

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ГЛАВНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ
ОБСЕРВАТОРИЯ

Л.С. ПИЛЮГИН

**ИОНИЗОВАННЫЙ ГАЗ
В ГАЛАКТИКАХ:
ФИЗИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ
И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ**

*ПРОЕКТ
«НАУКОВА КНИГА»*

КИЕВ «НАУКОВА ДУМКА» 2013

УДК 524.78

Рассмотрены методы определения физических характеристик и химического состава областей Н II: классический T_e -метод и разные варианты метода сильных линий (калибровки), разработанные в последние десятилетия. Проведен анализ основных результатов исследований химического состава спиральных и неправильных галактик.

Для научных работников в области астрономии, преподавателей, аспирантов и студентов высшей школы соответствующего профиля, а также всех, кто интересуется астрономией.

Розглянуто методи визначення фізичних характеристик і хімічного складу областей Н II: класичний T_e -метод і різні варіанти методу сильних ліній (калібровки), розроблені за останні десятиріччя. Проведено аналіз основних результатів дослідження хімічного складу спіральних та неправильних галактик.

Для наукових співробітників у галузі астрономії, викладачів, аспірантів і студентів вищої школи відповідного профілю, а також усіх, хто цікавиться астрономією.

Рецензент профессор Р.Е. Гершберг

*Рекомендовано к печати ученым советом
Главной астрономической обсерватории НАН Украины
(протокол № 23 от 16.12.2010)*

***Видання здійснено за державним замовленням
на випуск виробничої продукції***

Научно-издательский отдел физико-математической литературы

Редактор *В. В. Вероцкая*

ISBN 978-966-00-1267-7

© Л.С. Пилюгин, 2012
© НПП «Издательство “Наукова думка”
НАН Украины», дизайн, 2012

Оглавление

Предисловие	6
Глава 1. Введение	7
1.1. Зарождение спектрального анализа	10
1.2. Области H II	13
1.3. Терминология и обозначения	18
Глава 2. Рекомбинационный спектр области H II	22
2.1. Теория Занстра	22
2.2. Зона Стремгрена	24
2.3. Бальмеровский декремент	28
2.4. Определение электронной температуры по бальмеровскому скачку	30
2.5. Определение содержания иона кислорода O^{++} по рекомбинационным линиям	34
Глава 3. Классический метод определения электронной температуры и химического состава по запрещенным линиям	36
3.1. Запрещенные линии. Трехуровневая и пятиуровневая модели ионов	36
3.2. Определение электронной температуры в зоне свечения дважды ионизованного кислорода	43
3.3. Определение электронной температуры в зоне свечения однажды ионизованного кислорода	47
3.3.1. $t_2(O II)$	48
3.3.2. $t_2(N II)$	53
3.3.3. $t_2(S II)$	56

3.3.4. $t_3(\text{S III})$	58
3.4. Соотношение t_2-t_3	61
3.5. Определение электронной концентрации	66
3.5.1. $n_e(\text{O II})$ и $n_e(\text{S II})$	67
3.5.2. $n_e(\text{O III})$, $n_e(\text{S III})$ и $n_e(\text{N II})$	72
3.5.3. Электронные плотности во внегалактических областях Н II	76
3.6. Определение химического состава по запрещенным линиям. T_e -метод	79
3.6.1. Содержание кислорода	80
3.6.2. Содержание азота	85
3.7. Противоречие между значениями содержаний кис- лорода, найденными по запрещенным и разрешен- ным линиям	88
3.8. Применение T_e -метода	95
3.8.1. Сводка формул T_e -метода	95
3.8.2. Химический состав неправильных галактик	97
3.8.3. Химический состав спиральных галактик	110
Глава 4. Последовательность областей Н II	126
4.1. Последовательность областей Н II	126
4.2. Классификационные диаграммы	128
4.3. ff -соотношение	130
Глава 5. Метод сильных линий. Одномерные калибровки	137
5.1. Два типа калибровок	137
5.2. Одномерные R_{23} -калибровки	139
5.3. Одномерные N-калибровки	143
5.4. Другие одномерные калибровки	149
5.5. Применение одномерных калибровок	151
Глава 6. Метод сильных линий. Параметрические калибровки	162
6.1. Параметрические R_{23} -калибровки	162
6.1.1. Теоретическая параметрическая R_{23} -калибровка	163
6.1.2. Эмпирическая параметрическая R_{23} -калибровка. P -метод	166
6.2. Параметрические N-калибровки	171

6.2.1. Предварительные замечания	171
6.2.2. Выборка калибровочных точек (КТ118) . . .	175
6.2.3. ONS-калибровка	185
6.2.4. ON и NS-калибровки	197
6.2.5. Тестирование параметрических N-калибровок	204
6.3. Применение параметрических калибровок	210
6.3.1. Диаграмма “светимость — металличность” для галактик поздних морфологических типов	211
6.3.2. Максимально достижимое содержание кис- лорода в межзвездной среде	216
6.3.3. Эмпирическая оценка выхода кислорода . .	222
Глава 7. Определение химического состава по интегральному эмиссионному спектру галактики	226
Заключение	237
Список литературы	241

Предисловие

В монографии рассмотрены методы определения физических характеристик и химического состава областей ионизованного газа (областей H II) в нашей и других галактиках. Описано зарождение и развитие основных идей, которые лежат в основе методов диагностики областей H II. Формулы классического T_e -метода определения электронной температуры и содержаний кислорода и азота приведены для наборов современных атомных данных. Большое внимание уделено описанию и анализу разных вариантов метода сильных линий (калибровок), разработанных в последние десятилетия для определения содержания кислорода и азота во внегалактических областях H II, в спектрах которых не удается измерить слабые авроральные линии, необходимые для применения классического T_e -метода.

Проведен анализ основных результатов исследований химического состава межзвездного газа в галактиках поздних морфологических типов (спиральных и неправильных), в которых в современную эпоху протекает звездообразование и, следовательно, наблюдаются области H II.

Автор выражает благодарность Р.Е. Гершбергу, В.И. Пронику и Б.Я. Мелеху, прочитавшим рукопись и сделавшим полезные замечания, а также В.М. Клименко за помощь в подготовке рукописи.

Глава 1

Введение

Изучение спектров космических объектов составляет основу теоретической астрофизики. Это утверждение В.В. Соболев высказал в предисловии к известному учебнику “Курс теоретической астрофизики” [21]. Спектральный анализ лежит в фундаменте многих направлений исследований в разных разделах астрофизики.

Роль спектрального анализа в исследовании различных космических объектов невозможно переоценить. Даже такая простая характеристика спектральной линии, как наблюдаемая длина волны (смещение линии), содержит важную информацию о небесных телах. Сравнительно простые измерения лучевых скоростей дают важную информацию о звездах, межзвездной среде, галактиках и всей Вселенной. В 1889 году немецкий астроном Фогель обнаружил периодические смещения линий в спектре звезды Алголь [531]. Он доказал, что поведение линий в спектре вызвано орбитальным движением звезды в двойной системе. Таким образом, измерение лучевых скоростей звезд позволяет обнаружить их двойственность. Такие звезды получили название спектрально-двойные звезды.

Измерение лучевых скоростей привело к открытию межзвездного газа. В 1904 году Гартман [193] обнаружил, что в спектре спектрально-двойной звезды δ Ориона поведение линии кальция λ 393.4 нм отличается от поведения других линий. Другие линии показывают периодические смещения относительно некоторого среднего положения, обусловленные орбитальным движени-

ем звезды, линия кальция остается неподвижной. Гартман пришел к заключению, что линия кальция образуется в результате поглощения излучения звезды кальцием, находящимся между звездой и наблюдателем, т. е. в межзвездной среде.

Измерение лучевых скоростей на разных расстояниях от центра галактики привело к обнаружению вращения галактик [367, 472]. Кривая вращения галактики используется для определения динамической массы галактики, которая является одной из фундаментальнейших характеристик галактики. В настоящее время спектральные линии в оптическом диапазоне сравнительно редко используют для определения кривых вращения галактик, гораздо чаще кривые вращения галактик находят по измерениям спектральной линии водорода в радиодиапазоне на длине волны 21 см, предсказанной в середине XX века ван де Хюлстом [517] и Шкловским [25].

В начале XX столетия Слайфер измерил лучевые скорости нескольких десятков галактик [473]. Он обнаружил, что большинство галактик удаляется от нас. Линии в их спектрах смещены в красную сторону. Это явление стали называть красным смещением. Сравнивая расстояния до галактик со скоростями их удаления, в 1929 году Хаббл установил фундаментальную закономерность: скорость удаления галактики пропорциональна расстоянию до нее [210]. Коэффициент пропорциональности получил название постоянной Хаббла. Установленная закономерность лежит в основе метода определения расстояний до галактик по измеренным красным смещениям. Сам факт разбегания галактик имеет огромную важность для космологии, так как является наблюдательным подтверждением нестационарности Вселенной. Постоянная Хаббла относится к важнейшим константам астрономии, с ее помощью можно оценить возраст Вселенной.

Спектральный анализ открыл путь к решению фундаментальной задачи об определении химического состава космических объектов. Химический состав звездных атмосфер определен для многих звезд в нашей и ближайших галактик. Ключевую роль в исследовании химического состава галактик играют области H II. Во-первых, исследование областей H II позволяет детально исследовать распределение химических элементов в близких галактиках. Во-вторых, наличие областей H II дает уникальную возможность оценить химический состав в галактиках на больших расстояниях.

При рассмотрении методов определения химического состава в областях Н II сосредоточим основное внимание на методах определения содержания кислорода по ряду причин. Во-первых, основной целью данной книги является описание и анализ разных вариантов метода сильных линий (калибровок), разработанных в последние десятилетия. Большинство калибровок построено для определения только содержания кислорода во внегалактических областях Н II, в спектрах которых не удается измерить слабые авроральные линии, необходимые для применения классического метода. Во-вторых, данные о содержаниях кислорода более многочисленны по сравнению с данными о содержаниях других элементов. Более или менее реалистичные атомные данные для ионов кислорода получены более полувека назад: значения энергии возмущенных уровней [150, 151], эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов [174, 365], эффективные сечения для электронных ударов [452, 454]. Это позволило проводить количественные оценки содержания кислорода в областях Н II и планетарных туманностях, что стимулировало проведение необходимых наблюдений. В-третьих, в областях Н II определяют полное содержание кислорода, так как в большинстве областей Н II кислород находится в двух стадиях ионизации и в оптических спектрах измеряют линии обоих ионов кислорода O^+ и O^{++} . Только в наиболее горячих областях Н II часть кислорода может находиться в стадии трехкратной ионизации O^{3+} , линии этого иона отсутствуют в оптических спектрах областей Н II. Для других химических элементов приходится учитывать вклад ненаблюдаемых стадий ионизации в полное содержание данного элемента в туманности. В-четвертых, значения содержания кислорода в областях Н II получены разными методами, что позволяет оценить их достоверность. Успехи и трудности в определении химического состава в областях Н II прекрасно иллюстрируются на примере кислорода.

Теория свечения газовых туманностей и классические методы определения электронной температуры, электронной плотности и содержаний химических элементов в областях Н II и планетарных туманностях изложены в учебниках [2, 5, 21] и в монографиях [1, 6–8, 12, 23, 35]. На основании этого ограничимся кратким изложением основных идей, которые лежат в основе классических методов определения физических условий и химического состава в областях Н II, и приведем формулы классических методов

для наборов современных атомных данных. Эти формулы либо взяты из недавних работ, либо получены специально для данной публикации. Основное внимание уделено методам, разработанным в последние десятилетия для определения содержания кислорода в областях Н II, для которых невозможно использовать классические методы.

1.1. Зарождение спектрального анализа

Понятие “спектр” появилось около 350 лет назад. В 1666 году Ньютон открыл, что солнечный свет состоит из смеси лучей различных цветов [13]. Он также установил, что есть не только лучи, соответствующие наиболее сильным цветам, но и лучи, соответствующие промежуточным градациям. Иными словами, Ньютон открыл *непрерывный спектр*. Сам Ньютон так писал об этом открытии: “По моему суждению, это страннейшее, если не самое значительное открытие, которое когда-либо делалось в отношении действий природы” [4].

В 1752 году шотландский физик Томас Мелвилл использовал призму для определения природы пламени. Он изучал спектр пламени спирта, в который добавлял различные вещества. Мелвилл обнаружил, что спектры раскаленных газов или паров совершенно не похожи на непрерывный радужный спектр солнечного света и состоят из набора отдельных линий. Мелвилл открыл *эмиссионные линии* или *эмиссионный спектр*.

Со времен Ньютона на призму направляли свет от Солнца, прошедший через круглое отверстие. В 1802 году Волластон заменил круглое отверстие узкой ($1/20$ дюйма) щелью, чтобы избежать наложения отдельных цветов друг на друга [545]. Он обнаружил, что спектр пересечен несколькими темными линиями. Волластон интерпретировал эти линии как естественные границы различных цветов радуги (спектра). Темные линии делят спектр на четыре части: красную, желто-зеленую, голубую и фиолетовую. Впрочем, темная линия, которая разделяет зеленую и голубую части спектра, не очень отчетливая. Более того, с каждой стороны этой линии расположена еще одна темная линия. Волластон открыл *линии поглощения* или *абсорбционный спектр*. Темными линиями в спектре Солнца заинтересо-

вался Фраунгофер. Он обнаружил, что спектр Солнца содержит не семь, а многие сотни линий поглощения [152]; кроме того, в спектрах звезд также есть линии поглощения, хотя спектры разных звезд различаются между собой и отличаются от спектра Солнца.

Ключ к интерпретации спектров был найден Кирхгофом (рис. 1.1), который в 1859 году сформулировал законы спектрального анализа [258, 259]. Кирхгоф установил, что каждый химический элемент имеет индивидуальный набор спектральных линий, и следовательно, линейчатый спектр объекта зависит от его химического состава. Он вывел три закона, которые объясняют типы спектров:

1. Нагретые до высокой температуры твердые или жидкие тела (а также очень плотный газ) излучают свет непрерывного спектра.
2. Нагретый разреженный газ испускает яркий свет линейчатого (эмиссионного) спектра.
3. Спектр газа, находящегося перед более горячим источником непрерывного излучения, показывает линии поглощения на длинах волн, на которых этот газ излучает эмиссионные линии, будучи нагретым (обращение спектра).

Кирхгоф указал, что интенсивность линий в эмиссионном спектре (и даже их наличие) зависит от физических характеристик излучающего газа (от его температуры).

Несомненно, что открытию спектрального анализа Кирхгофом предшествовал целый ряд работ, в которых их авторы были близки к цели. Обзор этих работ можно найти в публикации Шпольского [27], посвященной столетию спектрального анализа (см. также [10, 11]).

Кирхгоф и Бунзен с помощью спектроскопа подробно изучали спектры, даваемые различными элементами. Они установили, что введение любой соли одного и того же металла в пламя горелки всегда приводит к появлению одинакового спектра. При внесении в пламя смеси солей нескольких металлов в спектре одновременно появляются все их линии. Кирхгоф и Бунзен обнаружили в спектрах некоторых образцов новые незнакомые

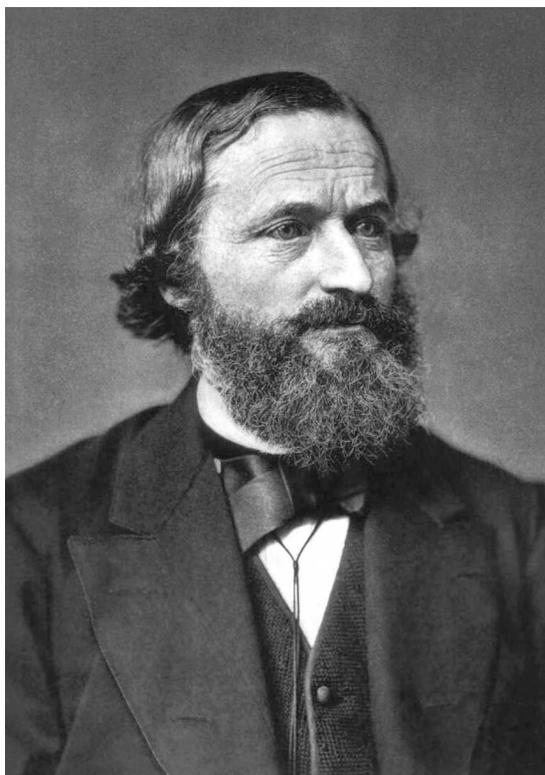


Рис. 1.1. Густав Роберт Кирхгоф (1824 — 1887)

линии в красной и голубой областях. Они объяснили появление новых линий наличием примеси неизвестных в то время химических элементов. Так, с помощью спектрального анализа были открыты рубидий (*rubidius* — красный) и цезий (*caesius* — голубой). Вслед за ними другие исследователи спектроскопически открыли еще три новых элемента: таллий, индий и галлий. Всего при помощи спектрального анализа было открыто более 20 новых элементов.

Путем сопоставления линий известных элементов с фраунгоферовыми линиями солнечного спектра Кирхгоф установил

присутствие на Солнце 22 элементов.¹ Благодаря усилиям целого ряда ученых (Кирхгоф, Секки, Ангстрем, Локьер, Жансен, Юнг, Роланд), в XIX веке для одного железа было найдено в солнечном спектре около 2000 линий. Одним из наиболее впечатляющих достижений спектрального анализа в XIX веке является открытие гелия. В 1868 году французский астроном Жансен и английский астроном Локьер обратили внимание на линию λ 587.49 нм в желтой части спектра Солнца. Было доказано, что ее нельзя приписать ни одному из элементов, известных на Земле. Оставалось предположить, что в атмосфере Солнца есть элемент, еще не открытый на земле. Локьер и английский химик Франкленд дали неизвестному элементу название гелий. Впоследствии были найдены линии гелия в спектрах некоторых других звезд. И только в 1895 году Рамсей [418] обнаружил гелий на Земле.

1.2. Области Н II

В 1864 году Хаггинс [213] попытался выяснить при помощи спектрального анализа, есть ли существенные различия между туманностями и звездами либо по составу вещества, либо в условиях, при которых они наблюдаются как источники света. С этой целью 29 августа 1864 года он пропустил сквозь призму спектроскопа лучи яркой планетарной туманности из созвездия Дракона (NGC 6543). Хаггинс обнаружил, что спектр туманности значительно отличается от спектров звезд: излучение от туманности подавляющей частью было монохроматичным, в спектре туманности доминировала одна эмиссионная линия. И лишь при более тщательном исследовании он обнаружил в спектре еще несколько эмиссионных линий, которые были гораздо слабее доминиру-

¹Всего лишь за четыре десятилетия до этого основатель позитивизма французский философ Огюст Конт (Auguste Comte) рассматривал определение химического состава Солнца как пример неразрешимой проблемы, занятие которой является для ученого бесполезной тратой времени. В 1835 году Конт писал о космических телах: “Мы представляем себе возможность определения их форм, расстояний, размеров и движений, но никогда, никакими средствами мы не сможем изучить их химический состав, их минералогическое строение.” (Паннекук, История астрономии, с. 448). По иронии судьбы Конт не дожил всего два года до того, как его утверждение было опровергнуто.

ющей линии. Хаггинс отметил, что самые слабые из обнаруженных им линий по положениям соответствуют линиям водорода. Он провел спектральные наблюдения еще нескольких планетарных туманностей и обнаружил, что они показывают аналогичные спектры. Хаггинс пришел к выводу, что планетарная туманность (по крайней мере ее внешние слои) представляет собой огромную массу светящегося газа или пара. Открытие Хаггинса положило начало исследованиям эмиссионных спектров астрономических объектов. В течение нескольких последующих лет Хаггинс исследовал спектры нескольких десятков туманностей. Он обнаружил, что треть из них имеет эмиссионные спектры, другие имеют спектры, характерные для звезд.

Туманности показывают большое разнообразие наблюдаемых характеристик. Кэртис [105] разделил туманности на три класса по морфологическим признакам: диффузные, планетарные и спиральные. Он охарактеризовал диффузные туманности как огромные массы светящегося вещества; туманные, облакоподобные, часто очень неправильные. Кэртис отметил, что диффузные туманности часто связаны с “молодыми” звездами и никогда со “старыми”.

Хаббл провел детальный анализ имеющихся наблюдательных данных о туманностях и предложил свою классификацию [208, 209]. Он разделил туманности на галактические и внегалактические. Галактические туманности Хаббл разделил на два класса: планетарные и диффузные. В свою очередь, диффузные туманности он разделил на светлые и темные. Хаббл установил, что тип спектра диффузной туманности зависит от спектрального класса освещающей ее звезды. Каждая диффузная туманность с эмиссионным спектром связана со звездой спектрального класса O или $B0$. Нет туманностей с эмиссионным спектром, освещаемых звездами спектрального типа более позднего, чем $B0$. С другой стороны, каждая отражательная туманность (с непрерывным спектром) связана со звездой спектрального класса, более позднего, чем $B1$. Среди отражательных туманностей нет таких, которые были бы освещены звездами спектральных типов O и $B0$.

В настоящее время известны разные типы газовых туманностей (оболочек) с эмиссионными спектрами: области H II, планетарные туманности, остатки сверхновых, оболочки новых звезд,

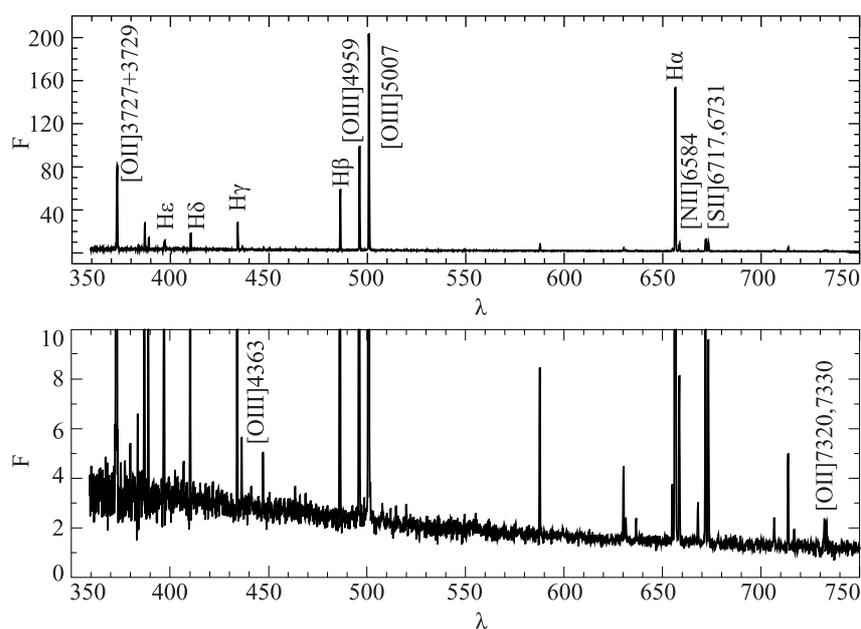


Рис. 1.2. Эмиссионный спектр объекта SDSS 113136.35 + 325431.2

околосветные оболочки, аккреционные диски. Эмиссионные линии появляются в спектрах газовых туманностей, свечение которых вызывается разными причинами: ультрафиолетовым излучением звезды, излучением незвездного происхождения в коротковолновой части спектра, ударными волнами.

Рассмотрим области Н II. Их свечение вызвано ультрафиолетовым излучением звезд. К этому типу туманностей принадлежат и планетарные туманности. Природа эмиссионных спектров областей Н II и планетарных туманностей одинакова (многие фундаментальные вопросы теории газовых туманностей нашли свое решение при изучении именно планетарных туманностей), хотя происхождение областей Н II и планетарных туманностей совершенно различно. Область Н II представляет собой межзвездный газ в окрестностях звезды высокой температуры. Оболочка планетарной туманности представляет собой вещество внешних слоев звезды, сброшенное звездой на заключительной

стадии ее эволюции и расширяющееся в окружающее пространство. По мере расширения оболочки планетарных туманностей “нагребают” на себя межзвездный газ. С точки зрения физики газовых туманностей основное различие между областями Н II и планетарными туманностями заключается в следующем. Типичная плотность газа в областях Н II не превышает $100\text{--}200\text{ см}^{-3}$. При таких плотностях многие физические процессы в туманности сравнительно слабо зависят от плотности и при изучении областей Н II применимо приближение низкой плотности. Плотность газа в планетарных туманностях лежит в интервале от 10^3 до 10^6 см^{-3} . При таких значениях плотность оказывает существенное влияние на характер физических процессов в туманности. Соотношения, полученные для областей Н II в приближении низкой плотности, могут быть неприменимы к планетарным туманностям.

К настоящему времени опубликованы спектры многих сотен областей Н II в спиральных и неправильных галактиках. Эмиссионные спектры сотен тысяч объектов получены в рамках цифрового обзора неба Sloan (SDSS — Sloan Digital Sky Survey). В случае спектров, полученных в рамках обзора Sloan, необходимо учитывать следующее обстоятельство. Так как обзор проводился с фиксированной апертурой, то спектры далеких объектов могут представлять собой спектры не индивидуальных областей Н II, а интегральные спектры совокупности областей Н II. На рис. 1.2 показан эмиссионный спектр объекта SDSS 113136.35 + 325431.2, взятый из базы данных цифрового обзора неба Sloan.

В спектрах многих областей Н II измеряется до нескольких десятков линий (см. рис. 1.2). Современные спектрографы высокого разрешения в совокупности с крупными телескопами позволяют регистрировать большое количество слабых линий в спектрах областей Н II в нашей и ближайших галактиках. В спектрах областей Н II, полученных на Южной европейской обсерватории (European Southern Observatory, ESO) на “очень большом телескопе” VLT (Very Large Telescope, 8.2 м) с ультрафиолетовым и визуальным эшелле-спектрографом (Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph, UVES), измерены сотни эмиссионных линий в диапазоне 310.0—1040.0 нм в спектрах галактических областей Н II М 8 (375 эмиссионных линий [165]), М 17 (260 линий [165]), NGC 3576 (458 линий [164]), туманность Ориона (555 линий [140]), туманность 30 Doradus в Большом Магеллановом Облаке (366 линий [368]).

Как установил Кирхгоф, интенсивность линий в эмиссионном спектре (и даже их наличие) зависит от физических условий, в которых находится излучающий газ. Физические условия излучающего газа в областях H II описываются электронной температурой T_e и электронной концентрацией n_e . Утверждение Кирхгофа в применении к областям H II можно выразить следующей общей формулой:

поток в эмиссионной линии $\sim f(T_e, n_e) \times$ содержание элемента. (1.1)

Если известна функция $f(T_e, n_e)$ и содержание химического элемента в области H II, то можно вычислить поток излучения от туманности в линии, принадлежащей данному химическому элементу. С другой стороны, если известна функция $f(T_e, n_e)$, то содержание химического элемента в области H II можно вычислить по измеренному потоку излучения от туманности в линии данного элемента. Поиски функций $f(T_e, n_e)$ для разных линий различных атомов и ионов являются важнейшей задачей теории свечения газовых туманностей. Для определения абсолютного количества атомов данного элемента в туманности с использованием приведенного выше уравнения необходимо знать также расстояние до туманности. На практике, как правило, определяют отношение содержаний какого-либо элемента и водорода. В этом случае не нужно знать расстояние до туманности.

Вторая четверть XX столетия стала “золотым веком” в развитии теории свечения газовых туманностей. В 1926 году Занстра [555] разработал теорию свечения газовых туманностей в линиях водорода. В 1927 году Боуэн [61] отождествил запрещенные линии в спектрах туманностей и определил механизм их образования. В 1939 году Стремгрен [495] исследовал в общем виде проблему ионизации межзвездного водорода и показал, что область ионизованного газа вокруг горячей звезды имеет резкую границу. В конце 1930-х и начале 1940-х годов усилиями Амбарцумяна [2], Мензела, Аллера и других исследователей [12] были разработаны методы определения физических условий и химического состава в туманностях, которые позднее стали называть классическими методами. В самом начале 1950-х годов Киппер [9], Спицер и Гринстейн [477] установили важную роль двухквантовых переходов в образовании непрерывного спектра газовых туманностей. На основании этих успехов в середине про-

шлого столетия появилось утверждение, что физика газовых туманностей принадлежит к числу наиболее разработанных разделов астрофизики [6, 21]. Дальнейшие исследования показали, что заметную роль в свечении газовых туманностей могут играть реакции перезарядки [74] и диэлектронные рекомбинации [346, 492].

В последние десятилетия прошлого столетия начались активные спектральные наблюдения внегалактических областей Н II. Для определения физических условий и химического состава в областях Н II низкой металличности (в неправильных галактиках) используются классические методы. Для большинства областей Н II высокой металличности (в спиральных галактиках) невозможно использовать классические методы определения электронной температуры и химического состава, так как в их спектрах не удастся измерить слабые авроральные линии, необходимые для применения классических методов. Для определения физических условий и химического состава в таких областях Н II разрабатывают методы, в которых используются только сильные линии. Исследования в этом направлении были начаты в 1979 году в работах Пейджела с соавторами [358] и Аллоин с соавторами [36] и продолжаются до настоящего времени.

1.3. Терминология и обозначения

Будем придерживаться в основном терминологии, принятой в астрономической энциклопедии “Физика космоса” [22].

Области Н II часто называют зонами Н II. Так как будут обсуждаться различные зоны свечения области Н II (зона свечения дважды ионизованного кислорода, зона свечения однократно ионизованного кислорода), то предпочтительнее применять термин “область Н II”. Термин “туманность” часто используют при описании областей Н II, т. е. термины “область Н II” и “туманность” в определенном смысле эквивалентны. В тоже время исторически сложилось так, что под термином “внегалактические области Н II” подразумевают области Н II в других галактиках, а под термином “внегалактические туманности” — галактики.

Спектры некоторых карликовых галактик невозможно отличить от спектров областей Н II [154, 320, 443]. Размеры карликовых галактик (карликовая галактика II Zw 40) сопоставимы с размерами гигантских областей Н II в спиральных галактиках

(гигантская область Н II NGC 5471 в галактике М 101). Такие карликовые галактики сначала называли изолированными межгалактическими областями Н II, позднее их стали называть Н II галактиками [80, 81, 320]. В последние годы обнаружили области Н II, которые расположены на больших расстояниях от галактик. Эти объекты снова стали называть межгалактическими областями Н II [176, 321, 440, 539].

В теории химической эволюции галактик все химические элементы тяжелее гелия принято называть тяжелыми элементами или “металлами”. Обычно под металличностью области Н II подразумевают содержание в ней кислорода. Содержание химического элемента X в области Н II принято выражать как количество атомов данного элемента, приходящееся на 10^{12} атомов водорода H , и указывать в логарифмической шкале $12 + \lg(X/H)$. Иногда содержания элементов в объекте приводят в нормированной шкале $[A/B] = \lg(A/B) - \lg(A_{\odot}/B_{\odot})$, где A и B — содержания двух элементов в объекте, а A_{\odot} и B_{\odot} — содержание этих элементов на Солнце. Долгие годы считалось, что химический состав солнечной атмосферы установлен достаточно надежно (содержание кислорода на Солнце принималось равным $12 + \lg(O_{\odot}/H_{\odot}) = 8.90 \pm 0.03$ [182, 278]). Поэтому использование нормированной шкалы содержаний было оправданным. В последнее десятилетие происходит пересмотр содержания кислорода на Солнце [33, 41, 319, 447]. Так как нет канонического значения содержания кислорода на Солнце, то в последние годы нормированная шкала содержаний используется реже.

Атомы в разных стадиях ионизации принято обозначать символом элемента с указанием стадии ионизации; $O I$ — нейтральный атом кислорода, $O II \equiv O^+$ — однократно ионизованный атом кислорода, $O III \equiv O^{++}$ — дважды ионизованный атом кислорода и т. д. Разрешенные линии излучения (и поглощения) иона химического элемента X принято обозначать указанием иона и длины волны линии. Для запрещенных линий название иона заключается в квадратные скобки. Например, $[O III] \lambda 436.3$ обозначает запрещенную линию дважды ионизованного кислорода с длиной волны 436.3 нм. Для первых членов бальмеровской серии линий водорода используют обозначения H_{α} , H_{β} , H_{γ} , H_{δ} , для высших членов бальмеровской серии линий водорода — H_{11} , H_{12} и т. д. Линии других серий линий водорода

обозначают указанием серии (L или Ly — серия Лаймана, P или Pa — серия Пашена, B или Br — серия Брэкета) и номера члена серии (число или буква греческого алфавита для первых членов серии).

Потоки излучения в эмиссионных линиях от области H II обычно нормируются на поток излучения в линии H β . Для ряда эмиссионных линий приняты краткие обозначения:

$$R_2 \equiv [\text{O II}] \lambda 372.7, 372.9 = I_{[\text{O II}]\lambda 372.7, 372.9} / I_{\text{H}\beta},$$

$$R_3 = [\text{O III}] \lambda 495.9, 500.7 = I_{[\text{O III}]\lambda 495.9, 500.7} / I_{\text{H}\beta},$$

$$R_{23} = R_2 + R_3,$$

$$N_2 \equiv [\text{N II}] \lambda 654.8, 658.4 = I_{[\text{N II}]\lambda 654.8, 658.4} / I_{\text{H}\beta},$$

$$S_2 \equiv [\text{S II}] \lambda 671.7, 673.1 = I_{[\text{S II}]\lambda 671.7, 673.1} / I_{\text{H}\beta}.$$

Наряду с интенсивностями линий важной характеристикой области H II является параметр возбуждения туманности P :

$$P = \frac{R_3}{R_3 + R_2}, \quad (1.2)$$

который отображает вклад эмиссионных линий дважды ионизованного кислорода в полное свечение туманности в кислородных линиях.

Под электронной температурой T_e туманности подразумевается значение параметра в законе Максвелла для распределения свободных электронов по скоростям, т. е. кинетическая температура свободных электронов. Поскольку электронная температура в областях H II порядка 10^4 К, то Ситон предложил выражать электронную температуру в единицах 10^4 К и обозначать эту величину символом t_e , чтобы избежать путаницы:

$$t_e = 10^{-4} T_e. \quad (1.3)$$

В общем случае электронная температура в области H II изменяется вдоль радиуса, т. е. области H II не являются изотермическими. (Только области H II с электронной температурой $T_e = 10^4$ К являются изотермическими.) При определении содержания кислорода и азота используется двухзонная модель для описания распределения электронной температуры в области H II. Электронную температуру в зоне свечения дважды ионизованного кислорода принято обозначать t_3 , а электронную температуру в зоне свечения однократно ионизованного кислорода — t_2 .

Принимается, что излучение туманности в линиях [O II], [N II] и [S II] образуется при температуре t_2 . При определении содержания других элементов (например серы) используется трехзонная модель для описания распределения электронной температуры в области H II. Электронная температура в зоне свечения дважды ионизованной серы имеет промежуточное значение между t_3 и t_2 . Мы выберем двухзонную модель для описания распределения электронной температуры в области H II, которую обычно используют при определении содержания кислорода и азота.

Для комбинаций линий, на которых базируются классические методы определения электронных температур в зонах свечения разных ионов, приняты следующие обозначения:

$$Q_{3,O} = \frac{I_{[\text{O III}]\lambda 495.9, 500.7}}{I_{[\text{O III}]\lambda 436.3}}, \quad (1.4)$$

$$Q_{2,O} = \frac{I_{[\text{O II}]\lambda 372.7, 372.9}}{I_{[\text{O II}]\lambda 732.0, 733.0}}, \quad (1.5)$$

$$Q_{2,N} = \frac{I_{[\text{N II}]\lambda 654.8, 658.4}}{I_{[\text{N II}]\lambda 575.5}}, \quad (1.6)$$

$$Q_{2,S} = \frac{I_{[\text{S II}]\lambda 671.7, 673.1}}{I_{[\text{S II}]\lambda 406.9, 407.6}}, \quad (1.7)$$

$$Q_{3,S} = \frac{I_{[\text{S III}]\lambda 906.9, 953.2}}{I_{[\text{S III}]\lambda 631.2}}. \quad (1.8)$$

Эти комбинации линий часто называют индикаторами электронной температуры.

Будем подразумевать, что интенсивности эмиссионных линий исправлены за межзвездное поглощение.

Глава 2

Рекомбинационный спектр области H II

2.1. Теория Занстра

Теория свечения газовых туманностей в линиях водорода была разработана Занстра в 1926 году [555]. Занстра обратил внимание на установленный Хабблом факт, что тип спектра диффузной туманности зависит от спектрального класса освещающей ее звезды. Диффузная туманность имеет эмиссионный спектр только в том случае, если она связана с горячей звездой спектрального класса O или $B0$. Планетарные туманности возбуждаются звездами очень высокой температуры¹ и имеют эмиссионные спектры. На основании этих наблюдательных фактов Занстра сделал вывод, что высокая температура возбуждающей звезды является необходимым условием появления эмиссионных линий в спектре туманности.

Занстра рассмотрел чисто водородную газовую туманность, освещаемую горячей звездой, распределение энергии в спектре которой описывается законом Планка. Характер взаимодействия излучения звезды с газовой туманностью определяется физическими условиями в туманности. Основная доля атомов водорода в туманности ионизована. Захват свободных электронов протонами приводит к появлению нейтральных атомов водорода в

¹Современные исследования показывают, что температуры ядер некоторых планетарных туманностей порядка 150000 К и выше [540].

туманности. Число рекомбинаций пропорционально концентрации протонов n_p и концентрации свободных электронов n_e . Для чисто водородного газа $n_p = n_e$, поэтому число рекомбинаций пропорционально n_e^2 . Ввиду низкой плотности газа в областях Н II концентрация свободных электронов тоже мала. Вследствие этого большинство водородных атомов будет находиться в ионизованном состоянии и лишь малая доля водородных атомов будет находиться в нейтральном состоянии. Благодаря низкой плотности излучения в туманности возбуждения нейтральных атомов излучением практически не происходит, и почти все нейтральные атомы находятся в основном состоянии. Так как нейтральные атомы водорода в туманности находятся в основном состоянии, то туманность способна поглощать только излучение звезды в длинах волн лаймановской серии линий, которые соответствуют переходам с основного на верхние энергетические уровни, и кванты с длиной волны $\lambda < 91.2$ нм (лаймановский континуум), которые обладают достаточной энергией, чтобы ионизовать атом водорода из основного состояния. Туманность прозрачна для излучения в других длинах волн. Если масса области Н II достаточно большая, то туманность поглощает все излучение звезды в лаймановском континууме, несмотря на то, что концентрация нейтральных атомов в туманности мала.

Занстра указал, что поглощение атомами водорода излучения звезды в длинах волн лаймановской серии линий приводит к появлению эмиссионных линий бальмеровской серии в спектре области Н II. Однако в результате этого образуются слишком слабые эмиссионные линии по сравнению с теми, что наблюдаются в спектрах областей Н II. Занстра показал, что наблюдаемые в областях Н II эмиссионные линии бальмеровской серии образуются вследствие поглощения атомами водорода излучения звезды в лаймановском континууме. Числом квантов, испускаемых звездой в линиях лаймановской серии, можно пренебречь по сравнению с числом квантов, испускаемых звездой в лаймановском континууме. В результате поглощения кванта лаймановского континуума атом водорода ионизируется. Через некоторое время электрон будет захвачен каким-нибудь ионом. При этом есть две возможности: 1) электрон попадает непосредственно на основной энергетический уровень, 2) электрон попадает на один из верхних уровней.

В первом случае излучается квант лаймановского континуума. Этот квант ионизует другой атом водорода, и цепочка событий начинается сначала.

Во втором случае, когда электрон попадает на один из верхних энергетических уровней, он может либо перейти спонтанно на основной уровень (непосредственно или путем каскадных переходов), либо перейти на более высокий уровень, поглотив еще один квант излучения звезды, либо перейти на более высокий или более низкий энергетический уровень в результате столкновения со свободным электроном. Плотность излучения в туманности и концентрация свободных электронов настолько малы, что цепочка спонтанных переходов на нижние уровни не прерывается в подавляющем большинстве случаев. При каскадных переходах излучаются кванты в линиях лаймановской, бальмеровской, пашеновской и других серий. Кванты лаймановской серии, излучаемые при переходах на основной уровень, поглощаются другими атомами водорода. Кванты других серий беспрепятственно покидают туманность, поскольку она совершенно прозрачна в линиях субординатных серий. Поглощения и переизлучения квантов лаймановской серии продолжаются до тех пор, пока каждый из них не распадется на один L_α -квант, один квант бальмеровской серии и, возможно, несколько квантов других серий.

Итак, в рамках теории Занстра эмиссионные линии водорода в спектрах областей Н II возникают в результате переработки туманностью коротковолнового излучения возбуждающей звезды. Число бальмеровских квантов, излучаемых туманностью, равно числу квантов лаймановского континуума, испускаемых возбуждающей звездой.

2.2. Зона Стремгрена

Важнейшей характеристикой межзвездного газа является степень его ионизации. В общем виде проблема ионизации и возбуждения межзвездного водорода была исследована Стремгренем в 1939 году [495]. Он показал, что далекое ультрафиолетовое излучение ($\lambda < 91.2$ нм) горячей звезды высокой светимости ионизует межзвездный водород в достаточно большой области. Стремгрен пришел к очень важному заключению о том, что межзвездный

водород практически полностью ионизован до некоторого расстояния S_0 от ионизирующей звезды, и остается практически полностью нейтральным на расстояниях, превышающих S_0 , т. е. область ионизованного газа имеет резкую границу. Области ионизованного газа (области Н II) иногда называют зонами Стремгрена, а величину S_0 принято называть радиусом зоны Стремгрена. Ионизацию межзвездной среды образно описал Шкловский [26]: “топология ионизации межзвездной среды выглядит весьма своеобразно: вокруг горячих звезд имеются замкнутые полости (в идеальном случае постоянной плотности межзвездной среды — сферы), где водород ионизован, в то время как между полостями водород нейтрален.”

Если горячая звезда расположена внутри достаточно большого газового облака, то возбуждаемая этой звездой область Н II окружена зоной нейтрального водорода (Н I). Такие области Н II называют областями, ограниченными излучением (radiation bounded). Существует и другая возможность, когда звезда ионизует все облако, в котором она находится, и часть ионизирующих квантов выходит за пределы облака. Такие области Н II называют ограниченными веществом (density bounded). В ряде работ [45, 146, 348 и др.] приводятся аргументы в пользу предположения, что гигантские области Н II могут быть ограниченными веществом, а часть квантов лаймановского континуума (до 30—50 %) от ионизирующих звезд уходит за пределы областей Н II и вызывает диффузное свечение межзвездной среды галактик в бальмеровских линиях.

