$ вычисляются в проекции на направление вдоль щелей, $|y_{obj_i} - y_{slit_i}|$ – вдоль дисперсии. Вид данного функционала определен эмпирическим путем, исходя из соображений о симметрии значений $\mathcal{F}_{x_i}$ и $\mathcal{F}_{y_i}$ относительно центров щелей по высоте и нулевых положений вдоль дисперсии.

Многочисленные эксперименты на модельных и реальных списках объектов подтвердили возможность использования данного формализованного подхода для расстановки щелей и его эффективность.

Алгоритм реализован в виде функции в среде IDL, которая используется в программах подготовки к наблюдениям.

4.2 Методика подготовки и проведения наблюдений

Предварительная подготовка к наблюдениям состоит из следующих этапов:

- Расчет вариантов расстановок щелей по списку интересующих объектов.
- По любому имеющемуся прямому снимку с телескопа, на котором предстоит проводить наблюдения, производится астрометрия с целью определения уравнения пластинки. В настоящий момент астрометрические процедуры полностью автоматизированы, используются каталог USNO A2.0 либо вторичный астрометрический стандарт, построенный для поля Q2203+29 по снимку с 2.6-метрового телескопа БАО.
- Уравнения пластинки оборачиваются для расчета положения центра многощелевой маски, координат щелей и трех опорных звезд, которые в процессе наблюдений будут использоваться для контроля точности наведения телескопа и установки позиционного угла.
- Формируется печатная версия карты для наблюдений, на которую нанесены щели и опорные звезды. Пример представлен на рисунке 4.4.
- Формируется файл с расчетными положениями щелей.
- Дается рекомендация гидирующих звезд (они находятся за пределами области расположения щелей).

В процессе проведения наблюдений:

1) производится наведение телескопа по рекомендуемым координатам;

2) производится предварительная расстановка щелей;

3) осуществляется получение прямого снимка области;

4) по прямому снимку производится автоматическая астрометрическая калибровка и рассчитываются коррекции положений щелей;

5) производится коррекция расстановки щелей, согласно рассчитанным значениям;

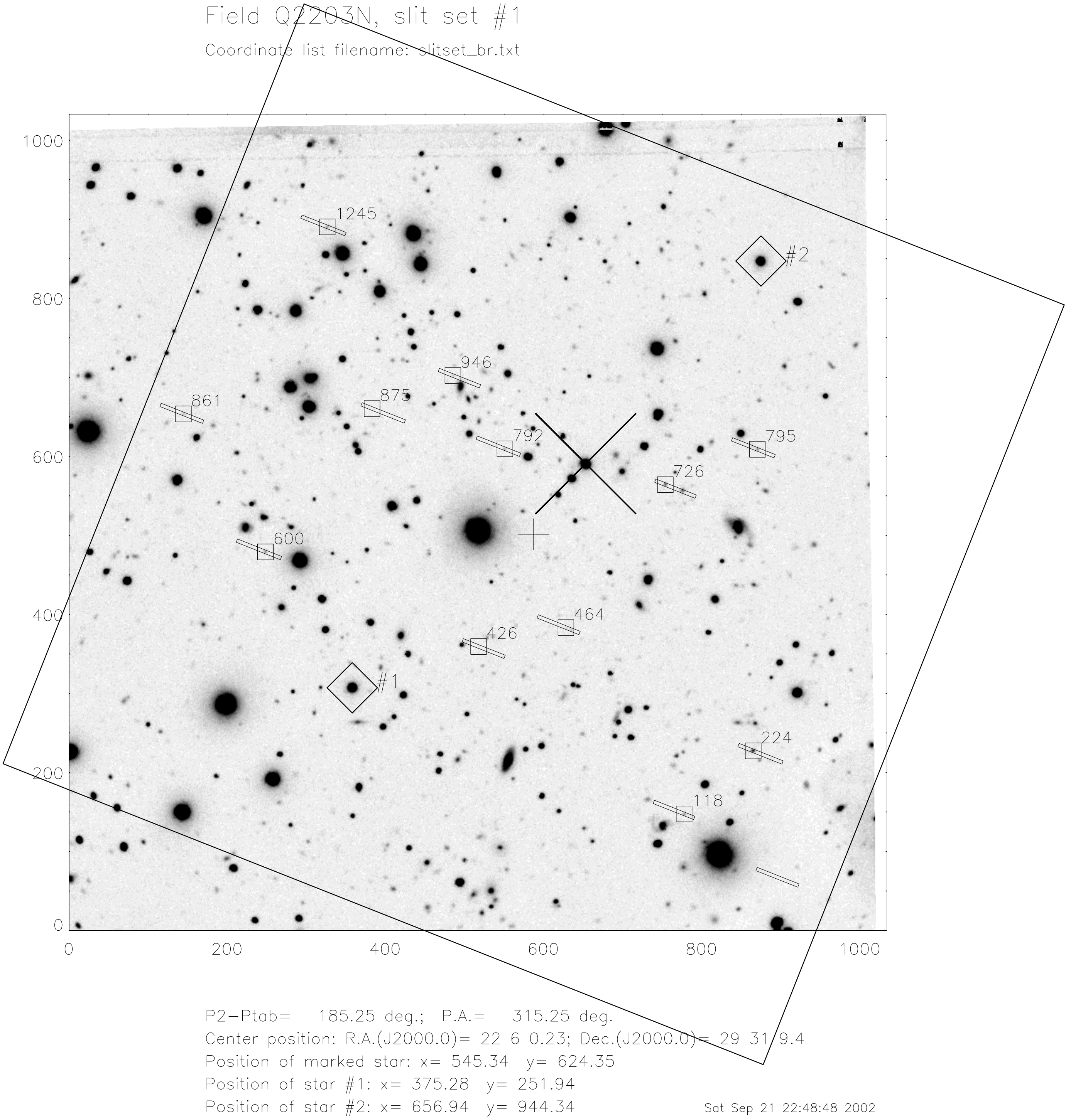

Рис. 4.4: Пример карты наблюдаемой области с расстановкой щелей, используемой в процессе наблюдений.

6) осуществляется повторное получение прямого снимка для контроля правильности расстановки;

7) если щели расставлены с допустимыми ошибками, начинаются наблюдения;

8) через каждые 2-3 спектральных экспозиции осуществляется получение контрольного прямого снимка.

Глава 5

Классификация объектов в поле Q2203+29

Одной из целей, для которых создавалась описанная в предыдущих главах методика фотометрической классификации объектов – поиск объектов с большими красными смещениями: далеких галактик и квазаров.

Применяется несколько стратегий поиска далеких объектов:

1. *"Направленные" поиски.* Очевидные области поисков далеких галактик - области вокруг известных объектов с большими красными смещениями. В соответствии с теориями образования галактик можно предполагать, что поверхностная плотность галактик в этих областях повышена. Областями исследования для подобных "направленных" поисков обычно служат области вокруг квазаров с большими z, а также вокруг далеких радиогалактик. Обычно поиски концентрируются на красных смещениях, соответствующих либо красному смещению самого объекта, вокруг которого осуществляется поиск, либо межгалактическим линиям поглощения в его спектре.

2. *Поиск в "пустых" полях.* Области, подходящие для поиска объектов с большими красными смещениями, не должны содержать ярких звезд и располагаться в областях локальных минимумов на 100μ картах IRAS, т.е. в областях с поверхностной яркостью ниже 2 mJy/sr, для того чтобы избежать галактического поглощения.

3. *Систематические поиски объектов с большими красными смещениями*

Таблица 5.1: Потоки и звездные величины для прямых снимков поля Q2203+29, соответствующие уровню 3σ над фоном неба, суммарные времена экспозиций

	B	R	707	755	812	860	915	967
$F_\lambda, 10^{-19}\frac{erg}{cm^2 \cdot s}$	1.42	1.33	1.30	1.31	1.51	1.93	2.24	2.99
ST-mag	26.02	26.09	26.12	26.11	25.95	25.69	25.52	25.21
AB-mag	26.47	25.68	25.58	25.42	25.12	24.71	24.42	23.99
Exp., s	3000	1800	3600	7200	7200	9600	7200	9900

вокруг скоплений галактик. усиление яркости далеких галактик за счет эффектов гравитационного линзирования дает нам возможность обнаруживать галактики с большими красными смещениями. Так была обнаружена пара галактик в HDF с красным смещением $z = 4.92$.