Стремгрен показал, что радиус области ионизации в межзвездной среде можно определить из условия равенства числа фотоионизаций и числа рекомбинаций водорода за единицу времени во всем объеме туманности. В свою очередь, число фотоионизаций в туманности равно числу ионизирующих квантов (с длиной волны $\lambda < 91.2$ нм), испускаемых звездой. Радиус S_0 области ионизации в межзвездной среде постоянной плотности n_e вокруг звезды, испускающей N_{Lc} ионизирующих фотонов в единицу времени, определяется следующим уравнением:

$$S_0 = \left(\frac{N_{Lc}}{c n_e^2} \right)^{1/3}, \quad (2.1)$$

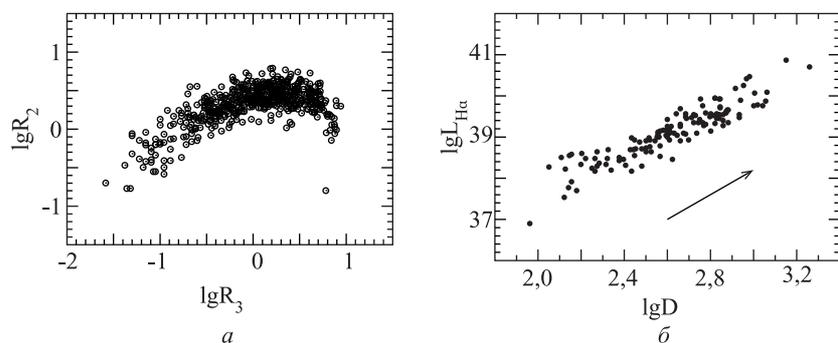


Рис. 2.1. *a)* Соотношение между интенсивностями линий дважды и однажды ионизованного кислорода в спектрах областей H II в близких спиральных галактиках (компиляция данных из [407]); *б)* корреляция между диаметрами и светимостями в линии H α областей H II в близких спиральных и неправильных галактиках. Стрелкой показан наклон, ожидаемый для ограниченных излучением областей H II одинаковой плотности

где $c = (4/3)\pi\alpha_{j>1}$ и $\alpha_{j>1}$ — коэффициент рекомбинации водорода на уровни выше первого. При рекомбинации на первый уровень испускается фотон с $\lambda < 91.2$ нм, который снова поглощается в туманности и ионизует другой атом водорода, не изменяя баланс между числом ионизаций и числом рекомбинаций в туманности. Поэтому рекомбинации на первый уровень не учитывают при выводе уравнения (2.1). Вообще говоря, уравнение (2.1) является строгим только для чисто водородной туманности, так как только в этом случае все ионизирующие фотоны, испускаемые звездой, поглощаются атомами водорода, и атомы водорода являются единственным источником свободных электронов. В реальных туманностях свободные электроны возникают также при фотоионизации гелия, углерода, азота, кислорода и других элементов. В этом случае вместо n_e^2 в уравнение (2.1) следует подставить $n_e n_p$, где n_p — концентрация протонов в туманности. Следует также учесть, что атомы гелия и других элементов поглощают часть ионизирующих квантов звезды. Поскольку водород является наиболее распространенным элементом в реальных областях H II, то он поглощает большинство ионизирующих квантов

звезды и является основным, хотя и не единственным, источником свободных электронов. Поэтому уравнение (2.1) вполне применимо для оценок характеристик реальных областей Н II.

Ионизация He I и He II вблизи горячих звезд была исследована Пикельнером [15]. Он получил выражения для радиусов зон ионизации гелия и показал, что отношение радиусов позволяет определить поверхностную температуру ионизирующей звезды.

Мак-Кол, Рыбский и Шиелдс [312] получили спектры 99 областей Н II в 20 спиральных и неправильных галактиках и исследовали корреляции между интенсивностями линий разных ионов: $[O II]/H_\beta$, $[O III]/H_\beta$, $[N II]/H_\alpha$, $[S II]/H_\alpha$. Они нашли хорошо выраженную корреляцию между интенсивностями линий однажды и дважды ионизованного кислорода. (Соотношение между интенсивностями линий дважды и однажды ионизованного кислорода в спектрах областей Н II в близких спиральных галактиках для компиляции данных из [407] показано на рис. 2.1, а.) Этот факт был интерпретирован как свидетельство того, что большинство внегалактических областей Н II ограничены излучением (radiation bounded). Если бы заметная доля внегалактических областей Н II была ограничена веществом (density bounded), то интенсивности линий ионов, которые находятся на периферии области Н II (O^+ , N^+ , S^+), были бы случайными (меньшими верхнего предела, который соответствует туманности, ограниченной излучением) и показывали бы существенный разброс для любого значения интенсивностей линий дважды ионизованного кислорода. Нижняя граница полосы, занимаемой областями Н II на диаграмме $[O II]/H_\beta - [O III]/H_\beta$ (см. рис. 2.1, а), была бы размыта или вообще отсутствовала.

Кенникатт исследовал свойства областей Н II в 95 близких спиральных и неправильных галактиках [245]. В частности, он рассмотрел зависимость между светимостью $L_{H\alpha}$ области Н II в линии H_α и ее диаметром D (рис. 2.1, б). Согласно теории свечения газовых туманностей в водородных линиях каждый квант ультрафиолетового излучения звезды в области Н II, ограниченной излучением, приводит к появлению кванта бальмеровского излучения туманности. Поэтому диаграмма $L_{H\alpha} - D$ в определенном смысле эквивалентна диаграмме $N_{Lc} - D$. Как следует из уравнения (2.1), диаметр области Н II пропорционален кубическому корню светимости области Н II в бальмеровских линиях,

а коэффициент пропорциональности определяется плотностью газа в туманности. Тот факт, что области Н II занимают сравнительно узкую полосу на диаграмме $L_{H\alpha} - D$ (см. рис. 2.1, б и аналогичные диаграммы в [192, 431]) свидетельствует о том, что значения плотности газа в разных внегалактических областях Н II лежат в узком интервале. Этот важный вывод подтверждается непосредственными оценками электронных плотностей во внегалактических областях Н II (см. ниже).

2.3. Бальмеровский декремент

Количество энергии, излучаемой туманностью в линии водорода, образующейся при спонтанных переходах из k -го состояния в j -е, определяется выражением

$$E_{k,j} = h\nu_{k,j} A_{k,j} \int_V n_k n_H dV, \quad (2.2)$$

где h — постоянная Планка, $\nu_{k,j}$ — частота излучения, $A_{k,j}$ — вероятность спонтанного перехода атома водорода из k -го состояния в j -е, n_k — доля атомов водорода в k -м состоянии, n_H — концентрация атомов водорода в туманности, и интегрирование ведется по всему объему туманности. Если считать, что величина n_k не изменяется в туманности, то уравнение (2.2) приобретает вид

$$E_{k,j} = h\nu_{k,j} A_{k,j} n_k \int_V n_H dV. \quad (2.3)$$

Отношение потоков излучения от туманности в бальмеровских линиях, которые образуются при переходах на 2-й уровень с вышележащих, принято выражать в шкале, в которой поток в линии H_β , образующейся при переходе с 4-го уровня на 2-й, принимают за единицу. При помощи уравнения (2.3) легко получить формулу для относительных интенсивностей бальмеровских линий:

$$\frac{F_i}{F_{H\beta}} = \frac{\nu_{i,2}}{\nu_{4,2}} \frac{n_i}{n_4} \frac{A_{i,2}}{A_{4,2}}. \quad (2.4)$$

Отношение интенсивностей линий серии Бальмера принято называть бальмеровским декрементом.

Как показывает уравнение (2.3), интенсивности эмиссионных линий водорода определяются населенностями энергетических уровней атомов водорода. Таким образом, вычисление интенсивностей эмиссионных линий водорода сводится к расчету населенностей возбужденных уровней. Расчет населенностей уровней базируется на постулате, что туманность находится в равновесном состоянии, т. е. число атомов, находящихся на данном уровне возбуждения, не изменяется со временем. На основании этого условия статистического равновесия можно рассчитать населенность каждого из возбужденных уровней и предсказать интенсивности эмиссионных линий. В частности, можно рассчитать бальмеровский декремент.

В рамках теории Занстра заселение возбужденных уровней атомов водорода осуществляется при рекомбинациях и последующих каскадных переходах. На населенность возбужденных уровней атомов водорода влияют также условия выхода квантов лаймановской серии из туманности. В случае *A* предполагается, что туманность является оптически тонкой в линиях лаймановской серии, лаймановские кванты беспрепятственно покидают туманность. В случае *B* (который более соответствует действительности) предполагается, что оптическая толщина туманности в лаймановских линиях велика. При этом все лаймановские кванты, излучаемые при спонтанных переходах с *i*-го уровня на основной, поглощаются в туманности, возбуждая атом водорода до *i*-го уровня. Для стационарной системы число переходов всеми путями в данное состояние равно числу переходов из данного состояния. Для случая *B*, в котором предполагается, что число переходов $i \rightarrow 1$ равно числу обратных переходов $1 \rightarrow i$, условие стационарности для *i*-го уровня имеет вид

$$n_i \sum_{k=2}^{i-1} A_{i,k} = n_e n^+ C_i + \sum_{k=i+1}^{\infty} n_k A_{k,i}, \quad (2.5)$$

где $C_i(T_e, n_e)$ — коэффициент рекомбинации на *i*-й уровень, n^+ — концентрация протонов. Член в левой части уравнения (2.5) описывает число спонтанных переходов с данного уровня на нижележащие уровни. Первый член в правой части уравнения (2.5) описывает число рекомбинаций непосредственно на *i*-й уровень, второй член — число спонтанных переходов на данный уровень с вышележащих уровней.

Населенности уровней находят решением системы линейных уравнений (2.5). Строго говоря, система уравнений бесконечна и содержит бесконечное число неизвестных n_i . Впервые приближенные значения населенностей уровней водорода вычислил Силлье [96,97]. Он рассмотрел систему уравнений для атомов водорода с 14 уровнями (значения эйнштейновских коэффициентов спонтанных переходов для более высоких уровней не были известны в то время) для случая B и вычислил относительные интенсивности линий бальмеровской серии до H_{10} . Расчеты рекомбинационного спектра водорода с учетом большего числа уровней и с учетом азимутального вырождения уровней проводились многими авторами. Современные расчеты эмиссионного спектра водорода для обширной сетки значений электронной температуры и электронной плотности приведены в [493]. Теоретический бальмеровский декремент слабо зависит от физических условий в туманности. Наблюдаемый бальмеровский декремент искажается межзвездным поглощением. Так как коротковолновое излучение поглощается сильнее, то наблюдаемый бальмеровский декремент становится более крутым по сравнению с теоретическим. Сравнение наблюдаемого и теоретического декрементов используют для определения межзвездного поглотения света.

2.4. Определение электронной температуры по бальмеровскому скачку

При рекомбинациях атомов водорода образуется непрерывное излучение области H II. Вклад в непрерывное излучение областей H II вносят и другие механизмы: рекомбинации ионов гелия и тяжелых элементов, свободно-свободные переходы, и двухквантовые переходы. Однако непрерывное излучение, обусловленное рекомбинациями атомов водорода, имеет важную особенность, которая используется для определения электронной температуры в туманностях. При рекомбинации на i -й уровень образуется квант, энергия которого больше энергии ионизации с i -го уровня, т. е. длина волны такого кванта меньше длины волны, соответствующей энергии ионизации с данного уровня. При рекомбинации на второй уровень образуется квант бальмеровского континуума с длиной волны $\lambda < 364.6$ нм. При рекомбинации на третий уровень образуется квант пашеновского континуума с

длиной волны $\lambda < 820.3$ нм. Кванты бальмеровского континуума беспрепятственно покидают туманность и их наблюдают в виде непрерывного спектра на длинах волн, меньших 364.6 нм.

Вклад в непрерывный спектр области H II на длинах волн меньше 364.6 нм вносят рекомбинации на 2-й и более высокие уровни, тогда как на длинах волн, больших 364.6 нм, вклад в непрерывное излучение вносят только рекомбинации на 3-й и более высокие уровни. Поэтому интенсивность непрерывного спектра изменяется скачкообразно на длине волны 364.6 нм. Эта особенность в спектре области H II называется бальмеровским скачком. На рис. 2.2, *a* показан спектр области H II NGC 5471 в спиральной галактике M 101 (NGC 5457) в коротковолновом диапазоне длин волн [183]. В спектре отчетливо виден бальмеровский скачок.

Распределение энергии в непрерывном спектре у предела пашеновской серии линий водорода (820.3 нм) также возрастает скачком при переходе от больших длин волн к меньшим. На рис. 2.2, *b* показан спектр той же области NGC 5471 в спиральной галактике M 101 в длинноволновом диапазоне длин волн, взятый из спектральной базы данных цифрового обзора неба Sloan (номер объекта SDSS 113136.35+325431.2, номер спектра Sp 1325-52762-353). В спектре отчетливо виден пашеновский скачок. Большое количество спектров голубых компактных галактик и внегалактических областей H II, в которых виден бальмеровский и/или пашеновский скачки, приведено в работах [183, 185].

Поскольку коэффициенты рекомбинаций зависят от электронной температуры в туманности, то величины бальмеровского и пашеновского скачков зависят от электронной температуры в туманности. Следовательно, электронную температуру в туманности можно определить по измеренной величине бальмеровского (пашеновского) скачка в спектре туманности.

Пеймберт [370] первым использовал величину бальмеровского скачка $B_J = I(364.6^- \text{ нм}) - I(364.6^+ \text{ нм})$ для определения электронной температуры в туманности Ориона. Ли и др. [295] предложили измерять величину бальмеровского скачка как разность интенсивностей непрерывного спектра на длинах волн λ 364.3 и λ 368.1 нм и выражать величину бальмеровского скачка в единицах интенсивности бальмеровской линии $I_{H_{11}}$ λ 377.0 нм,

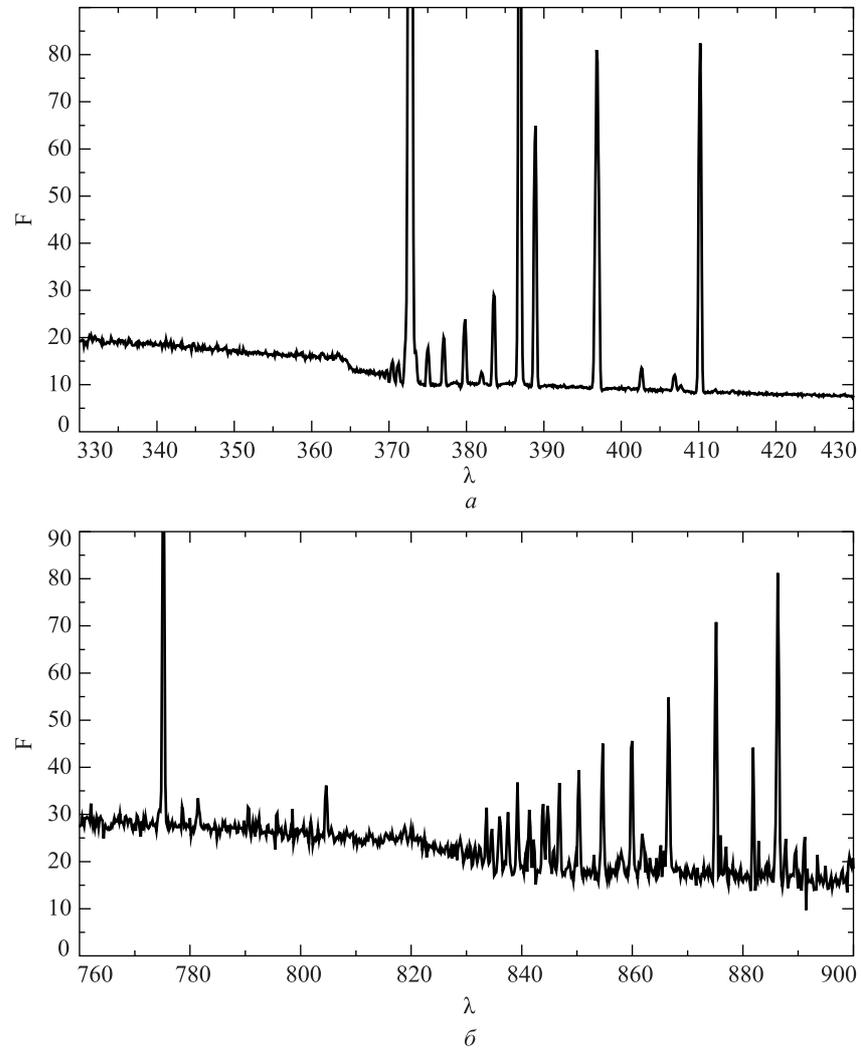


Рис. 2.2. Бальмеровский скачок в спектре области H II NGC 5471 в спиральной галактике M 101 (NGC 5457) [183] (а); пашеновский скачок в спектре той же области H II (б)

т. е. характеризовать величину бальмеровского скачка BJ параметром $(I_{\lambda 364.3} - I_{\lambda 368.1})/I_{H_{11}}$. Они получили, что в этом случае соотношение между электронной температурой и величиной бальмеровского скачка определяется простой формулой:

$$T_e = \alpha (BJ/I_{H_{11}})^{-1.5}, \quad (2.6)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha &= 377 \text{ при } \text{He}^+/\text{H}^+ = 0.1 \text{ и } \text{He}^{++}/\text{H}^+ = 0, \\ \alpha &= 432 \text{ при } \text{He}^+/\text{H}^+ = 0.05 \text{ и } \text{He}^{++}/\text{H}^+ = 0.05, \\ \alpha &= 490 \text{ при } \text{He}^+/\text{H}^+ = 0 \text{ и } \text{He}^{++}/\text{H}^+ = 0.1. \end{aligned}$$

В [295] использовано предложенное соотношение для определения электронных температур в планетарных туманностях. Другое соотношение приведено в работе [294]:

$$T_e = 368 (1 + 0.259 y^+ + 3.409 y^{++}) \left(\frac{BJ}{I_{H_{11}}} \right)^{-3/2}, \quad (2.7)$$

где $y^+ = \text{He}^+/\text{H}^+$, $y^{++} = \text{He}^{++}/\text{H}^+$.

В общем случае наблюдаемое излучение области Н II в континууме представляет собой суммарное излучение ионизованного газа и излучения звезд. Эквивалентные ширины эмиссионных линий водорода в спектрах областей Н II никогда не достигают значений, предсказываемых теорией для случая чисто газового спектра. Это свидетельствует о том, что вклад звездного излучения в континуум никогда не бывает пренебрежимо мал. Вклад звездного излучения в континуум может существенно исказить величину бальмеровского скачка, обусловленного излучением газа. Поэтому достоверность электронной температуры в области Н II, вычисленной по измеренной величине бальмеровского (и/или пашеновского) скачка в ее спектре, в значительной степени определяется тем, насколько хорошо учтен вклад звездного излучения в континуум.

Гусева и др. [183, 185] определили электронные температуры по бальмеровскому и пашеновскому скачкам для большой выборки внегалактических областей Н II и голубых компактных карликовых галактик.

2.5. Определение содержания иона кислорода O^{++} по рекомбинационным линиям

Теория свечения газовых туманностей в рекомбинационных линиях, разработанная Занстра первоначально для водорода, применима также для описания свечения туманности в рекомбинационных линиях кислорода (и других элементов). При этом следует учитывать, что некоторые рекомбинационные линии иона кислорода O^{++} могут быть усилены действием флуоресцентного механизма Боуэна [63], суть которого заключается в следующем. Длина волны линии, образующейся при переходах с уровня $2p^1 3d^1 \ ^3P_2$ на уровень $2p^2 \ ^3P_2$ иона O^{++} , равна $\lambda = 30.3799$ нм (40.81155 эВ) и близка к длине волны резонансной линии однажды ионизованного гелия $\lambda = 30.3780$ нм (40.81410 эВ). В туманностях высокого возбуждения, в которых гелий дважды ионизован, резонансная линия однажды ионизованного гелия имеет высокую интенсивность. В таких туманностях заселение возбужденного уровня $2p^1 3d^1 \ ^3P_2$ осуществляется не только при рекомбинациях иона O^{3+} и последующих каскадных переходах, но и при возбуждении с уровня $2p^2 \ ^3P_2$ квантами резонансной линии ионизованного гелия. Поэтому разрешенные линии иона O^{++} , образующиеся при каскадных переходах с уровня $2p^1 3d^1 \ ^3P_2$, будут усилены по сравнению с интенсивностями других разрешенных линий иона O^{++} .

При рекомбинациях иона O^{++} и последующих каскадных переходах возникает излучение туманности в рекомбинационных линиях иона кислорода O^+ . Соотношение между потоком излучения в линии иона кислорода O^+ , образующейся при переходах с j -го уровня на k -й, и потоком излучения в линии водорода H_β задано выражением [374]

$$\frac{F_{j,k}(O^+)}{F_{H_\beta}} = \frac{\nu_{j,k}(O^+)}{\nu_{4,2}(H)} \frac{\alpha_j^*(O^+)}{\alpha_4^*(H)} \frac{O^{++}}{H^+}, \quad (2.8)$$

где O^{++} и H^+ — содержания ионов дважды ионизованного кислорода и ионов водорода в туманности, α_j^* — эффективный рекомбинационный коэффициент на j -й уровень, который учитывает как число рекомбинаций непосредственно на j -й уровень,

так и число спонтанных переходов на данный уровень с вышележащих уровней. Для выбранной рекомбинационной линии иона однажды ионизованного кислорода уравнение (2.8) можно переписать в виде

$$\frac{\text{O}^{++}}{\text{H}^+} = K(T_e, n_e) \frac{F_{j,k}(\text{O}^+)}{F_{\text{H}\beta}}. \quad (2.9)$$

В 1993 году Пеймберт, Сторей и Торрес-Пеймберт [374] определили содержание дважды ионизованного кислорода O^{++}/H^+ в галактических областях Н II М 17 и М 42 по рекомбинационным линиям кислорода. К настоящему времени содержание ионов дважды ионизованного кислорода O^{++}/H^+ определено для ряда галактических областей Н II [142, 162–165, 328, 515] и для областей Н II в других галактиках [143, 297, 368, 369, 515]. Анализ этих результатов приведен далее.

Глава 3

Классический метод определения электронной температуры и химического состава по запрещенным линиям

3.1. Запрещенные линии. Трехуровневая и пятиуровневая модели ионов

Долгое время самые сильные линии в спектрах областей H II и планетарных туманностей не удавалось отождествить с линиями известных химических элементов, и эти линии приписывались гипотетическому элементу “небулий”, который не встречается на Земле. В 1927 году Боуэн [61, 62] показал, что линии “небулия” в действительности являются запрещенными линиями хорошо известных элементов. Все “правила запрета” связаны с тем или иным приближением при вычислении эйнштейновских коэффициентов вероятностей спонтанных переходов [2]. Если при вычислениях учитывают только дипольное излучение и пренебрегают квадрупольным и другими излучениями, то получают, что вероятности некоторых переходов равны нулю. В действительности вероятности запрещенных переходов отличны от нуля, но на

много порядков меньше вероятностей разрешенных переходов. Запрещенные линии, образующиеся при переходах с уровней, с которых разрешены переходы, никогда не могут достигнуть большой интенсивности. Большой интенсивности могут достигнуть только запрещенные линии, образующиеся при переходах с метастабильных уровней, т. е. с уровней, с которых нет разрешенных переходов на нижележащие уровни. Время жизни атома в метастабильном состоянии велико — десятки секунд для уровня, переходы с которого дают запрещенную линию иона кислорода O^{++} с длиной волны 500.7 нм. Следовательно, для того чтобы происходили спонтанные переходы с метастабильных уровней, необходимо, чтобы столкновения с другими частицами происходили в промежутки времени такого же порядка или реже. В противном случае при столкновении с частицей энергия возбуждения передается этой частице, происходит опустошение метастабильного уровня без излучения запрещенной линии. Таким образом, низкая плотность газа является необходимым условием появления запрещенных линий. За время пребывания в метастабильном состоянии атом не должен поглощать световые кванты, т. е. плотность излучения должна быть маленькой. Отсутствие запрещенных линий в “земных” спектрах свидетельствует о том, что указанные условия не реализуются в земных условиях.

Сильными линиями в спектрах областей H II являются запрещенные линии, возникающие при переходах между термами основной конфигурации сравнительно обильных ионов O^{++} , O^+ , N^+ , S^+ , S^{++} . В частности, самая сильная линия (chief or principal line) с длиной волны 500.7 нм принадлежит иону дважды ионизованного кислорода. Боуэн показал, что низколежащие метастабильные уровни ионов возбуждаются в результате неупругих столкновений со свободными электронами. Возвращаясь затем путем каскадных переходов на нижние уровни, ионы излучают линии запрещенных переходов. При прочих равных условиях эффективность возбуждения больше для метастабильных уровней, чем для уровней с разрешенными переходами [7]. При возбуждении уровня с разрешенным переходом свободный электрон отдает часть своей энергии электрону атома, который и переходит из основного состояния в возбужденное. Наибольшую вероятность этот процесс имеет в том случае, когда энергия свободного электрона после столкновения сравнима с энергией, отданной элек-

трону атома. Иными словами, эффективное сечение возбуждения разрешенных переходов максимально при энергии свободного электрона, примерно в два раза большей, чем энергия возбуждения. При возбуждении метастабильных уровней электрон атома не может перейти из основного состояния в метастабильное. Условно можно считать, что в этом случае процесс возбуждения заключается в том, что свободный электрон садится на возбужденный уровень, а “атомный электрон” покидает атом. Процесс обмена тем более вероятен, чем больше времени свободный электрон находится вблизи атома, т. е. чем меньше его скорость (энергия). Поэтому эффективное сечение возбуждения метастабильных уровней максимально при энергии свободного электрона, близкой к энергии возбуждения.

Основным источником информации о химическом составе и физических условиях в области Н II являются интенсивности запрещенных линий в ее спектре. Для определенности рассмотрим ион дважды ионизованного кислорода. Объемный коэффициент излучения $J_{k,j}$ туманности в эмиссионной линии иона кислорода O^{++} , образующейся при спонтанных переходах из k -го состояния в j -е, выражается формулой

$$J_{k,j} = A_{k,j} n_k^*(t_e, n_e) n_O \quad (3.1)$$

, где $n_k^*(t_e, n_e)$ — доля ионов кислорода в k -м состоянии, $A_{k,j}$ — вероятность спонтанного перехода из k -го состояния в j -е, n_O — концентрация атомов кислорода во всех стадиях ионизации. Если все атомы кислорода находятся в одной стадии ионизации, то величина $n_k^*(t_e, n_e)$ соответствует населенности k -го уровня $n_k(t_e, n_e)$. Если атомы кислорода находятся в двух и более стадиях ионизации, то величина $n_k^*(t_e, n_e)$ определяется не только населенностью k -го уровня $n_k(t_e, n_e)$, но и долей атомов кислорода, находящихся в данной стадии ионизации:

$$n_k^*(t_e, n_e) = n_k(t_e, n_e) \frac{n_{O^{++}}}{n_O}. \quad (3.2)$$

При наблюдениях измеряют поток от всей туманности или от ее части. Интегрированием уравнения (3.1) по объему туманности получают поток энергии $F_{k,j}$ от туманности в эмиссионной линии:

$$F_{k,j} = A_{k,j} \int_V n_k^*(t_e, n_e) n_O dV. \quad (3.3)$$

Если предположить, что величина $n_k^*(t_e, n_e)$ является постоянной во всем объеме туманности, то соотношение между количеством ионов кислорода в туманности и потоком энергии $F_{k,j}$ от туманности в эмиссионной линии определяют уравнением

$$F_{k,j} = h\nu_{k,j} A_{k,j} n_k^*(t_e, n_e) O, \quad (3.4)$$

где O — количество атомов кислорода в туманности. Уравнение (3.4) является исходным для определения физических условий в областях Н II и их химического состава. Вообще говоря, уравнение (3.4) является строгим только для идеальной туманности, в которой электронная температура, электронная плотность и степень ионизации данного химического элемента одинаковы по всему объему туманности. Для туманности в целом уравнение (3.4) выполняется достаточно строго только для водорода и только для некоторых областей Н II. Согласно изложенному выше, водород практически полностью ионизован во всем объеме области Н II. Градиент электронной температуры внутри некоторых областей Н II мал или равен нулю. Именно для таких областей Н II уравнение (3.4) выполняется достаточно строго для водорода.

На практике уравнение (3.4) в исходном виде не используют. Определение физических условий в туманности основано на сравнении интенсивностей двух линий одного и того же иона:

$$\frac{F_{k,j}}{F_{i,n}} = \frac{\nu_{k,j} n_k(t_e, n_e) A_{k,j}}{\nu_{i,n} n_i(t_e, n_e) A_{i,n}}. \quad (3.5)$$

Так как рассматриваются линии атома в одной стадии ионизации, то функции n_k^* и n_i^* заменены населенностями k -го и i -го уровней данного иона, n_k и n_i . Если отношение населенностей двух уровней достаточно сильно зависит от электронной температуры и/или от электронной концентрации, то отношение интенсивностей линий, возникающих при переходах с этих уровней, используют как индикатор электронной температуры и/или электронной концентрации.

Классический метод определения электронной температуры и электронной плотности в области Н II основан на том благоприятном обстоятельстве, что основная электронная конфигурация с двумя и тремя p -электронами имеет два метастабильных термина с энергией возбуждения в несколько электронвольт. Схема

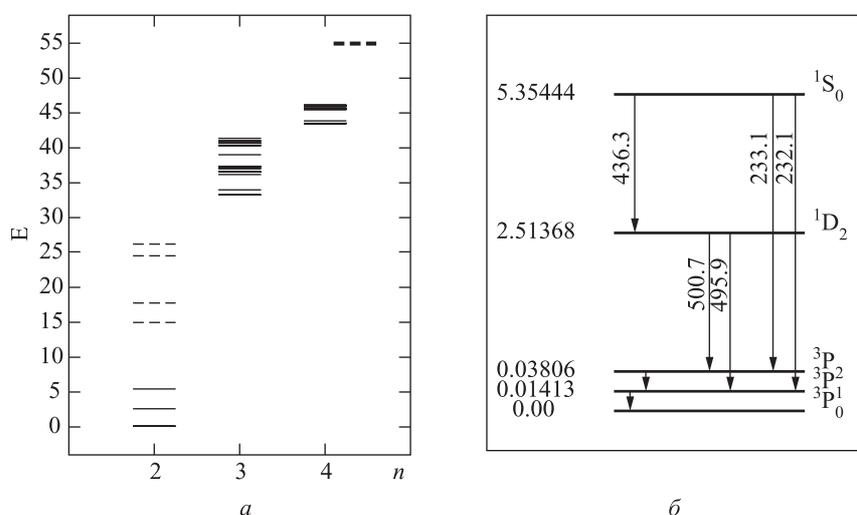


Рис. 3.1. Схема (а) нижних энергетических уровней иона O^{++} . Для главного квантового числа $n = 2$ энергетические уровни конфигурации $1s^2 2s^2 2p^2$ показаны сплошными линиями, конфигурации $1s^2 2s^1 2p^3$ — штриховыми. Жирная штриховая линия в правом верхнем углу обозначает энергию ионизации; б) детальная схема пяти нижних энергетических уровней (расстояния между уровнями не соблюдаются)

нижних энергетических уровней иона O^{++} показана на рис. 3.1. Ионы O^{++} возбуждаются электронными ударами. С увеличением электронной температуры туманности увеличивается доля свободных электронов, которые обладают энергией, достаточной для возбуждения уровня $1S_0$, и следовательно, увеличивается относительное число ионов в состоянии $1S_0$ по сравнению с числом ионов в состоянии $1D_2$. Поэтому с увеличением электронной температуры туманности отношение интенсивности небулярных линий [O III] λ 495.9, 500.7 нм к интенсивности авроральной линии [O III] λ 436.3 нм уменьшается. Это отношение $Q_{3,O} = [\text{O III}] \lambda$ 495.9, 500.7 / $[\text{O III}] \lambda$ 436.3 является индикатором электронной температуры в зоне свечения иона O^{++} туманности.

Для того чтобы вывести теоретическое соотношение между электронной температурой туманности и отношением $Q_{3,O}$, необходимо найти населенности уровней иона O^{++} . Для определе-

ния населенности уровней используют уравнения стационарности, которые выражают тот факт, что число переходов в данное состояние равно числу переходов из данного состояния. Для метастабильного уровня k уравнение стационарности записывается в виде

$$\begin{aligned} & \sum_{j < k} n_j n_e b_{j,k} + \sum_{j > k} n_j n_e a_{j,k} + \sum_{j > k} n_j A_{j,k} = \\ & = \sum_{j > k} n_k n_e b_{k,j} + \sum_{j < k} n_k n_e a_{k,j} + \sum_{j < k} n_k A_{k,j}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

где $b_{j,k}$ — коэффициент неупругих столкновений первого рода, при которых происходят переходы атома из нижнего в верхнее состояние (возбуждающие столкновения, электрон передает энергию атому), $a_{k,j}$ — коэффициент неупругих столкновений второго рода, при которых происходят переходы атома из верхнего в нижнее состояние (дезактивирующие столкновения, энергия возбуждения атома передается электрону). Первый член в левой части уравнения (3.6) описывает число переходов на данный уровень с нижележащих уровней, вызванных столкновениями первого рода, второй — число переходов на данный уровень с вышележащих уровней под действием столкновений второго рода, третий — число спонтанных переходов на данный уровень с вышележащих уровней. Первый член в правой части уравнения (3.6) описывает число переходов с данного уровня на вышележащие уровни, вызванных столкновениями первого рода, второй — число переходов с данного уровня на нижележащие уровни под действием столкновений второго рода, третий — число спонтанных переходов с данного уровня на нижележащие уровни. Уравнение такого вида записывают для каждого уровня. Обычно населенность уровней определяют в относительной шкале, и система уравнений дополняется уравнением

$$\sum_k n_k = 1. \quad (3.7)$$

Коэффициент дезактивирующих столкновений $a_{k,j}$ определяют соотношением [457]

$$a_{k,j} = \frac{8.629 \cdot 10^{-6}}{\omega_k T_e^{1/2}} \Omega_{j,k}, \quad (3.8)$$

где $\Omega_{j,k}$ — эффективные сечения для электронных ударов, ω_k — статистический вес k -го уровня. Эффективное сечение для электронных ударов $\Omega_{j,k}$ является безразмерной величиной, зависящей от температуры. Коэффициент возбуждающих столкновений $b_{k,j}$ определяют соотношением

$$b_{j,k} = \frac{\omega_k}{\omega_j} a_{k,j} \exp\left(\frac{-(E_k - E_j)}{k_B T_e}\right), \quad (3.9)$$

где E_k — энергия k -го энергетического уровня, k_B — постоянная Больцмана.

Решение уравнений (3.5)—(3.7) при заданном наборе атомных данных (энергетические уровни возбужденных состояний, вероятности спонтанных переходов, эффективные сечения для электронных ударов) позволяет найти соотношения между интенсивностями спектральных линий и характеристиками области Н II (электронная температура, электронная концентрация и содержание химических элементов). Более или менее достоверные значения атомных данных для нижних уровней ионов O^{++} , O^+ , N^+ , S^{++} и S^+ были определены в 50—60-х годах прошлого столетия. По мере развития квантовой механики и вычислительной техники уточнялись эффективные сечения для электронных ударов и эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов. Эффективные сечения для электронных ударов приведены в работах [52, 156, 161, 174, 345] для иона O^{++} , [260, 315, 316, 337, 410, 412, 499] — для иона O^+ , [211, 212, 286, 478] — для иона N^+ , [75, 243, 411, 419, 420, 501, 502] — для иона S^+ , [160, 323, 498, 500] — для иона S^{++} . Эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов приведены в работах [52, 156, 161, 174, 345] для иона O^{++} , [156, 497, 558, 559] — для иона O^+ , [161] — для иона N^+ , [157, 218, 219, 324, 325] — для иона S^+ , [53, 106, 155, 324, 326] — для иона S^{++} . Экспериментальные энергии возбуждения уровней приведены в работе [132] для иона O^{++} , в работах [55, 64, 118, 138, 308, 538] — для иона O^+ , [161] — для иона N^+ , [107, 309] — для иона S^+ , [237] — для иона S^{++} . Итак, атомные данные (эффективные сечения для электронных ударов, эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов и энергии возбуждения уровней) для ионов O^{++} , O^+ , N^+ , S^{++} и S^+ известны. По этим данным можно легко вычислить физические характеристики туманности (электронную температуру, электронную концентрацию и содержание химических эле-

ментов) по измеренным интенсивностям диагностических линий в спектре области H II решением уравнений (3.5)—(3.7). Более того, программы таких расчетов (на языке программирования FORTRAN) опубликованы [117] и встроены в известный пакет обработки астрономических данных IRAF/STSDAS [457]. Однако для многих задач удобнее использовать аналитические выражения, связывающие физические характеристики туманности с интенсивностями диагностических линий в ее спектре. В следующих параграфах приведены такие соотношения, полученные с помощью современных атомных данных.

3.2. Определение электронной температуры в зоне свечения дважды ионизованного кислорода

Метод определения электронной температуры туманности по измеренному отношению $Q_{3,O}$ интенсивностей небулярных и авроральных линий иона O^{++} был предложен Амбарцумяном в 1939 году [2]. Подход Амбарцумяна базируется на следующих предположениях: а) электроны образуются в туманности путем фотоионизации, б) упругие столкновения происходят достаточно часто для того, чтобы между электронами установилось максвеллово распределение скоростей, в) ансамбль атомов характеризуется некоторым устойчивым распределением атомов по различным квантовым состояниям. Амбарцумян рассматривал трехуровневое приближение для описания состояний иона O^{++} . Терм $^3P_{0,1,2}$ рассматривался как первый (основной) энергетический уровень, терм 1D_2 — как второй уровень, терм 1S_0 — как третий уровень (см. рис. 3.1, б). Так как атомные данные (эффективные сечения для электронных ударов) тогда еще не были известны, то Амбарцумян вывел соотношение в символьном виде.

В 1941 году Мензел, Аллер и Хебб [12] получили формулу, связывающую электронную температуру в зоне свечения дважды ионизованного кислорода $T_{3,O}$ и отношение $Q_{3,O}$ интенсивностей линий, в численном виде:

$$Q_{3,O} = 4.4 \exp\left(\frac{33000}{T_{3,O}}\right) + 0.75. \quad (3.10)$$

Уравнение (3.10) основано на рассмотрении трехуровневой модели иона O^{++} с эффективными сечениями для электронных ударов, вычисленных Хэббом и Мензелом в 1940 году [12]. Эффективные сечения для электронных ударов, определенные Хэббом и Мензелом для иона O^{++} , существенно (на порядок величины для некоторых переходов) отличаются от сечений, найденных позднее.

По мере развития квантовой механики и вычислительной техники уточнялись эффективные сечения для электронных ударов и эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов (см. ссылки в предыдущем параграфе). В свою очередь, по мере уточнения необходимых атомных данных уточнялось и соотношение между электронной температурой в зоне свечения иона O^{++} и отношением интенсивностей небулярной и авроральной линий иона O^{++} . В 1954 году Ситон опубликовал знаменитые диаграммы для графического определения температуры и плотности в туманности по измеренным интенсивностям линий [452]. Формула для определения электронной температуры в зоне свечения иона O^{++} приведена в работах Боярчука, Гершберга и Проника (1963) [3], Пеймберта и Костеро (1969) [371], Ситона (1975) [453], Мак-Кола (1984) [311], Пейджела и др. (1992) [362], Изотова и др. (2006) [225], Пилюгина и др. (2010) [409]. При выводе формулы использовалась как трехуровневая, так и пятиуровневая модель иона O^{++} . Решения для трехуровневой и пятиуровневой модели иона O^{++} хорошо согласуются между собой [311].

Соотношение между электронной температурой в зоне свечения иона O^{++} и отношением интенсивностей небулярной и авроральной линий иона O^{++} получено с использованием пятиуровневой модели. Для энергий возбужденных уровней приняты экспериментальные значения из работы [132]. Эти значения указаны на рис. 3.1, б. Эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов взяты из работы [161], эффективные сечения для электронных ударов — из [30]. Эффективные сечения зависят от электронной температуры и приведены в [30] для ряда значений электронной температуры. Эти данные были аппроксимированы полиномами второй степени. Найденные полиномы приведены в табл. 3.1. По этим атомным данным для сетки значений t_e и n_e вычислены соответствующие значения $Q_{3,O}$ путем решения уравнений (3.5)–(3.7).

Таблица 3.1. Эйнштейновские коэффициенты $A_{j,k}$ спонтанных переходов [156] и эффективные сечения $\Omega_{j,k}$ для электронных ударов [30] для пяти нижних уровней иона O^{++}

Переход $j \rightarrow k$	λ	$A_{j,k} \text{ см}^{-1}$	$\Omega_{j,k} = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$	
2→1	88.4 мкм	$2.596 \cdot 10^{-5}$	$0.493 + 0.036t - 0.008t^2$	
3→1		$3.032 \cdot 10^{-11}$	$0.233 + 0.028t - 0.004t^2$	
3→2	51.8 мкм	$9.632 \cdot 10^{-5}$	$1.141 + 0.108t - 0.018t^2$	
4→1		$2.322 \cdot 10^{-6}$	$0.214 + 0.034t - 0.004t^2$	
4→2	495.9 нм	$6.951 \cdot 10^{-3}$	$0.641 + 0.102t - 0.011t^2$	
4→3		$2.029 \cdot 10^{-2}$	$1.069 + 0.170t - 0.018t^2$	
5→1	232.1 нм	0	$0.029 + 0.003t + 0.000t^2$	
5→2		$2.255 \cdot 10^{-1}$	$0.088 + 0.009t + 0.000t^2$	
5→3		$6.998 \cdot 10^{-4}$	$0.147 + 0.014t + 0.001t^2$	
5→4		436.3 нм	1.685	$0.334 + 0.237t - 0.056t^2$

Зависимость между электронной температурой $t_{3,O}$ и параметром $Q_{3,O}$, соответствующая численному решению для $n_e = 1 \text{ см}^{-3}$, показана на рис. 3.2, *a* точками. Плюсами обозначена зависимость для $n_e = 500 \text{ см}^{-3}$. Из рис. 3.2, *a* видно, что соотношение $t_{3,O} - Q_{3,O}$ практически не зависит от электронной плотности при концентрациях, меньше нескольких сотен частиц в кубическом сантиметре.

Аппроксимацией численных результатов получена формула, связывающая $t_{3,O}$ и $Q_{3,O}$. Следуя [362], мы аппроксимировали численные результаты уравнением вида

$$t_j = \frac{a_0}{\lg Q_j + a_1 + a_2 \lg t_j + a_3 t_j + \lg(1 + a_4 x_j)}, \quad (3.11)$$

где

$$x_j = 10^{-4} n_e t_j^{-1.2}. \quad (3.12)$$

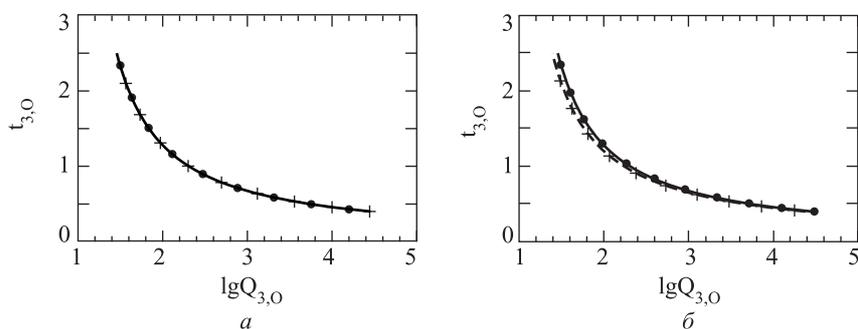


Рис. 3.2. Зависимость между электронной температурой $t_{3,0}$ и параметром $Q_{3,0}$: а) точки — численное решение в рамках пятиуровневой модели иона O^{++} для $n_e = 1 \text{ см}^{-3}$, плюсы — для $n_e = 500 \text{ см}^{-3}$; сплошная линия — аппроксимация численного решения; б) сплошная линия — то же, что и на а; точки — соотношение из [225]; штриховая линия — соотношение из [3], плюсы — соотношение из [311]

Для интересующего нас интервала плотностей численные данные с высокой точностью аппроксимируются уравнением

$$t_{3,0} = \frac{1.467}{\lg Q_{3,0} - 0.876 - 0.193 \lg t_{3,0} + 0.033 t_{3,0}}. \quad (3.13)$$

Так как соотношение $t_{3,0} - Q_{3,0}$ практически не зависит от электронной плотности в интересующем нас интервале плотностей, то член с x_3 , учитывающий зависимость от n_e , близок к нулю и отсутствует в уравнении (3.13). Эта аппроксимация представлена на рис. 3.2, а сплошной линией. Уравнение (3.13) решают методом итераций. На первом шаге члены с t_3 в правой части уравнения игнорируют (или задают некоторое “нулевое” приближение для электронной температуры, например $t_3 = 1$) и находят значение t_3 в первом приближении. На втором шаге уравнение (3.13) решается с найденным значением t_3 и находится значение t_3 во втором приближении, и т. д. Абсолютная величина относительной разности $|(t_3^{j+1}/t_3^j) - 1|$ становится меньше 0.0001 через несколько шагов.

Соотношение $t_{3,0} - Q_{3,0}$ приведено во многих работах [362, 371, 434 и др.]. На рис. 3.2, б найденное соотношение $t_{3,0} - Q_{3,0}$

(сплошная линия) сравнено с соотношениями из недавней (2006) работы Изотова и др. [225] и из ранних работ Боярчука, Гершберга и Проника (1963) [3] и Мак-Кола (1984). Из рис. 3.2, б следует, что соотношения, полученные в современных работах и в работе полувековой давности, сравнительно близки друг к другу. В работе [18] приведено сравнение эйнштейновских коэффициентов спонтанных переходов $A_{j,k}$ и эффективных сечений для электронных ударов $\Omega_{j,k}$ из разных работ для иона O^{++} . Разница между значениями $A_{j,k}$ из разных работ в большинстве случаев не превышает 5 %. Только для перехода $4 \rightarrow 1$ расхождение заметно большее. Следует отметить, что значения $A_{j,k}$, рассчитанные более полувека назад Гарстангом [174], достаточно хорошо согласуются с результатами современных расчетов. Разница между $\Omega_{j,k}$ из разных работ для большинства переходов порядка 5 % и меньше, исключая переход $4 \rightarrow 5$. Погрешность современных расчетов вероятностей спонтанных переходов также составляет порядка 10 % [158, 161].

3.3. Определение электронной температуры в зоне свечения однажды ионизованного кислорода

Электронная температура $t_2(O II)$, определенная по линиям ионизованного кислорода, характеризует температуру в зоне свечения ионизованного кислорода. Зону свечения ионизованного кислорода называют также зоной свечения ионов низкой ионизации. В этой зоне помимо свечения O^+ образуется свечение ионов N^+ , S^+ и S^{++} , линии которых наблюдаются в оптическом и близком инфракрасном диапазонах спектра. Электронная температура, определенная по линиям этих ионов, также характеризует температуру в зоне свечения ионизованного кислорода, или, более строго, в зоне свечения ионов низкой ионизации.

Наблюдаемая стратификация излучения в областях H II указывает, что свечение иона k -й степени ионизации X_k формируется в зоне, внешний радиус которой определяется потенциалом ионизации $\chi_{X_{k-1}}$, а внутренний радиус определяется потенциалом ионизации χ_{X_k} . Потенциал ионизации нейтрального азота $\chi_{N I} = 14.534$ эВ больше, чем потенциал ионизации нейтрально-

го кислорода $\chi_{O I} = 13.618$ эВ, а потенциал ионизации однажды ионизованного азота $\chi_{N II} = 29.601$ эВ меньше, чем потенциал ионизации однажды ионизованного кислорода $\chi_{O II} = 35.117$ эВ. Сравнение потенциалов ионизации показывает, что зона свечения иона N^+ несколько меньше зоны свечения иона O^+ и полностью лежит в зоне свечения иона O^+ . Так как потенциалы первой и второй ионизаций кислорода и потенциалы первой и второй ионизаций азота не слишком различаются, то в первом приближении можно пренебречь различием между зонами свечения O^+ и N^+ [166, 362]. Поэтому можно ожидать, что значения электронных температур, найденных по линиям O^+ и N^+ , должны совпадать или, по крайней мере, должны быть близки друг к другу: $t_2(O II) \approx t_2(N II)$.

Потенциалы первой и второй ионизаций кислорода и потенциалы первой и второй ионизаций серы (10.360 и 23.33 эВ) существенно различаются, потенциал второй ионизации кислорода близок к потенциалу третьей ионизации серы (34.83 эВ). В грубом приближении, зона свечения иона O^+ покрывает зоны свечения двух ионов серы S^+ и S^{++} . Электронная температура, найденная по линиям S^+ , характеризует электронную температуру во внешней части зоны свечения иона O^+ , а электронная температура, найденная по линиям S^{++} , характеризует электронную температуру во внутренней части зоны свечения иона O^+ . Поэтому можно ожидать, что электронная температура $t_2(O II)$ должна иметь промежуточное значение между $t_2(S II)$ и $t_3(S III)$.

Ниже приведены формулы для определения электронной температуры по линиям ионов O^+ , N^+ , S^+ и S^{++} .

3.3.1. $t_2(O II)$

Основная электронная конфигурация ионизованного кислорода O^+ также имеет два метастабильных терма с энергией возбуждения в несколько электронвольт (схема нижних энергетических уровней иона O^+ представлена на рис. 3.3). Так как энергии уровней $^2P_{1/2}$ и $^2P_{3/2}$ очень близки друг к другу, то линии $[O II]$ λ 372.19 нм (переход $4 \rightarrow 2$) и $[O II]$ λ 732.05 нм (переход $5 \rightarrow 2$) разрешаются только в спектрах высокого разрешения. Обычно эти линии наблюдаются как бленда, которая обозначается как линия $[O II]$ λ 732.0. Линии $[O II]$ λ 733.25 (переход $4 \rightarrow 3$) и

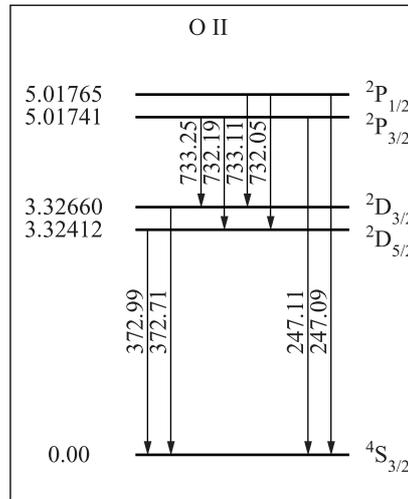


Рис. 3.3. Схема нижних энергетических уровней иона O^+ . Шкала расстояний между уровнями не соблюдается

[O II] λ 733.11 (переход $5 \rightarrow 3$) также обычно наблюдаются как бленда, которая обозначается как линия [O II] λ 733.0. Отношение $Q_{2,O}$ интенсивностей небулярных ([O II] λ 372.7, 372.9) и авроральных ([O II] λ 732.0, 733.0) линий служит индикатором электронной температуры $t_{2,O}$ в зоне свечения иона O^+ . Формулу, связывающую измеренное отношение $Q_{2,O}$ интенсивностей линий и электронную температуру $t_{2,O}$, можно получить тем же самым методом, который использован в предыдущем параграфе при определении соотношения $t_{3,O} - Q_{3,O}$ для дважды ионизованного кислорода.

Приведенная ниже формула, связывающая измеренное отношение $Q_{2,O}$ интенсивностей линий и электронную температуру $t_{2,O}$, получена со следующим набором атомных данных. Для энергии возмущенных уровней иона O^+ взяты экспериментальные величины из [538], эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов — из [156], эффективные сечения для электронных ударов — из работы [412]. Для учета зависимости эффективных сечений от электронной температуры табличные данные из

Таблица 3.2. Эйнштейновские коэффициенты $A_{j,k}$ спонтанных переходов [156] и эффективные сечения $\Omega_{j,k}$ для электронных ударов [412] для пяти нижних уровней O^+

Переход $j \rightarrow k$	λ , нм	$A_{j,k}$ с $^{-1}$	$\Omega_{j,k} = a_0 + a_1t + a_2t^2$
2 \rightarrow 1	372.9	$3.456 \cdot 10^{-5}$	$0.888 - 0.007t + 0.003t^2$
3 \rightarrow 1	372.7	$1.635 \cdot 10^{-4}$	$0.590 - 0.008t + 0.003t^2$
3 \rightarrow 2		$1.241 \cdot 10^{-7}$	$1.638 - 0.268t + 0.056t^2$
4 \rightarrow 1	247.11	$5.646 \cdot 10^{-2}$	$0.301 + 0.012t - 0.001t^2$
4 \rightarrow 2	732.19	$1.106 \cdot 10^{-1}$	$0.912 + 0.028t + 0.008t^2$
4 \rightarrow 3	733.25	$5.871 \cdot 10^{-2}$	$0.573 + 0.030t + 0.003t^2$
5 \rightarrow 1	247.09	$2.265 \cdot 10^{-2}$	$0.150 + 0.002t + 0.001t^2$
5 \rightarrow 2	732.05	$5.824 \cdot 10^{-2}$	$0.382 + 0.018t + 0.002t^2$
5 \rightarrow 3	733.11	$9.668 \cdot 10^{-2}$	$0.376 + 0.019t + 0.002t^2$
5 \rightarrow 4		$3.158 \cdot 10^{-10}$	$0.278 + 0.011t + 0.003t^2$

работы [412] были аппроксимированы полиномами второй степени. Найденные полиномы приведены в табл. 3.2. С этим набором атомных данных для сетки значений t_e и n_e вычислены $Q_{2,0}$ решением уравнений (3.5)–(3.7). Зависимость между $t_{2,0}$ и $Q_{2,0}$, соответствующая численному решению для $n_e = 1 \text{ см}^{-3}$, представлена на рис. 3.4, *a* плюсами. Кружками показана зависимость для $n_e = 100 \text{ см}^{-3}$. Из рис. 3.4, *a* следует, что соотношение $t_{2,0} - Q_{2,0}$ зависит от электронной плотности. Однако при плотностях меньше $n_e = 100 \text{ см}^{-3}$ этой зависимостью можно пренебречь. Численные результаты можно аппроксимировать выражением

$$t_{2,0} = \frac{0.871}{\lg Q_{2,0} - 0.871 - 0.134 \lg t_{2,0} + 0.011 t_{2,0}}. \quad (3.14)$$

Зависимость, описываемая уравнением (3.14), представлена на рис. 3.4, *a* сплошной линией. Следует подчеркнуть, что уравне-

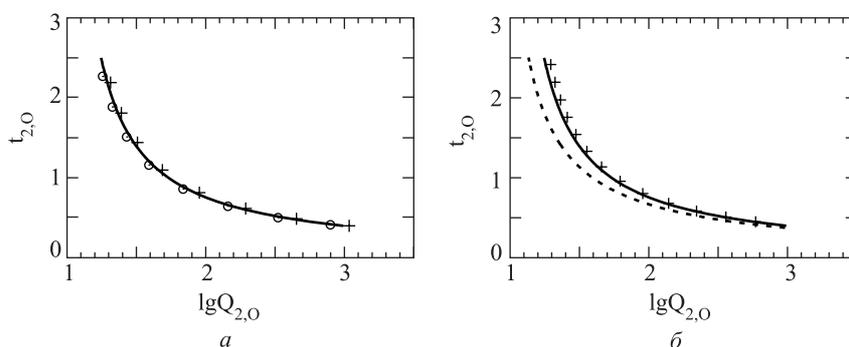


Рис. 3.4. Зависимость между электронной температурой $t_{2,0}$ и параметром $Q_{2,0}$: *a*) плюсы — численное решение для $n_e = 1 \text{ см}^{-3}$, кружки — для $n_e = 100 \text{ см}^{-3}$; сплошная линия соответствует уравнению (3.14); *б*) сплошная линия — то же, что и на *a*; штриховая линия — соотношение из [454], плюсы — из [371]

ние (3.14) применимо для определения электронной температуры только в областях Н II низкой плотности.

Соотношение, связывающее измеренное отношение $Q_{2,0}$ интенсивностей линий и электронную температуру $t_{2,0}$, приведено в работах Ситона и Остерброка (1957) [454], Пеймберта и Костеро (1969) [371]. На рис. 3.4, *б* сравнивается приведенное выше соотношение $t_{2,0} - Q_{2,0}$ с соотношениями из ранних работ. Штриховой линией обозначено соотношение из работы Ситона и Остерброка 1957 года [454]. Плюсами — соотношение из работы Пеймберта и Костеро 1969 года [371].

При выводе соотношения, связывающего отношение интенсивностей спектральных линий с электронной температурой в зоне свечения данного иона, используют атомные данные: энергии возбужденных уровней E_j , эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов $A_{j,k}$, эффективные сечения для электронных ударов $\Omega_{j,k}$. Численные значения атомных данных находят при квантовомеханических расчетах в рамках разных приближений. Энергии возбужденных уровней установлены также экспериментально. Сравнение рассчитанных энергий возбужденных уровней с измеренными позволяет судить о точности современ-

ных квантовомеханических расчетов. Сравнение показывает, что разность между вычисленными и измеренными энергиями уровней иона O^+ может превышать разность энергий между близкими уровнями ${}^2P_{1/2}$ и ${}^2P_{3/2}$ или ${}^2D_{3/2}$ и ${}^2D_{5/2}$ иона O^+ (см. рис. 3.3). В результате вычисленная при одних предположениях энергия уровня ${}^2P_{1/2}$ больше энергии уровня ${}^2P_{3/2}$, а вычисленная при других предположениях энергия уровня ${}^2P_{1/2}$ меньше энергии уровня ${}^2P_{3/2}$ [499]. Иными словами, даже порядок вычисленных энергетических уровней иона O^+ может изменяться в зависимости от предположений, принятых при расчетах. Поэтому при выводе соотношений между интенсивностями спектральных линий и электронными температурами для разных ионов использовали эмпирические значения энергий возбужденных уровней.

Считается, что с помощью наиболее надежных современных расчетов эффективных сечений для электронных ударов для переходов между нижними уровнями можно получить значения $\Omega_{j,k}$ с точностью порядка 10 % [211, 499]. Точность современных расчетов вероятностей спонтанных переходов также составляет около 10 % [158, 161]. Эти оценки характеризуют среднюю точность расчетов, точность расчетов атомных данных может быть разной для разных ионов. В работе [18] выполнено сравнение эйнштейновских коэффициентов спонтанных переходов $A_{j,k}$ и эффективных сечений для электронных ударов $\Omega_{j,k}$ из разных работ для иона O^+ . Разница между эйнштейновскими коэффициентами спонтанных переходов из разных работ порядка 10 %, кроме перехода $5 \rightarrow 4$. При этом $A_{j,k}$ из разных работ могут содержать как случайную, так и систематическую ошибку. Разница между эффективными сечениями для электронных ударов из разных работ может достигать 30 %. Значения $\Omega_{j,k}$ также показывают не только случайный разброс, но и систематическую ошибку. Ошибки эйнштейновских коэффициентов спонтанных переходов оказывают меньшее влияние на точность определения электронной температуры по сравнению с ошибками эффективных сечений для электронных ударов [18, 400]. Ошибка электронной температуры, обусловленная неточностями в атомных данных, увеличивается с увеличением электронной температуры.

3.3.2. $t_2(\text{N II})$

Ионы однажды ионизованного азота N^+ и дважды ионизованного кислорода O^{++} имеют схожие схемы нижних энергетических уровней. Как и для иона кислорода O^{++} , основная электронная конфигурация иона азота N^+ имеет два метастабильных терма с энергией возбуждения в несколько электронвольт (схема нижних энергетических уровней иона N^+ представлена на рис. 3.5). Отношение $Q_{2,\text{N}}$ интенсивностей небулярных ($[\text{N II}] \lambda 654.8, 658.4$) и авроральной ($[\text{N II}] \lambda 575.5$) линий азота служит индикатором электронной температуры $t_{2,\text{N}}$ в зоне свечения иона N^+ .

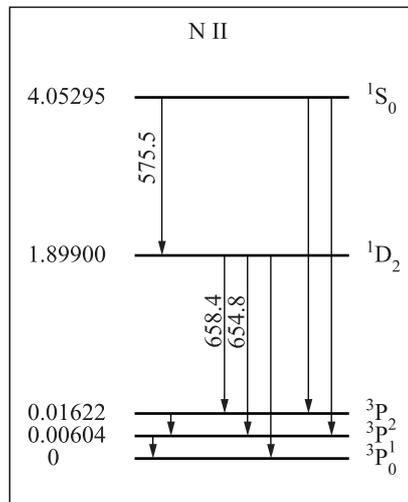


Рис. 3.5. Схема нижних энергетических уровней иона N^+ . Шкала расстояний между уровнями не соблюдается

Соотношение между отношением $Q_{2,\text{N}}$ интенсивностей линий и электронной температурой $t_{2,\text{N}}$ находят стандартным методом. Для энергий возбужденных уровней приняты экспериментальные значения, которые приведены в [161]. Эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов взяты из [161], эффективные сечения для электронных ударов вычислены недавно Хадсоном и Беллом [212]. Табличные данные из [212] аппроксимированы полиномами второй степени. Найденные полиномы приведены в

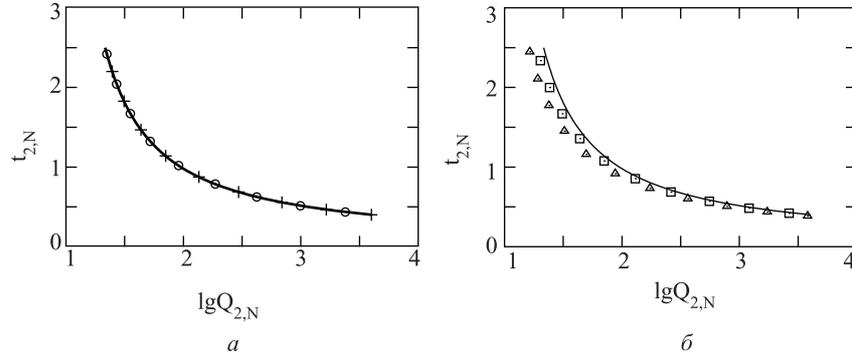


Рис. 3.6. Зависимость между электронной температурой $t_{2,N}$ и параметром $Q_{2,N}$: а) плюсы — зависимость, соответствующая численному решению для $n_e = 1 \text{ см}^{-3}$, кружки — для $n_e = 100 \text{ см}^{-3}$, сплошная линия соответствует уравнению (3.15); б) непрерывная линия — то же, что и на а; треугольники — зависимость из [3], квадратики — зависимость из [311]

табл. 3.3. С этим набором атомных констант рассчитаны соотношения между t_e и $Q_{2,N}$. Соотношение, соответствующее численному решению для $n_e = 1 \text{ см}^{-3}$, представлено на рис. 3.6, а плюсами. Кружками показано решение для $n_e = 100 \text{ см}^{-3}$. На рис. 3.6, а видно, что соотношение $t_{2,N} - Q_{2,N}$ не зависит от электронной плотности в интересующем нас диапазоне плотностей. Аппроксимацией численных результатов получаем

$$t_{2,N} = \frac{1.118}{\lg Q_{2,N} - 0.891 - 0.177 \lg t_{2,N} + 0.030 t_{2,N}}. \quad (3.15)$$

Кривая, соответствующая уравнению (3.15), представлена на рис. 3.6, а сплошной линией. Видно, что аппроксимация хорошо воспроизводит численные результаты.

На рис. 3.6, б показано, как изменялось соотношение $t_{2,N} - Q_{2,N}$ за полвека. Сплошной линией представлено приведенное выше соотношение (то же, что на рис. 3.6, а). Квадратиками показано соотношение, взятое из работы Мак-Кола 1984 года [311]. Треугольниками — зависимость из работы Боярчука, Гершберга и Проника 1963 года [3].

Таблица 3.3. Эйнштейновские коэффициенты $A_{j,k}$ спонтанных переходов [156] и эффективные сечения $\Omega_{j,k}$ для электронных ударов [212] для пяти нижних уровней иона N^+

Переход $j \rightarrow k$	λ	$A_{j,k} \text{ c}^{-1}$	$\Omega_{j,k} = a_0 + a_1t + a_2t^2$
2→1	205 мкм	$2.083 \cdot 10^{-6}$	$0.344 + 0.108t - 0.019t^2$
3→1		$1.116 \cdot 10^{-12}$	$0.210 + 0.072t - 0.009t^2$
3→2	122 мкм	$7.420 \cdot 10^{-6}$	$0.905 + 0.290t - 0.043t^2$
4→1		$5.253 \cdot 10^{-7}$	$0.281 + 0.026t - 0.004t^2$
4→2	654.8 нм	$9.851 \cdot 10^{-4}$	$0.841 + 0.080t - 0.012t^2$
4→3	658.4 нм	$2.913 \cdot 10^{-3}$	$1.399 + 0.131t - 0.018t^2$
5→1		0.	$0.033 + 0.002t - 0.000t^2$
5→2		$3.185 \cdot 10^{-2}$	$0.099 + 0.006t - 0.000t^2$
5→3		$1.547 \cdot 10^{-4}$	$0.165 + 0.012t - 0.001t^2$
5→4	575.5 нм	1.136	$1.164 - 0.458t + 0.093t^2$

Сравнение эйнштейновских коэффициентов спонтанных переходов $A_{j,k}$ и эффективных сечений для электронных ударов $\Omega_{j,k}$ из разных работ для иона N^+ показывает, что разница между значениями $A_{j,k}$ из разных работ в большинстве случаев не превышает 10 %, разница между эффективными сечениями для электронных ударов из разных работ также не превышает 10 % [18]. Точность атомных данных для иона N^+ , по-видимому, больше, чем для иона O^+ . Точность определения электронной температуры $t_{2,N}$ зависит главным образом от точности эффективных сечений для переходов $1 \rightarrow 4$ и $1 \rightarrow 5$. Когда ошибки $\Omega_{1,4}$ и $\Omega_{1,5}$ велики и имеют противоположные знаки, то электронная температура содержит большую ошибку, если даже эффективные сечения для электронных ударов для других переходов $\Omega_{j,k}$ известны с большой точностью [400]. Так как точность атомных данных для иона N^+ , по-видимому, больше, чем для иона O^+ , то значения $t_{2,N}$ более надежны, чем значения $t_{2,O}$.

3.3.3. $t_2(\text{S II})$

Электронная температура, найденная по линиям S^+ , характеризует электронную температуру во внешней части зоны свечения иона O^+ .

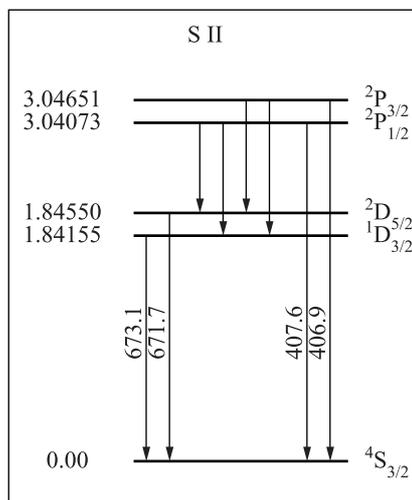


Рис. 3.7. Схема нижних энергетических уровней иона S^+ . Шкала расстояний между уровнями не соблюдается

Ионы серы S^+ и кислорода O^+ имеют схожие схемы нижних энергетических уровней. Основная электронная конфигурация ионизованной серы S^+ также имеет два метастабильных терма с энергией возбуждения в несколько электронвольт (схема нижних энергетических уровней иона S^+ представлена на рис. 3.7). Отношение $Q_{2,S}$ интенсивностей небулярных ($[\text{S II}] \lambda 671.7, 673.1$) и авроральных ($[\text{S II}] \lambda 406.9, 407.6$) линий служит индикатором электронной температуры $t_{2,S}$ в зоне свечения иона S^+ . Найдем уравнение, связывающее измеренное отношение $Q_{2,S}$ интенсивностей линий и электронную температуру $t_{2,S}$. Искомая формула может быть получена тем же методом, который использовался в предыдущих параграфах для других ионов. Атомные данные для иона S^+ рассчитывались многими исследователями. Эффективные сечения для электронных ударов приведены в ра-

Таблица 3.4. Эйнштейновские коэффициенты $A_{j,k}$ спонтанных переходов [218] и эффективные сечения $\Omega_{j,k}$ для электронных ударов [243] для пяти нижних уровней иона S^+

Переход $j \rightarrow k$	λ , нм	$A_{j,k}$ см $^{-1}$	$\Omega_{j,k} = a_0 + a_1t + a_2t^2$
2 \rightarrow 1	673.1	$6.845 \cdot 10^{-4}$	$3.426 - 0.835t + 0.175t^2$
3 \rightarrow 1	671.7	$2.024 \cdot 10^{-4}$	$5.122 - 1.277t + 0.272t^2$
3 \rightarrow 2		$2.340 \cdot 10^{-7}$	$8.624 - 1.350t + 0.187t^2$
4 \rightarrow 1	407.6	$7.739 \cdot 10^{-2}$	$1.304 - 0.157t + 0.023t^2$
4 \rightarrow 2		$1.432 \cdot 10^{-1}$	$2.280 - 0.625t + 0.147t^2$
4 \rightarrow 3		$6.866 \cdot 10^{-2}$	$2.584 - 0.479t + 0.099t^2$
5 \rightarrow 1	406.9	$1.925 \cdot 10^{-1}$	$2.593 - 0.269t + 0.023t^2$
5 \rightarrow 2		$1.146 \cdot 10^{-1}$	$3.571 - 0.729t + 0.160t^2$
5 \rightarrow 3		$1.563 \cdot 10^{-1}$	$6.178 - 1.524t + 0.349t^2$
5 \rightarrow 4		$2.508 \cdot 10^{-7}$	$3.311 - 0.735t + 0.141t^2$

ботах [75, 243, 411, 419, 420, 501, 502], эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов — в работах [157, 218, 219, 324, 325], экспериментальные энергии возбуждения уровней — в работах [107, 309].

Ниже приведено соотношение $t_{2,S} - Q_{2,S}$, полученное для следующего набора атомных данных. Для энергии возмущенных уровней иона S^+ взяты экспериментальные значения из работы [309], эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов — из [218], эффективные сечения для электронных ударов — из [243]. Эффективные сечения зависят от электронной температуры и указаны в [243] для набора значений электронной температуры. Табличные данные были аппроксимированы полиномами второй степени (найденные полиномы приведены в табл. 3.4). С этим набором атомных данных для сетки значений t_e (в диапазоне 0.4–2.5) и n_e (в интервале 1–500 см $^{-3}$) вычислены соответствующие значения $Q_{2,S}$ решением уравнений (3.5)–(3.7). Зависимость между электронной температурой $t_{2,S}$ и отношением

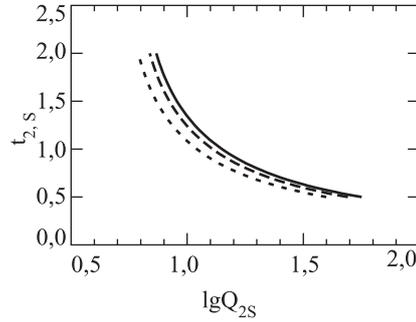


Рис. 3.8. Зависимость между электронной температурой $t_{2,S}$ и параметром $Q_{2,S}$. Сплошная линия — численное решение в рамках 5-уровневой модели иона S^+ для $n_e = 1 \text{ см}^{-3}$, штриховая — для $n_e = 100 \text{ см}^{-3}$, пунктирная — для $n_e = 300 \text{ см}^{-3}$

ем $Q_{2,S}$, соответствующая численному решению для $n_e = 1 \text{ см}^{-3}$, представлена на рис. 3.8 сплошной линией. Зависимость для $n_e = 100 \text{ см}^{-3}$ — штриховой линией, зависимость для $n_e = 300 \text{ см}^{-3}$ — пунктирной линией. Из рис. 3.8 следует, что соотношение $t_{2,S} - Q_{2,S}$ зависит от электронной плотности в туманности.

Аппроксимацией численных результатов получено аналитическое выражение, связывающее $t_{2,S}$ и $Q_{2,S}$:

$$t_{2,S} = \frac{0.589}{\lg Q_{2,S} - 0.518 + 0.094 \lg t_{2,S} - 0.041 t_{2,S} + w}, \quad (3.16)$$

где

$$w = \lg(1 + 9.056 x_{2,S}) \quad (3.17)$$

и

$$x_{2,S} = 10^{-4} n_e t_{2,S}^{-1/2}. \quad (3.18)$$

Линии ионизованной серы гораздо чаще используют для оценки электронной концентрации в туманности, чем для определения электронной температуры.

3.3.4. $t_3(S \text{ III})$

Как отмечено выше, электронная температура, найденная по линиям S^{++} , характеризует электронную температуру во внутрен-

ней части зоны свечения иона O^+ . Ионы серы S^{++} и кислорода O^{++} имеют схожие схемы нижних энергетических уровней. Основная электронная конфигурация дважды ионизованной серы S^{++} имеет два метастабильных терма с энергией возбуждения в несколько электронвольт (схема нижних энергетических уровней иона S^{++} представлена на рис. 3.9). Отношение $Q_{3,S}$ интенсивностей небулярных ($[S \text{ III}] \lambda 906.9, 953.2$) и авроральной ($[S \text{ III}] \lambda 631.2$) линий служит индикатором электронной температуры $t_{3,S}$.

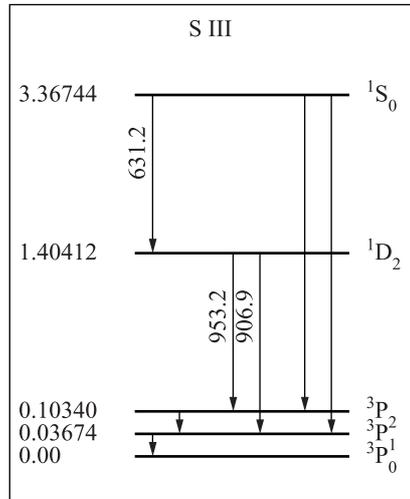


Рис. 3.9. Схема нижних энергетических уровней иона S^{++} . Шкала расстояний между уровнями не соблюдается

Атомные данные для иона S^{++} рассчитывались многими исследователями. Эффективные сечения для электронных ударов приведены в работах [160, 323, 498, 500], эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов — в [53, 106, 155, 324, 326], экспериментальные энергии возбуждения уровней — в [237].

Ниже приведено соотношение $t_{3,S} - Q_{3,S}$, полученное для следующего набора атомных данных. Для значений энергии возмущенных уровней иона S^{++} взяты экспериментальные значения из [237], эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов

Таблица 3.5. Эйнштейновские коэффициенты $A_{j,k}$ спонтанных переходов [155] и эффективные сечения $\Omega_{j,k}$ для электронных ударов [500] для пяти нижних уровней иона S^{++}

Переход $j \rightarrow k$	λ	$A_{j,k}, c^{-1}$	$\Omega_{j,k} = a_0 + a_1t + a_2t^2$
2 \rightarrow 1	33,5 мкм	$3.418 \cdot 10^{-4}$	$4.955 - 1.081t + 0.112t^2$
3 \rightarrow 1		$2.277 \cdot 10^{-8}$	$1.564 - 0.360t + 0.109t^2$
3 \rightarrow 2	18,7 мкм	$1.430 \cdot 10^{-3}$	$9.800 - 2.383t + 0.462t^2$
4 \rightarrow 1		$5.638 \cdot 10^{-6}$	$0.856 - 0.134t + 0.050t^2$
4 \rightarrow 2	906.7 нм	$1.992 \cdot 10^{-2}$	$2.580 - 0.425t + 0.158t^2$
4 \rightarrow 3	953.2 нм	$5.157 \cdot 10^{-2}$	$4.289 - 0.692t + 0.256t^2$
5 \rightarrow 1		0	$0.128 + 0.002t + 0.001t^2$
5 \rightarrow 2		$6.876 \cdot 10^{-1}$	$0.385 + 0.003t + 0.004t^2$
5 \rightarrow 3		$9.532 \cdot 10^{-3}$	$0.640 + 0.008t + 0.007t^2$
5 \rightarrow 4	613.2 нм	2.188	$1.270 + 0.042t + 0.059t^2$

дов — из [155], эффективные сечения для электронных ударов — из работы [500]. Табличные данные для эффективных сечений аппроксимированы полиномами второй степени (найденные полиномы приведены в табл. 3.5). Зависимость между электронной температурой $t_{3,S}$ и отношением $Q_{3,S}$, соответствующая численному решению для $n_e = 1 \text{ см}^{-3}$, представлена на рис. 3.10, *a* сплошной линией. Зависимость для $n_e = 500 \text{ см}^{-3}$ показана пунктиром. Из рис. 3.10, *a* следует, что соотношение $t_{3,S} - Q_{3,S}$ практически не зависит от электронной плотности в туманности.

Аппроксимацией численных результатов получено аналитическое выражение, связывающее $t_{3,S}$ и $Q_{3,S}$:

$$t_{3,S} = \frac{0.915}{\lg Q_{3,S} - 0.683 + 0.485 \lg t_{3,S} - 0.114 t_{3,S}}. \quad (3.19)$$

Соотношение между $t_{3,S}$ и $Q_{3,S}$ приведено в ряде публикаций. Сравнение приведенного здесь уравнения с аналогичными уравнениями из других работ показано на рис. 3.10, *b*. Сплошная

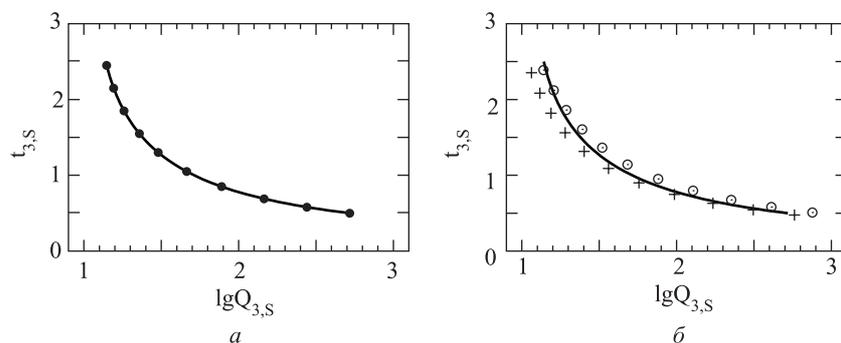


Рис. 3.10. Зависимость между электронной температурой $t_{3,S}$ и параметром $Q_{3,S}$: *a*) численное решение в рамках пятиуровневой модели иона S^{++} для $n_e = 1 \text{ см}^{-3}$ (сплошная линия) и для $n_e = 500 \text{ см}^{-3}$ (точки); *б*) сравнение соотношений $t_{3,S} - Q_{3,S}$ из разных работ; сплошная линия — то же, что и на рис. *a*, плюсы — данные [371], кружки — [362]

линия соответствует уравнению (3.19). Уравнение, приведенное в работе Пеймберта и Костеро 1969 г. [371], показано плюсами, соотношение из работы Пейджела и др. 1992 г. [362] — кружками. В работе Пейджела и др. соотношение между $t_{3,S}$ и $Q_{3,S}$ явно не приведено. Однако, это соотношение легко может быть получено вычитанием их уравнения (12) из уравнения (13) (см. [362]).

3.4. Соотношение t_2-t_3

На практике прямой метод редко применяется полностью. При определении содержаний кислорода и азота распределение электронной температуры в туманности описывается в рамках двухзонной модели, в которой температура в зоне свечения иона O^{++} задана значением t_3 и температура в зоне свечения ионов O^+ и N^+ — значением t_2 . Очень редко в спектрах внегалактических областей Н II удается измерить какую-либо одну авроральную линию, $[O \text{ III}] \lambda 436.3$ или $[N \text{ II}] \lambda 575.5$, и только в немногих случаях удается надежно измерить одновременно обе линии. Если измеряется авроральная линия дважды ионизованного кислоро-

да [O III] λ 436.3 и определяется электронная температура t_3 в зоне свечения иона O^{++} , то электронная температура t_2 в зоне свечения ионов O^+ и N^+ оценивается при помощи соотношения, связывающего между собой t_2 и t_3 . Если измеряется авроральная линия [N II] λ 575.5 и определяется электронная температура t_2 , то электронная температура t_3 оценивается при помощи соотношения $t_2 - t_3$.

Соотношение между t_2 и t_3 может быть установлено путем измерения t_2 и t_3 в областях Н II. Кенникатт, Брезолин и Гарнетт [249] построили диаграмму $t_{2,O} - t_3$ для областей Н II в спиральных галактиках. Они обнаружили, что электронная температура $t_{2,O}$ практически не коррелирует с электронной температурой t_3 . Большой разброс точек на наблюдаемой диаграмме $t_2 - t_3$ отмечен и в других работах [189, 190, 379]. Отсутствие корреляции между измеренными значениями t_2 и t_3 не может быть объяснено только ошибками измерений слабых авроральных линий в спектрах областей Н II. Природа этого расхождения неизвестна. Одна из возможных причин была указана в работах [295, 432]. В зоне дважды ионизованного кислорода происходят рекомбинации и последующие каскадные переходы между энергетическими уровнями иона O^+ . При этом часть электронов может попадать на уровень, переходы с которого дают авроральные линии [O II] λ 732.0, 733.0. В результате в зоне дважды ионизованного кислорода возникает рекомбинационное излучение туманности в авроральной линии [O II] λ 732.0, 733.0. Вклад этого рекомбинационного излучения в свечение туманности в линии [O II] λ 732.0, 733.0, обусловленное возбуждением ионов O^+ при столкновениях со свободными электронами в зоне однажды ионизованного кислорода, может исказить $Q_{2,O}$, и следовательно, найденную электронную температуру $t_{2,O}$. Кенникатт, Брезолин и Гарнетт оценили возможный вклад этого эффекта в наблюдаемый разброс на диаграмме $t_{2,O} - t_3$ и пришли к выводу, что для исследованных ими областей Н II этот эффект мал и не может объяснить наблюдаемый разброс.

Разброс точек на наблюдаемой диаграмме $t_{2,S} - t_3$ также большой [139]. Однако электронная температура $t_{2,S}$ практически не используется при определении содержаний кислорода и азота в областях Н II.

Изотов и др. [225] построили диаграмму $t_{2,O} - t_3$ для объектов из цифрового обзора неба Sloan, в спектрах которых они измерили авроральные линии однажды и дважды ионизованного

кислорода. Они определили, что измеренные электронные температуры в целом следуют соотношению, найденному ими из моделей областей Н II. Однако разброс значений $t_{2,O}$ при любом значении t_3 очень велик. Они полагают, что этот разброс обусловлен большими ошибками измерений слабых авроральных линий однажды ионизованного кислорода [O II] λ 732.0, 733.0. Изотов с соавторами сделали вывод, что для определения содержания кислорода (и других элементов) следует использовать значение t_2 , полученное из $t_2 - t_3$ соотношения, а не значение, найденное по измеренной $Q_{2,O}$.

Было высказано предположение, что большой разброс точек на диаграмме $t_{2,O} - t_3$ может указывать на отсутствие однозначного соответствия между электронными температурами $t_{2,O}$ и t_3 [189, 190, 379, 392]. Исключить или надежно обосновать такую возможность пока не удается.

Разброс точек на наблюдаемой диаграмме $t_{2,N} - t_3$ существенно меньше, чем на диаграмме $t_{2,O} - t_3$ [69, 139, 249], т. е. наблюдается тесная корреляция между $t_{2,N}$ и t_3 . Это является весомым аргументом в пользу того, что $t_{2,N}$ дает более надежное значение электронной температуры t_2 в зоне свечения ионов O^+ и N^+ , чем $t_{2,O}$.

Ниже под электронной температурой t_2 в зоне свечения ионов O^+ и N^+ будем подразумевать $t_{2,N}$.

Для установления соотношения между t_2 и t_3 обычно используют модели областей Н II. Предложено несколько вариантов соотношения между t_2 и t_3 . Наиболее широкое распространение получило соотношение, предложенное Кемпбелл, Терлевицем и Мельником [81]. На базе фотоионизационных моделей областей Н II Стасинской [481] они нашли следующее выражение:

$$t_2 = 0.7 t_3 + 0.3. \quad (3.20)$$

Это соотношение, ставшее каноническим, было подтверждено Гарнеттом на основе рассчитанных им фотоионизационных моделей областей Н II [167]. Это соотношение подтверждается также наблюдениями (см. ниже).