Поле Q2203+29 представляет пример реализации первой стратегии. Вблизи центра поля находится яркий квазар с красным смещением $z = 4.4$. Наблюдения области вокруг квазара Q2203+29 ведутся на телескопах САО РАН и БАО с 1997 года.

В работе использованы данные, полученные осенью 2001 года на 6-метровом телескопе САО РАН. С помощью многофункционального редуктора светосилы SCORPIO были получены глубокие прямые снимки в 8 фильтрах комбинированной фотометрической системы (рис. 3.1). Они получены при хорошем качестве изображения (от 0.8" до 1.1"). Суммарные времена накопления, предельные звездные величины и соответствующие им потоки для суммарного изображения в каждом фильтре приведены в таблице 5.1.

В настоящее время многоцветная фотометрия поля Q2203+29 является наиболее глубоким обзором, проведенным на 6-м телескопе САО РАН.

Весь процесс обработки, начиная первичной редукцией, заканчивая получением итоговых списков с абсолютной фотометрией объектов в поле, был произведен С.Н.Додоновым с помощью специально разработанного программного пакета в среде IDL.

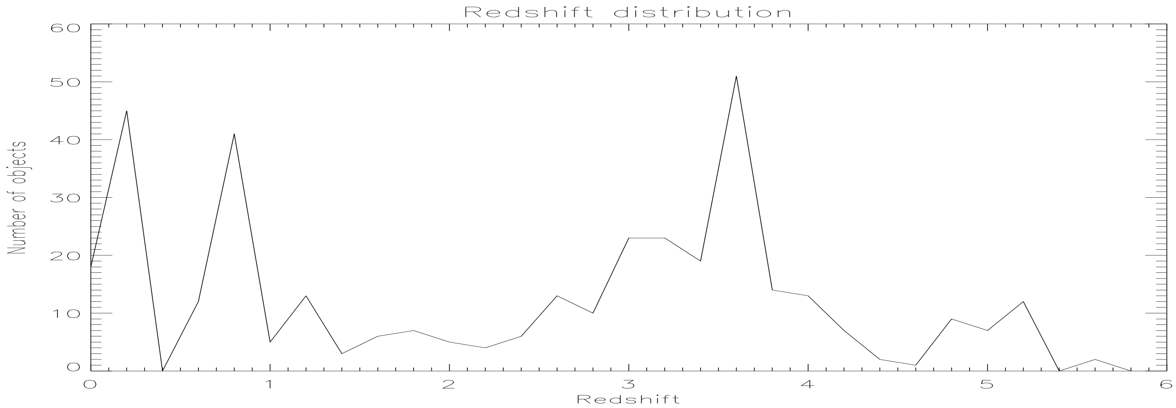

Рис. 5.1: Распределение объектов по фотометрическому красному смещению.

Основной целью исследования поля Q2203+29 является поиск объектов с красными смещениями $z > 4.5$, в связи с чем был проведен предварительный отбор объектов по критерию dropout в фильтре B. В список вошли 373 объекта с потоками в этом фильтре, не превосходящими уровень 2σ над фоном неба.

Для классификации использовался полный набор template-спектров, содержащий звезды, нормальные галактики хаббловских типов E и S, 2 галактики со вспышками звездообразования, активные ядра типа LINER, Seyfert 1 и 2 и 9 спектров квазаров с различными наклонами континуума и эквивалентными ширинами эмиссионных линий.

Пример результатов классификации изображен на рисунке 5.2. В левой части рисунка представлены распределения энергии в спектре, в правой части – критерии значимости для каждого из типов объектов с соответствующими красными смещениями. Жирной линией на левых рисунках показана величина 1σ над фоном неба. Объекты 74, 1245 и 1339 являются кандидатами в далекие объекты, объект 795 по всей видимости красная звезда, а объект 371 – относительно близкая галактика ($z \sim 0.85$).