Используя более поздние модели областей Н II Стасинской [482], Пейджел и др. [362] получили

$$\frac{1}{t_2} = 0.5 \left(\frac{1}{t_3} + 0.8 \right). \quad (3.21)$$

Изотов, Туан и Липоветский [232], используя модели [482], определили

$$t_2 = 0.243 + 1.031 t_3 - 0.184 t_3^2. \quad (3.22)$$

Дехарвенг и др. [115] вывели соотношение

$$t_2 = 0.775 t_3 + 0.281, \quad (3.23)$$

анализируя модели областей Н II Стасинской и Шерера [488]. Ой и Шиелдс [350] пришли к заключению, что соотношение, предложенное Кемпбелл, Терлевичем и Мельником [81], является правдоподобным при $t_3 > 1.0$. При низких температурах области Н II лучше соответствуют изотермичным моделям. Следовательно, соотношение имеет вид

$$\begin{aligned} t_2 &= 0.7 t_3 + 0.3, & t_3 > 1.0, \\ t_2 &= t_3, & t_3 < 1.0. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Изотов и др. [225], используя модели областей Н II Лейзера и др. [285], получили соотношение

$$\begin{aligned} t_2 &= -0.577 + t_3 (2.065 - 0.498 t_3), & 7.2 > Z, \\ t_2 &= -0.744 + t_3 (2.338 - 0.610 t_3), & 8.2 > Z > 7.2, \\ t_2 &= 2.967 + t_3 (-4.797 + 2.827 t_3), & Z > 8.2, \end{aligned} \quad (3.25)$$

где $Z = 12 + \lg(\text{O}/\text{H})$. Таким образом, соотношение между t_2 и t_3 зависит от моделей областей Н II.

Пилюгин, Вильчез и Туан [408] показали, что если есть однозначное соответствие между t_2 и t_3 , то модельно-независимое соотношение между t_2 и t_3 может быть найдено в рамках следующего подхода. Если уравнение для определения содержания иона O^{++} (см. далее уравнение (3.45)) применить не ко всей туманности, а только к зоне свечения иона O^{++} , то с помощью этого уравнения можно определить полное содержание кислорода в туманности. Аналогично, если уравнение для определения содержания иона O^+ (см. далее уравнение (3.49)) применить не ко всей туманности, а только к зоне свечения иона O^+ , то также можно найти полное содержание кислорода в туманности. Решая оба уравнения, мы должны получить одинаковые значения

содержания кислорода, так как для большинства областей Н II нет оснований полагать, что распределение содержания кислорода внутри туманности неоднородно. В рамках такого подхода было получено соотношение

$$t_2 = 0.72 t_3 + 0.26, \quad (3.26)$$

которое удовлетворительно согласуется с соотношением, предложенным Кемпбелл, Терлевицем и Мельником.

В работе [139] приведена эмпирическая зависимость

$$t_2 = 0.71 t_3 + 0.305. \quad (3.27)$$

В работе [400] приведена полуэмпирическая зависимость для областей Н II высокой металличности:

$$t_2 = 0.672 t_3 + 0.314. \quad (3.28)$$

Получены эмпирические ff -соотношения, которые связывают индикаторы электронной температуры $Q_{3,O}$ и $Q_{2,N}$ с интенсивностями сильных кислородных линий. При помощи полученных ff -соотношений были вычислены значения $Q_{3,O}$ и $Q_{2,N}$ и электронные температуры $t_{3,O}$ и $t_{2,N}$ для ряда областей Н II высокой металличности. Соотношение между найденными $t_{2,N}$ и $t_{3,O}$ (уравнение (3.28)) очень близко к каноническому соотношению $t_2 - t_3$, предложенному Кемпбелл, Терлевицем и Мельником.

Соотношение между $t_{3,S}$ и $t_{3,O}$ было получено Гарнеттом на основе рассчитанных им фотоионизационных моделей областей Н II [167]:

$$t_{3,S} = 0.83 t_{3,O} + 0.17. \quad (3.29)$$

Это соотношение, также ставшее каноническим, подтверждается данными наблюдений [69, 139, 249].

Сравнение зависимостей $t_2 - t_3$, полученных в разных работах, приведено на рис. 3.11. Факт однозначного соотношения между значениями электронных температур t_2 , t_3 и $t_{3,S}$ имеет чрезвычайно важное значение. Это означает, что для определения содержания кислорода и азота при помощи T_e -метода достаточно измерить какую-либо одну авроральную линию: [O III] λ 436.3, [N II] λ 575.5 или [S III] λ 631.2. Содержания кислорода и

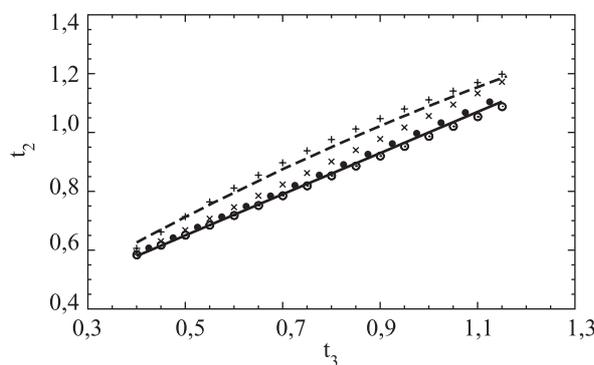


Рис. 3.11. Сравнение зависимостей между t_2 и t_3 , полученных в разных работах: сплошная линия — данные [81], пунктировая — [232], точки — [139], кружки — [400], плюсы — [362], крестики — [115]

азота, найденные с использованием любой из электронных температур ($t_{3,O}$, $t_{2,N}$, $t_{3,S}$), согласуются между собой. Авроральная линия [O III] λ 436.3 измеряется в областях Н II низкой металличности (с высокой температурой), а авроральные линии [N II] λ 575.5 и [S III] λ 631.2 измеряются в областях Н II высокой металличности (с низкой температурой). Так как содержания кислорода и азота, найденные с использованием любой из электронных температур ($t_{3,O}$, $t_{2,N}$, $t_{3,S}$), согласуются между собой, то это позволяет установить единую шкалу металличностей в областях Н II в широком диапазоне металличностей (температур).

3.5. Определение электронной концентрации

Отношение интенсивностей некоторых пар запрещенных линий в оптическом и инфракрасном диапазонах многих ионов (O I, O II, O III, S II, S III, Ne III, Ne V, Ar IV и др.) зависит от электронной плотности [35, 353, 433]. Отношения интенсивностей этих линий могут быть использованы в качестве индикатора электронной плотности в зоне свечения данного иона туманности.

Если можно определить размеры туманности (объем светящегося газа), то можно определить среднюю электронную плотность в туманности по ее свечению в линиях водорода [2]. Этот метод удастся использовать только в том случае, когда известно расстояние до туманности.

3.5.1. $n_e(\text{O II})$ и $n_e(\text{S II})$

Отношение интенсивностей компонентов дублета небулярных линий ионизованного кислорода $[\text{O II}] \lambda 372.9/[\text{O II}] \lambda 372.7$ зависит от плотности. Теоретическое соотношение между отношением интенсивностей линий и электронной плотностью может быть установлено стандартным образом в рамках пятиуровневой модели иона O^+ (решением уравнений (3.5)–(3.7) для сетки значений t_e и n_e). Рассчитанные отношения интенсивностей линий $[\text{O II}] \lambda 372.9/[\text{O II}] \lambda 372.7$ в зависимости от электронной концентрации для трех значений электронной температуры $t_e = 0.5, 1$ и 1.5 представлены на рис. 3.12, *a*. Зависимость для $t_e = 0.5$ показана крестиками, для $t_e = 1.0$ — кружками и для $t_e = 1.5$ — плюсами. Зависимости рассчитывались с теми же значениями атомных параметров, которые использовались выше для вывода соотношения $t_{2,\text{O}} - Q_{2,\text{O}}$ (экспериментальные значения энергий возмущенных уровней взяты из [538], эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов — из [156], эффективные сечения для электронных ударов — из [412]).

На рис. 3.12, *a* видно, что отношение $[\text{O II}] \lambda 372.9/[\text{O II}] \lambda 372.7$ можно использовать для определения электронной концентрации в диапазоне от $n_e \sim 10^2 \text{ см}^{-3}$ до $n_e \sim 10^4 \text{ см}^{-3}$. Аппроксимировав численное решение, получаем простую формулу, которая связывает электронную плотность n_e и отношение интенсивностей линий $[\text{O II}] \lambda 372.9/[\text{O II}] \lambda 372.7$:

$$\begin{aligned} \lg n_e &= 6.441 - 9.660 x + 9.137 x^2 - 3.326 x^3, \\ x &= [\text{O II}] \lambda 372.9/[\text{O II}] \lambda 372.7. \end{aligned} \quad (3.30)$$

Формула получена для $t_e = 1$ и справедлива в диапазоне электронных концентраций от $n_e \sim 10^2 \text{ см}^{-3}$ до $n_e \sim 10^4 \text{ см}^{-3}$. Аппроксимация показана на рис. 3.12, *b* сплошной линией. Для сравнения треугольниками на рис. 3.12, *b* представлено также соотношение, полученное Ситоном и Остерброком в 1957 г. Следует отметить, что соотношение между n_e и $[\text{O II}] \lambda 372.9/[\text{O II}]$

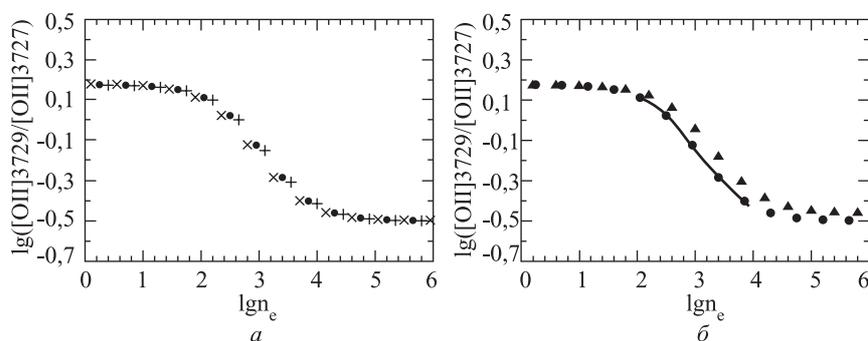


Рис. 3.12. Зависимость от электронной концентрации отношения интенсивностей небулярных линий однажды ионизованного кислорода $[\text{O II}] \lambda 372.9 / [\text{O II}] \lambda 372.7$: а) крестики — численное решение при $t_e = 0.5$, кружки — численное решение при $t_e = 1$, плюсы — численное решение при $t_e = 1.5$; б) кружки — то же, что и на а, сплошная линия — аппроксимация численного решения при $t_e = 1$, треугольники — соотношение из работы [454]

$\lambda 372.7$ зависит от электронной температуры. Для вычисления более точного значения n_e следует учесть эту зависимость.

Метод определения электронной концентрации по отношению $[\text{O II}] \lambda 372.9 / [\text{O II}] \lambda 372.7$ пока редко используется в исследованиях внегалактических областей Н II. Во-первых, в подавляющем большинстве имеющихся в настоящее время спектров внегалактических областей Н II линии $[\text{O II}] \lambda 372.9$ и $[\text{O II}] \lambda 372.7$ не разрешаются и наблюдаются как бленда. Во-вторых, отношение $[\text{O II}] \lambda 372.9 / [\text{O II}] \lambda 372.7$ слабо чувствительно к электронной плотности при малых электронных концентрациях, которые характерны для внегалактических областей Н II.

Соотношение между n_e и $[\text{O II}] \lambda 372.9 / [\text{O II}] \lambda 372.7$ служит не только для определения электронной концентрации в туманностях, но и для тестирования достоверности атомных данных. На рис. 3.12, а видно, что при малых (меньших 10^2 см^{-3}) плотностях отношение $[\text{O II}] \lambda 372.9 / [\text{O II}] \lambda 372.7$ практически не зависит от электронной плотности. При малых электронных концентрациях столкновения происходят редко, и уровни $^2D_{3/2}$ и $^2D_{5/2}$ заселяются только возбуждением электронными удара-

ми из основного состояния. Каждое возбуждение заканчивается спонтанным переходом вниз. Поэтому при низкой электронной плотности отношение $[\text{O II } \lambda 372.9]/[\text{O II } \lambda 372.7]$ близко к пределу, который определяется эффективными сечениями для электронных ударов, вызывающих переходы с первого на второй и третий уровни.

На рис. 3.12, *a* видно, что при высоких плотностях (больше 10^4 см^{-3}) отношение $[\text{O II } \lambda 372.9]/[\text{O II } \lambda 372.7]$ также практически не зависит от электронной плотности. Так как при высоких плотностях столкновения происходят часто, то деактивация уровней $^2D_{3/2}$ и $^2D_{5/2}$ электронными ударами является эффективной. Населенность уровней стремится к больцмановскому распределению. Поскольку энергии уровней $^2D_{3/2}$ и $^2D_{5/2}$ близки, отношение населенностей этих уровней практически не зависит от температуры. В туманности высокой плотности отношение $[\text{O II } \lambda 372.9]/[\text{O II } \lambda 372.7]$ близко к пределу, который определяется отношением вероятностей соответствующих спонтанных переходов.

Сравнение пределов отношений $[\text{O II } \lambda 372.9]/[\text{O II } \lambda 372.7]$, вычисленных с атомными данными из разных работ, с наблюдаемыми предельными отношениями в планетарных туманностях и областях II низкой и высокой плотности позволяет сделать вывод о достоверности рассчитанных атомных данных. В работах [100, 242, 535] было установлено, что эффективные сечения для электронных ударов, рассчитанные Мак-Лафлином и Беллом (1998) для иона O^+ [316], противоречат наблюдениям. Предельное значение $[\text{O II } \lambda 372.9]/[\text{O II } \lambda 372.7] = 1.9$ при низкой плотности, найденное с эффективными сечениями для электронных ударов Мак-Лафлина и Белла [242], намного больше значения 1.5, полученного с эффективными сечениями для электронных ударов из других работ [242] (см. также рис. 3.12).

Вычисленное отношение интенсивностей авроральных линий ионизованного кислорода $[\text{O II } \lambda 732.0]/[\text{O II } \lambda 733.0]$ практически не изменяется с плотностью и равно 1.24. Это отношение также можно использовать для оценки достоверности атомных данных. Отношения интенсивностей авроральных линий ионизованного кислорода $[\text{O II } \lambda 732.0]/[\text{O II } \lambda 733.0]$ были измерены в нескольких сотнях спектров из спектральной базы данных цифрового обзора неба Sloan. Детали измерений и часть данных при-

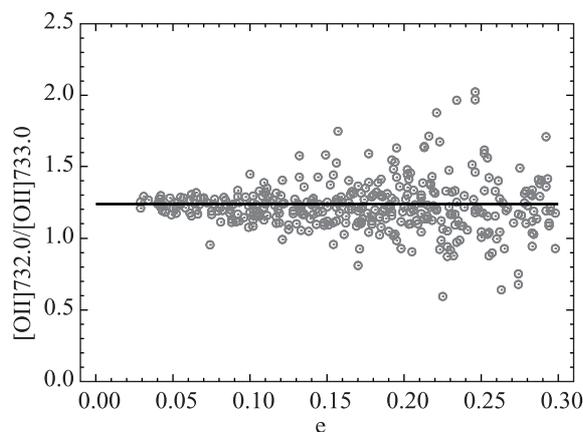


Рис. 3.13. Измеренные отношения интенсивностей авроральных линий ионизованного кислорода $[\text{O II}] \lambda 732.0 / [\text{O II}] \lambda 733.0$ в SDSS-спектрах в зависимости от относительной ошибки измерения ϵ . Линия — теоретическое значение

ведены в работе [406]. На рис. 3.13 измеренные отношения интенсивностей авроральных линий ионизованного кислорода $[\text{O II}] \lambda 732.0 / [\text{O II}] \lambda 733.0$ в SDSS-спектрах показаны в зависимости от относительной ошибки измерения ϵ (ошибка измерения потока, деленная на поток в линии). На рис. 3.13 видно, что измеренные отношения $[\text{O II}] \lambda 732.0 / [\text{O II}] \lambda 733.0$ согласуются с наблюдаемыми в пределах ошибок. Это свидетельствует о том, что используемые нами атомные данные весьма реалистичны.

Схемы нижних энергетических уровней однажды ионизованной серы S^+ и однажды ионизованного кислорода O^+ имеют одинаковый характер. Как и в случае кислорода, отношение интенсивностей компонентов дублета небулярных линий ионизованной серы $[\text{S II}] \lambda 671.7 / [\text{S II}] \lambda 673.1$ зависит от плотности. Рассчитанные изменения отношения интенсивностей линий $[\text{S II}] \lambda 671.7 / [\text{S II}] \lambda 673.1$ в зависимости от электронной концентрации представлены на рис. 3.14, а для трех значений электронной температуры: $t_e = 0.5$, 1 и 1.5. Зависимость для $t_e = 0.5$ показана крестиками, для $t_e = 1.0$ — кружками и для $t_e = 1.5$ — плюсами. Зависимости рассчитывались с теми же атомными данными,

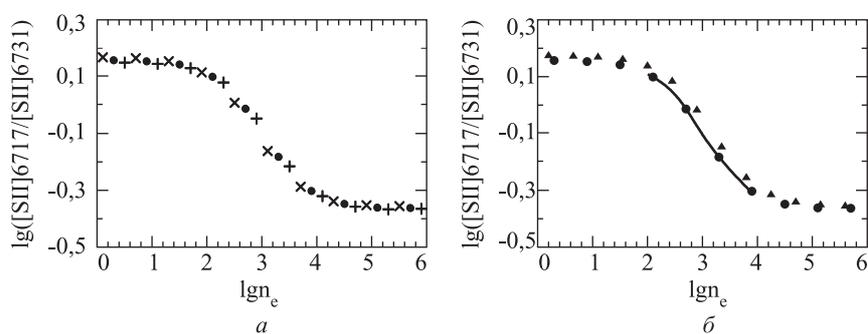


Рис. 3.14. Зависимость от электронной концентрации отношения интенсивностей небулярных линий однажды ионизованной серы [S II] λ 671.7/[S II] λ 673.1: а) крестики — численное решение при $t_e = 0.5$, кружки — численное решение при $t_e = 1$, плюсы — численное решение при $t_e = 1.5$; б) кружки — то же, что на рис. а, сплошная линия — аппроксимация численного решения при $t_e = 1$, треугольники — соотношение из работы [311]

которые использовались выше для вывода соотношения $t_{2,S}$ — $Q_{2,S}$ (экспериментальные значения энергий возмущенных уровней взяты из [309], эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов — из [218], эффективные сечения для электронных ударов — из [243]).

Изменение отношения интенсивностей небулярных линий ионизованной серы [S II] λ 671.7/[S II] λ 673.1 с плотностью носит такой же характер, как и изменение отношения интенсивностей линий ионизованного кислорода [O II] λ 372.9/[O II] λ 372.7 (сравним рис. 3.12 и 3.14). Отношение [S II] λ 671.7/[S II] λ 673.1 чувствительно к плотности в диапазоне плотностей от $n_e \sim 10^2$ см $^{-3}$ до $n_e \sim 10^4$ см $^{-3}$. Формула для вычисления электронной плотности n_e в туманности по измеренному отношению интенсивностей линий ионизованной серы [S II] λ 671.7/[S II] λ 673.1 в ее спектре

$$\begin{aligned} \lg n_e &= 8.448 - 15.101 x + 14.419 x^2 - 5.115 x^3, \\ x &= [\text{S II}]\lambda 671.7 / [\text{S II}]\lambda 673.1 \end{aligned} \quad (3.31)$$

получена аппроксимацией численного решения при $t_e = 1.0$ для интервала плотностей от $n_e \sim 10^2$ см $^{-3}$ до $n_e \sim 10^4$ см $^{-3}$. Аппрок-

симация показана на рис. 3.14, *б* сплошной линией. Для сравнения треугольниками на рис. 3.14, *б* показано соотношение, приведенное Мак-Коллом (1984) [311].

3.5.2. $n_e(\text{O III})$, $n_e(\text{S III})$ и $n_e(\text{N II})$

Отношения интенсивностей инфракрасных линий дважды ионизованного кислорода $[\text{O III}] \lambda 88.4 \text{ мкм} / [\text{O III}] \lambda 51.8 \text{ мкм}$, интенсивностей инфракрасных линий дважды ионизованной серы $[\text{S III}] \lambda 33.5 \text{ мкм} / [\text{S III}] \lambda 18.7 \text{ мкм}$ и интенсивностей инфракрасных линий ионизованного азота $[\text{N II}] \lambda 205 \text{ мкм} / [\text{N II}] \lambda 122 \text{ мкм}$ также зависят от плотности. Не составляет труда рассчитать изменение отношения интенсивностей этих линий с плотностью в рамках пятиуровневой модели атома.

На рис. 3.15, *а* представлены вычисленные отношения интенсивностей инфракрасных линий дважды ионизованного кислорода в зависимости от электронной концентрации для трех значений электронной температуры $t_e = 0.5, 1$ и 1.5 . Аналогичные данные для дважды ионизованной серы представлены на рис. 3.16, *а* и для ионизованного азота на рис. 3.17, *а*. Зависимости для кислорода рассчитывали с теми значениями атомных данных, которые использованы выше для вывода соотношения между $t_{3,\text{O}}$ и $Q_{3,\text{O}}$ (экспериментальные значения энергий возмущенных уровней взяты из [132], эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов — из [161], эффективные сечения для электронных ударов — из [30]). Зависимости для серы рассчитывали с теми значениями атомных данных, которые использованы выше для вывода соотношения между $t_{3,\text{S}}$ и $Q_{3,\text{S}}$ (экспериментальные значения энергий возмущенных уровней взяты из [237], эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов — [155], эффективные сечения для электронных ударов — [500]). Зависимости для азота рассчитывались с атомными данными, которые использованы выше для вывода соотношения между $t_{2,\text{N}}$ и $Q_{2,\text{N}}$ (экспериментальные энергии возмущенных уровней и эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов взяты из [161], эффективные сечения для электронных ударов — [212]).

Как и для случая оптических линий, получаем формулы для определения электронной плотности в туманности по отношению интенсивностей инфракрасных линий аппроксимацией численного решения при $t_e = 1$. Формула для вычисления электронной

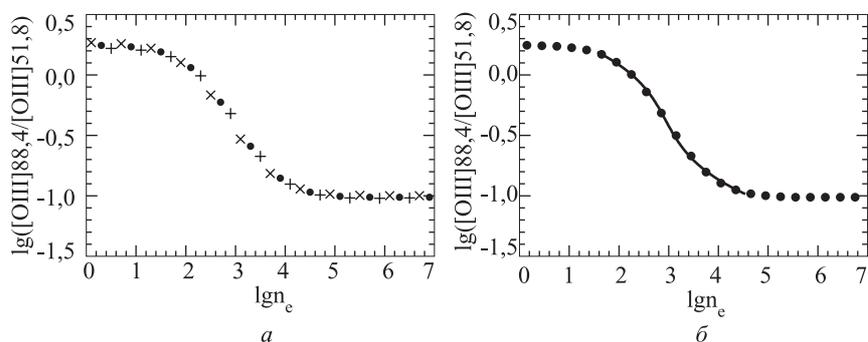


Рис. 3.15. Зависимость от электронной концентрации отношения интенсивностей инфракрасных линий дважды ионизованного кислорода $[\text{O III}] \lambda 88.4 \text{ мкм}/[\text{O III}] \lambda 51.8 \text{ мкм}$: а) крестики — численное решение при $t_e = 0.5$, кружки — численное решение при $t_e = 1$, плюсы — численное решение при $t_e = 1.5$; б) кружки — то же, что на рис. а, сплошная линия — аппроксимация численного решения при $t_e = 1$

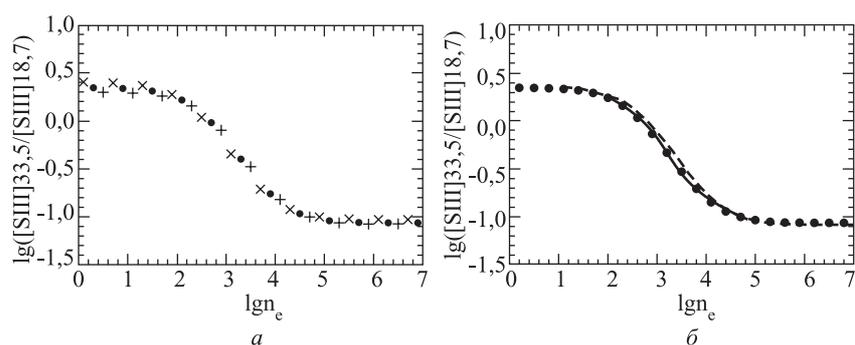


Рис. 3.16. Зависимость от электронной концентрации отношения интенсивностей инфракрасных линий дважды ионизованной серы $[\text{S III}] \lambda 33.5 \text{ мкм}/[\text{S III}] \lambda 18.7 \text{ мкм}$: а) крестики — численное решение при $t_e = 0.5$, кружки — численное решение при $t_e = 1$, плюсы — численное решение при $t_e = 1.5$; б) кружки — то же, что на рис. а, сплошная линия — аппроксимация численного решения при $t_e = 1$, штриховая — зависимость из [128]

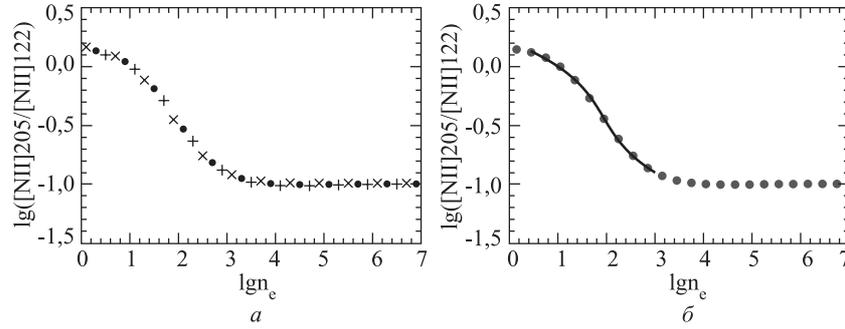


Рис. 3.17. Зависимость от электронной концентрации отношения интенсивностей однажды ионизованного азота $[N II] \lambda 205 \text{ мкм}/[N II] \lambda 122 \text{ мкм}$: *а*) крестики — численное решение при $t_e = 0.5$, кружки — численное решение при $t_e = 1$, плюсы — численное решение при $t_e = 1.5$; *б*) кружки — то же, что на рис. *а*, сплошная линия — аппроксимация численного решения при $t_e = 1$

плотности по отношению интенсивностей дважды ионизованного кислорода $[O III] \lambda 88.4 \text{ мкм}/[O III] \lambda 51.8 \text{ мкм}$ в ее спектре

$$\begin{aligned} \lg n_e &= 2.263 - 2.792x - 3.963x^2 - 3.530x^3, \\ x &= \lg([O III] \lambda 88.4 \text{ мкм}/[O III] \lambda 51.8 \text{ мкм}) \end{aligned} \quad (3.32)$$

получена для интервала электронной плотности от 30 до 50000 см^{-3} . Аппроксимация показана на рис. 3.16, *б* сплошной линией. Формула для вычисления электронной плотности в туманности по отношению интенсивностей линий $[S III] \lambda 33.5 \text{ мкм}/[S III] \lambda 18.7 \text{ мкм}$

$$\begin{aligned} \lg n_e &= 2.692 - 2.060x - 2.400x^2 - 2.340x^3, \\ x &= \lg([S III] \lambda 33.5 \text{ мкм}/[S III] \lambda 18.7 \text{ мкм}) \end{aligned} \quad (3.33)$$

получена для электронной плотности от 10^2 до 10^5 см^{-3} . Аппроксимация показана на рис. 3.16, *б* сплошной линией. Для сравнения показана зависимость из [128] (штриховой линией). Формула

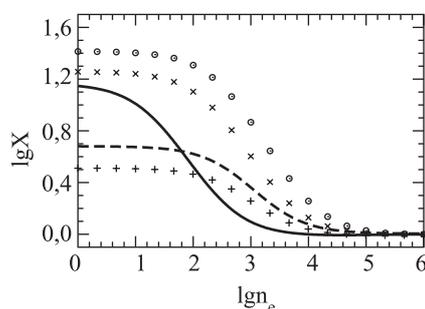


Рис. 3.18. Зависимость от электронной концентрации отношения интенсивностей линий [S III] λ 33.5 мкм/[S III] λ 18.7 мкм (кружки), [O III] λ 88.45 мкм/[O III] λ 51.8 мкм (крестики), [N II] λ 205 мкм/[N II] λ 122 мкм (сплошная линия), [S II] λ 671.7 нм/[S II] λ 673.1 нм (плюсы), [O II] λ 372.9 нм/[O II] λ 372.7 нм (штриховая линия). Все отношения рассчитаны при $t_e = 1$ и нормированы на значение при $n_e = 10^8 \text{ см}^{-3}$

для вычисления электронной плотности в туманности по отношению интенсивностей линий [N II] λ 205 мкм/[N II] λ 122 мкм

$$\begin{aligned} \lg n_e &= 1.009 - 3.587 x - 4.962 x^2 - 3.835 x^3, \\ x &= \lg([\text{N II}]\lambda 205 \text{ мкм}/[\text{N II}]\lambda 122 \text{ мкм}) \end{aligned} \quad (3.34)$$

получена для электронной плотности от 2 до 1000 см^{-3} . Соответствующая кривая показана на рис. 3.17, б сплошной линией.

Сравнение чувствительности рассмотренных выше отношений интенсивностей линий к электронной плотности показано на рис. 3.18. Изменение отношения интенсивностей линий каждого иона с электронной плотностью рассчитано при $t_e = 1$ и для большей наглядности нормировано на предел отношения при высокой плотности (на значение при $n_e = 10^8 \text{ см}^{-3}$). Видно, что характер изменения с плотностью отношений интенсивностей инфракрасных линий такой же, как и оптических линий. Но амплитуда изменения отношений интенсивностей инфракрасных линий в несколько раз больше, чем оптических линий. Отношения интенсивностей инфракрасных линий более чувствительны к элек-

тронной концентрации, и следовательно, являются более надежными индикаторами электронной плотности в туманности, чем отношения интенсивностей оптических линий.

Линии дважды ионизованного кислорода [O III] λ 88.4 мкм и [O III] λ 51.8 мкм и дважды ионизованной серы [S III] λ 33.5 мкм и [S III] λ 18.7 мкм используют как для определения электронной концентрации в областях Н II в нашей Галактике [289, 338, 339, 436, 463], так и во внегалактических объектах [51, 111, 128, 217, 302]. Значительное увеличение измерений этих линий в последние годы обусловлено запуском на орбиту телескопа “Spitzer” с инфракрасным спектрографом. Тем не менее, количество таких измерений пока невелико. Основной базой для определения электронной плотности во внегалактических областях Н II служат оптические линии ионизованной серы [S II] λ 671.7 и [S II] λ 673.1.

Инфракрасные линии ионизованного азота [N II] λ 122 мкм и [N II] λ 205 мкм впервые были измерены около 20 лет назад с инфракрасными спектрографами, установленными на КАО (Kuiper Airborne Observatory) [98] и СОВЕ (Cosmic Background Explorer) [548]. В настоящее время спектроскопия в далеком инфракрасном диапазоне, включающем линии ионизованного азота [N II] λ 122 мкм и [N II] λ 205 мкм, проводится со спутника “Гершель” (Herschel) [47, 149].

3.5.3. Электронные плотности во внегалактических областях Н II

Небулярные линии ионизованной серы измерены в спектрах большого числа областей Н II в спиральных и неправильных галактиках. На рис. 3.19 представлены отношения [S II] λ 671.7/[S II] λ 673.1, измеренные Брезолином и др. [71] в спектрах областей Н II в спиральных галактиках NGC 1232, NGC 1365, NGC 2903, NGC 2997 и NGC 5236 (плюсы) и отношения [S II] λ 671.7/[S II] λ 673.1, измеренные в SDSS-спектрах [406] (кружки). Точные значения электронной концентрации во внегалактических областях Н II по измеренным отношениям [S II] λ 671.7/[S II] λ 673.1 определить сложно, так как измеренные отношения [S II] λ 671.7/[S II] λ 673.1 лежат в диапазоне, в котором их чувствительность к плотности низка. Действительно, при изменении электронной концентрации n_e в 100 раз (от 1 до 100 см⁻³) отношение [S II] λ

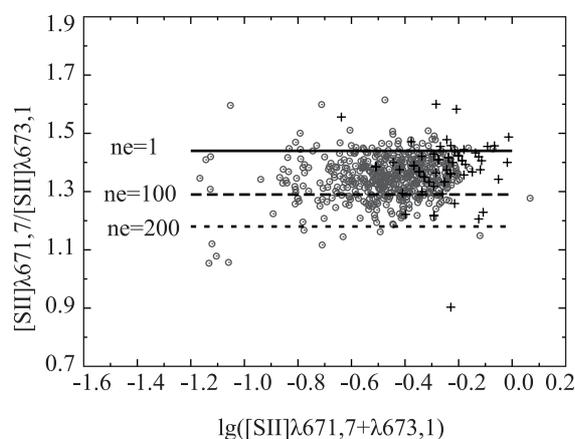


Рис. 3.19. Измеренные отношения интенсивностей небулярных линий ионизованной серы $[\text{S II}] \lambda 671.7 / [\text{S II}] \lambda 673.1$. Плюсы — области H II в спиральных галактиках [71], кружки — SDSS-объекты [406]

$671.7 / [\text{S II}] \lambda 673.1$ изменяется всего лишь на 10 %. Хорошим индикатором электронной плотности при низких плотностях $1\text{--}1000 \text{ см}^{-3}$ является отношение интенсивностей инфракрасных линий ионизованного азота $[\text{N II}] \lambda 122 \text{ мкм}$ и $[\text{N II}] \lambda 205 \text{ мкм}$ [435], но измерений этих линий для внегалактических областей H II пока очень мало [47, 149]. Представленные на рис. 3.19 данные демонстрируют очень важный вывод о том, что электронная концентрация в большинстве внегалактических областей H II меньше 100 см^{-3} и редко превышает 200 см^{-3} .

Амбарцумян [2] разработал метод определения электронной плотности в туманности по ее свечению в линиях водорода. Число рекомбинаций в туманности задано выражением

$$\int_V \alpha_H n_e n^+ dV, \quad (3.35)$$

где α_H — полный коэффициент рекомбинаций для водорода, n_e — концентрация электронов, n^+ — концентрация ионизованных атомов водорода. Каждая рекомбинация приводит к появлению

кванта бальмеровской серии, а каждые 2.2 рекомбинации — к появлению кванта в линии H_α [353]. Тогда для светимости туманности в линии H_α можно записать

$$2.2 L_{H_\alpha} = h\nu_{H_\alpha} \int_V \alpha_H n_e n^+ dV, \quad (3.36)$$

где $h\nu_{H_\alpha}$ — энергия H_α кванта. Так как водород является наиболее распространенным элементом, а в светящейся части туманности он находится преимущественно в ионизованном состоянии, то можно считать, что $n_e = n^+$. Для сферической туманности однородной плотности из уравнения (3.36) получаем

$$n_e = \sqrt{\frac{2.2 L_{H_\alpha}}{(4/3)\pi\alpha_H h\nu_{H_\alpha} R^3}}, \quad (3.37)$$

где R — радиус туманности. С помощью уравнения (3.37) определяют среднюю электронную концентрацию в туманности. Следует отметить одно важное преимущество метода определения электронной плотности в туманности по свечению в линиях водорода по сравнению с методами, в которых в качестве индикатора электронной плотности используется отношение интенсивностей запрещенных линий. Первый метод применим при любых плотностях, тогда как отношения запрещенных линий ионов O^+ , S^+ , N^+ , O^{++} , S^{++} являются индикаторами электронной плотности в ограниченном диапазоне плотностей (см. рис. 3.18, а также [32, 433]).

Гутиеррез и Бекман измерили светимости в линии H_α и радиусы 2657 областей $H\ II$ в диске спиральной галактики $M\ 51$ и 273 областей $H\ II$ в неправильной галактике $NGC\ 4449$ [188]. Если радиус туманности выразить в парсеках, светимость в линии H_α — в эрг/с и взять значение полного коэффициента рекомбинаций для случая B при каноническом значении электронной температуры $T_e = 10^4$ К, то уравнение (3.37) можно записать в виде

$$n_e = 1.5 \cdot 10^{-16} \sqrt{\frac{L_{H_\alpha}}{R^3}}. \quad (3.38)$$

Гутиеррез и Бекман определили, что значения электронной концентрации лежат в диапазоне от 1 до 20 см^{-3} в областях $H\ II$ в

диске спиральной галактики М 51 и в диапазоне от 5 до 50 см⁻³ в областях Н II в неправильной галактике NGC 4449.

Нахождение электронных плотностей во внегалактических областях Н II по свечению в линиях водорода подтверждает вывод, сделанный на основании определения электронных плотностей по отношению интенсивностей линий ионизованной серы [S II] λ 671.7/[S II] λ 673.1, т. е. что электронная концентрация в большинстве внегалактических областей Н II меньше 100 см⁻³. Таким образом, при исследовании внегалактических областей Н II справедливо приближение низкой плотности.

3.6. Определение химического состава по запрещенным линиям. T_e -метод

Содержание химических элементов в области Н II, в которой измерены авроральные линии кислорода и/или азота (и следовательно, электронные температуры), определяется классическим методом, который называют T_e -методом или прямым методом. В данном параграфе рассмотрен этот метод.

Для описания содержания химического элемента X в области Н II принято использовать относительную шкалу, т. е. определять отношение числа атомов данного элемента к числу атомов водорода X/H. Число атомов водорода принимается равным 10¹². С учетом указанных соглашений под содержанием элемента X подразумевается количество атомов данного элемента, приходящееся на 10¹² атомов водорода. Содержания обычно представляют в виде 12 + lg(X/H). В этой шкале содержания всех элементов обозначены положительными числами. Часто содержания элементов в объекте приводят в нормированной шкале [A/B] = lg(A/B) - lg(A_☉/B_☉), где A и B — содержания двух элементов в объекте, а A_☉ и B_☉ — содержание этих элементов на Солнце. Долгие годы содержание кислорода на Солнце принималось равным 12 + lg(O_☉/H_☉) = 8.90 ± 0.03 [182, 278]. Появление трехмерных моделей фотосферы Солнца, уточнение атомных данных и спектральные наблюдения более высокого качества (идентификация бленд) привели к пересмотру содержания кислорода на Солнце. Согласно результатам [33, 41, 319, 447] содержание кислорода на Солнце составляет 12 + lg(O_☉/H_☉) ≈ 8.7. Это значение используется ниже.

3.6.1. Содержание кислорода

Исходным для определения содержания химических элементов в областях Н II является уравнение (3.4). Записываем это уравнение для небулярных линий дважды ионизованного кислорода [O III] λ 495.9, 500.7 в рамках пятиуровневой модели иона O⁺⁺ (см. рис. 3.1, б):

$$\begin{aligned} F_{[\text{O III}]\lambda 495.9, 500.7} &= F_{4,2} + F_{4,3} = \\ &= h(\nu_{4,2} A_{4,2} + \nu_{4,3} A_{4,3}) n_4(t_e, n_e) \text{O}^{++}. \end{aligned} \quad (3.39)$$

Линии водорода имеют рекомбинационное происхождение. Выражение для потока в линии H $_{\beta}$ приведено в [35]:

$$F_{\text{H}_{\beta}} = 1.387 \cdot 10^{-25} n_e t_e^{-0.983} 10^{-0.0424/t_e} \text{H}^+. \quad (3.40)$$

Разделив уравнение (3.39) на уравнение (3.40), получим

$$\frac{F_{[\text{O III}]\lambda 495.9, 500.7}}{F_{\text{H}_{\beta}}} = \frac{h(\nu_{4,2} A_{4,2} + \nu_{4,3} A_{4,3}) n_4(t_e, n_e)}{1.387 \cdot 10^{-25} n_e t_e^{-0.983} 10^{-0.0424/t_e}} \frac{\text{O}^{++}}{\text{H}^+}. \quad (3.41)$$

Уравнение (3.41) можно переписать в виде

$$\frac{\text{O}^{++}}{\text{H}^+} = \psi(t_e, n_e) \frac{F_{[\text{O III}]\lambda 495.9, 500.7}}{F_{\text{H}_{\beta}}}, \quad (3.42)$$

где

$$\psi(t_e, n_e) = \frac{1.387 \cdot 10^{-25} n_e t_e^{-0.983} 10^{-0.0424/t_e}}{h(\nu_{4,2} A_{4,2} + \nu_{4,3} A_{4,3}) n_4(t_e, n_e)}. \quad (3.43)$$

С атомными данными для иона кислорода O⁺⁺, использованными выше при выводе уравнения (3.13) для определения электронной температуры $t_{3, \text{O}}$, были вычислены значения $\psi(t_e, n_e)$ для сетки значений t_e и n_e решением уравнений (3.6), (3.7), (3.43). Численные значения $\psi(t_e, n_e)$ аппроксимируют выражением типа

$$\lg \psi(t_e, n_e) = a_0 + \frac{a_1}{t_e} + a_2 \lg t_e + a_3 t_e + \lg(1 + a_4 x_3). \quad (3.44)$$

С учетом аппроксимации из уравнения (3.42) получаем

$$12 + \lg(\text{O}^{++}/\text{H}^+) = \lg \frac{[\text{O III}]\lambda 495.9, 500.7}{\text{H}_\beta} + 6.251 + \frac{1.204}{t_3} - 0.613 \lg t_3 - 0.015 t_3. \quad (3.45)$$

Уравнение (3.45) служит для определения содержания иона кислорода O^{++} в области Н II.

Функцию $\psi(t_e, n_e)$ можно вычислить для любой линии, и следовательно, для определения содержания иона кислорода O^{++} можно использовать любую линию этого иона. Ниже приведены уравнения для определения содержания иона кислорода O^{++} по интенсивностям запрещенных линий $[\text{O III}] \lambda 436.3$, $[\text{O III}] \lambda 51.8$ мкм и $[\text{O III}] \lambda 88.4$ мкм:

$$12 + \lg(\text{O}^{++}/\text{H}^+) = \lg \frac{[\text{O III}]\lambda 436.3}{\text{H}_\beta} + 7.137 + \frac{2.649}{t_3} - 0.517 \lg t_3 - 0.031 t_3, \quad (3.46)$$

$$12 + \lg(\text{O}^{++}/\text{H}^+) = \log \frac{[\text{O III}]\lambda 51.8 \mu\text{m}}{\text{H}_\beta} + 8.257 - \frac{0.063}{t_3} - 0.659 \lg t_3 - 0.038 t_3, \quad (3.47)$$

$$12 + \lg(\text{O}^{++}/\text{H}^+) = \log \frac{[\text{O III}]\lambda 88.4 \mu\text{m}}{\text{H}_\beta} + 8.047 - \frac{0.046}{t_3} - 0.643 \lg t_3 - 0.012 t_3. \quad (3.48)$$

Уравнения (3.46)–(3.48) получены в рамках пятиуровневой модели иона тем же методом, что и уравнение (3.45). Очевидно, что если интенсивности линий измерены достаточно точно, то по уравнениям (3.45)–(3.48) получают одинаковые содержания иона кислорода O^{++} в области Н II.

На рис. 3.20 показаны изменения с электронной температурой функций $\psi(t_e, n_e)$ для разных линий иона кислорода O^{++} . Сплошная линия показывает функцию $\psi(t_e, n_e)$ для линий $[\text{O III}] \lambda 495.9, 500.7$, штриховая линия — для $[\text{O III}] \lambda 436.3$, кружки —

для [O III] λ 51.8 мкм, плюсы — для [O III] λ 88.4 мкм. Для каждой линии представлена функция $\psi(t_e, n_e)$ получена усреднением для трех значений плотности $n_e = 1, 50$ и 100 см^{-3} и нормирована на значение функции при $t_e = 1$.

Для линий [O III] λ 495.9, 500.7, [O III] λ 436.3 и [O III] λ 51.8 мкм функции $\psi(t_e, n_e)$ практически не зависят от электронной концентрации в туманности в диапазоне плотностей, характерных для областей H II (меньше 100 см^{-3}). Для линии [O III] λ 88.4 мкм функция $\psi(t_e, n_e)$ сильно зависит от электронной концентрации в туманности. Поэтому при определении содержания иона кислорода O^{++} по инфракрасным линиям предпочтительнее использовать линию [O III] λ 51.8 мкм, чем линию [O III] λ 88.4 мкм.

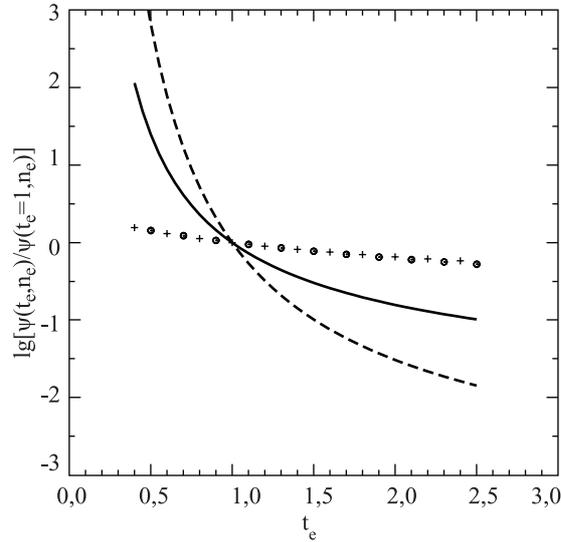


Рис. 3.20. Изменение с электронной температурой функций $\psi(t_e, n_e)$ для линий иона кислорода O^{++} . Сплошная линия показывает функцию $\psi(t_e, n_e)$ для линий [O III] λ 495.9, 500.7, штриховая — для [O III] λ 436.3, кружки — для [O III] λ 51.8 мкм, плюсы — для [O III] λ 88.4 мкм

Для оптических линий [O III] λ 495.9, 500.7 и [O III] λ 436.3 функции $\psi(t_e, n_e)$ показывают сильную зависимость от электронной температуры в туманности, тогда как для инфракрасных линий [O III] λ 51.8 и [O III] λ 88.4 мкм функции $\psi(t_e, n_e)$ слабо зависят от электронной температуры (см. рис. 3.20). Это имеет очевидное объяснение. Энергии возбуждения уровней, спонтанные переходы с которых дают кванты инфракрасных линий, меньше средней энергии свободных электронов, и практически любой свободный электрон способен возбудить эти уровни. Энергии возбуждения уровней, спонтанные переходы с которых дают кванты оптических линий, больше средней энергии свободных электронов. Только некоторая доля свободных электронов имеет энергию, достаточную для возбуждения этих уровней. Доля свободных электронов, обладающих энергией выше фиксированного значения, сильно зависит от электронной температуры в туманности. Этим и обусловлена сильная зависимость функций $\psi(t_e, n_e)$ для оптических линий от электронной температуры в туманности.

Аналогичным образом выводят соотношение между содержанием иона кислорода O^+ в области H II и интенсивностями линий этого иона в ее спектре. Для определения содержания иона кислорода O^+ можно использовать как небулярные линии [O II] λ 372.7, 372.9:

$$12 + \lg(O^+/H^+) = \lg \frac{[O II] \lambda 372.7, 372.9}{H_\beta} + 5.929 + \frac{1.617}{t_2} - 0.568 \lg t_2 - 0.008 t_2, \quad (3.49)$$

так и авроральные линии [O II] λ 732.0, 733.0:

$$12 + \lg(O^+/H^+) = \log \frac{[O II] \lambda 732.0, 733.0}{H_\beta} + 6.801 + \frac{2.478}{t_2} - 0.487 \lg t_2 - 0.009 t_2, \quad (3.50)$$

где $t_2 = t_{2,N}$. Уравнения (3.49), (3.50) получены с теми же атомными данными, что и соотношение для определения электронной температуры $t_{2,O}$ (значения энергий возмущенных уровней взяты из [538], эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов — из [156], эффективные сечения для электронных ударов — из [412]). В подавляющем большинстве случаев для определе-

ния содержания иона кислорода O^+ используют небулярные линии $[O\ II] \lambda 372.7, 372.9$, но иногда и авроральные линии $[O\ II] \lambda 732.0, 733.0$ [224, 225, 262, 300].

Полное содержание кислорода в области H II равно

$$\frac{O}{H} = \frac{O^+}{H^+} + \frac{O^{++}}{H^+}. \quad (3.51)$$

В очень горячих областях H II некоторая доля кислорода может быть трижды ионизована. Так как потенциал третьей ионизации кислорода 54.934 эВ близок к потенциалу второй ионизации гелия 54.416 эВ, то зона свечения иона кислорода O^{3+} совпадает с зоной свечения иона He^{++} . Поэтому вклад трижды ионизованного кислорода в полное содержание обычно учитывается при помощи соотношения [468, 511]

$$\frac{O}{H} = \frac{He^+ + He^{++}}{He^+} \frac{O^+ + O^{++}}{H^+}. \quad (3.52)$$

Приведенные здесь и в предыдущем параграфе уравнения позволяют определить содержание кислорода в области H II низкой плотности по измеренным интенсивностям эмиссионных линий в спектре, используя следующую схему. Сначала определяют электронную плотность n_e в туманности при помощи уравнения (3.31). Если n_e не превышает $100 - 300\text{ см}^{-3}$, то вычисляют электронную температуру t_3 в зоне свечения иона O^{++} при помощи уравнения (3.13) и электронную температуру t_2 в зоне свечения иона O^+ при помощи уравнения (3.15). Затем при помощи уравнений (3.45), (3.49) вычисляют содержания ионов O^{++} и O^+ . И наконец, определяют полное содержание кислорода в области H II согласно уравнению (3.51). Если в спектре есть линии иона гелия He^{++} , то вклад трижды ионизованного кислорода в полное содержание учитывают при помощи соотношения (3.52). Как отмечалось выше, этот классический метод определения содержания кислорода в областях H II принято называть T_e -методом или прямым методом.

Содержание кислорода, определенное по интенсивностям эмиссионных линий, соответствует содержанию кислорода в газовой фазе межзвездной среды. Часть атомов кислорода находится в пылинках. Разница между полным содержанием кислорода и содержанием кислорода в газовой фазе межзвездной среды (оxygen

depletion) в знаменитой галактической области Н II в созвездии Ориона может достигать 0.08–0.12 dex [140, 329]. Карделли и др. [84] оценили, что в пылинках не может быть больше 25–30 % атомов кислорода по следующей простой причине. Атомы кислорода более многочисленны в межзвездной среде по сравнению с другими пылеобразующими элементами (Si, Fe, Mg и др.). Если предположить, что все пылеобразующие элементы содержатся в пылинках, то для этого достаточно 25–30 % атомов кислорода при всех разумных вариантах минералогии пылинок. Таким образом, разница между полным содержанием кислорода в межзвездной среде и содержанием кислорода в межзвездном газе составляет около 0.1 dex.

3.6.2. Содержание азота

В предыдущем параграфе получены формулы, связывающие содержание ионов кислорода в туманности и интенсивности запрещенных линий кислорода в ее спектре. Схема, использованная при выводе формул для определения содержания ионов кислорода, является достаточно общей и может быть использована при выводе формул для определения содержания ионов других элементов. Небулярные линии ионизованного азота $N_2 = [N II] \lambda 654.8, 658.4$ используют для определения содержания иона азота N^+ . Исходным для определения содержания ионов химических элементов является уравнение (3.4). Следуя описанной выше схеме, получаем уравнение для небулярных линий ионизованного азота:

$$\frac{N^+}{H^+} = \psi(t_e, n_e) \frac{F_{[N II] \lambda 654.8, 658.4}}{F_{H\beta}}, \quad (3.53)$$

где

$$\psi(t_e, n_e) = \frac{1.387 \cdot 10^{-25} n_e t_e^{-0.983} 10^{-0.0424/t_e}}{h(\nu_{4,2} A_{4,2} + \nu_{4,3} A_{4,3}) n_4(t_e, n_e)}. \quad (3.54)$$

Следует отметить, что в символьном виде уравнение (3.54) совпадает с уравнением (3.43).

С атомными данными для иона азота N^+ , использованными выше при выводе уравнения (3.15) для электронной темпе-

ратуры $t_{2,N}$ (экспериментальные значения энергий возбужденных уровней и эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов из [161], эффективные сечения для электронных ударов из [212]), были вычислены значения $\psi(t_e, n_e)$ для сетки значений t_e и n_e решением уравнений (3.6), (3.7), (3.54). Аппроксимацией численных результатов получаем искомую формулу для определения содержания иона азота N^+ :

$$12 + \lg \frac{N^+}{H^+} = \lg N_2 + 6.263 + \frac{0.893}{t_2} - 0.603 \lg t_2 - 0.003 t_2. \quad (3.55)$$

Для небулярных линий ионизованного азота функция $\psi(t_e, n_e)$ практически не зависит от электронной концентрации в туманности в диапазоне плотностей, характерных для областей Н II. Поэтому в уравнении (3.55) отсутствует член с x_2 , который учитывает зависимость от n_e .

В отличие от кислорода, в спектрах областей Н II наблюдают запрещенные линии только иона азота N^+ и не наблюдают линий иона азота N^{++} . Поэтому полное содержание азота в туманности определяют коррекцией за ненаблюдаемые стадии ионизации азота. Как отмечено выше, потенциалы первой и второй ионизаций кислорода и потенциалы первой и второй ионизаций азота не сильно различаются. В первом приближении можно пренебречь различием между зонами свечения O^+ и N^+ . Тогда можно принять [166, 362, 371]

$$\frac{N^+}{N} = \frac{O^+}{O}, \quad (3.56)$$

или

$$\frac{N^+}{O^+} = \frac{N}{O}. \quad (3.57)$$

В этом случае полное содержание азота в туманности можно выразить через полное содержание кислорода:

$$\lg \frac{N}{H} = \lg \frac{O}{H} + \lg \frac{N}{O}. \quad (3.58)$$

Отношение содержаний ионов азота и кислорода N^+/O^+ задано уравнением

$$\lg \frac{N^+}{O^+} = \lg \frac{N_2}{R_2} + 0.334 - \frac{0.724}{t_2} - 0.035 \lg t_2 + 0.005 t_2, \quad (3.59)$$

полученным из уравнений (3.49), (3.55). Итак, полное содержание азота в туманности находят следующим образом. Сначала из уравнения (3.59) определяют отношение содержаний ионов азота и кислорода N^+/O^+ . Это отношение принимается равным отношению полных содержаний азота и кислорода N/O . Затем из уравнения (3.58) определяют полное содержание азота в туманности N/H . Следует отметить, что в теории химической эволюции галактик гораздо чаще используется отношение содержаний азота и кислорода N/O , чем содержание азота N/H . Обычно рассчитывают эволюционные треки галактик на диаграмме $N/O - O/H$ и сравнивают с наблюдаемыми положениями галактик на этой диаграмме.

На основе анализа фотоионизационных моделей областей Н II Гарнетт (1990) [166] пришел к заключению, что предположение $N^+/N = O^+/O$ выполняется с хорошей точностью (не хуже 20 % [362]). В работе Изотова и др. (2005) [230] приведен ионизационный коррекционный множитель $ICF(N^+)$ для азота, полученный из анализа фотоионизационных моделей разной металличности:

$$\begin{aligned}
 ICF(N^+) &= -0.828 v + 0.718 + 0.853 v^{-1} \\
 &\text{при } 12 + \lg(O/H) = 7.2, \\
 &= -0.809 v + 0.712 + 0.852 v^{-1} \\
 &\text{при } 12 + \lg(O/H) = 7.6, \\
 &= -1.476 v + 1.752 + 0.688 v^{-1} \\
 &\text{при } 12 + \lg(O/H) = 8.2,
 \end{aligned} \tag{3.60}$$

где

$$ICF(N^+) = \frac{N}{N^+} \tag{3.61}$$

и

$$v = \frac{O^+ + O^{++}}{O^+}. \tag{3.62}$$

Разница между полным содержанием азота, найденным с использованием предположения $N^+/N = O^+/O$, и полным содержанием азота, полученным при помощи ионизационного коррекционного множителя для азота из [230], не превышает 0.05–0.07 dex.

Так как предположение $N^+/N = O^+/O$ обеспечивает определение содержания азота в туманностях с достаточно высокой точностью, то далее будем определять содержание азота с использованием этого предположения.

3.7. Противоречие между значениями содержаний кислорода, найденными по запрещенным и разрешенным линиям

Содержание кислорода (и других химических элементов) в области Н II может быть определено и по разрешенным рекомбинационным линиям (уравнение (2.9)). Проблема заключается в том, что разрешенные рекомбинационные линии ионов кислорода и других тяжелых элементов очень слабы и могут быть измерены только в спектрах высокого разрешения, полученных для самых ярких областей Н II и планетарных туманностей. Преимущество метода заключается в том, что интенсивности разрешенных рекомбинационных линий водорода и тяжелых элементов слабо зависят от электронной температуры и электронной плотности в интервале температур и плотностей, типичных для областей Н II. По этой причине отношение содержаний кислорода и водорода, определенное по разрешенным рекомбинационным линиям, практически не зависит от электронной температуры и электронной плотности в области Н II.

В 1993 году Пеймберт, Сторей и Торрес-Пеймберт [374] получили спектры высокого разрешения для ярких галактических областей Н II М 17 и М 42 и определили содержание дважды ионизованного кислорода O^{++}/H^+ в этих областях Н II по разрешенным рекомбинационным линиям кислорода. Они получили, что содержание O^{++}/H^+ , найденное по разрешенным линиям, в два раза превышает содержание, найденное по запрещенным линиям. Расхождение между содержаниями, найденными по разрешенным и запрещенным линиям, характеризуют фактором расхождения содержаний ADF (abundance discrepancy factor), который определяется как отношение содержания иона, найденное по разрешенным линиям, к содержанию иона, найденному по запрещенным линиям. К настоящему времени фактор расхож-

дения содержаний $ADF(O^{++})$ определен для ряда галактических областей Н II: М 8 (2.3 [165]), М 16 (2.8 [162]), М 17 (1.8—2.2 [142], 2.1 [515], 1.9 [165]), М 20 (2.1 [162]), М 42 (туманность Ориона) (1.3 [515], 1.4—1.6 [328]), NGC 3576 (1.8 [515], 1.9 [164]), NGC 3603 (1.9 [162]), S 311 (1.8 [163]), и для нескольких областей Н II в других галактиках: 30 Doradus в Большом Магеллановом Облаке (1.6 [368], 2.0—2.7 [515]), N 11B в Большом Магеллановом Облаке (4.9—8.2 [515]), N 66 в Малом Магеллановом Облаке (2.3 [515]), область Н II V в неправильной галактике NGC 6822 (1.9 [369]), голубая компактная карликовая галактика NGC 5253 (2.0—2.5 [297]), область Н II NGC 604 в галактике М 33 (1.6 [143]), область Н II NGC 5461 в галактике М 101 (1.9 [143]), область Н II NGC 5471 в галактике М 101 (1.6 [143]), область Н II NGC 2363 в неправильной галактике NGC 2366 (2.2 [143]). Для большинства областей Н II значения фактора расхождения содержаний $ADF(O^{++})$ лежат в интервале от 1.3 до 2.5.

Для ряда планетарных туманностей фактор расхождения содержаний найден для ионов C^{++} , N^{++} , O^{++} , Ne^{++} . Значения фактора расхождения содержаний для планетарных туманностей лежат в широком интервале от 1 (совпадение содержаний) до 20 и выше, при этом для конкретной планетарной туманности фактор расхождения содержаний примерно одинаков для всех ионов [293]. Другими словами, “абсолютные” содержания каждого иона, определенные по разрешенным и запрещенным линиям, могут различаться в несколько раз, однако соотношения между содержаниями разных ионов (C^{++}/O^{++} , N^{++}/O^{++} , Ne^{++}/O^{++}), определенными по разрешенным и запрещенным линиям, согласуются между собой. Барлоу и др. [44] определили содержание магния по рекомбинационным линиям в 10 планетарных туманностях, для которых фактор расхождения содержаний для иона кислорода O^{++} (и других элементов второго ряда Периодической таблицы Менделеева) составляет 2—10 и выше. Они нашли, что в противоположность ситуации с содержаниями кислорода содержания магния, который является элементом третьего ряда Периодической таблицы Менделеева, во всех исследованных планетарных туманностях лежат в узком интервале и близки к солнечному, т. е. не показывают заметного избытка. Барлоу и др. предположили, что расхождение между содержаниями, найденными по запрещенным и разрешенным линиям, имеет ме-

сто только для элементов второго ряда Периодической таблицы Менделеева.

Противоречие между содержаниями ионов, найденных по запрещенным и разрешенным линиям, обуславливает постановку вопроса о надежности одного из этих (или обоих) методов определения химического состава в областях Н II. В целом идеология классического метода определения химического состава по запрещенным линиям логически безупречна. Однако при реализации этого метода на практике приходится делать предположения, которые могут существенно влиять на строгость полученных результатов. Наиболее уязвимым является предположение об однородности туманности. При наблюдениях измеряется интегральный по лучу зрения поток от разных частей туманности вне зависимости от того, вся туманность или только ее часть попадает в щель спектрографа. Соотношение, связывающее измеряемый поток энергии от туманности в эмиссионной линии с количеством атомов (ионов) данного химического элемента и физическими условиями в туманности (уравнение (3.4)), выводят при предположении, что химический состав и физические условия постоянны во всем объеме свечения данного иона. Очевидно, что это предположение не выполняется в большинстве областей Н II. Во-первых, в областях Н II наблюдают стратификация излучения. Во-вторых, электронные температуры, найденные по запрещенным линиям разных ионов (O^{++} , S^{++} , N^+ , O^+), различаются между собой. Вместе эти два факта свидетельствуют о наличии глобального радиального градиента электронной температуры в туманности. Наличие радиального градиента электронной температуры в туманности подтверждается непосредственными измерениями электронной температуры в разных частях туманности Ориона [328]. На основе анализа сетки моделей областей Н II Стасинска [483] пришла к выводу, что содержания элементов, найденные в областях Н II высокой металличности (больше металличности Солнца) прямым методом, занижены из-за радиального градиента электронной температуры в туманности, причем разница между найденным и реальным содержаниями увеличивается с увеличением реальной металличности области Н II.

Более 40 лет назад Пеймберт предположил [370], что в планетарных туманностях и областях Н II могут наблюдаться мел-

комасштабные пространственные флуктуации электронной температуры (и плотности). Он предложил характеризовать амплитуду этих флуктуаций электронной температуры параметром t^2 , который определяют для каждого иона X_j двумя уравнениями:

$$t_0(X_j) = \frac{\int_V t_e X_j n_e dV}{\int_V X_j n_e dV}, \quad (3.63)$$

$$t^2(X_j) = \frac{\int_V (t_e - t_0(X_j))^2 X_j n_e dV}{t_0^2(X_j) \int_V X_j n_e dV}, \quad (3.64)$$

где $t_0(X_j)$ — средняя электронная температура в зоне свечения иона X_j , t_e — локальная электронная температура в данной точке туманности. Если мелкомасштабные пространственные флуктуации температуры имеют место в областях Н II, то они могут существенно влиять на значения содержаний, найденные по оптическим запрещенным линиям, так как в этом методе содержания зависят экспоненциально от электронной температуры. В области Н II, в которой электронная температура флуктуирует с амплитудой $t^2 \approx 0.04$, содержание кислорода, определенное по оптическим запрещенным линиям, будет меньше истинного примерно на 0.3 dex [485].

Кингдон и Ферланд [255] рассчитали сетку моделей областей Н II с целью оценить допустимую амплитуду флуктуаций электронной температуры t^2 в областях Н II и влияние этих флуктуаций на содержание кислорода, определенное по запрещенным линиям. Они нашли, что в некоторых случаях флуктуации электронной температуры действительно могут вносить искажения в определяемое по запрещенным линиям содержание кислорода. Однако эти искажения малы ($\approx 3\%$) и не могут объяснить большой фактор расхождения содержаний для областей Н II. Амплитуду флуктуаций электронной температуры в областях Н II можно оценить из наблюдений сравнением электронной температуры $t_{3,O}$ и температуры, определенной по бальмеровскому скачку t_{Ba} [370, 371]. В планетарных туманностях разница $\Delta t = t_{3,O} - t_{Ba}$ может достигать 4000 К; она коррелирует с фактором расхождения содержаний для иона O^{++} [293]. Гусева и др. [183, 185]

определили электронные температуры по бальмеровскому и папенцовскому скачкам для большой выборки областей Н II низкой металличности. Они пришли к выводу, что электронные температуры $t_{3,O}$ и t_{Ba} не различаются статистически, хотя небольшую разницу температур порядка 3–5 % нельзя исключить.

Если различия между содержаниями иона кислорода O^{++} , найденными по оптическим запрещенным и разрешенным линиям, обусловлены тем, что электронная температура $t_{3,O}$ не соответствует реальной электронной температуре в туманности (из-за наличия глобального радиального градиента электронной температуры в туманности или мелкомасштабных флуктуаций электронной температуры), то содержания по инфракрасным запрещенным линиям согласовались бы с содержаниями, найденными по разрешенным рекомбинационным линиям. Действительно, содержания иона кислорода, найденные по оптическим запрещенным линиям [O III] λ 4959,5007, сильно зависят от электронной температуры в туманности, тогда как для инфракрасных линий [O III] λ 51.8 и [O III] λ 88.4 мкм эта зависимость очень слабая (см. рис. 3.20 и уравнения (3.45), (3.47), (3.48)). Тсамис и др. [515] показали, что содержания, найденные по запрещенным оптическим и инфракрасным линиям в четырех областях Н II, согласуются между собой в пределах 20–30 %, причем ИК-содержания в двух областях Н II (M 42 и M 17) меньше, а в двух областях Н II (NGC 3576 и 30 Doradus) — больше. В работе [280] также сделан вывод, что содержания, определенные по инфракрасным и оптическим запрещенным линиям в областях Н II NGC 3603, 30 Doradus и N 66, согласуются между собой. Рудольф и др. [437] на основе собственных наблюдений запрещенных оптических и ИК-линий в галактических областях Н II и данных [31, 438, 462] нашли радиальные распределения содержания кислорода, азота и серы в диске Галактики. Оказалось, что содержания кислорода, определенные по запрещенным инфракрасным линиям, в среднем даже меньше, чем содержания кислорода, найденные по оптическим запрещенным линиям. Эти результаты свидетельствуют о том, что различия между содержаниями иона кислорода O^{++} , найденными по оптическим запрещенным и разрешенным линиям, не могут быть вызваны тем, что электронная температура $t_{3,O}$ не соответствует реальной электронной температуре в туманности.

Меса-Дельгадо и др. [330] получили карты распределения интенсивностей спектральных линий по изображению объекта Хербига — Аро НН 202 при помощи наблюдений с мультиапертурным спектрографом PMAS (Potsdam Multi-Aperture Spectrometer) на обсерватории “Калар Альто”. На основе этих наблюдений они построили карты распределения различных характеристик, включая фактор расхождения содержаний $ADF(O^{++})$ и амплитуду флуктуаций электронной температуры. Оказалось, что нет корреляции между фактором расхождения содержаний $ADF(O^{++})$ и амплитудой флуктуаций электронной температуры. Они пришли к выводу, что различия между содержаниями иона кислорода O^{++} , найденными по оптическим запрещенным и разрешенным линиям, не могут быть обусловлены флуктуациями электронной температуры в туманности.

Для выяснения причины расхождения содержаний, полученных по запрещенным эмиссионным линиям и по разрешенным рекомбинационным линиям высоковозбужденных атомов, Вильямс и др. [542, 543] определили содержания в нескольких планетарных туманностях третьим независимым методом. Они получили спектры нескольких ядер планетарных туманностей в ультрафиолетовом диапазоне (от 115.0 до 169.0 нм) на космическом телескопе Хаббла (Hubble Space Telescope) и измерили резонансные линии поглощения, обусловленные поглощением в туманности. Они сравнили лучевые концентрации элементов, определенные: 1) по резонансным линиям поглощения, 2) по запрещенным эмиссионным линиям и 3) по разрешенным рекомбинационным линиям атомов. Было найдено, что лучевые концентрации, определенные по резонансным линиям поглощения и по запрещенным эмиссионным линиям, совпадают между собой в пределах ошибок измерений и расчетов. В частности, содержания иона серы S^{++} , найденные по резонансным линиям поглощения и по запрещенным эмиссионным линиям, хорошо согласуются между собой. Вильямс и др. пришли к выводу, что электронные температуры и плотности, определенные по запрещенным линиям, реалистичны и позволяют получить достоверные содержания химических элементов.

Есть еще один путь проверить достоверность содержаний кислорода, найденных прямым методом по запрещенным оптическим линиям [390, 404]. Слабая межзвездная линия поглощения

кислорода O I λ 135.6 нм может быть измерена с очень высокой точностью в спектрах звезд, полученных с высоким разрешением. Эти измерения дают возможность определить содержание кислорода в межзвездной среде в солнечной окрестности с высокой точностью. Следует подчеркнуть, что этот метод определения содержаний не имеет каких-либо предположений, т. е. является модельно независимым. Измерения линии кислорода O I λ 135.6 нм проведены в спектрах нескольких десятков звезд в разных направлениях. Найдено, что содержание кислорода в межзвездной среде в солнечной окрестности (в области радиусом порядка 0.8 кпс вокруг Солнца) составляет $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 8.50$ [39, 86, 332, 352]. Туманность Ориона (= NGC 1976 = M 42), расстояние до которой около 0.5 кпс, является частью межзвездной среды в солнечной окрестности. Содержание кислорода в туманности Ориона определено прямым методом по запрещенным оптическим линиям во многих работах и составляет: $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.52$ [377], 8.49 [354], 8.47 [141], 8.51 [115], 8.51 [140]. Согласие между содержаниями кислорода в межзвездной среде в солнечной окрестности, найденные по резонансным линиям поглощения, и в туманности Ориона, полученные по запрещенным оптическим линиям, служит еще одним свидетельством в пользу того, что электронные температуры и плотности, определенные по запрещенным линиям, реалистичны и позволяют получить достоверные содержания химических элементов.

Итак, более или менее удовлетворительное согласие между содержаниями кислорода, найденными по оптическим запрещенным линиям, по инфракрасным запрещенным линиям и по резонансным линиям поглощения, дает основание сделать вывод, что содержания кислорода, определенные по запрещенным линиям, достаточно реалистичны. Расхождения между содержаниями элементов, найденных по запрещенным и рекомбинационным линиям, могут быть обусловлены ошибками в значениях коэффициентов рекомбинации [426]. Однако до тех пор, пока не будет установлена окончательно причина расхождений между содержаниями кислорода, найденными по разрешенным и запрещенным линиям, сомнения в достоверности содержаний кислорода, определенных по запрещенным линиям, будут иметь место.

3.8. Применение T_e -метода

В первых попытках определить химический состав газовых туманностей рассматривали планетарные туманности [65, 355]. Так как необходимые атомные данные не были известны, то Пейдж [355] предположил, что отношение числа квантов, излучаемых туманностью в запрещенных линиях двух ионов, пропорционально отношению содержаний этих ионов в туманности. Предположение Пейджа справедливо только в том случае, если: а) относительные населенности метастабильных уровней (доля ионов, находящихся в данном состоянии) разных ионов одинаковы, б) вероятности спонтанных переходов из метастабильного состояния в основное одинаковы для всех ионов. Иными словами, Пейдж предположил, что в уравнении (3.42) функции $\psi(t_e, n_e)$ одинаковы для метастабильных уровней разных ионов. Содержания химических элементов, найденные при таком сильном упрощении, — не более чем грубые оценки. Определение химического состава в областях Н II начинается с работы Вайса [549], в которой он наряду с планетарными туманностями рассмотрел туманность Ориона.

3.8.1. Сводка формул T_e -метода

Выше были получены формулы для определения электронных температур $t_{3,O}$ и $t_{2,N}$ и содержания ионов O^{++}/H^+ , O^+/H^+ и N^+/H^+ в туманностях низкой плотности. Для удобства пользования приводим здесь сводку этих формул. Для описания температуры в туманности принимается стандартная двухзонная модель, в которой температура в зоне свечения иона O^{++} описывается t_3 , а температура в зоне свечения ионов O^+ и N^+ — t_2 .

Электронные температуры определяют по формулам:

$$t_{3,O} = \frac{1.467}{\lg Q_{3,O} - 0.876 - 0.193 \lg t_{3,O} + 0.033 t_{3,O}}, \quad (3.65)$$

где $Q_{3,O} = [O \text{ III}](\lambda 495.9 + \lambda 500.7)/[O \text{ III}] \lambda 436.3$ — отношение интенсивностей небулярных и авроральных линий дважды ионизованного кислорода;

$$t_{2,N} = \frac{1.118}{\lg Q_{2,N} - 0.891 - 0.177 \lg t_{2,N} + 0.030 t_{2,N}}, \quad (3.66)$$

где $Q_{2,N} = [\text{N II}](\lambda 654.8 + \lambda 658.4)/[\text{N II}] \lambda 575.5$ — отношение интенсивностей небулярных и авроральных линий ионизованного азота;

$$t_{3,S} = \frac{0.915}{\lg Q_{3,S} - 0.683 + 0.485 \lg t_{3,S} - 0.114 t_{3,S}}, \quad (3.67)$$

где $Q_{3,S} = [\text{S III}](\lambda 906.9 + \lambda 953.2)/[\text{S III}] \lambda 631.2$ — отношение интенсивностей небулярных и авроральных линий дважды ионизованной серы.

Если измерена электронная температура только в одной зоне области Н II (наиболее типичный случай на практике), то электронную температуру в другой зоне находят из соотношения

$$t_2 = 0.672 t_3 + 0.314. \quad (3.68)$$

Если измерена электронная температура $t_{3,S}$, то сначала находят электронную температуру t_3 из соотношения

$$t_{3,S} = 0.83 t_3 + 0.17, \quad (3.69)$$

а затем — электронную температуру t_2 .

Формулы для определения содержания ионов азота и кислорода имеют вид

$$12 + \lg \frac{\text{N}^+}{\text{H}^+} = \lg N_2 + 6.263 + \frac{0.893}{t_2} - 0.603 \lg t_2 - 0.003 t_2, \quad (3.70)$$

$$12 + \lg \frac{\text{O}^+}{\text{H}^+} = \lg R_2 + 5.929 + \frac{1.617}{t_2} - 0.568 \lg t_2 - 0.008 t_2, \quad (3.71)$$

$$12 + \lg \frac{\text{O}^{++}}{\text{H}^+} = \lg R_3 + 6.251 + \frac{1.204}{t_3} - 0.613 \lg t_3 - 0.015 t_3. \quad (3.72)$$

Полные содержания кислорода и азота равны

$$\frac{\text{O}}{\text{H}} = \frac{\text{O}^{++}}{\text{H}^+} + \frac{\text{O}^+}{\text{H}^+}. \quad (3.73)$$

$$\lg \frac{\text{N}}{\text{H}} = \lg \frac{\text{O}}{\text{H}} + \lg \frac{\text{N}}{\text{O}}, \quad (3.74)$$

где

$$\frac{N}{O} = \frac{N^+}{O^+}, \quad (3.75)$$

$$\lg \frac{N^+}{O^+} = \lg \frac{N_2}{R_2} + 0.334 - \frac{0.724}{t_2} - 0.035 \lg t_2 + 0.005 t_2. \quad (3.76)$$

Ниже электронные температуры и содержания азота и кислорода в туманностях вычислены по этим формулам.

3.8.2. Химический состав неправильных галактик

Неправильные галактики имеют сравнительно малую полную массу (меньше $(1-3) \cdot 10^{10} M_\odot$), значительную часть которой составляет газ. Во многих неправильных галактиках протекает звездообразование в настоящую эпоху и, следовательно, есть области H II, что дает возможность определять химический состав межзвездной среды в этих галактиках.

Диапазон металличностей неправильных галактик превышает порядок величины. Содержание кислорода в Большом Магеллановом Облаке, которое принадлежит к неправильным галактикам высокой светимости, составляет $12 + \lg(O/H) \approx 8.4$ [368, 515, 525]. Содержание кислорода в карликовой неправильной галактике Leo A составляет $12 + \lg(O/H) \approx 7.3$ [467, 523]. Голубые компактные карликовые галактики также представляют собой галактики сравнительно малой массы с интенсивным звездообразованием в современную эпоху. Есть две противоположные точки зрения на взаимоотношение неправильных и голубых компактных карликовых галактик. Согласно одной точке зрения неправильные и голубые компактные карликовые галактики представляют собой один тип галактик, т. е. голубые компактные карликовые галактики представляют собой группу неправильных галактик с повышенным темпом звездообразования в современную эпоху [506]. Согласно другой точке зрения неправильные галактики и голубые компактные карликовые галактики являются совершенно разными типами галактик [234, 425]. С точки зрения определения химического состава важно то, что природа эмиссионных спектров этих объектов одинакова (фотоионизация межзвездного газа коротковолновым излучением горячих звезд). Поэтому мы включаем голубые компактные карликовые

галактики в группу неправильных галактик, если не оговорено обратное.

К настоящему времени содержания кислорода прямым методом определены для нескольких сотен областей Н II в неправильных галактиках ([50, 154, 191, 224, 225, 257, 262, 336, 503]). Наиболее точные содержания кислорода получены Изотовым и Туаном с сотрудниками, которые провели обширный ряд спектральных наблюдений Н II областей в голубых компактных карликовых галактиках [184, 226, 227, 231, 507]. Они получили, что типичная ошибка определения содержания кислорода не превышает 0.1 dex, а в нескольких десятках исследованных ими областей Н II — 0.05 dex. Высокая точность определения содержания кислорода в областях Н II в неправильных галактиках достигается благодаря двум обстоятельствам. Во-первых, области Н II в неправильных галактиках имеют высокую электронную температуру, поэтому интенсивность авроральной линии [O III] λ 436.3 в их спектрах сравнительно велика. Во-вторых, для областей Н II в неправильных галактиках ион O^{++} вносит, как правило, доминирующий вклад в полное содержание. Поэтому возможная ошибка вычисления содержания иона O^+ , обусловленная неточностью нахождения электронной температуры t_2 , не оказывает существенного влияния на точность определения полного содержания кислорода в этих областях Н II.

Определение химического состава для большого количества областей Н II в неправильных галактиках используют при решении важных проблем, среди которых:

- исследование распределения химического состава в неправильных галактиках,
- поиск зависимостей между металличностью и другими макроскопическими параметрами (масса, светимость, скорость вращения и др.) неправильных галактик,
- поиск галактик с экстремально малым содержанием тяжелых элементов, которые могут быть молодыми галактиками,
- определение догалактического содержания гелия.

Распределение химического состава в неправильных галактиках. Для ряда галактик измерены спектры и определен химический состав в нескольких областях Н II, расположенных в разных частях галактики. В этих случаях можно установить, является ли химический состав галактики однородным или есть

радиальный градиент содержания кислорода в галактике. Такие исследования были проведены в работах [129, 359, 525] для Большого и Малого Магеллановых Облаков, в [429] для NGC 2366 (= DDO 42), в [378] для NGC 3109, в [267] для NGC 1569, в [520] для Leo A и GR 8, в [283, 358, 388] для NGC 6822, в [104] для нескольких неправильных галактик. Во всех этих случаях был сделан вывод, что в неправильных галактиках отсутствует радиальный градиент содержания кислорода (либо он меньше ошибок определения содержания кислорода в областях H II).

Миллер (1996) получил спектры нескольких областей H II в баре галактики магелланова типа A 143 (= ESO 245—G005) [335]. Значения содержаний кислорода, оцененные при помощи теоретической R_{23} -калибровки МакГоха [313], лежат в интервале от $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 7.65$ до $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 8.2$. Такие же значения содержаний получены в [445]. Миллер отметил, что содержания кислорода, по-видимому, свидетельствуют о наличии градиента металличности вдоль бара галактики A 143, хотя ошибки определения содержаний кислорода большие. Если этот результат подтвердится, то галактика A 143 уникальна, так как это единственная неправильная галактика, в которой содержание кислорода изменяется примерно в три раза на расстоянии 1.5 кпк.

Зависимость “светимость — металличность” для неправильных галактик. Леке и др. (1979) [287] провели спектрофотометрические наблюдения трех неправильных галактик (NGC 4449, NGC 6822, IC 10) и трех голубых компактных галактик (I Zw 18, II Zw 40, II Zw 70) и определили их химический состав. Анализируя полученные данные для этих галактик и взятые из литературы данные для Большого и Малого Магеллановых Облаков, они обнаружили, что содержание тяжелых элементов в галактике Z коррелирует с полной массой галактики M_T :

$$\lg(M_T/M_\odot) = 8.5 (\pm 0.4) + 190 (\pm 60) Z. \quad (3.77)$$

Содержание тяжелых элементов в галактике Z авторы работы [287] определили из измеренного содержания кислорода, принимая, что содержание кислорода составляет 45 % содержания тяжелых элементов по массе. Зависимость $Z — M_T$ для близких неправильных галактик показана на рис. 3.21.

Зависимость между содержанием тяжелых элементов в галактике и ее массой была подтверждена в последующих рабо-

тах [257, 470, 514], хотя в некоторых работах [205, 214] она подвергалась сомнению. В [205] в качестве индикатора полной массы голубой компактной галактики использовалась ширина профиля эмиссионной линии нейтрального водорода на уровне 20 % от максимального значения. Было найдено, что нет корреляции между определенной таким способом полной массой голубой компактной галактики с содержанием кислорода в ней.

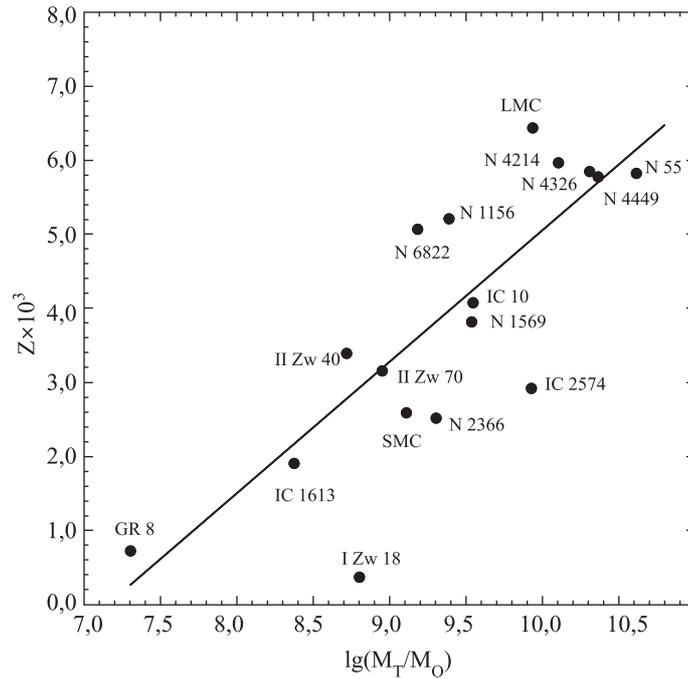


Рис. 3.21. Зависимость между содержанием тяжелых элементов Z и массой галактики M_T для неправильных галактик. Большая часть данных, представленных на этом рисунке, получена Талентом (1980) в его диссертации, которая не была опубликована. Данные Талента взяты из работы [470]. Данные для GR 8 получены в [470], для I Zw 18 — в [288] (масса галактики) и в [112] (содержание тяжелых элементов). Сплошной линией показано соотношение $Z - M_T$, найденное Талентом

Так как определение массы галактики представляет собой сложную задачу, то Скиллман, Кенникатт и Ходж (1989) [467] предложили использовать светимость галактики как индикатор ее массы, т. е. вместо зависимости “масса — металличность” рассматривать зависимость “светимость — металличность”. Это предложение получило широкое признание. Зависимость “светимость — металличность” для неправильных галактик исследована во многих работах [187, 317, 397, 425, 520 и др.]. В большинстве работ при исследовании зависимости “светимость — металличность” использована светимость галактики в фотометрической полосе B . В галактиках с интенсивным звездообразованием светимость в фотометрической полосе B может быть не очень надежным индикатором массы галактики. Светимость галактики в инфракрасном диапазоне слабее зависит от истории звездообразования в галактике и, следовательно, может быть более надежным индикатором ее массы (однако см. замечания в [187]). Поэтому в последние годы активно исследуется зависимость между металличностью и светимостью галактик в инфракрасном диапазоне (в фотометрических полосах K , J , H) [322, 445, 516].