Распределение объектов по фотометрическим красным смещениям приведено на рисунке 5.1. Из 373 объектов имеется 32 кандидата в далекие объекты с красным смещением $z_{phot} \geq 4.5$. Звезды соответствуют $z_{phot} = 0$

Полные результаты классификации для всех объектов списка доступны по адресу: http://www.sai.msu.su/~chil/Q2203N_totFBR0_E_res.ps.gz

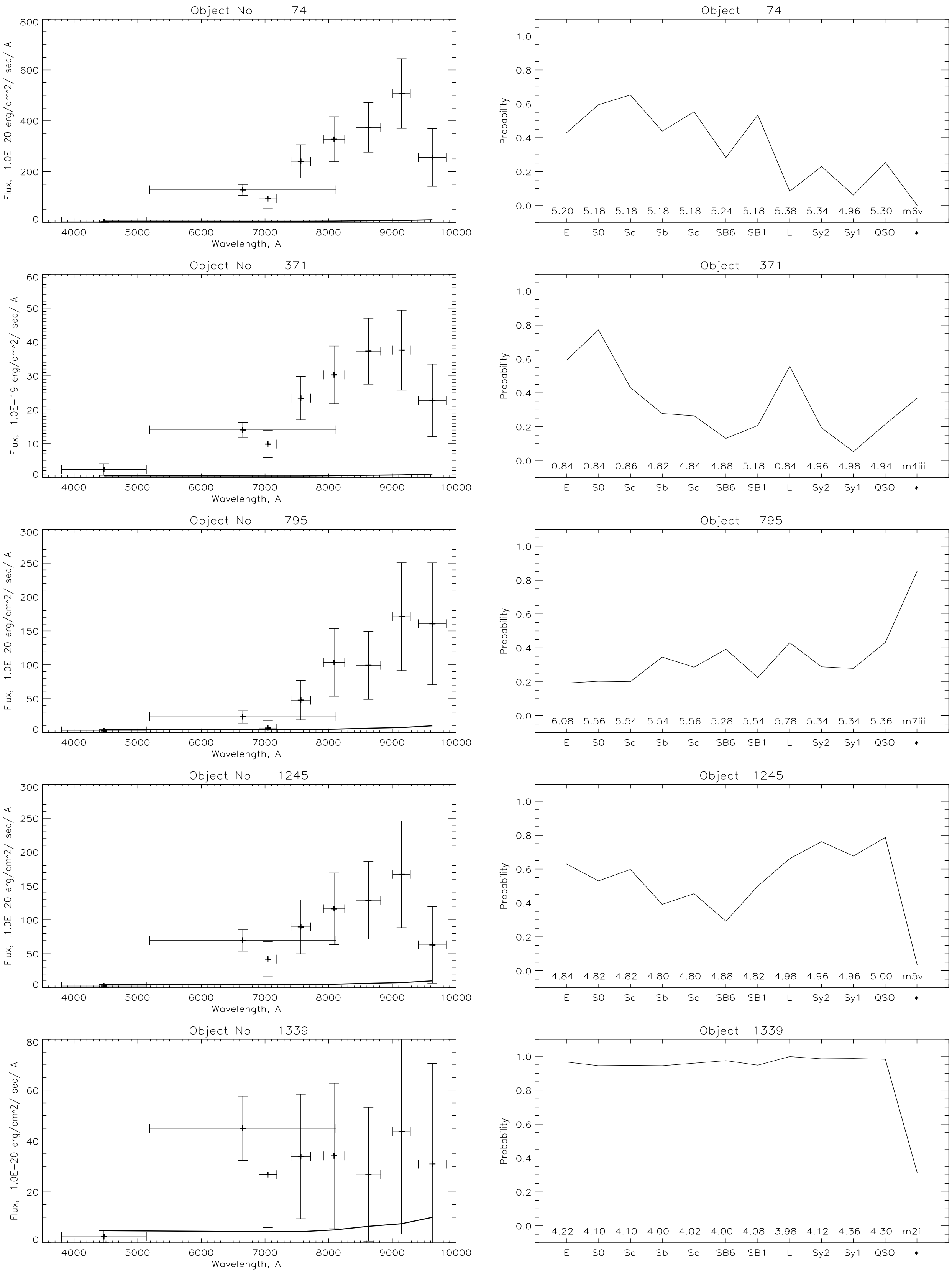

Рис. 5.2: Пример результатов фотометрической классификации объектов.