Скиллман, Кенникатт и Ходж (1989) [467] получили спектры областей $H\ II$ в семи близких карликовых неправильных галактиках и определили содержание кислорода в этих галактиках. Используя эти и опубликованные данные для других неправильных галактик, они исследовали связь между содержанием кислорода O/H и абсолютной светимостью неправильной галактики в фотометрической полосе B (точки на рис. 3.22). Они обнаружили довольно тесную корреляцию между O/H и M_B . Только одна неправильная галактика (IC 5152) существенно отклоняется от общей тенденции. Исключив эту галактику, авторы работы [467] методом наименьших квадратов получили следующее соотношение между O/H и M_B :

$$12 + \lg(O/H) = -0.153 M_B + 5.50, \quad (3.78)$$

которое показано сплошной линией на рис. 3.22. Они определили, что карликовые эллиптические галактики также следуют этой зависимости.

Ричер и Мак-Колл (1995) [425] нашли следующее соотношение между содержанием кислорода O/H и абсолютной светимостью

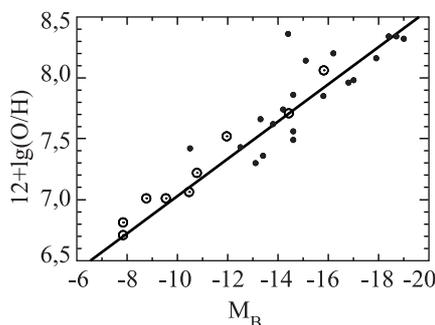


Рис. 3.22. Зависимость между содержанием кислорода и абсолютной звездной величиной в фотометрической полосе B для неправильных (точки) и карликовых эллиптических галактик (светлые кружки) из [467]. Сплошной линией показано соотношение $O/H - M_B$, полученное методом наименьших квадратов для неправильных галактик

стью неправильной галактики M_B :

$$12 + \lg(O/H) = -0.147 (\pm 0.029) M_B + 5.67 (\pm 0.48). \quad (3.79)$$

Они отметили, что разброс точек на диаграмме “светимость — металличность” для неправильных галактик сравнительно мал для галактик высокой светимости и существенно выше для галактик низкой светимости. Изменение разброса происходит при светимости $M_B \approx -15^m$ или $\lg L_B \approx 8.2$. Большой разброс точек на диаграмме “светимость — металличность” для неправильных галактик с $M_B > -17^m$ или $\lg L_B < 9$ был получен также в работе [201], что послужило поводом для заключения об отсутствии корреляции между металличностью и светимостью для неправильных галактик. Однако в работе [388] было показано, что существенная доля разброса точек на диаграмме “светимость — металличность” для неправильных галактик низкой светимости вызвана большими ошибками в найденных содержаниях кислорода, которые, в свою очередь, обусловлены большими ошибками в измерениях интенсивности слабой авроральной линии $[O\ III] \lambda 436.3$, используемой для определения электронной температуры. Для неправильной галактики данной светимости с помощью со-

отношения Ричера и Мак-Колла получают более высокое содержание кислорода, чем используя соотношение Скиллмана, Кенникатта и Ходжа.

Ли и др. (2003) [282] получили спектры областей Н II в пяти близких карликовых неправильных галактиках и определили их химический состав. Они рассмотрели диаграмму “светимость — металличность” для неправильных галактик поля, используя наиболее точные значения содержаний и расстояний. Они получили следующее соотношение между содержанием кислорода O/H и абсолютной светимостью неправильной галактики M_B :

$$12 + \lg(O/H) = -0.153 (\pm 0.025) M_B + 5.59 (\pm 0.54). \quad (3.80)$$

Полученное Ли и др. соотношение $O/H - M_B$ хорошо согласуется с соотношением, найденным Ричером и Мак-Коллом. Однако разброс точек при низких металличностях на диаграмме “светимость — металличность”, построенной Ли и др., меньше, чем на диаграмме Ричера и Мак-Колла.

Ван Зи, Скиллман и Хайнес [523] получили спектры и определили химический состав в областях Н II в двух близких неправильных галактиках низкой светимости: Leo A ($M_B = -11.52^m$) и GR 8 ($M_B = -12.12^m$). Используя каталог Караченцева [240], они составили выборку всех неправильных галактик в локальном объеме (до расстояния 5 Мпк), для которых измерены содержания кислорода. Для этой выборки неправильных галактик в локальном объеме они нашли соотношение между O/H и M_B :

$$12 + \lg(O/H) = -0.151 (\pm 0.014) M_B + 5.67 (\pm 0.21). \quad (3.81)$$

Они отметили, что разброс точек на диаграмме “светимость — металличность” практически не изменяется при переходе от галактик высокой светимости к галактикам низкой светимости.

Сравнение соотношений между содержанием кислорода и абсолютной звездной величиной в фотометрической полосе B для неправильных галактик, полученных разными исследователями, представлено на рис. 3.23. Соотношения из разных работ удовлетворительно согласуются между собой, учитывая дисперсию точек на диаграмме $O/H - Z_B$. Исследования неправильных галактик в группе Центавр А (Centaurus A) [284] и в группе M 81 [104] показывают, что неправильные галактики в группах и неправильные галактики поля следуют, по-видимому, одной и той же зависимости “светимость — металличность”.

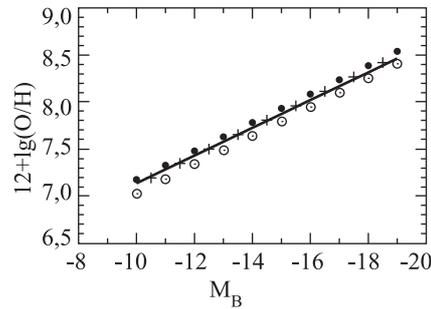


Рис. 3.23. Зависимость между содержанием кислорода и абсолютной звездной величиной в фотометрической полосе B для неправильных галактик: кружки — [467], сплошная линия — [425], плюсы — [282], точки — [523]

Дисперсия точек на диаграмме $O/H - Z_B$ имеет две составляющие. Во-первых, содержания кислорода и светимости галактик содержат ошибки. Во-вторых, наблюдаются реальные различия содержаний кислорода в неправильных галактиках близкой массы, обусловленные различиями в истории звездообразования и/или различиями в характере обмена газом между галактикой и окружающей средой. Можно предположить, что зависимость “светимость — металличность” соответствует некоторому “типичному” пути эволюции неправильных галактик. Тогда отклонение положения неправильной галактики от этой зависимости является свидетельством нетипичности ее эволюции.

Диаграмма “светимость — металличность” использована для установления различия/схожести между неправильными галактиками и голубыми компактными карликовыми галактиками. В работе [459] показано, что зависимость $O/H - M_B$ для голубых компактных галактик согласуется с зависимостью для неправильных галактик. Однако некоторые голубые компактные галактики с экстремально низким содержанием кислорода (I Zw 18, SBS 0335–052, SDSS 0809+1729) существенно отклоняются от зависимости $M_B - O/H$ [252]. В работе [516] исследована зависимость между металличностью Z и светимостью L_K в ближком инфракрасном диапазоне (фотометрическая полоса K) для

карликовых неправильных галактик и голубых компактных карликовых галактик. Было найдено, что зависимости $L_K - Z$ для неправильных галактик и голубых компактных карликовых галактик не различаются. Однако те же голубые компактные галактики I Zw 18 и SBS 0335—052 существенно отклоняются и от зависимости $M_H - O/H$ [445].

В работах [73, 252] были найдены 11 галактик с пониженным содержанием тяжелых элементов. Эти галактики, как и I Zw 18 и SBS 0335—052, лежат существенно ниже зависимости “светимость — металличность” для неправильных галактик, т. е. их металличность в 2—3 раза меньше, чем металличность неправильных галактик той же светимости, или их светимость на полтора—два порядка больше, чем светимость неправильных галактик той же металличности. В этой же полосе на диаграмме “светимость — металличность” лежат “близкие” (с красными смещениями менее 0.2) галактики, в которых наблюдают длительные гамма-вспышки (long-duration gamma-ray bursts). Авторы высказали предположение, что галактики с пониженным содержанием тяжелых элементов являются потенциальными “хозяевами” длительных гамма-вспышек.

Гусева и др. [187] исследовали зависимость между содержанием кислорода и светимостью галактики в полосе g фотометрической системы SDSS для большого числа неправильных, спиральных и голубых компактных галактик, используя полученные ими высокоточные спектры 154 областей H II и 9000 SDSS-спектров. На полученной ими диаграмме $O/H - M_g$ для всех типов галактик видно, что содержание кислорода в галактиках близкой светимости может различаться примерно на порядок величины.

Карликовые галактики с экстремально низким содержанием тяжелых элементов. Предположение Сирла и Саржента (1972) [450] о том, что среди неправильных галактик могут быть молодые галактики, вдохновило многих исследователей на поиски галактик с первичным химическим составом, т. е. галактик с нулевым (или экстремально низким) содержанием тяжелых элементов. Однако содержание кислорода $12 + \lg(O/H) \approx 7.3$ в голубой компактной галактике I Zw 18, найденное Сирлом и Саржентом и подтвержденное другими исследованиями [220, 223, 468, 528], долгое время оставалось рекордно малым зна-

чением металличности неправильных галактик. Неудачи в поиске галактик, которые бы имели металличность ниже, чем I Zw 18, дали повод Кунцу и Саргенту (1986) [272] предположить, что именно в галактике I Zw 18 наблюдается формирование первого поколения звезд в современную эпоху. Они предположили, что отличная от нуля металличность области ионизованного водорода в I Zw 18 обусловлена самообогащением области звездообразования тяжелыми элементами, которые выброшены в межзвездную среду массивными звездами наблюдаемой вспышки звездообразования. В более поздних исследованиях были получены свидетельства, что наблюдаемая вспышка звездообразования в галактике I Zw 18 не является первой (см. [270] и ссылки там).

Ультракомпактная карликовая галактика Pox 186 была открыта Кунцем и Саргентом (1981) [273]. Проводя многоцветную фотометрию, Кунц с сотрудниками [269] обнаружили, что размеры галактики Pox 186 во всех цветах не превышают размеры области ионизованного водорода. Наблюдения в линии 21 см не обнаружили нейтрального водорода в Pox 186 [46]. Кунц с сотрудниками предположили, что в Pox 186 наблюдается первая вспышка звездообразования, причем мощность вспышки такова, что ионизован весь газ в галактике. До сих пор выводы о наличии старого звездного населения в Pox 186 противоречивы [101, 126, 186]. Следует отметить, что содержание кислорода в Pox 186 довольно высокое: $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 7.75$ [186, 271].

Для поиска галактик с экстремально низким содержанием тяжелых элементов ($12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 7.65$) используются спектральные обзоры неба. Изотов и др. нашли во Втором Бюраканском Обзоре неба голубую компактную галактику SBS 0335-052 (SBS — Second Uragan Survey), содержание кислорода в которой оказалось меньше, чем в галактике I Zw 18 [221]. В этом обзоре было найдено еще несколько галактик с экстремально низким содержанием тяжелых элементов [222]. Несколько галактик с экстремально низким содержанием тяжелых элементов было найдено в [263, 413] и две галактики в [363]. Около десятка галактик с экстремально низким содержанием тяжелых элементов было найдено в SDSS [223, 228, 261, 416].

Таким образом, к настоящему времени найдены три близкие галактики, в которых содержание тяжелых элементов ниже, чем

в I Zw 18 (SBS 0335-052 [221, 230, 364], DDO 68 [228, 415], SDSS J092609.45 + 334304.1 [416]).

Ху и др. [207] использовали обзор галактик с ультрасильными эмиссионными линиями и экстремально большими эквивалентными ширинами линии H_β для поиска галактик с экстремально низким содержанием тяжелых элементов и нашли семь галактик с содержанием $12 + \lg(O/H) < 7.65$. Галактика KHC 912-29 с красным смещением $z = 0.3931$ имеет содержание кислорода $12 + \lg(O/H) = 6.97 \pm 0.17$, другая галактика KHC 912-269 с красным смещением $z = 0.8175$ имеет содержание кислорода $12 + \lg(O/H) = 7.25 \pm 0.03$. Содержание кислорода в этих галактиках ниже или сравнимо с содержанием кислорода в I Zw 18, однако эти галактики находятся на очень больших расстояниях.

Догалактическое содержание гелия. Наблюдаемое содержание гелия в различных объектах Вселенной складывается из двух частей. Одна часть гелия синтезирована на ранней стадии существования Вселенной — это так называемый первичный или догалактический гелий. Здесь следует сделать одно замечание, касающееся термина “первичный элемент”, поскольку этот термин употребляется в двух значениях. По характеру синтеза в звездах элементы делят на два типа — первичные и вторичные элементы. Синтез первичных элементов не зависит от начального химического состава звезды. Для синтеза вторичного элемента необходимо наличие в звезде в момент ее формирования конкретного элемента (тяжелее гелия), который выступает либо в роли катализатора в определенных цепочках ядерных реакций, ведущих к синтезу данного вторичного элемента, либо является исходным материалом для синтеза данного вторичного элемента. В этом смысле термин “первичный элемент” эквивалентен англоязычному термину “primary element”. С другой стороны, термин “первичный гелий” употребляется также при обозначении количества гелия, который синтезируется в процессе космологического нуклеосинтеза и определяет начальный химический состав галактик. В этом случае термин “первичный гелий” эквивалентен англоязычному термину “primordial helium”. Чтобы избежать путаницы, мы будем употреблять термин “догалактический гелий” при описании доли гелия, синтезированного на ранней стадии формирования Вселенной (догалактическая стадия) в процессе космологического нуклеосинтеза.

Другая часть представляет собой гелий, который синтезирован в звездах. Проблема определения догалактического содержания гелия привлекает пристальное внимание многих исследователей. Это вызвано тем, что догалактическое содержание гелия Y_P представляет интерес не только для теории химической эволюции галактик, но и является критическим тестом для космологических моделей.

Пеймберт и Торрес-Пеймберт [375, 376] обнаружили корреляцию между содержанием гелия Y и содержанием тяжелых элементов Z в нескольких областях II (рис. 3.24). Основываясь на этом факте, они предложили метод определения догалактического содержания гелия Y_P . Суть метода заключается в том, что линейная эмпирическая зависимость между содержанием гелия и содержанием тяжелых элементов, построенная для объектов с различным содержанием тяжелых элементов, вида

$$Y = Y_P + \frac{dY}{dZ} Z \quad (3.82)$$

экстраполируется к нулевому содержанию тяжелых элементов. Содержание гелия по массе Y выражается через содержание гелия по числу частиц He/H и содержания тяжелых элементов по массе Z :

$$Y = \frac{4 (\text{He}/\text{H}) (1 - Z)}{1 + 4 (\text{He}/\text{H})}. \quad (3.83)$$

В дальнейшем этот метод определения догалактического содержания гелия использовался во многих работах [159, 229, 351, 362, 372, 373]. Иногда при построении зависимости вместо суммарного содержания тяжелых элементов Z используется содержание кислорода Z_O по массе:

$$Y = Y_P + \frac{dY}{dZ_O} Z_O \quad (3.84)$$

или содержание кислорода O/H по числу частиц:

$$Y = Y_P + \frac{dY}{d(\text{O}/\text{H})} (\text{O}/\text{H}), \quad (3.85)$$

где

$$\frac{dY}{d(\text{O}/\text{H})} = 12 \frac{dY}{dZ_O} = 18.2 \frac{dY}{dZ}. \quad (3.86)$$

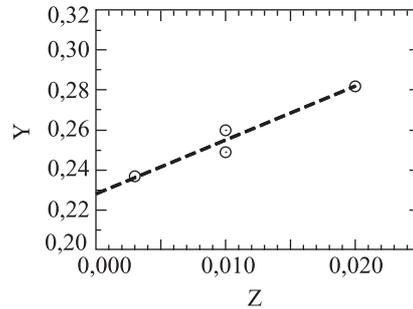


Рис. 3.24. Содержание гелия в зависимости от содержания тяжелых элементов. Кружки — данные для областей Н II в ММО, БМО и галактической области Н II в Орионе из [376]. Штриховая линия — зависимость $Y - Z$, найденная Пеймбертом и Торрес-Пеймберт (1976)

Изложенным методом в двух недавних работах получены следующие значения догалактического содержания гелия: $Y_P = 0.2477 \pm 0.0029$ в работе Пеймберта и др. (2007) [372] и $Y_P = 0.2565 \pm 0.0010$ (статистическая) ± 0.0050 (систематическая) в работе Изотова и Туана (2010) [229].

Детальное картографирование космического микроволнового фона в рамках проекта *WMAP* — *Wilkinson microwave anisotropy probe* и других проектов позволило установить параметры космологической модели [131, 215, 476] и предсказать догалактическое содержание гелия Y_P в рамках модели стандартного нуклеосинтеза при Большом Взрыве (*SBBN* — *standard Big Bang nucleosynthesis*). В работе [490] найдено модельное значение догалактического содержания гелия $Y_P = 0.2482 \pm 0.0007$, в работе [215] модельное значение равно $Y_P = 0.25^{+0.10}_{-0.07}$. Согласие измеренного содержания догалактического гелия с предсказываемым значением является веским аргументом в пользу справедливости модели стандартного нуклеосинтеза при Большом Взрыве. В настоящее время трудно сделать окончательный вывод о согласии или противоречии между измеренным и предсказываемым значениями содержания догалактического гелия. Для такого выво-

да необходимо повысить точность как измеренного, так и предсказываемого значений Y_R .

Следует сделать одно замечание. Метод Пеймберта базируется на весьма сильном допущении, что все объекты должны лежать на одной линии на диаграмме “ $Y - Z_O$ ”. Другими словами, в методе Пеймберта постулируется, что эволюционные треки всех галактик на диаграмме “ $Y - Z_O$ ” должны иметь одинаковый наклон, т. е. величина dY/dZ_O предполагается одинаковой для всех галактик. С одной стороны, разброс точек на диаграмме “ $Y - Z_O$ ” заставляет усомниться в справедливости этого предположения. С другой, модели химической эволюции галактик предсказывают, что относительное обогащение межзвездной среды галактики тяжелыми элементами dZ_j/dZ_k (в том числе и dY/dZ_O) является функцией эффективности обогащенного галактического ветра и темпа притока газа в галактику извне (аккреции) [16,382]. Изменение эффективности обогащенного галактического ветра и темпа аккреции от одной галактики к другой обуславливает изменение наклона эволюционного трека галактики на диаграмме “ $Y - Z_O$ ” и разброс точек на ней [17,305,383].

3.8.3. Химический состав спиральных галактик

Химический состав спиральных галактик исследован значительно хуже по сравнению с неправильными галактиками. Точность определения содержаний химических элементов в областях Н II в дисках спиральных галактик при помощи T_e -метода не очень высока. Это обусловлено тем, что большинство областей Н II в спиральных галактиках имеет низкую электронную температуру, поэтому интенсивности авроральных линий кислорода [O III] λ 436.3 и азота [N II] λ 575.5 в их спектрах малы и измеряются с низкой точностью. Это накладывает ограничения на точность определения электронной температуры и, следовательно, содержания элементов в областях Н II в дисках спиральных галактик.

Еще в первых работах, посвященных спектральным исследованиям областей Н II [34,449,461,474], было показано, что физические условия и химический состав в областях Н II в дисках спиральных галактик изменяются с галактоцентрическим расстоянием. Химический состав области Н II характеризует химический состав межзвездной среды в диске только на данном галактоцентрическом расстоянии. Для установления радиального

распределения содержаний кислорода в диске галактики необходимо определить содержания кислорода в ряде областей Н II, галактоцентрические расстояния которых покрывают достаточно большую долю радиуса галактики. Только для нескольких спиральных галактик (М 33, М 51, М 101, NGC 300 и наша Галактика) содержания кислорода определены прямым методом для семи и более областей Н II, которые покрывают сравнительно большой интервал галактоцентрических расстояний. Наиболее изученной является спиральная галактика М 101. Галактика М 101 используется как своего рода “Розетский камень” в исследованиях химического состава областей Н II. Радиальное распределение кислорода $(O/H)_{T_e}$ в диске этой галактики используют для проверки достоверности содержаний кислорода, найденных другими методами [387, 399]. Поэтому уделим этой галактике больше внимания.

Гигантская спиральная галактика М 101 находится на сравнительно небольшом расстоянии от нашей Галактики и наблюдается почти “с полюса”. Галактика М 101 принадлежит к морфологическому типу Sc. Она содержит свыше 1000 эмиссионных туманностей (каталог Ходжа и др. [203] содержит 1264 эмиссионные туманности). Характеристики галактики М 101, которые использованы в этой и следующих главах, приведены в табл. 3.6. Следуя работе Кенникатта и Гарнетта [250], мы приняли позиционный угол большой оси изображения галактики (угол между направлением на север и большой осью изображения галактики, отсчитываемый против хода часовой стрелки) $PA = 37^\circ$ и угол наклона галактики (угол между плоскостью галактики и картинной плоскостью или угол между полярной осью галактики и лучом зрения) $i = 18^\circ$. Эти значения были использованы и в более поздних работах, посвященных исследованию радиального распределения кислорода в диске М 101 [249, 387, 522]. Следует отметить, что значения угла наклона галактики М 101, найденные по оптическим и радионаблюдениям, не совпадают [114]. Однако, так как угол наклона достаточно мал, то ошибка в его значении не оказывает заметного влияния на истинные (исправленные за наклон галактики) галактоцентрические расстояния областей Н II. Расстояние до галактики М 101 определялось в нескольких работах разными способами. В качестве стандартной свечи использовались: функция светимости планетарных туман-

Таблица 3.6. Характеристики спиральной галактики М 101

Характеристика	Значение	Литературный источник
Позиционный угол РА большой оси	37°	[250]
Наклон i	18°	[250]
Расстояние	6.7 Мпк	[153]
Изофотный радиус	14.42 (24.1 кпк)	[119]
Видимая звездная величина B_T^O	8.31 ^m	[119]
Абсолютная звездная величина M_B	-20.82 ^m	

ностей [144], красные переменные сверхгиганты [238], расширяющаяся фотосфера сверхновой II типа [446], цефеиды [37, 153, 244]. Расхождение между расстояниями, найденными разными способами, не превышает 20%. Мы принимаем расстояние 6.7 Мпк, полученное по цефеидам в рамках ключевого проекта космического телескопа Хаббла по установлению шкалы внегалактических расстояний [153]. Видимая звездная величина галактики М 101 в фотометрической полосе B составляет $B_T^O = 8.31^m$ [119]. С принятым значением расстояния 6.7 Мпк абсолютная звездная величина галактики М 101 равна $M_B = -20.82^m$.

Обзор литературных источников показал, что на протяжении последних 40 лет получено несколько десятков спектров областей Н II в галактике М 101, в которых более или менее надежно измерены авроральные линии кислорода [O III] λ 436.3 и/или азота [N II] λ 575.5. Наш список содержит 61 спектр, и он вряд ли является исчерпывающим. Список спектров приведен в табл. 3.7. В 1-й графе дан порядковый номер спектра. Во 2-й графе указана идентификация области Н II, которая представляет собой либо номер объекта в одном из опубликованных каталогов ("N" — каталог NGC, "H" — каталог Ходжа и др. [203], "S" — список Сир-

ла [449]), либо координаты положения области Н II относительно центра галактики (offset) по прямому восхождению и склонению, выраженные в угловых секундах. Области Н II в табл. 3.7 расположены в порядке возрастания галактоцентрических расстояний R_G , которые выражены в единицах изофотного радиуса R_{25} и даны в 3-й графе. В 4-й графе приведены содержания кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{t_3}$, найденные T_e -методом по температуре t_3 , когда в спектре измерена авроральная линия кислорода [O III] λ 436.3. В 5-й графе приведены содержания кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{t_2}$, найденные T_e -методом по температуре t_2 , когда в спектре измерена авроральная линия азота [N II] λ 575.5. Содержания азота $12 + \lg(\text{N}/\text{H})_{t_3}$ и $12 + \lg(\text{N}/\text{H})_{t_2}$ указаны в 6-й и 7-й графах соответственно.

Интенсивности эмиссионных линий [O II] λ 372.7 + λ 372.9, [O III] λ 436.3, [O III] λ 500.7, [N II] λ 575.5, [N II] λ 658.4, [S II] λ 671.7 + λ 673.1 в спектрах областей Н II в диске галактики М 101 приведены в табл. 3.8. Интенсивности линий исправлены за межзвездное поглощение света (в цитируемых работах) и нормированы на интенсивность линии H_β .

Для некоторых областей Н II в галактике М 101 получено несколько спектров с измеренными авроральными линиями (см. табл. 3.7). Следует отметить, что наиболее яркие эмиссионные туманности в М 101 представляют собой гигантские комплексы Н II, содержащие несколько “пятен”. Например, Ходж и др. [203] выделили в NGC 5461 12 пятен (а в NGC 5462 — 33 пятна) и включили их в свой каталог как отдельные области Н II. Очевидно, что физические условия в разных частях гигантского комплекса Н II могут быть разными. Поэтому интенсивности линий в разных спектрах комплекса Н II могут существенно различаться, если спектры получены для разных частей (“пятен”) комплекса. Распределение областей Н II из табл. 3.7 по наблюдаемому изображению галактики М 101 представлено на рис. 3.25.

На рис. 3.26, а кружками показаны содержания кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{T_e}$ в областях Н II в диске галактики М 101 в зависимости от их галактоцентрических расстояний. Отчетливо видна тенденция уменьшения содержания кислорода в областях Н II по мере увеличения расстояния от центра галактики. Традиционно радиальное распределение содержания кислорода в дисках

Таблица 3.7. Содержания кислорода и азота в областях Н II в диске спиральной галактики М 101, в спектрах которых измерены авроральные линии кислорода [O III] λ 436.3 и/или азота [N II] λ 575.5. Для областей Н II приведены: номер в NGC каталоге (N), номер в каталоге Ходжа и др. [203] (H), номер в списке Сирла [449] (S), смещение относительно центра галактики. Содержания элементов даны в стандартной шкале $Z_X = 12 + \lg(X/H)$ и получены на основе температур t_2 и t_3

Номер	Область Н II	R_G/R_{25}	Z_O (t_3)	Z_O (t_2)	Z_N (t_3)	Z_N (t_2)	Литературный источник
1	H493	0.10	—	8.88	—	8.18	[67]
2	H1013	0.19	8.45	8.45	7.55	7.55	[67]
3	H1013	0.19	—	8.38	—	7.42	[512]
4	H1013	0.19	—	8.47	—	7.58	[249]
5	H1013	0.20	8.39	8.43	7.60	7.63	[139]
6	H336	0.22	—	8.59	—	7.78	[249]
7	H336	0.22	—	8.63	—	7.80	[256]
8	N5461	0.33	8.49	—	—	—	[474]
9	N5461	0.33	8.42	8.35	7.35	7.31	[249]
10	N5461	0.33	8.42	8.28	7.51	7.42	[139]
11	N5461	0.33	8.51	8.56	7.50	7.53	[298]
12	N5461	0.33	8.48	—	7.25	—	[421]
13	N5461	0.33	8.39	8.50	7.31	7.38	[512]
14	N5461	0.33	8.43	—	7.29	—	[455]
15	252-107	0.33	8.52	—	7.25	—	[312]
16	N5462	0.41	8.30	—	7.10	—	[249]
17	N5462	0.42	8.17	—	7.09	—	[249]
18	N5462	0.43	8.28	—	7.13	—	[249]
19	N5462	0.42	8.22	—	6.98	—	[455]
20	No 3	0.47	8.37	—	7.27	—	[233]
21	No 4	0.47	8.30	—	7.16	—	[233]
22	N5455	0.47	8.40	—	7.12	—	[512]
23	N5455	0.47	8.37	8.42	6.96	6.99	[455]

Продолжение табл. 3.7

Номер	Область H II	R_G/R_{25}	Z_O (t_3)	Z_O (t_2)	Z_N (t_3)	Z_N (t_2)	Литера- турный источник
24	N5455	0.48	8.49	—	7.34	—	[461]
25	N5455	0.48	8.48	—	7.18	—	[474]
26	N5455	0.48	8.34	8.26	7.17	7.11	[249]
27	-347+276	0.54	8.43	—	7.21	—	[522]
28	-459-053	0.55	8.28	—	6.86	—	[522]
29	N5457	0.55	8.34	—	7.28	—	[249]
30	N5447	0.55	8.29	—	7.10	—	[455]
31	N5447	0.55	8.44	—	7.16	—	[474]
32	N5457	0.55	8.16	—	7.10	—	[249]
33	N5457	0.55	8.46	8.23	7.29	7.14	[249]
34	H67	0.55	8.12	—	6.75	—	[249]
35	H70	0.58	8.15	—	6.82	—	[249]
36	H71	0.58	8.06	—	6.80	—	[249]
37	H1216	0.66	8.27	—	6.87	—	[455]
38	H1216	0.66	8.16	—	6.82	—	[249]
39	H1216	0.66	8.29	—	6.98	—	[474]
40	-398-436	0.68	8.02	—	6.56	—	[522]
41	N5471	0.81	8.05	—	6.73	—	[249]
42	N5471	0.81	7.90	7.88	6.68	6.67	[249]
43	N5471	0.81	8.01	—	7.01	—	[249]
44	N5471	0.81	8.06	—	6.71	—	[249]
45	N5471	0.81	8.14	—	6.57	—	[461]
46	N5471	0.81	8.11	—	6.64	—	[464]
47	N5471	0.81	7.98	—	6.50	—	[464]
48	N5471	0.81	8.11	—	6.83	—	[464]
49	N5471	0.81	8.05	—	6.95	—	[464]
50	N5471	0.81	8.09	—	6.82	—	[474]
51	N5471	0.81	8.10	—	6.82	—	[298]
52	N5471	0.81	8.04	—	6.80	—	[172]
53	N5471	0.81	8.16	—	6.71	—	[421]
54	N5471	0.81	8.12	—	6.71	—	[455]

Окончание табл. 3.7

Номер	Область Н II	R_G/R_{25}	$Z_O(t_3)$	$Z_O(t_2)$	$Z_N(t_3)$	$Z_N(t_2)$	Литературный источник
55	N5471	0.81	8.07	8.15	6.76	6.81	[512]
56	No 1	0.82	8.05	—	6.66	—	[233]
57	No 2	0.82	8.00	—	6.65	—	[233]
58	H681	1.04	7.88	—	6.41	—	[169]
59	010+885	1.04	7.92	—	6.47	—	[522]
60	H681	1.04	7.69	—	—	—	[455]
61	SDH 323	1.25	7.55	—	6.11	—	[249]

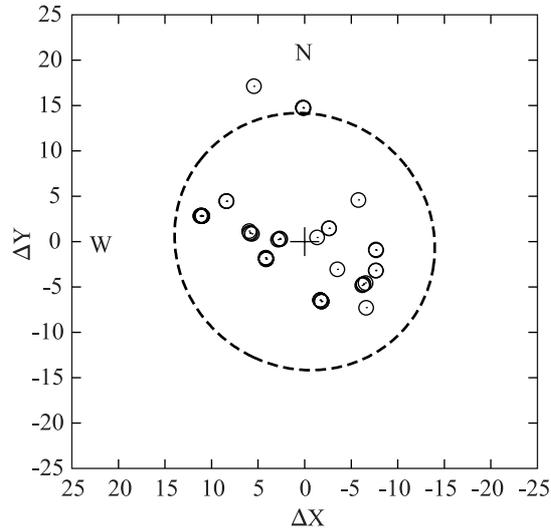


Рис. 3.25. Распределение областей Н II, в спектрах которых измерены авроральные линии кислорода [O III] λ 436.3 или азота [N II] λ 575.5, в диске спиральной галактики М 101. Кружками показаны области Н II из табл. 3.7. Крестиком обозначен центр галактики, пунктирной линией показан изофотный радиус R_{25}

Таблица 3.8. Интенсивности линий в спектрах областей H II в диске спиральной галактики M 101. Интенсивности линий исправлены за межзвездное поглощение и нормированы на интенсивность линии водорода H_{β}

Номер	[OII] λ 372.7 + λ 372.9	[OIII] λ 436.3	[OIII] λ 500.7	[NII] λ 575.5	[NII] λ 658.4	[SII] λ 671.7+ λ 673.1
1	0.840	—	0.080	0.0024	0.950	0.514
2	2.210	0.0024	1.020	0.0059	0.710	0.298
3	2.570	—	0.871	0.0063	0.676	0.279
4	1.880	—	1.030	0.0050	0.646	0.288
5	1.350	0.0019	0.970	0.0043	0.590	0.259
6	1.780	—	0.230	0.0050	0.959	0.568
7	1.850	—	0.200	0.0049	0.980	0.680
8	1.622	0.0131	3.437	—	0.000	0.224
9	1.850	0.0140	3.160	0.0040	0.334	0.241
10	1.030	0.0110	3.020	0.0034	0.290	0.212
11	1.915	0.0119	3.240	0.0040	0.417	0.357
12	2.455	0.0141	3.236	—	0.309	0.196
13	2.138	0.0148	3.020	0.0037	0.363	0.225
14	1.860	0.0160	3.450	—	0.282	0.188
15	2.228	0.0134	3.428	—	0.264	0.172
16	1.980	0.0190	3.170	—	0.236	0.298
17	3.080	0.0160	2.010	—	0.440	0.567
18	1.600	0.0240	3.690	—	0.212	0.230
19	2.960	0.0280	3.250	—	0.282	0.341
20	2.012	0.0230	3.885	—	0.308	0.350
21	2.281	0.0230	3.438	—	0.308	0.429
22	3.090	0.0195	3.311	—	0.311	0.467
23	3.260	0.0220	3.370	0.0030	0.235	0.307
24	2.570	0.0166	3.599	—	0.377	0.372
25	3.090	0.0212	3.946	—	0.306	0.295
26	2.180	0.0230	3.700	0.0040	0.273	0.312
27	0.980	0.0359	5.944	—	0.112	0.176
28	3.000	0.0220	3.004	—	0.202	0.347
29	2.120	0.0180	3.180	—	0.359	0.372

Окончание табл. 3.8

Номер	[OII] λ 372.7 + λ 372.9	[OIII] λ 436.3	[OIII] λ 500.7	[NII] λ 575.5	[NII] λ 658.4	[SII] λ 671.7 + λ 673.1
30	1.950	0.0230	3.500	—	0.233	0.297
31	1.905	0.0212	4.131	—	0.202	0.178
32	2.190	0.0230	2.840	—	0.333	0.402
33	1.450	0.0170	3.910	0.0030	0.208	0.233
34	2.440	0.0350	3.420	—	0.163	0.263
35	3.110	0.0250	2.670	—	0.236	0.472
36	2.000	0.0590	4.540	—	0.159	0.291
37	1.630	0.0360	4.600	—	0.114	0.216
38	1.510	0.0470	4.730	—	0.111	0.189
39	1.660	0.0413	5.083	—	0.140	0.186
40	2.050	0.0521	3.993	—	0.102	0.206
41	1.060	0.0950	6.440	—	0.068	0.158
42	2.130	0.0660	3.950	0.0040	0.167	0.547
43	1.740	0.0540	4.160	—	0.251	0.232
44	1.370	0.0800	5.780	—	0.085	0.206
45	1.148	0.0676	5.836	—	0.047	0.245
46	1.320	0.1000	6.970	—	0.061	0.141
47	3.000	0.0620	3.920	—	0.130	0.480
48	2.040	0.0540	4.600	—	0.160	0.270
49	1.560	0.0810	5.640	—	0.170	0.210
50	1.175	0.1038	7.017	—	0.086	0.144
51	1.022	0.0935	6.762	—	0.075	0.190
52	1.770	0.0800	5.430	—	0.140	0.130
53	1.445	0.0871	6.761	—	0.074	0.145
54	1.160	0.0930	6.800	—	0.064	0.152
55	1.318	0.0912	6.310	0.0017	0.089	0.176
56	1.144	0.0980	6.474	—	0.064	0.195
57	2.428	0.0730	4.637	—	0.147	0.402
58	2.442	0.0500	3.122	—	0.108	0.269
59	2.130	0.0562	3.637	—	0.102	0.247
60	2.500	0.0950	3.730	—	—	—
61	1.940	0.0550	2.270	—	0.079	0.208

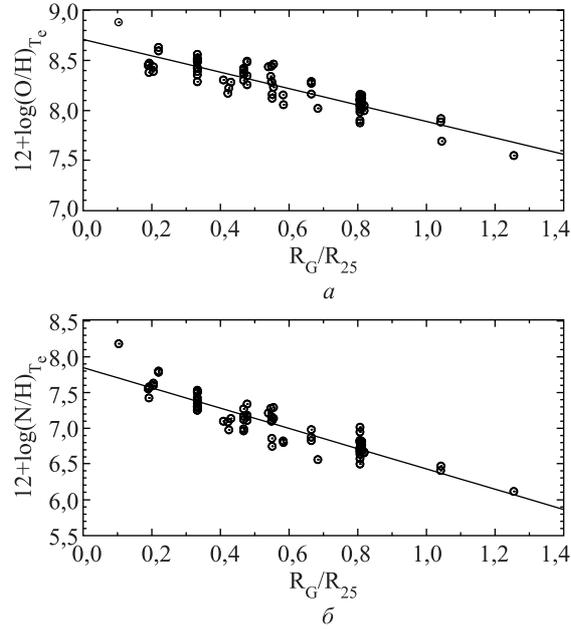


Рис. 3.26. Радиальное распределение содержания кислорода (*a*) и азота (*б*) в диске спиральной галактики М 101. Кружками обозначены области Н II из табл. 3.7. Линиями показаны линейные зависимости, найденные методом наименьших квадратов

галактик описывается соотношением типа

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{T_e} = c_0 + c_1 r, \quad (3.87)$$

где галактоцентрическое расстояние выражается либо в единицах изофотного радиуса $r = R_G/R_{25}$, либо в килопарсеках $r = R_G$. Коэффициент c_0 описывает содержание кислорода в центре диска. Коэффициент c_1 характеризует амплитуду изменения содержания кислорода в диске галактики в пределах изофотного радиуса, если галактоцентрические расстояния выражены в единицах изофотного радиуса. Коэффициент c_1 характеризует радиальный градиент содержания кислорода на килопарсек, если галактоцентрические расстояния выражены в килопарсеках. Использование галактоцентрических расстояний, нормированных

на изофотный радиус, при описании радиального распределения содержаний кислорода в дисках галактик дает одно важное преимущество. Определенный таким образом радиальный градиент содержания кислорода не зависит от расстояния до галактики. Это позволяет находить и сравнивать радиальные градиенты содержания кислорода в галактиках, для которых неизвестны (или известны неточно) расстояния.

В некоторых спектрах измерена как авроральная линия кислорода [O III] λ 436.3, так и авроральная линия азота [N II] λ 575.5. В этом случае можно найти два значения содержания кислорода: $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{t_3}$ и $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{t_2}$. Эти значения рассматриваются как два независимых определения содержания кислорода в данной области Н II. Таким образом, табл. 3.7 содержит 72 определения содержаний кислорода в диске М 101. Для этих данных, представленных на рис. 3.26, *a*, методом наименьших квадратов получено соотношение

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{T_e} = 8.71 (\pm 0.03) - 0.82 (\pm 0.05) (R_G/R_{25}), \quad (3.88)$$

которое описывает радиальное распределение содержаний кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{T_e}$ в диске галактики М 101. Эта зависимость показана на рис. 3.26, *a* сплошной линией. Если галактоцентрические расстояния выразить в килопарсеках, то радиальное распределение содержаний кислорода в диске галактики М 101 описывается соотношением

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{T_e} = 8.71 (\pm 0.03) - 0.029 (\pm 0.002) R_G. \quad (3.89)$$

На рис. 3.26, *a* видно, что радиальное распределение кислорода в диске хорошо описывается одним соотношением. Следует отметить, что в работах [448, 556] приведено, что наклон в радиальном распределении кислорода в диске М 101 претерпевает излом при $(0.3-0.5)R_{25}$. Более поздние исследования [197, 249, 389] не подтвердили этот результат.

Среднее отклонение точек от найденной зависимости $\text{O}/\text{H} = f(R_G)$ составляет 0.1 dex. С одной стороны, разброс значений содержаний кислорода в областях Н II с близкими галактоцентрическими расстояниями может быть обусловлен азимутальной асимметрией в распределении кислорода в диске галактики. При определении радиального распределения содержания кислорода в дисках галактик неявно предполагается азимутальная

симметрия в распределении содержания кислорода, т. е. предполагается, что области Н II с близкими галактоцентрическими расстояниями имеют близкие содержания тяжелых элементов. В действительности же две области с галактоцентрическими расстояниями, например 10 кпк, могут быть пространственно удалены друг от друга на 20 кпк. Эволюционировать эти области галактики будут независимо, и не исключено, что они не будут иметь одинакового химического состава. Азимутальная асимметрия обуславливает разброс значений содержания кислорода в областях Н II с близкими галактоцентрическими расстояниями.

С другой стороны, разброс значений содержаний кислорода в областях Н II с близкими галактоцентрическими расстояниями может быть обусловлен ошибками определения содержания кислорода. Как отмечено выше, для некоторых областей Н II в галактике М 101 получено несколько индивидуальных определений содержания кислорода. Расхождение между максимальным и минимальным значениями содержаний кислорода, найденными для фиксированной области Н II, может превышать 0.2 dex. Это свидетельствует о том, что ошибки определения содержаний кислорода в областях Н II вносят существенный (скорее всего, доминирующий) вклад в наблюдаемый разброс на диаграмме $O/H - R_G$.

Предположение о наличии азимутальной асимметрии распределения кислорода в диске галактики М 101 было высказано в работе [250]. В более поздней работе тех же авторов [249] это предположение не нашло подтверждения. В работе [24] исследовалось распределение кислорода в дисках восьми спиральных галактик на основе 314 спектров областей Н II. Распределения содержания кислорода в дисках галактик оказались азимутально-симметричными в пределах ошибок измерений. Таким образом, предположение об азимутальной симметрии в распределении содержания кислорода в дисках галактик подтверждается наблюдениями.

На рис. 3.26, б кружками показаны содержания азота $12 + \lg(N/H)_{T_e}$ в областях Н II в диске галактики М 101 в зависимости от их галактоцентрических расстояний. Для этих данных методом наименьших квадратов были получены соотношения

$$12 + \lg(N/H)_{T_e} = 7.85 (\pm 0.04) - 1.42 (\pm 0.07) (R_G/R_{25}) \quad (3.90)$$

и

$$12 + \lg(\text{N}/\text{H})_{T_e} = 7.85 (\pm 0.04) - 0.050 (\pm 0.003) R_G. \quad (3.91)$$

Среднее отклонение индивидуальных значений $12 + \lg(\text{N}/\text{H})_{T_e}$ от найденной зависимости $\text{N}/\text{H} = f(R_G)$ составляет 0.15 dex.

Кроме галактики М 101 радиальное распределение содержания кислорода в межзвездной среде найдено еще в четырех спиральных галактиках: М 33 (= NGC 598), М 51 (=NGC 5194), NGC 300 и в нашей Галактике MWG (Milky Way Galaxy).

М 33. Галактика М 33 является третьим по светимости членом Локальной группы галактик. Спектральные измерения областей Н II в диске М 33 приведены в работах [103, 275, 300, 530]. Содержания кислорода, найденные в этих работах T_e -методом, показаны точками на рис. 3.27 в зависимости от галактоцентрического расстояния R_G (в килопарсеках). Сплошной линией показана зависимость

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{T_e} = 8.53 (\pm 0.05) - 0.054 (\pm 0.011) R_G, \quad (3.92)$$

полученная в работе [300]. В работе [427] авроральная линия [O III] λ 436.3 измерена в спектрах 61 области Н II в диске М 33. На основе этих данных был найден меньший наклон в радиальном распределении O/H в диске М 33:

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{T_e} = 8.36 (\pm 0.04) - 0.027 (\pm 0.015) R_G. \quad (3.93)$$

Это соотношение показано на рис. 3.27 штриховой линией. Плохое согласие между соотношениями $\text{O}/\text{H} = f(R_G)$ для М 33 из разных работ не является неожиданным, так как разброс O/H для каждого значения R_G составляет 0.4 dex [427].

М 51. Долгое время считалось, что галактика М 51 является галактикой с предельно высоким содержанием кислорода [68, 121, 526]. В 2004 году в спектрах 10 областей Н II в диске М 51, полученных на телескопе “Кека” (Keck I telescope), были измерены интенсивности авроральных линий азота [N II] λ 575.5 и дважды ионизованной серы [S III] λ 631.2 [68, 170]. Эти измерения дали возможность определить содержания кислорода в областях Н II при помощи T_e -метода и найти радиальное

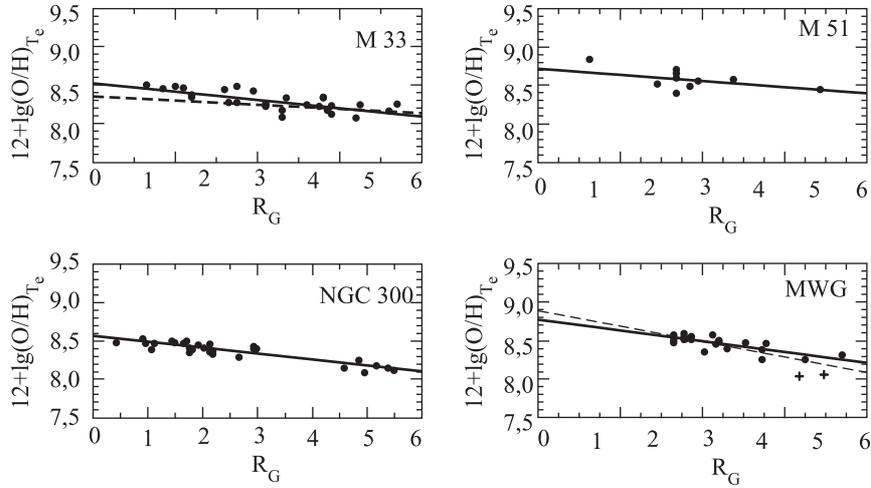


Рис. 3.27. Радиальное распределение содержания кислорода в дисках спиральных галактик М 33, М 51, NGC 300 и нашей Галактики

распределение O/H в межзвездной среде в диске М 51. Найденные содержания кислорода в областях Н II показаны точками на рис. 3.27. Сплошной линией показана зависимость

$$12 + \lg(O/H)_{T_e} = 8.72 (\pm 0.09) - 0.02 (\pm 0.01) R_G, \quad (3.94)$$

полученная в работе [68]. Вопреки ожиданиям, содержание кислорода в межзвездной среде в диске галактики М 51 оказалось “нормальным”, очень близким к содержанию кислорода в межзвездной среде в диске спиральной галактики М 101.

NGC 300. Спиральная галактика NGC 300 является членом группы галактик Скульптора (Sculptor Group). Первые спектральные исследования областей Н II в диске NGC 300 были выполнены более 30 лет назад в знаменитой работе Пейджела и др. [358], в которой была предложена R_{23} -калибровка. Однако до недавнего времени в спектрах только двух областей Н II в NGC 300 была измерена авроральная линия кислорода [O III] λ 436.3. В работе [69] авроральные линии кислорода [O III] λ 436.3, ионизованного азота [N II] λ 575.5 и дважды ионизован-

ной серы [S III] λ 631.2 были измерены в спектрах 28 областей Н II в NGC 300. Содержания кислорода, найденные в этой работе T_e -методом, показаны точками на рис. 3.27. Сплошной линией показана зависимость

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{T_e} = 8.57 (\pm 0.02) - 0.077 (\pm 0.006) R_G, \quad (3.95)$$

полученная в той же работе.

Галактика Млечный Путь. Интенсивности авроральных линий кислорода и азота измерены в спектрах нескольких областей Н II в диске Галактики [43, 82, 115, 140 и др.]. В работе [398] собраны спектральные измерения областей Н II в диске Галактики из 15 работ, выполненных до 2003 года. Для областей Н II с несколькими измерениями в этой работе получены осредненные значения содержания кислорода. Мы дополнили эту компиляцию данными из более поздних работ [140, 162–165, 327, 515]. Эти данные показаны на рис. 3.27. Точками представлены области Н II, в которых содержания кислорода вычислены по измеренной электронной температуре t_3 (в спектрах измерена авроральная линия кислорода [O III] λ 436.3). Плюсами показаны две области Н II, в которых содержания кислорода вычислены по измеренной электронной температуре t_2 (в спектрах которых измерена авроральная линия кислорода [O II] λ 732.5). Для областей Н II с измеренной электронной температурой t_3 методом наименьших квадратов мы нашли следующее соотношение между содержанием кислорода и галактоцентрическим расстоянием в килопарсеках:

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{T_e} = 8.779 (\pm 0.057) - 0.035 (\pm 0.006) R_G. \quad (3.96)$$

Эта зависимость показана на рис. 3.27 сплошной линией. Добавление двух областей Н II с измеренной электронной температурой $t_{2,\text{O}}$ существенно изменяет соотношение $\text{O}/\text{H} - R_G$:

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{T_e} = 8.895 (\pm 0.072) - 0.050 (\pm 0.008) R_G. \quad (3.97)$$

Эта зависимость показана на рис. 3.27 штриховой линией.

На рис. 3.27 видно, что радиальное распределение содержания кислорода в межзвездной среде в диске Галактики более или менее достоверно установлено по областям Н II только для галактоцентрических расстояний в диапазоне от 6 до 11 кпк. Как

отмечалось выше, содержание кислорода в межзвездной среде в солнечной окрестности, найденное по областям H II, подтверждается результатами определения содержания кислорода, основанными на измерениях межзвездной линии поглощения кислорода O I $\lambda 135.6$ нм в спектрах звезд. Так как радиальный градиент содержания кислорода в диске Галактики установлен с низкой точностью (ср. уравнения (3.96) и (3.97)), то точность содержания кислорода в центре Галактики, найденного экстраполяцией зависимости O/H — R_G , не может быть высокой. Чтобы надежно установить радиальное распределение содержания кислорода в межзвездной среде во всем диске Галактики необходимы дополнительные спектральные измерения областей H II на малых (< 6 кпк) и больших (> 11 кпк) галактоцентрических расстояниях.

Глава 4

Последовательность областей Н II

4.1. Последовательность областей Н II

Классический T_e метод позволяет определить значения электронной температуры в разных зонах области Н II. Однако применимость этого метода ограничена. Интенсивность авроральных линий низка в сравнении с интенсивностями небулярных и балмеровских линий водорода даже в областях Н II с высокой электронной температурой. По мере уменьшения электронной температуры в туманности содержится все меньше свободных электронов, способных возбудить атом на уровень, переходы с которого дают авроральную линию. Вследствие этого интенсивность авроральной линии уменьшается, и в спектрах холодных областей Н II она становится ниже порога обнаружения. Отсутствие измеримой авроральной линии в спектрах холодных областей Н II препятствует применению классического метода для определения электронной температуры. К сожалению, авроральные линии не удается измерить в подавляющем большинстве областей Н II в спиральных галактиках. Вследствие этого невозможно найти электронную температуру и применить прямой метод для определения содержания кислорода в таких областях Н II. Это послужило причиной поиска других методов определения содержания кислорода и электронной температуры, в которых используются интенсивности только сильных линий.

Предположение о том, что некоторые комбинации интенсивностей сильных линий в спектрах областей H II являются индикаторами их металличности, высказал Сирл в 1971 г. [449]. Сирл измерил интенсивности сильных линий (бальмеровские линии водорода, линии кислорода [O II] λ 372.7, 372.9 нм, [O III] λ 495.9, 500.7 нм, линии азота [N II] λ 654.8 и 658.4 нм) в спектрах областей H II в спиральных галактиках Sc типа; NGC 598 (M 33), NGC 1232, NGC 2403, NGC 4214, NGC 5194 (M 51), NGC 5457 (M 101). Он обнаружил, что отношение [O III]/H β в спектрах систематически увеличивается, а отношение [N II]/H α систематически уменьшается с увеличением галактоцентрических расстояний областей H II. Сирл предположил, что в дисках спиральных галактик содержание тяжелых элементов уменьшается с удалением от центра галактики, и систематические изменения отношений интенсивностей линий в спектрах областей H II с разными галактоцентрическими расстояниями отображают эти изменения.

Интенсивности эмиссионных линий в спектре области H II зависят от ее химического состава и от распределения электронной температуры внутри туманности. В свою очередь, электронная температура в туманности определяется распределением энергии в спектре ионизирующей звезды или скопления ионизирующих звезд (определяет нагрев газа) и содержанием тяжелых элементов (определяет охлаждение) в туманности. Тесная корреляция между электронной температурой и содержанием кислорода в областях H II (рис. 4.1) свидетельствует о том, что электронная температура в туманности существенно зависит от охлаждения газа путем излучения в линиях кислорода.

Интенсивности линий в спектре гигантской области H II, связанной со скоплением звезд, изменяются со временем. Эти эволюционные изменения спектра гигантской области H II вызваны постепенными изменениями со временем распределения энергии в интегральном спектре ионизирующего излучения, обусловленного эволюцией звезд скопления. Расчеты интенсивностей линий в спектрах областей H II разного химического состава и для разных источников ионизирующего излучения (одиночные звезды разных спектральных классов, звездные скопления разных возрастов) проводили неоднократно [123, 124, 312, 343, 479–482, 487]. Результаты этих расчетов показывают, что положения фотоио-

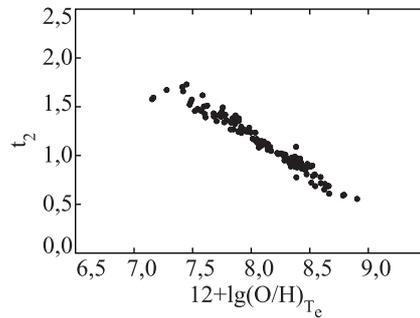


Рис. 4.1. Связь между электронной температурой t_2 и содержанием кислорода для выборки областей Н II КТ118 [409]

низационных моделей областей Н II на различных диаграммах образуют хорошо выраженные последовательности. Это означает, что есть фундаментальная последовательность спектральных свойств областей Н II. Этот факт имеет чрезвычайно важное значение.

В основе разнообразных исследований областей Н II явно или неявно лежит факт наличия фундаментальной последовательности спектральных характеристик областей Н II.

4.2. Классификационные диаграммы

Болдвин, Филлипс и Терлевич [42] (см. также [524]) показали, что положение объекта на некоторых диаграммах можно использовать для того, чтобы разделить области Н II, источником ионизации которых является коротковолновое излучение звезд, и другие объекты с эмиссионными линиями (например, активные ядра галактик). Диаграмма $[\text{O III}] \lambda 500.7/\text{H}_\beta - [\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}_\alpha$ широко применяется для разделения фотоионизационных областей Н II и активных ядер галактик. Для построения классификационных диаграмм используют эмиссионные линии и других ионов, например линии ионизованной серы $[\text{S II}] \lambda 671.7, 673.1$. Наблюдаемая диаграмма $[\text{O III}] \lambda 500.7/\text{H}_\beta - [\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}_\alpha$ показана на рис. 4.2. Положения галактик с эмиссионными линиями на диаграмме $[\text{O III}] \lambda 500.7/\text{H}_\beta - [\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}_\alpha$ образу-

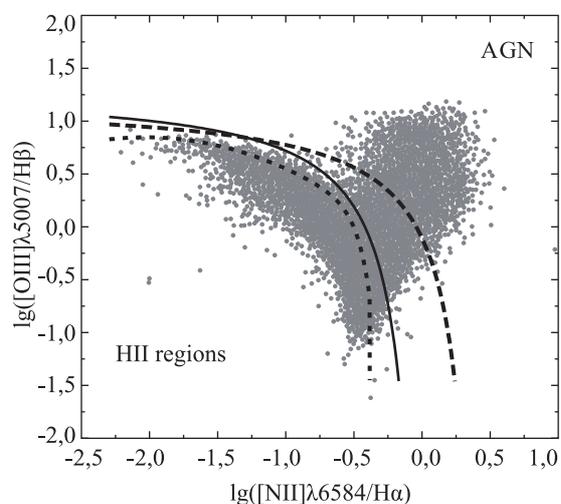


Рис. 4.2. Диаграмма “чайка”. Точки — положения галактик с эмиссионными линиями из спектральной базы данных цифрового обзора неба Sloan. Линиями показана граница, разделяющая фотоионизационные области Н II и активные ядра галактик: сплошная линия — [254], штриховая — [241], пунктирная — [486]

ют фигуру, напоминающую летящую чайку. В последнее время ее так и называют — диаграмма “чайка” (seagull). Фотоионизационные области Н II образуют “левое крыло чайки”, а активные ядра галактик — “правое”.

Однако точное положение кривой, разделяющей фотоионизационные области Н II и активные ядра галактик, пока не установлено и является предметом обсуждений. В работе [254] получено следующее уравнение кривой, разделяющей положения активных галактических ядер и фотоионизационных областей Н II на диаграмме $[\text{O III}] \lambda 500.7 / \text{H}\beta - [\text{N II}] \lambda 658.4 / \text{H}\alpha$:

$$\lg \frac{[\text{O III}] \lambda 500.7}{\text{H}\beta} = \frac{0.61}{\lg \frac{[\text{N II}] \lambda 658.4}{\text{H}\alpha} - 0.47} + 1.19. \quad (4.1)$$

Эта кривая показана на рис. 4.2 штриховой линией.

Кауфманн и др. [241] нашли иное положение кривой, разделяющей положения активных галактических ядер и фотоионизационных областей Н II на диаграмме “чайка”:

$$\lg \frac{[\text{O III}]\lambda 500.7}{\text{H}\beta} = \frac{0.61}{\lg \frac{[\text{N II}]\lambda 658.4}{\text{H}\alpha} - 0.05} + 1.3. \quad (4.2)$$

Эта кривая показана на рис. 4.2 сплошной линией.

В работе Стасинской и др. [486] найдено, что граница между положениями активных галактических ядер и областей Н II может быть аппроксимирована соотношением

$$\begin{aligned} y &= (-30.787 + 1.1358x + 0.27297x^2) \text{th}(5.7409x) - \\ &\quad - 31.093, \\ y &= \lg([\text{O III}]\lambda 500.7/\text{H}\beta), \\ x &= \lg([\text{N II}]\lambda 658.4/\text{H}\alpha). \end{aligned} \quad (4.3)$$

Кривая, соответствующая этому уравнению, показана пунктирной линией на рис. 4.2. Видно, что полученные в разных исследованиях кривые, разделяющие положения активных галактических ядер и фотоионизационных областей Н II на диаграмме “чайка”, сильно различаются между собой.

4.3. ff -соотношение

Из существования фундаментальной последовательности спектральных характеристик областей Н II можно ожидать, что интенсивности небулярных и авроральных линий кислорода в спектрах областей Н II должны быть связаны между собой. В работе [391] было показано, что действительно есть соотношение между интенсивностями небулярных и авроральных линий (flux-flux, ff -соотношение) кислорода в спектрах областей Н II. Наличие ff -соотношения можно предположить на основе схематического рассмотрения закона сохранения энергии свободных электронов.¹ Свободные электроны возникают при фотоионизации атомов и исчезают при рекомбинации. Так как в областях

¹Методы определения электронной температуры туманности, основанные на законе сохранения энергии свободных электронов, были предложены

Н II водород является наиболее обильным элементом и основным поставщиком свободных электронов, то можно рассматривать ионизации и рекомбинации только водорода. При возникновении в момент фотоионизации τ_i свободный электрон приносит в туманность среднюю энергию e_{τ_i} , которая зависит от жесткости ионизирующего излучения hir (hardness of ionization radiation), т. е. $e_{\tau_i} = f(hir)$. При исчезновении в момент рекомбинации τ_r свободный электрон уносит из туманности среднюю энергию e_{τ_r} , которая зависит от электронной температуры туманности t_e , т. е. $e_{\tau_r} = f(t_e)$. В результате этих двух процессов за единицу времени в туманность притекает энергия E^+ :

$$E^+ = e_{\tau_i} N_i - e_{\tau_r} N_r, \quad (4.4)$$

где N_i — число ионизаций в единицу времени в туманности, N_r — число рекомбинаций.

За время жизни в туманности свободные электроны расходуют свою энергию несколькими способами [21]. Основная часть энергии свободных электронов тратится на возбуждение нижних энергетических уровней ионов кислорода, азота, серы и других элементов и уносится из туманности в виде излучения туманности в запрещенных линиях. Часть энергии свободных электронов тратится на свечение туманности в непрерывном спектре при свободно-свободных переходах. Некоторая часть энергии свободных электронов может тратиться на возбуждение атомов водорода и теряться при взаимодействии с пылинками. Важным является факт, что количество энергии, которое свободные электроны теряют каждым путем, зависит от электронной температуры туманности. Другими словами, вклад каждого механизма в полное количество энергии, теряемой свободными электронами всеми способами, определяется электронной температурой туманности. Тогда полное количество энергии, теряемое свободными электронами всеми способами, может быть выражено через потери энергии свободными электронами каким-либо одним способом и некоторую функцию электронной температуры туманности, которая определяет вклад данного механизма в полные

ны Соболевым [21] и Проником [20]. Эти методы пока не нашли широкого применения для определения электронных температур областей Н II, так как для их использования необходимо знать либо распределение энергии в коротковолновой части спектра ионизирующей звезды, либо содержание кислорода в области Н II

потери энергии. Учитывая, что основная доля потерь энергии свободными электронами приходится на свечения туманности в запрещенных линиях кислорода, полные потери энергии свободными электронами выразим через поток энергии от туманности в линиях [O III] λ 495.9, 500.7:

$$E^- = f(t_e)F_{[\text{O III}]\lambda 495.9, 500.7}, \quad (4.5)$$

где функция $f(t_e)$ описывает вклад излучения туманности в линиях кислорода [O III] λ 495.9, 500.7 в полное количество энергии, теряемое свободными электронами всеми способами.

Объединяя уравнение (4.4) и уравнение (4.5), закон сохранения энергии для свободных электронов

$$E^+ = E^- \quad (4.6)$$

можно записать в виде

$$e_{\tau_i} N_i - e_{\tau_r} N_r = f(t_e)F_{[\text{O III}]\lambda 495.9, 500.7}. \quad (4.7)$$

Учитывая, что число ионизаций равно числу рекомбинаций:

$$N_i = N_r, \quad (4.8)$$

и что число рекомбинаций может быть выражено через количество H_β -квантов от туманности или через поток энергии от туманности в линии H_β :

$$N_r = c(t_e)F_{H_\beta}, \quad (4.9)$$

уравнение (4.7) можно записать в виде

$$e_{\tau_i} c(t_e)F_{H_\beta} - e_{\tau_r} c(t_e)F_{H_\beta} = f(t_e)F_{[\text{O III}]\lambda 495.9, 500.7}. \quad (4.10)$$

Поделив на F_{H_β} и используя общепринятое обозначение $R_3 = F_{[\text{O III}]\lambda 495.9, 500.7}/F_{H_\beta}$, уравнение (4.10) представим в виде

$$e_{\tau_i} c(t_e) - e_{\tau_r} c(t_e) = f(t_e)R_3. \quad (4.11)$$

Исходя из уравнения (3.13), для электронной температуры имеем $t_{3,0} = f(Q_{3,0}) = f(R, R_3)$. Величина e_{τ_r} является функцией электронной температуры. Учитывая, что электронная температура

может быть выражена через интенсивности линий кислорода R и R_3 , величина e_{τ_r} также может быть выражена через интенсивности линий кислорода R и R_3 , т. е. $e_{\tau_r} = f(R, R_3)$. Величина e_{τ_i} является функцией жесткости ионизирующего излучения. Степень возбуждения туманности характеризуется параметром возбуждения $P = R_3/(R_3 + R_2)$, который определяется как вклад излучения запрещенной линии R_3 дважды ионизованного кислорода в суммарное излучение кислорода в запрещенных линиях $R_3 + R_2$. Очевидно, что параметр возбуждения туманности зависит от жесткости ионизирующего излучения, т. е. $P = f(h\nu, t_e)$. Сравнивая две зависимости $e_{\tau_i} = f(h\nu)$ и $P = f(h\nu, t_e)$, полагаем, что $e_{\tau_i} = f(h\nu)$ может быть выражена через параметр возбуждения туманности P и электронную температуру t_e , т. е. $e_{\tau_i} = f(P, t_e)$. Так как параметр возбуждения также выражен через интенсивности линий кислорода R_2 и R_3 , а электронная температура — через интенсивности линий кислорода R и R_3 , то $e_{\tau_i} = f(P, t_e) = f(R_3, R_2, R)$. С учетом этого из уравнения (4.11) следует, что должны существовать функциональные зависимости

$$R = f(R_2, R_3) \text{ или } R_3 = f(R, R_2), \text{ или } R_2 = f(R, R_3) \quad (4.12)$$

между интенсивностями небулярных и авроральных линий кислорода в спектрах областей Н II.

Для того чтобы найти выражения для зависимостей между интенсивностями небулярных и авроральных линий кислорода в спектрах областей Н II, необходимо знать распределение энергии в коротковолновой части спектра ионизирующей звезды и адекватно описать все физические процессы, протекающие в туманности. К сожалению, как модели звездных атмосфер, так и модели областей Н II пока далеки от совершенства. Поэтому пока не удается вывести теоретически указанные зависимости строго.

Есть другой подход к решению этой задачи, который можно назвать эмпирическим. Если ожидаемые зависимости между интенсивностями небулярных и авроральных линий кислорода в спектрах областей Н II имеют место, то измеренные интенсивности линий в спектрах областей Н II должны следовать этим зависимостям. Анализ соотношений между измеренными интенсивностями линий в спектрах областей Н II позволяет подтвердить (или опровергнуть) наличие ожидаемых зависимостей. К настоящему времени известно несколько десятков спектров внегалактических областей Н II с высоким содержанием кислорода,

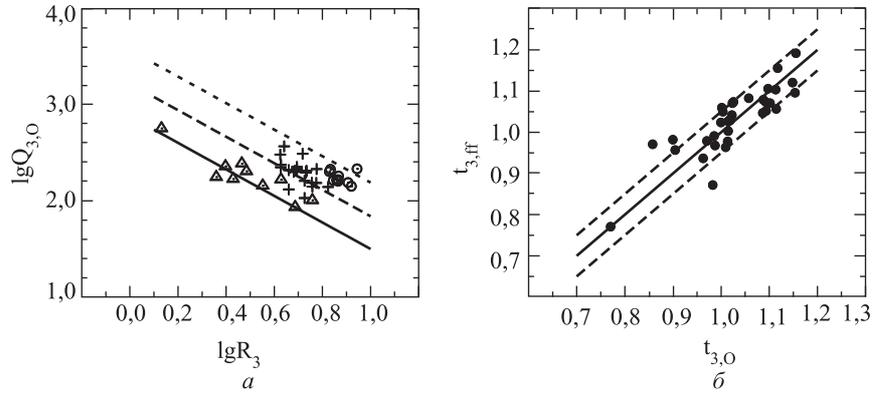


Рис. 4.3. Диаграмма $Q_{3,0} - R_3$ (а). Области Н II с разными значениями параметра возбуждения P : треугольники — области Н II с $0.6 > P > 0.3$, плюсы — области Н II с $0.8 > P > 0.6$, кружки — области Н II с $1.0 > P > 0.8$, линии — найденная зависимость (4.15) для трех значений P : сплошная — для $P = 0.33$, штриховая — для $P = 0.66$, пунктирная — для $P = 1$; б) сравнение электронных температур, найденной по измеренным и вычисленным значениям $Q_{3,0}$. Сплошная линия соответствует равным значениям температур; пунктирные линии смещены на ± 500 К

в которых более или менее надежно измерены слабые авроральные линии R . Компиляция этих данных использовалась в работах [391, 404] для установления зависимости между измеренными интенсивностями линий при помощи диаграмм $R - R_3$ и $R - R_{23}$ и $Q_{3,0} - R_3$. На рис. 4.3, а приведена диаграмма $Q_{3,0} - R_3$ для измеренных интенсивностей линий в спектрах областей Н II. Данные для областей Н II с разными значениями параметра возбуждения P представлены разными символами. Эмпирические данные подтверждают ожидаемую зависимость между измеренными интенсивностями небулярных и авроральных линий кислорода в спектрах областей Н II.

Измеренные интенсивности линий можно использовать для нахождения эмпирического ff -соотношения. Анализ рис. 4.3, а показывает, что в первом приближении зависимость между интенсивностями линий в спектрах областей Н II можно описать

простым выражением:

$$\lg Q_{3,0} = a_0 + a_1 P + a_2 \lg R_3. \quad (4.13)$$

Коэффициенты в уравнении (4.13) можно определить из требования, чтобы среднее значение разности $\Delta Q_{3,0}$ между вычисленными ($Q_{3,0}^{\text{ff}}$) и измеренными ($Q_{3,0}^{\text{obs}}$) величинами

$$\Delta Q_{3,0} = \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n ((Q_{3,0}^{\text{ff}})_j - (Q_{3,0}^{\text{obs}})_j)^2 \right)^{1/2} \quad (4.14)$$

было минимальным. Это приводит к выражению

$$\lg Q_{3,0} = 2.54 + 1.03 P - 1.38 \lg R_3. \quad (4.15)$$

Линии на рис. 4.3, *a* показывают найденную зависимость (4.15) для трех значений параметра возбуждения туманности P .

Таким образом, с помощью уравнения (4.15) можно вычислить отношение $Q_{3,0} = R_3/R$ (и следовательно, интенсивность авроральной линии R) по измеренным интенсивностям небулярных линий R_3 и R_2 в спектре области Н II. Но если определено значение $Q_{3,0}$, то электронная температура в области Н II может быть найдена при помощи классического выражения (3.13). Насколько надежны электронные температуры, найденные таким путем? На рис. 4.3, *b* сравниваются электронные температуры, найденные по измеренным и вычисленным значениям $Q_{3,0}$. Видно, что электронные температуры, найденные при помощи ff -соотношения, согласуются с электронными температурами, найденными по измеренным $Q_{3,0}$.

В работах [404,405] ff -соотношение использовалось для определения содержания кислорода в спиральных галактиках высокой светимости, в которых ожидается максимальное содержание кислорода. Было найдено, что максимальное содержание кислорода в галактиках примерно в два раза больше содержания кислорода на Солнце (см. п. 6.3.2).

Зависимости между интенсивностями небулярных и авроральных линий кислорода в спектрах областей Н II могут быть использованы не только для оценки интенсивности авроральной линии по измеренным небулярным линиям. Беспрецедентная по

объему база спектральных данных получена в рамках цифрового обзора неба Sloan (SDSS). Однако при определении содержания кислорода в областях H II в близких галактиках возникает проблема, связанная с тем, что коротковолновая граница спектров SDSS лежит вблизи 380.0 нм. Поэтому спектры SDSS для близких объектов (с красным смещением $z \leq 0.024$) не содержат небулярной линии кислорода [O II] λ 372.7 нм, которая используется для определения содержания иона O^+ в области H II. В работах [19, 28, 402] интенсивность небулярной линии кислорода [O II] λ 372.7 нм была найдена по измеренным интенсивностям линий кислорода [O III] λ 495.9, 500.7 и [O III] λ 436.3 при помощи f/f -соотношения.

Глава 5

Метод сильных линий. Одномерные калибровки

5.1. Два типа калибровок

Существование фундаментальной последовательности спектральных характеристик областей Н II дает возможность оценить электронную температуру и содержание тяжелых элементов в области Н II, даже если в ее спектре невозможно измерить слабые авроральные линии, необходимые для прямого определения электронной температуры классическим методом. Так как интенсивности эмиссионных линий в спектре области Н II зависят от ее химического состава и от электронной температуры внутри туманности, то некоторые комбинации интенсивностей сильных линий могут служить достаточно хорошими индикаторами металличности и электронной температуры в туманности. Можно найти соотношение, связывающее значение индикатора металличности (или температуры) с содержанием тяжелых элементов (или электронной температурой) в туманности. Другими словами, значения выбранного индикатора металличности (электронной температуры) могут быть прокалиброваны в шкале металличности (электронной температуры). Такой подход к определению содержания тяжелых элементов (электронной температуры) в областях Н II получил название “метод сильных линий”, так как в качестве индикатора металличности (температуры) используется комбинация интенсивностей сильных эмиссионных линий в

спектре области Н II. Вариант метода для конкретно выбранного индикатора металличности обычно называют калибровкой. В большей части калибровок получено только соотношение для определения содержания кислорода в областях Н II. В некоторых калибровках получены также соотношения для определения содержания азота и/или электронной температуры.

Калибровки различаются между собой двумя характеристиками. Во-первых, в калибровках могут использоваться разные индикаторы металличности (температуры). Во-вторых, соотношения между значениями индикатора металличности (температуры) и содержания тяжелых элементов (электронной температуры) калибруются двумя разными способами. В калибровках первого типа это соотношение устанавливается на основе реальных областей Н II, в которых содержание тяжелых элементов определено при помощи классического T_e -метода. Такие калибровки называются эмпирическими. В калибровках второго типа соотношение устанавливается на основе моделей областей Н II. Такие калибровки называются теоретическими (или модельными).

В принципе значения металличностей (температур), найденные при помощи эмпирических и теоретических калибровок, должны совпадать, или по крайней мере быть близкими друг к другу. В работе [390] проведено сравнение содержаний кислорода, найденных при помощи двух теоретических калибровок (калибровка, построенная Кобульницким и др. [265] с использованием сетки моделей областей Н II МакГоха [313], и калибровка, построенная Кьюли и Допита [253] на базе собственных моделей областей Н II) и эмпирической калибровки из [385, 386]. Значения содержаний кислорода, определенные при помощи теоретической калибровки из [265], и значения, найденные при помощи эмпирической калибровки, удовлетворительно согласуются между собой для областей Н II низкой металличности и существенно различаются для областей Н II высокой металличности (низкой электронной температуры). Значения содержаний кислорода, найденные при помощи теоретической калибровки из [253], существенно отличаются как от значений, определенных с использованием эмпирической калибровки, так и от значений, вычисленных при помощи теоретической калибровки из [265]. При-

чем различия наблюдаются как для областей Н II высокой металличности, так и для областей Н II низкой металличности.

Итак, эмпирическая шкала металличности областей Н II, установленная на основе реальных областей Н II, в которых содержания тяжелых элементов определено при помощи T_e -метода, не согласуется с теоретической шкалой металличности, установленной на основе фотоионизационных моделей областей Н II. Какая шкала металличности является более достоверной и предпочтительнее? С одной стороны, теоретические шкалы металличности областей Н II, установленные на основе разных фотоионизационных моделей областей Н II, не согласуются между собой, т. е. единой теоретической шкалы металличности областей Н II нет. С другой, в предыдущей главе были приведены весомые аргументы в пользу того, что электронная температура и содержания тяжелых элементов, найденные при помощи классического T_e -метода, являются достоверными. Поэтому реалистичность всех калибровок, рассматриваемых ниже, мы будем оценивать, сравнивая содержания кислорода, найденные при помощи данной калибровки, с содержаниями кислорода, определенными с использованием классического T_e -метода, для выборки областей Н II, в которых надежно измерены слабые авроральные линии.

5.2. Одномерные R_{23} -калибровки

В 1979 году Пейджел и др. [358] предложили использовать суммарную интенсивность сильных линий кислорода $R_{23} = ([\text{O II}] \lambda 372.7, 372.9 + [\text{O III}] \lambda 495.9, 500.7) / \text{H}\beta$ для оценки содержания кислорода в областях Н II, для которых не удастся измерить слабые авроральные линии кислорода, и следовательно, невозможно использовать прямой метод. Другими словами, они предложили калибровку $\text{O}/\text{H} = f(R_{23})$.

Наблюдаемая диаграмма $R_{23} - \text{O}/\text{H}$ для областей Н II, в которых содержание кислорода определено классическим методом, представлена на рис. 5.1. Видно, что нет однозначного соответствия между значением индикатора металличности R_{23} и содержанием кислорода O/H . Зависимость $\text{O}/\text{H} = f(R_{23})$ распадается на две ветви, которые принято называть нижней и верхней ветвями диаграммы $R_{23} - \text{O}/\text{H}$. Необходимо найти отдельное соот-

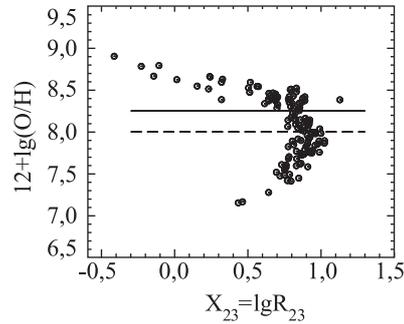


Рис. 5.1. Наблюдаемая диаграмма $R_{23} - O/H$ для областей Н II, в которых содержания кислорода определены прямым методом (выборка КТ118, см. п. 6.2.2).

ношение $O/H = f(R_{23})$ для каждой ветви. Обычно строят только соотношение $O/H = f(R_{23})$ для верхней ветви, т. е. для областей Н II высокой металличности.

Используя в качестве калибровочных точек области Н II с содержаниями кислорода, найденными прямым методом, и фотоионизационные модели областей Н II, Эдмундс и Пейджел [133] получили зависимость $O/H = f(R_{23})$ в форме таблицы. Для более удобного использования эту зависимость для верхней ветви диаграммы $R_{23} - O/H$ можно аппроксимировать полиномом

$$\begin{aligned}
 12 + \lg(O/H)_{EP} &= 9.342 - 0.454x - 0.843x^2 - \\
 &- 0.401x^3 + 0.545x^4, \\
 x &= \lg R_{23},
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

а для нижней ветви диаграммы — прямой линией

$$12 + \lg(O/H)_{EP} = 1.81 \lg R_{23} + 6.24.
 \tag{5.2}$$

Предложенный Пейджелом и др. индикатор металличности R_{23} получил широкое распространение. Позднее разными авторами было предложено несколько вариантов R_{23} -калибровки.

Скиллман [465] получил соотношение $O/H = f(R_{23})$ для нижней ветви диаграммы $R_{23} - O/H$, используя в качестве калиб-

ровочных точек области Н II с содержаниями кислорода, найденными прямым методом, и фотоионизационные модели областей Н II. Так же, как Эдмундс и Пейджел [133], он получил линейное соотношение

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{sk} = 1.21 \lg R_{23} + 6.64. \quad (5.3)$$

Однако коэффициенты в уравнении Скиллмана заметно отличаются от коэффициентов в уравнении Эдмундса и Пейджела.

Допита и Эванс [123] рассчитали сетку фотоионизационных моделей областей Н II и нашли зависимость $\text{O}/\text{H} = f(R_{23})$ для верхней ветви диаграммы $R_{23} - \text{O}/\text{H}$. Данные Допита и Эванса можно аппроксимировать полиномом

$$\begin{aligned} 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{DE} &= 9.072 - 0.170x - 0.0037x^2 - \\ &- 0.371x^3 - 0.330x^4, \\ x &= \lg R_{23}. \end{aligned} \quad (5.4)$$

Мак-Колл, Рыбский и Шиелдс [312] также рассчитали сетку фотоионизационных моделей областей Н II и нашли зависимость $\text{O}/\text{H} = f(R_{23})$ для верхней ветви диаграммы $R_{23} - \text{O}/\text{H}$. Приведенные ими табличные данные хорошо аппроксимируются полиномом

$$\begin{aligned} 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{MRS} &= 9.327 - 0.171x + 0.113x^2 - \\ &- 0.561x^3 - 0.593x^4, \\ x &= \lg R_{23}. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Зарицкий, Кенникатт и Хахра [557] измерили интенсивности сильных линий в спектрах 159 областей Н II в 14 спиральных галактиках. Для каждой области Н II они определили три значения содержания кислорода при помощи трех описанных выше вариантов R_{23} -калибровки из [123, 133, 312]. Среднее для трех значений они приняли как истинное содержание кислорода в области Н II, а различие между тремя значениями рассматривали как ошибку определения содержания. Они определили, что соотношение между найденными средними значениями и измеренными

интенсивностями сильных линий хорошо аппроксимируется соотношением

$$\begin{aligned} 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{ZKH} &= 9.265 - 0.33x - 0.202x^2 - \\ &- 0.207x^3 - 0.333x^4, \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$x = \lg R_{23}.$$

Зарицкий, Кенникатт и Хахра отметили, что дисперсия содержаний, найденных при помощи трех калибровок, значительно превышает ошибку, обусловленную неточностью измерений сильных линий.

Еще один вариант R_{23} -калибровки был предложен Тремонти и др. [514]:

$$\begin{aligned} 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{Tr} &= 9.185 - 0.313x - \\ &- 0.264x^2 - 0.321x^3, \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$x = \lg R_{23}.$$

R_{23} -калибровка для областей Н II нижней ветви диаграммы $R_{23} - \text{O}/\text{H}$ была предложена Уином и др. [551]:

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{Yin} = 6.486 + 1.401 \lg R_{23}. \quad (5.8)$$

В качестве калибровочных точек использовали галактики из обзора SDSS, голубые компактные галактики и отдельные области Н II, в которых содержания кислорода определяли при помощи классического T_e -метода. Список калибровочных точек содержит около 700 объектов.

R_{23} -калибровки из работ Эдмундса и Пейджела [133], Допита и Эванса [123], Мак-Колла и др. [312], Тремонти и др. [514], Скиллмана [465], Уина и др. [551] представлены на рис. 5.2 вместе с положениями областей Н II, в которых содержания кислорода определены классическим T_e -методом. На рисунке хорошо видно, что полученные соотношения $\text{O}/\text{H} = f(R_{23})$ не согласуются друг с другом. Значения содержаний кислорода, найденные при помощи разных вариантов этого соотношения, могут различаться более чем в два раза.

Видно также, что соотношения $O/H = f(R_{23})$ лежат выше области, в которой расположены области Н II с надежно определенными содержаниями кислорода. R_{23} -калибровки дают содержания кислорода, которые в 2–3 раза выше, чем содержания кислорода, найденные при помощи классического T_e -метода. Этот факт отмечен во многих работах. Так, один из родоначаль-

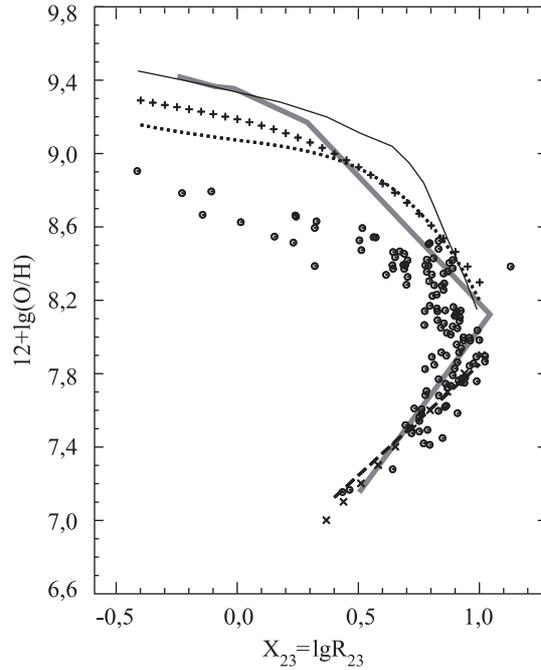


Рис. 5.2. Диаграмма $R_{23} - O/H$. Кружки — положения областей Н II, в которых содержания кислорода надежно определены классическим T_e -методом (те же данные, что и на рис. 5.1). Толстая линия — R_{23} -калибровки [133], тонкая линия — [312], пунктир — [123], штриховая линия — [465], плюсы — [514], крестики — [551]

ников R_{23} -калибровок Пейджел двадцать лет спустя писал об их калибровке следующее. “Наша калибровка основывается на модельной оценке содержания кислорода в области Н II Searle 5

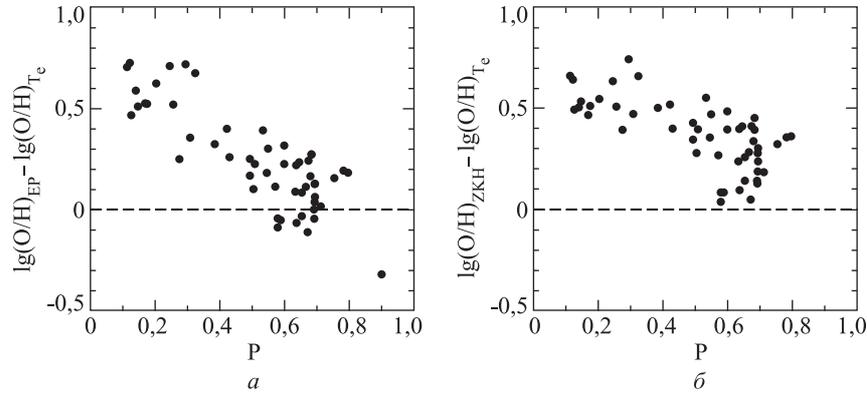


Рис. 5.3. Разница между содержаниями кислорода, найденными при помощи R_{23} -калибровок [133] (а) и [557] (б), и содержаниями кислорода, определенными T_e -методом, в зависимости от параметра возбуждения туманности P

в диске спиральной галактики М 101, полученной Шиелдсом и Сирлом [461]. Эта оценка не подтвердилась в более поздних исследованиях: содержание кислорода там оказалось значительно ниже. Таким образом, наша калибровка дает завышенные содержания кислорода в областях Н II высокой металличности” [357].