Заключение

Работа по созданию методики фотометрической классификации объектов по распределению энергии в спектре проводилась автором в составе ЛСФВО САО РАН в течение трех лет, поскольку все варианты подобной методики, предлагаемые зарубежными авторами не являются законченными и готовыми к использованию.

В результате проделанной работы получены следующие результаты:

- Собрана библиотека template-спектров, включающая в себя спектры звезд и большинства известных типов внегалактических объектов. Разработан алгоритм создания композитных спектров с оптимальным использованием данных с различными отношениями сигнал/шум. С использованием открытых данных космической ультрафиолетовой спектроскопии и спектров из обзора SDSS построены композитные спектры внегалактических объектов.

- Разработаны и реализованы в виде платформенно-независимого программного пакета на языке IDL высокопроизводительные алгоритмы SED-fitting, оптимизированные для работы с большими объемами данных; произведено их тестирование на модельных и реальных данных; разработан наглядный способ отображения результатов классификации.

- С помощью созданного программного пакета произведена классификация объектов в поле Q2203+29, предварительно отобранных по критерию dropout в фильтре B.

- Разработана методика подготовки и проведения наблюдений в многощелевом варианте наблюдений на многофункциональном спектрографе SCORPIO. Разработаны и реализованы алгоритмы расстановки щелей.

Главным результатом проделанной работы можно считать создание законченной методики фотометрической классификации объектов с помощью анализа распределений энергии в спектрах. В дальнейшем это позволит с помощью небольших и средних по размеру телескопов (до 3 метров) ставить задачи по спектральному подтверждению кандидатов в далекие объекты на крупных телескопах.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю Сергею Николаевичу Додонову, главному научному сотруднику САО РАН В.Л.Афанасьеву за консультации и полезные обсуждения по вопросам, касающимся астрономического приборостроения и физике активных галактик, зав. ЛПР САО РАН С.В.Маркелову, сотрудникам ЛСФВО САО РАН А.В.Моисееву и А.Н.Буренкову, ведущему научному сотруднику ГАИШ МГУ О.К.Сильченко за консультации как по научным вопросам, так и по вопросам оформления дипломной работы, французским коллегам из обсерватории г.Лион Ph.Prugniel и G.Paturel за предоставленную базу данных LEDA, сотрудникам ГАИШ МГУ Н.В.Тюриной и А.А.Белинскому и проф. А.В.Засову за моральную и техническую поддержку во время написания диплома.

Программный пакет SED-fitting с полным набором template-спектров доступен при запросе у автора по электронной почте: chil@sai.msu.su

Литература

[1] Baum, W. A., 1962, Problems of Extra-Galactic Research, Proceedings from IAU Symposium no. 15, New York, p. 390.

[2] Matthews, T. A., Sandage, A. R., 1963, ApJS, v. 7, p. 141

[3] Koo, D. C., March 1985, AJ, vol. 90, p. 418-440.

[4] В. Л. Страйжис, 1977, Многоцветная фотометрия звезд. Фотометрические системы и методы. Вильнюс, "Мокслас".

[5] Loh, E. D., Spillar, E. J., April 1, 1986, ApJ, Part 1, vol. 303, p. 154-161

[6] E. Thommes, K. Meisenheimer, R. Fockenbrock, H. Hippelein, H.-J. Röser, 1997, RvMA, v. 10, p. 279-322

[7] Wolf, C., 1999, PASP, v. 111, issue 762, p. 1048

[8] S. Phleps, K. Meisenheimer, B. Fuchs, 2000, A&A, v. 356, p. 108

[9] Hall, P. B., Osmer, P. S., Green, R. F., Porter, A. C., Warren, S. J., 1996, ApJS, v. 104, p. 185

[10] Hall, P. B., Osmer, P. S., Green, R. F., Porter, A. C., Warren, S. J., May 20, 1996, ApJ, vol. 20

[11] Kennefick, J. D., Osmer, P. S., Hall, P. B., Green, R. F., 1997, AJ, v. 114, p. 2269

[12] Williams, R., Dickinson, M., Giavalisco, M., Gilliland, R., Ferguson, H., Fruchter, A., McElroy, D., Lucas, R., Petro, L., Postman, M., 1995, AAS, 187th AAS Meeting, #09.03; Bulletin of the AAS, Vol. 27, p.1294

[13] Williams, R., Baum, S. A. et al., 1998, 193rd AAS Meeting, #75.01; Bulletin of the AAS, Vol. 30, p.1366

[14] Spinrad, H., Stern, D., Bunker, A., Dey, A., Lanzetta, K., Yahil, A., Fernandez-Soto, A., Pascarelle, S., 1998, AJ, v. 116, issue 6, pp. 2617-2623

[15] Yahata, N., Lanzetta, K., Chen, H.-W. et al., 2000, ApJ, v. 538, Issue 2, pp. 493-504., 2000

[16] http://www.sdss.org/

[17] http://www.ipac.caltech.edu/2mass/

[18] http://webast.ast.obs-mip.fr/hyperz/

[19] Oke, J. B., Feb 1974, ApJSS vol. 27, p. 21-35

[20] R. Lupton, J. Gunn, A. Szalay, 1999, astro-ph/9903081

[21] Betin E., Arnouts S., 1996, A&AS, v. 117, p. 393

[22] Andreon S., Gargiulo G., Longo G., Tagliaferri R., Capuano N., 2000, MNRAS, v. 298, p. 361

[23] Andrew E. Firth, Lahav O., Rachel S., Somerville, Storrie-Lombardi M. C., 2002, MNRAS in press, astro-ph/0203250

[24] R. Tagliaferri, G. Longo, S. Anderson, S. Capozziello, C. Donalek and G. Giordano, 2002, A&A in press, astro-ph/0203445

[25] Lahav O., Naim A., Sodré L. Jr., Storrie-Lombardi M. C., 1996, MNRAS, v. 283, p. 307

[26] Bailer-Jones C. A. L., Irwin M., von Hippel T., 1998, MNRAS, v. 298, p. 361

[27] Alende Prieto C., Rebolo R., López R. J. G. et al., 2000, AJ, v. 120, p. 1516

[28] Weaver W. B., 2000, ApJ, v. 541, p. 298

[29] Picles, A. J., 1998, PASP, v. 110, issue 749, p. 863

[30] Basri G., Allard F., Hauschildt P., Mohanty S., 2000, Very Low-mass Stars and Brown Dwarfs, Edited by R. Rebolo and M. R. Zapatero-Osorio. Published by the Cambridge University Press, UK, p.133

[31] Francis P.J., Hewett P.C., Foltz C.B., Chaffee F.H., Weymann R. J., Morris S.L., 1991, ApJ, v. 373, p. 465

[32] Kinney A.L., Calzetti D., Bohlin R.C., McQuade K., Storchi-Bergmann T., Schmitt H.R. 1996, ApJ, v. 467, p. 38

[33] Schmitt, H. R., Kinney, A. L., Calzetti, D., Storchi Bergmann, T., 1997, AJ v.114, p. 592-612

[34] Vanden Berk D.E. et al., 2001, astro-ph/0105231

[35] Fitzpatrick, 1999, PASP, v. 111, p. 63

[36] Schlegel, D., Finkbeiner, D., Davis, M., 1998, ApJ, v. 500, p. 525

[37] Véron-Cetty, M.-P., Véron, P., 2001, A&A, v.374, p.92-94

[38] Gorgas, J., Cardiel, N., Pedraz, S., Gonzlez, J. J., Oct 1 1999, A&AS v. 139, p. 29

[39] Fioc, M., Rocca-Volmerange, B., 1997, A&A, v.326, p.950

[40] Madau, P., 1995, ApJ, v. 441, p. 18

[41] Carroll, S. M., Press, W. H., Turner, E. L., 1992, ARA&A, v. 30, p. 499

[42] Додонов С.Н., 1991, Канд. диссертация