На рис. 5.3 показана разница между содержаниями кислорода, найденными при помощи R_{23} -калибровок Эдмундса и Пейджела [133] (а) и Зарицкого, Кенникатта, Хахра [557] (б), и содержаниями кислорода, определенными T_e -методом, в зависимости от параметра возбуждения туманности P . Хорошо видно, что разница между $(\text{O}/\text{H})_{R_{23}}$ и $(\text{O}/\text{H})_{T_e}$ коррелирует с параметром возбуждения туманности.

Таким образом, использование суммарной интенсивности R_{23} сильных линий кислорода для определения содержания кислорода O/H в области Н II имеет два недостатка. Во-первых, точность таких оценок низка. Более того, содержания кислорода, найденные при помощи R_{23} -калибровок, больше содержаний кислорода, определенных прямым методом, в 2-3 раза. Во-вторых, соотношение распадается на две ветви, что затрудняет его применение, так как необходимо априори знать, к какой ветви принадлежит

рассматриваемая область Н II. Поэтому усилия были направлены на поиски другого индикатора (другой комбинации сильных линий), который был бы лишен указанных недостатков.

5.3. Одномерные N-калибровки

Аллоин и др. [36] показали, что в методе сильных линий можно использовать не только кислородные линии, но и сильные линии азота. Анализируя спектры областей Н II, в которых электронная температура определена по измеренной интенсивности авроральной линии [O III] λ 436.3, и модели областей Н II из [479], они нашли, что отношение интенсивностей эмиссионных линий R_3/N_2 коррелирует с электронной температурой туманности. Аллоин и др. предложили использовать отношение интенсивностей эмиссионных линий R_3/N_2 как индикатор электронной температуры t_3 в туманности $t_3 = f(R_3/N_2)$ и применили предложенный подход для определения химического состава в областях Н II с низкой температурой. В дальнейшем были предложены разные варианты метода сильных линий, в которых используются интенсивности сильных линий азота.

В работе [491] было обнаружено, что для областей Н II высокой металличности ($12 + \lg(O/H) > 8.3$) наблюдается тесная корреляция между содержанием кислорода в туманности и интенсивностью линии ионизованного азота N_2/H_α в ее спектре. Эта корреляция описывается линейной зависимостью

$$\begin{aligned} 12 + \lg(O/H)_{N_2} &= 8.31 + 0.91 x, \\ x &= N_2/H_\alpha. \end{aligned} \quad (5.9)$$

Интенсивность N_2 линии азота нормируется на интенсивность линии водорода H_α . Так как длины волн линий азота N_2 ($\lambda = 654.8$ нм и $\lambda = 658.4$ нм) и линии водорода H_α ($\lambda = 656.5$ нм) близки, то отношение N_2/H_α не зависит от величины межзвездного поглощения. В работе [417] эта калибровка была распространена на объекты низкой металличности и было предложено единое для всего интервала металличностей областей Н II соотношение

$$\begin{aligned} 12 + \lg(O/H)_{N_2} &= 8.89 + 0.53 x, \\ x &= \lg(N_2/H_\alpha). \end{aligned} \quad (5.10)$$

Ван Зее и др. [521, 522] получили спектры большого числа областей Н II в неправильных и спиральных галактиках. Они нашли, что отношение интенсивностей линий N_2/H_α в спектрах областей Н II увеличивается с увеличением содержания кислорода. Причем, в отличие от суммарной интенсивности сильных линий кислорода R_{23} , отношение интенсивностей линий N_2/H_α увеличивается с металличностью на всем интервале металличностей областей Н II. Ван Зее и др. [522] получили следующее соотношение:

$$\begin{aligned} 12 + \lg(O/H)_{N_2} &= 9,36 + 1,02x, \\ x &= \lg(N_2/H_\alpha). \end{aligned} \quad (5.11)$$

Они отметили, что точность найденной калибровки довольно малая. Типичная ошибка определения содержания кислорода составляет 0.2 dex и больше.

Для построения калибровки $O/H = f(N_2)$ Дениколо, Р. Терлевич и Е. Терлевич [116] собрали большую выборку спектральных данных и данных о химическом составе областей Н II в неправильных и спиральных галактиках. Они также рассчитали сетку фотоионизационных моделей областей Н II при помощи программы CLOUDY [147]. На основе этих данных они пришли к выводу, что соотношение $O/H = f(N_2)$ является линейным во всем диапазоне металличностей ($7.2 < 12 + \lg(O/H) < 9.1$) областей Н II и может быть записано в виде

$$\begin{aligned} 12 + \lg(O/H)_{N_2} &= 9.12 + 0.73x, \\ x &= \lg([N II]\lambda 658.4/H_\alpha). \end{aligned} \quad (5.12)$$

Однако разброс значений O/H для фиксированного отношения $[N II] \lambda 658.4/H_\alpha$ для их выборки областей Н II составляет 0.6 dex и больше (до порядка величины). Часть разброса значений O/H может быть обусловлена тем, что содержания кислорода в областях Н II из их выборки не являются однородными, так как содержания были определены разными методами (T_e -метод, R_{23} -калибровка, S_{23} калибровка).

Петтини и Пейджел [380] провели ревизию данных, которые Дениколо, Р. Терлевич и Е. Терлевич [116] использовали для нахождения $O/H = f(N_2)$ калибровки. В свой список калибровочных точек они включили из списка Дениколо, Р. Терлевич и

Е. Терлевич только области Н II, в которых содержания кислорода определены T_e -методом или при помощи детальных фотоионизационных моделей, и дополнили список данными из двух более поздних работ [249, 466]. Список калибровочных точек Петтини и Пейджела содержит 137 внегалактических областей Н II. Содержания кислорода в 131 области Н II определены T_e -методом и в 6 областях Н II при помощи детальных фотоионизационных моделей. Методом наименьших квадратов Петтини и Пейджел получили единое для интервала $-2.5 < \lg([\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}_\alpha) < -0.3$ соотношение

$$\begin{aligned} 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{N_2} &= 8.90 + 0.57x, \\ x &= \lg([\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}_\alpha), \end{aligned} \quad (5.13)$$

или

$$\begin{aligned} 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{N_2} &= 9.37 + 2.03x + 1.26x^2 + 0.32x^3, \\ x &= \lg([\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}_\alpha). \end{aligned} \quad (5.14)$$

Содержания кислорода, найденные при помощи линейного и кубического соотношений, близки в диапазоне значений индикатора $-2.0 < \lg([\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}_\alpha) < -0.5$ и отличаются для значений индикатора за пределами этого диапазона. Петтини и Пейджел отметили, что найденные ими N-калибровки (уравнения (5.13) и (5.14)) позволяют оценить содержание кислорода в областях Н II с точностью до множителя 2.5.

Петтини и Пейджел построили и другую N-калибровку, в которой в качестве индикатора металличности используется отношение $R_3/N_2 = \lg([\text{O III}] \lambda 500.7/\text{H}_\beta)/([\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}_\alpha)$. В диапазоне значений $-1 < \lg(R_3/N_2) < 1.9$ была получена довольно тесная корреляция между R_3/N_2 и O/H. Методом наименьших квадратов они нашли следующее соотношение:

$$\begin{aligned} 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{R_3/N_2} &= 8.73 - 0.32x, \\ x &= \lg \frac{[\text{O III}] \lambda 500.7/\text{H}_\beta}{[\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}_\alpha}. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Для значений $\lg(R_3/N_2) < 1.9$ с помощью уравнения (5.15) можно оценить содержание кислорода с точностью ~ 0.25 dex. При

больших значениях ($\lg(R_3/N_2) > 2$) отношение R_3/N_2 нельзя использовать для определения металличности.

Стасинска [484] использовала 740 калибровочных точек для нахождения N-калибровок. В качестве калибровочных точек использовались области H II, в которых содержания кислорода определены T_e -методом или при помощи параметрической R_{23} -калибровки (см. следующую главу). Стасинска нашла, что кубическое соотношение $O/H = f(N_2)$ Петтини и Пейджела (уравнение (5.14)) хорошо соответствует ее набору калибровочных точек. Она также пришла к выводу, что для областей H II высокой металличности (для малых значений R_3/N_2) существует довольно сильная корреляция между R_3/N_2 и O/H, которая может быть представлена линейным соотношением

$$\begin{aligned} 12 + \lg(O/H)_{R_3/N_2} &= 8.55 - 0.25x, \\ x &= \lg([O \text{ III}] \lambda 500.7 / [N \text{ II}] \lambda 658.4). \end{aligned} \quad (5.16)$$

Соотношение теряет силу для больших значений R_3/N_2 . Следует обратить внимание на то, что индикатор металличности в работе Стасинской $R_3/N_2 = \lg([O \text{ III}] \lambda 500.7 / [N \text{ II}] \lambda 658.4)$ несколько отличается от индикатора металличности в работе Петтини и Пейджела $R_3/N_2 = \lg([O \text{ III}] \lambda 500.7 / H_\beta) / ([N \text{ II}] \lambda 658.4 / H_\alpha)$.

Брезолин [67] построил N-калибровку, используя в качестве индикатора металличности отношение $[N \text{ II}] \lambda 658.4 / R_2$ и области H II, в которых содержания кислорода определены T_e -методом, в качестве калибровочных точек. Он получил следующее соотношение:

$$\begin{aligned} 12 + \lg(O/H)_{N_2/R_2} &= 8.66 + 0.36x - 0.17x^2, \\ x &= \lg([N \text{ II}] \lambda 658.4 / R_2). \end{aligned} \quad (5.17)$$

Брезолин показал, что фотоионизационные модели областей H II из [124] дают содержания кислорода примерно на 0.2 dex больше, чем найденное им соотношение.

Две N-калибровки получены Уином и др. [551]. В качестве калибровочных точек использовались объекты, в которых содержания кислорода определены при помощи T_e -метода. Список калибровочных точек включает 531 галактику из обзора SDSS и

164 области Н II и голубые компактные галактики из других источников. Для индикатора металличности $\lg([\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}_\alpha)$ они получили соотношение

$$\begin{aligned} 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{N_2} &= 9.263 + 0.836 x, \\ x &= \lg([\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}_\alpha). \end{aligned} \quad (5.18)$$

Дисперсия для этого соотношения составляет 0.159 dex. Для индикатора металличности $\lg([\text{O III}] \lambda 500.7/\text{H}_\beta)/([\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}_\alpha)$ они получили соотношение

$$\begin{aligned} 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{R_3/N_2} &= 8.203 + 0.630 x - 0.327 x^2, \\ x &= \lg \frac{[\text{O III}] \lambda 500.7/\text{H}_\beta}{[\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}_\alpha}. \end{aligned} \quad (5.19)$$

Это соотношение применимо в интервале значений индикатора металличности $1.4 < \lg([\text{O III}] \lambda 500.7/\text{H}_\beta)/([\text{N II}] \lambda 658.4/\text{H}_\alpha) < 3$. Дисперсия для этого соотношения составляет 0.199 dex.

Для оценки точности содержаний кислорода, которые дают описанные выше N калибровки, опять будем использовать выборку КТ118 областей Н II, в которых содержания кислорода надежно определены классическим T_e -методом (см. п. 6.2.2). На рис. 5.4 приведено сравнение содержаний кислорода, найденных при помощи N-калибровок из [67, 116, 380, 484, 522, 551], и содержаний кислорода $(\text{O}/\text{H})_{T_e}$ для этой выборки областей Н II. Традиционно N-калибровки строили для определения содержания кислорода в области Н II. Однако можно построить N-калибровки и для определения других характеристик областей Н II. Более того, в пионерской работе Аллоин и др. [36] было предложено использовать отношение интенсивностей эмиссионных линий R_3/N_2 как индикатор электронной температуры в туманности. В работе [508] величины $X = N_2$, N_2/R_2 и N_2/R_3 использованы как индикаторы электронной температуры и содержания азота в туманности. Соотношения $\text{N}/\text{H} = f(X)$ и $t_2 = f(X)$ представлены полиномами третьей степени. Коэффициенты полиномов находили методом наименьших квадратов. В качестве калибровочных точек использовали области Н II в близких галактиках с измеренными авроральными линиями, и следовательно, с электронными температурами и содержаниями азота, найденными

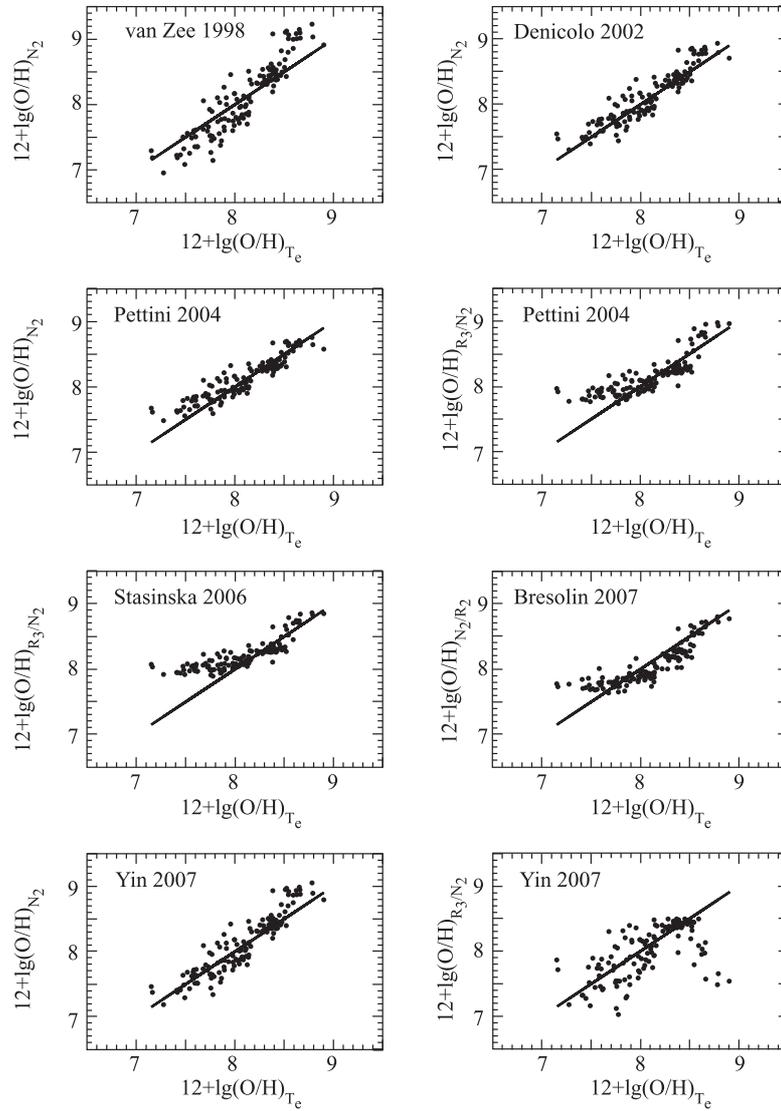


Рис. 5.4. Сравнение содержаний кислорода, найденных при помощи N-калибровок [67, 116, 380, 484, 522, 551], и содержаний кислорода $(\text{O}/\text{H})_{T_e}$, определенных классическим T_e -методом, для областей II с надежными значениями $(\text{O}/\text{H})_{T_e}$ (выборка КТ118). Сплошная линия соответствует равным значениям содержаний кислорода

классическим T_e -методом. Соотношения $N/H = f(X)$ и $t_2 = f(X)$ были получены для областей Н II высокой ($12 + \lg(O/H) > 8.2$) металличности. Для компактности записи уравнений будем использовать обозначение $(N/H)^* = 12 + \lg(N/H)$ для содержания азота:

$$\begin{aligned} (N/H)_{N_2}^* &= 7.649 + 1.454x + 0.257x^2 - 0.148x^3, \\ x &= \lg N_2, \end{aligned} \quad (5.20)$$

$$\begin{aligned} (N/H)_{N_2/R_2}^* &= 7.918 + 0.877x - 0.058x^2 + 0.038x^3, \\ x &= \lg(N_2/R_2), \end{aligned} \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned} (N/H)_{N_2/R_3}^* &= 7.526 + 0.521x + 0.062x^2 + 0.014x^3, \\ x &= \lg(N_2/R_3) \end{aligned} \quad (5.22)$$

и обозначение $t^* = t_2$ для электронной температуры:

$$\begin{aligned} t_{N_2}^* &= 0.778 - 0.354x + 0.001x^2 + 0.044x^3, \\ x &= \lg N_2, \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$\begin{aligned} t_{N_2/R_2}^* &= 0.702 - 0.248x + 0.042x^2 + 0.019x^3, \\ x &= \lg(N_2/R_2), \end{aligned} \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned} t_{N_2/R_3}^* &= 0.802 - 0.172x + 0.003x^2 + 0.011x^3, \\ x &= \lg(N_2/R_3). \end{aligned} \quad (5.25)$$

На рис. 5.5, а приведено сравнение содержаний азота, найденных при помощи N-калибровок (уравнения (5.20), (5.21) и (5.22)), и содержаний азота $(N/H)_{T_e}$ для областей Н II из выборки КТ118.

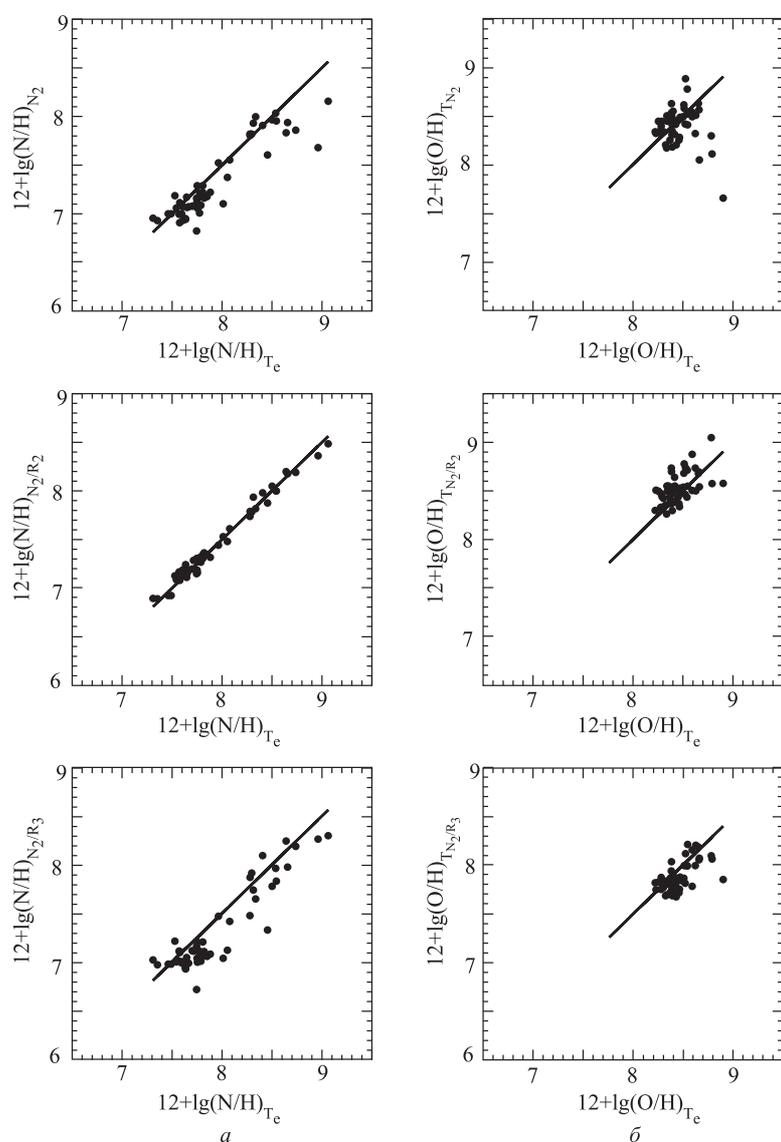


Рис. 5.5. Сравнение содержаний азота (а) и кислорода (б), найденных при помощи N-калибровок из [508], и содержаний, определенных классическим T_c -методом, для областей Н II из выборки КТ118. Сплошная линия соответствует равным значениям содержаний кислорода

С помощью уравнений (5.23), (5.24) и (5.25) можно оценить электронную температуру t_2 туманности. Используя это значение электронной температуры, можно найти содержание кислорода (и других элементов) в туманности при помощи уравнений T_e -метода. На рис. 5.5, б приведено сравнение найденных таким образом содержаний кислорода $(O/H)_{T_e}$ для областей Н II из выборки КТ118.

5.4. Другие одномерные калибровки

В качестве индикаторов металличности областей Н II можно использовать комбинации интенсивностей сильных линий не только кислорода и азота, но и других элементов. Вильчез и Эстебан [527] отметили, что суммарную интенсивность эмиссионных линий серы

$$S_{23} = \frac{[S \text{ II}]\lambda 671.7, 673.1 + [S \text{ III}]\lambda 906.9, 953.2}{H_{\beta}} \quad (5.26)$$

можно использовать как индикатор содержания кислорода в туманности. Обозначение S_{23} для суммарной интенсивности линий серы было предложено по аналогии с обозначением R_{23} для суммарной интенсивности линий кислорода. Следует отметить, что в работе [94] было предложено использовать величину S_{23} как индикатор обилия серы.

Диаз и Перез-Монтеро [120] нашли

$$12 + \lg(O/H)_{S_{23}} = 8.27 + 1.53 \lg S_{23}, \quad (5.27)$$

или

$$12 + \lg(O/H)_{S_{23}} = 8.25 + 1.42 \lg S_{23} + 0.24 (\lg S_{23})^2. \quad (5.28)$$

Ой и Шиелдс [350] определили, что параметр

$$S_{234} = \frac{[S \text{ II}]\lambda 671.7, 673.1 + [S \text{ III}]\lambda 906.9, 953.2 + [S \text{ IV}]\lambda 10.5 \text{ мкм}}{H_{\beta}} \quad (5.29)$$

является лучшим индикатором содержания кислорода, чем параметр S_{23} .

Стасинска [484] предложила использовать как индикаторы металличности области Н II отношение интенсивностей линий дважды ионизованного аргона и дважды ионизованного кислорода $Ar_3/O_3 = [Ar III] \lambda 713.5/[O III] \lambda 500.7$ и отношение интенсивностей линий дважды ионизованной серы и дважды ионизованного кислорода $S_3/O_3 = [S III] \lambda 906.9/[O III] \lambda 500.7$. Для 740 калибровочных точек она получила следующие соотношения:

$$\begin{aligned} 12 + \lg(O/H)_{Ar_3/O_3} &= 8.91 + 0.34x + 0.27x^2 + 0.20x^3, \\ x &= \lg([Ar III]\lambda 713.5/[O III]\lambda 500.7) \end{aligned} \quad (5.30)$$

и

$$\begin{aligned} 12 + \lg(O/H)_{S_3/O_3} &= 8.70 + 0.28x + 0.03x^2 + 0.1x^3, \\ x &= \lg([S III]\lambda 906.9/[O III]\lambda 500.7). \end{aligned} \quad (5.31)$$

В качестве калибровочных точек использованы области Н II, в которых содержания кислорода определены T_e -методом или при помощи параметрической R_{23} -калибровки. Она нашла, что средняя ошибка содержаний, найденных при помощи этих соотношений, составляет 0.23–0.25 dex.

Ши, Жао и Лианг [460] построили калибровку, в которой в качестве индикатора металличности области Н II использовано отношение интенсивностей линий дважды ионизованного неона и ионизованного кислорода $Ne_3/O_2 = [Ne III] \lambda 386.9/[O II] \lambda 372.7$. В качестве калибровочных точек использованы области Н II из обзора SDSS: 210 областей Н II, для которых содержания кислорода определены классическим T_e -методом, и 2960 областей Н II, для которых содержания кислорода определены при помощи параметрической R_{23} -калибровки. Они получили соотношения

$$\begin{aligned} 12 + \lg(O/H)_{Ne_3/O_2} &= 7.063 - 1.171x, \\ x &= \lg([Ne III]\lambda 386.9/[O II]\lambda 372.7). \end{aligned} \quad (5.32)$$

Средняя ошибка содержания кислорода, найденного при помощи этого соотношения, составляет 0.3 dex.

5.5. Применение одномерных калибровок

Простота описанных выше одномерных калибровок способствовала их широкому применению. Калибровки играют сравнительно малую роль в исследованиях неправильных галактик. Содержание кислорода в неправильных галактиках довольно низкое. Области H II низкой металличности имеют высокую электронную температуру. Вследствие этого в спектрах многих областей H II в неправильных галактиках можно измерить авроральные линии и определить электронную температуру и химический состав T_e -методом. В случае спиральных галактик ситуация иная. Содержание кислорода в спиральных галактиках выше, чем в неправильных галактиках. Области H II высокой металличности имеют низкую электронную температуру. Вследствие этого в спектрах областей H II в спиральных галактиках редко удается измерить авроральные линии и определить электронную температуру и химический состав T_e -методом. Поэтому калибровки являются основным методом определения химического состава в спиральных галактиках.

Содержания кислорода, найденные при помощи одномерных калибровок, часто использовались для исследования радиального распределения содержаний кислорода в межзвездной среде в дисках спиральных галактик (см. [48, 70, 113, 145, 195, 198, 199, 307, 347, 430, 469, 489, 522, 526, 532, 537, 557] и др.). Результаты этих исследований подтвердили предположение Сирла [449] о том, что содержание кислорода в межзвездной среде в дисках спиральных галактик уменьшается от центра к периферии. Наличие градиента содержания кислорода в межзвездной среде в дисках спиральных галактик можно считать надежно установленным фактом. Однако количественные характеристики распределения содержания кислорода (содержание кислорода в центре диска или на фиксированном значении галактоцентрического расстояния и величина радиального градиента) в дисках галактик сильно зависят от используемой калибровки для определения содержания кислорода. Различия между содержаниями кислорода, полученными при помощи разных калибровок в областях H II в галактике M 83, достигают множителя 3 [70]. Таким образом, содержания кислорода, найденные с использованием одномерных ка-

либровок, дают только общую качественную картину изменения содержаний кислорода в дисках спиральных галактик.

Изменение содержания кислорода в межзвездной среде в дисках спиральных галактик хорошо описывается экспоненциальной функцией [197]. Так как содержание кислорода принято выражать в логарифмической шкале, то изменение $\lg(\text{O}/\text{H})$ с галактоцентрическим расстоянием описывается линейным соотношением $\lg(\text{O}/\text{H}) = c_0 + c_1 R_G$, где коэффициент c_0 представляет содержание кислорода в центре диска, а коэффициент c_1 описывает наклон в распределении содержания кислорода вдоль радиуса галактики. В цитированных выше работах было найдено, что это линейное соотношение хорошо описывает радиальное распределение содержания кислорода в дисках большинства спиральных галактик. Однако в нескольких галактиках (М 33, М 81, М 101) радиальное распределение содержания кислорода имеет излом [430, 448, 526, 530, 556].

Галактика М 101 является одной из немногих спиральных галактик, в которых достаточно надежно установлен химический состав областей Н II при помощи прямого T_e -метода (см. п. 3.8.3). В работе [389] было обращено внимание на следующий факт. Радиальное распределение содержаний кислорода, найденных при помощи одномерных R_{23} -калибровок, показывает излом; радиальное распределение кислорода имеет более крутой наклон в центральной части диска галактики и распределение становится более плоским на периферии галактики [448, 526, 556]. В то же время, радиальное распределение содержаний кислорода, найденных при помощи T_e -метода, имеет постоянный наклон во всем диске М 101, т. е. хорошо описывается одним линейным соотношением. Это свидетельствует о том, что излом в радиальном распределении кислорода в диске М 101, найденный в [448, 526, 556], является ложным. Его появление обусловлено тем, что содержания кислорода, найденные при помощи одномерных R_{23} -калибровок, содержат систематическую ошибку.

Радиальные распределения содержаний кислорода в диске галактики М 101, полученные разными методами, показаны на рис. 5.6. Выборка областей Н II в диске галактики М 101 приведена в табл. 3.7, 3.8. Значения содержания кислорода $(\text{O}/\text{H})_{EP}$, полученные при помощи ранней R_{23} -калибровки Эдмундса и Пейджела (5.1) для тех же областей Н II, представлены точками на

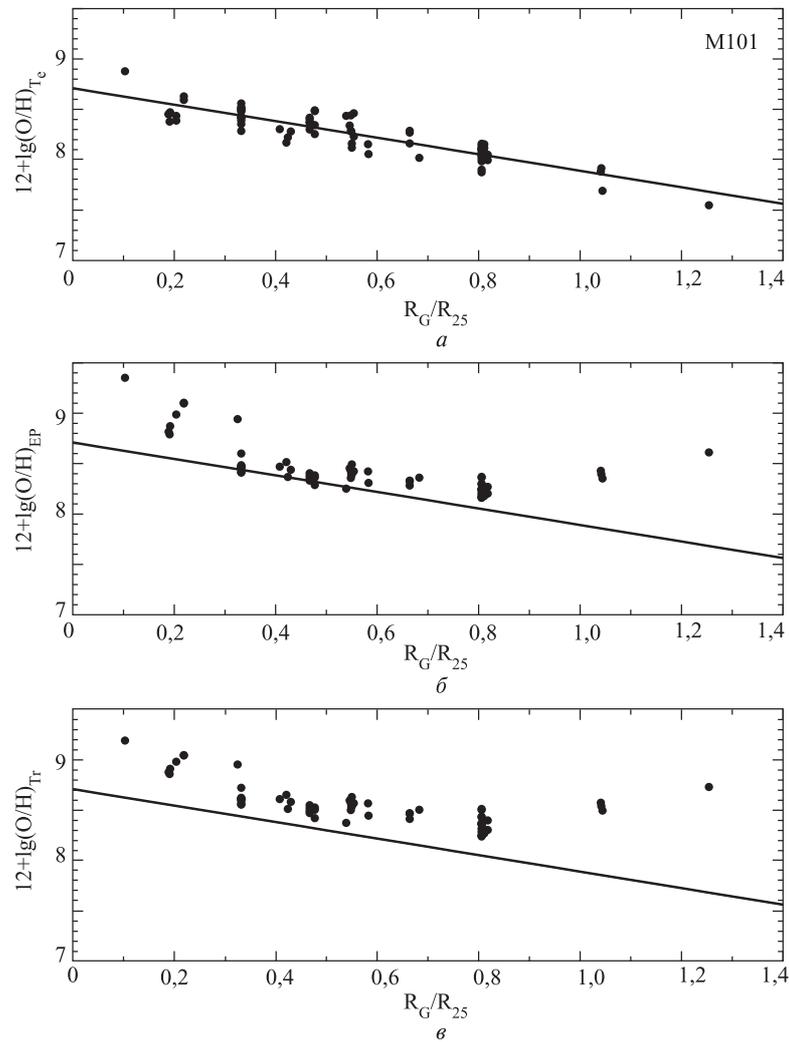


Рис. 5.6. Радиальное распределение содержания кислорода в диске спиральной галактики М 101: *a* — значения содержания кислорода в областях Н II, найденные классическим T_e -методом (точки); *б* — при помощи R_{23} -калибровки Эдмундса и Пейджела (1984) (уравнение (5.1)), *в* — при помощи R_{23} -калибровки Трмонти и др. (уравнение (5.7)). Сплошные линии — линейная зависимость $\lg(\text{O}/\text{H})_{T_e} = f(R_G)$, найденная методом наименьших квадратов

рис. 5.6, б. Значения содержания кислорода $(\text{O}/\text{H})_{Tr}$, найденные при помощи более поздней R_{23} -калибровки Тремонта и др. (5.7) для тех же областей Н II, обозначены точками на рис. 5.6, в. На рис. 5.6, б и рис. 5.6, в отчетливо видно, что радиальные распределения содержаний кислорода $(\text{O}/\text{H})_{R_{23}}$, найденные при помощи одномерных R_{23} -калибровок, имеют излом; радиальное распределение кислорода имеет более крутой наклон в центральной части диска галактики, распределение становится более плоским.

Изменения наклона радиального распределения $(\text{O}/\text{H})_{R_{23}}$ обусловлено двумя причинами. Во-первых, содержания кислорода, найденные при помощи одномерных R_{23} -калибровок, содержат систематическую ошибку. Величина этой ошибки зависит от степени возбуждения области Н II (см. рис. 5.3). В центральной части галактики М 101 степень возбуждения областей Н II намного возрастает вдоль радиуса до галактоцентрического расстояния $0.5R_G$ [389]. Вследствие этого в центральной части галактики радиальные распределения содержаний кислорода $(\text{O}/\text{H})_{R_{23}}$ имеют существенно более крутой наклон, чем распределение содержаний кислорода $(\text{O}/\text{H})_{T_e}$. На галактоцентрических расстояниях более $0.5R_G$ степень возбуждения областей Н II меньше увеличивается вдоль радиуса. Вследствие этого радиальные распределения содержаний кислорода $(\text{O}/\text{H})_{R_{23}}$ имеют наклон, подобный наклону в распределение содержаний кислорода $(\text{O}/\text{H})_{T_e}$.

Во-вторых, область применения одномерных R_{23} -калибровок ограничена. Как видно на рис. 5.6, а, содержания кислорода в областях Н II на галактоцентрических расстояниях более $0.7R_G$ меньше $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{T_e} = 8.2$. Эти области Н II не лежат на верхней ветви диаграммы $R_{23} - \text{O}/\text{H}$. Следовательно, уравнения (5.1) и (5.7) нельзя использовать для определения содержания кислорода в этих областях Н II. Некорректное применение R_{23} -калибровок к этим областям Н II является другой причиной появления ложного излома в радиальном распределении содержаний кислорода $(\text{O}/\text{H})_{R_{23}}$. В работе [407] отмечено, что ложный излом такого типа появляется в радиальном распределении содержаний кислорода $(\text{O}/\text{H})_{R_{23}}$ и в других спиральных галактиках: NGC 300, NGC 925, NGC 1365, NGC 2805, NGC 3198, NGC 4651, NGC 5033, NGC 7793 и IC 342.

Значения содержания кислорода, найденные при помощи одномерных калибровок в дисках спиральных галактик, использовались для установления корреляций между содержанием кислорода и другими макроскопическими характеристиками спиральных галактик [168, 171, 508, 514, 526, 557]. Так как содержание кислорода в диске спиральной галактики изменяется с галактоцентрическим расстоянием, то металличность спиральной галактики принято описывать характерным значением, которое определяют как содержание кислорода на некотором выбранном галактоцентрическом расстоянии в диске галактики. В качестве характерного содержания кислорода в спиральной галактике чаще других используют значение содержания на галактоцентрическом расстоянии $R = 0.4R_{25}$ (где R_{25} — изофотный или фотометрический радиус галактики) или значение содержания в центре диска. Установлено, что характерное содержание кислорода в спиральной галактике коррелирует с ее светимостью [168, 171, 522, 526, 557], т. е. для спиральных галактик существует зависимость “светимость — металличность”, как и для неправильных галактик. Зависимость “светимость — металличность” для спиральных галактик рассмотрена в следующей главе

В рамках спектральных обзоров неба (KISS — KPNO International Spectroscopic Survey, 2dF Galaxy Redshift Survey, SDSS — Sloan Digital Sky Survey, VVDS — VIMOS VLT Deep Survey — VISIBLE Multi-Object Spectrograph Very Large Telescope Deep Survey, GOODS-N — Great Observatories Origins Deep Survey — North) получены спектры большого числа галактик с эмиссионными линиями. Измеренные интенсивности сильных линий в этих спектрах используют для определения содержаний кислорода в галактиках и для исследования зависимости “светимость — металличность”, а также для изучения изменения этой зависимости с красным смещением [102, 276, 279, 290, 301, 318, 444]. Калибровки являются основным методом определения содержаний кислорода в эмиссионных галактиках из спектральных обзоров. Используя данные из спектральных обзоров, можно построить зависимость светимость — металличность для большого количества галактик, от нескольких сотен (519 галактик из обзора KISS [318], 6387 галактик из обзора 2dF Galaxy Redshift Survey [277]) до десятков тысяч галактик (53000 галактик из обзора SDSS [137, 514], 50000—80000 галактик из обзора SDSS [508]). Тремонти и др.

[514] при помощи собственного варианта R_{23} -калибровки определили содержание кислорода в 53000 галактик из обзора SDSS и построили диаграммы “светимость — металличность” и “масса — металличность”. Они нашли среднее значение содержания кислорода в галактиках большой светимости $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 9.1$. Эрб и др. [137] определили заново при помощи N_2 -калибровки содержание кислорода в тех же 53000 галактик из обзора SDSS и получили среднее значение $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 8.6$. Таким образом, средние значения содержания кислорода в галактиках высокой светимости, найденные для одной и той же выборки спектров при помощи разных калибровок, различаются примерно в три раза.

Следует сделать важное замечание. Содержание кислорода, определенное при помощи одномерных калибровок, зависит от условий наблюдения области H II. Для примера рассмотрим простейший вариант N-калибровки $\text{O}/\text{H} = f(N_2)$. Азот дважды ионизован во внутренней области области H II до некоторого расстояния R , которое соответствует угловому радиусу R^* на изображении туманности. Пусть при получении первого спектра область H II полностью проваливается в щель спектрографа, а при получении второго спектра щель спектрографа проходит через центр изображения туманности, ширина щели меньше $2R^*$ и в щель проваливается только центральная часть изображения туманности. Во втором случае измеренный параметр N_2 будет меньше, чем в первом. Если же при получении третьего спектра щель спектрографа смещена относительно центра изображения туманности, и в щель проваливается только периферийная часть изображения туманности, то измеренный параметр N_2 будет больше, чем в первом случае. Если для первого спектра применение N-калибровки приводит к реалистичному значению содержания кислорода, то для второго спектра N-калибровка даст заниженное значение, а для третьего спектра — завышенное. Таким образом, N-калибровки следует использовать только в тех случаях, когда получен спектр всей туманности или по крайней мере большей ее части.

Итак, точность определения содержания кислорода при помощи одномерных R_{23} -калибровок низка. Более того, определенные таким способом содержания кислорода содержат не только случайную, но и систематическую ошибку. Содержания кислоро-

да, найденные при помощи одномерных R_{23} -калибровок, больше содержаний кислорода, определенных прямым методом, в 2—3 раза.

Значения содержаний кислорода, найденные при помощи одномерных N-калибровок, лучше согласуются со значениями, полученными прямым методом. Однако одномерные N-калибровки позволяют определить содержания кислорода с удовлетворительной точностью только в ограниченном интервале металличности областей II.

Глава 6

Метод сильных линий. Параметрические калибровки

6.1. Параметрические R_{23} -калибровки

Еще в работе 1979 года [358], в которой Пейджел и др. предложили первую одномерную R_{23} -калибровку $O/H = f(R_{23})$, они указали, что суммарная интенсивность сильных линий кислорода R_{23} в спектрах областей H II изменяется монотонно с изменением содержания кислорода в области H II и с изменением эффективной температуры возбуждающей звезды. Другими словами, соотношение между содержанием кислорода и интенсивностью сильных линий должно быть параметрическим (двухмерным), а не одномерным.

Вывод о том, что одномерная R_{23} -калибровка не может быть точной, можно получить из самых общих соображений. Действительно, однозначное соответствие между O/H и R_{23} имело бы место (и следовательно, одномерная R_{23} -калибровка была бы точной) в одном из следующих случаев.

1. Излучательные способности R_3 и R_2 постоянны и равны друг другу.

- 2а. Излучательные способности R_3 и R_2 изменяются с электронной температурой, но остаются равными друг другу для любого значения электронной температуры.

2б. Есть однозначное соответствие между электронной температурой туманности и содержанием кислорода в ней.

3а. Излучательные способности R_3 и R_2 являются монотонными функциями электронной температуры.

3б. Однозначное соответствие имеет место не только между электронной температурой туманности и содержанием кислорода в ней, но и между параметром возбуждения туманности и содержанием кислорода в ней.

Расчеты показывают, что условия 1) и 2а) не выполняются. Наблюдения показывают, что условие 3б) также не выполняется. Таким образом, однозначного соответствия между О/Н и R_{23} нет, следовательно, одномерная R_{23} -калибровка не может быть точной.

Далее опишем две параметрические (двухмерные) R_{23} -калибровки: теоретическую, установленную на основе фотоионизационных моделей областей Н II, и эмпирическую, установленную на основе реальных областей Н II, в которых содержание кислорода определено при помощи классического T_e -метода.

6.1.1. Теоретическая параметрическая R_{23} -калибровка

Мак-Гох [313] рассчитал обширную сетку фотоионизационных моделей областей Н II и построил диаграмму $R_{23} - \text{О/Н}$. Он пришел к выводу, что R_{23} является хорошим индикатором содержания кислорода в областях Н II высокой металличности (верхняя ветвь диаграммы $R_{23} - \text{О/Н}$). При определении содержания кислорода в областях Н II низкой металличности (нижняя ветвь диаграммы $R_{23} - \text{О/Н}$) в дополнение к величине R_{23} необходимо использовать отношение интенсивностей линий кислорода $[\text{O III}] \lambda 495.9, 500.7 / [\text{O II}] \lambda 372.7, 372.9$. Мак-Гох сделал вывод, что сильные линии кислорода содержат достаточную информацию для определения точных содержаний кислорода в областях Н II, которые лежат на нижней ветви диаграммы $R_{23} - \text{О/Н}$.

Аналитические выражения для теоретической параметрической R_{23} -калибровки $\text{О/Н} = f(R_{23}, y)$, соответствующей фотоионизационным моделям областей Н II Мак-Гоха, приведены в

работе [265]:

$$\begin{aligned}
 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{R_{23},y} &= 7.056 + 0.767x + 0.602x^2 - \\
 &- y(0.29 + 0.323x - 0.331x^2) \\
 &\text{(для нижней ветви),} \\
 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{R_{23},y} &= 9.061 - 0.2x - 0.237x^2 - \\
 &- 0.305x^3 - 0.0283x^4 - \\
 &- y(0.0047 - 0.0221x - 0.102x^2 - \\
 &- 0.0817x^3 - 0.00717x^4) \\
 &\text{(для верхней ветви),}
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

где

$$\begin{aligned}
 x &= \lg R_{23}, \\
 y &= \lg(R_3/R_2).
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

В работе [265] отмечено, что эти аналитические выражения хорошо аппроксимируют модельные данные, среднее значение разности не превышает 0.05 dex.

Другой вариант аналитических выражений для двухмерной R_{23} -калибровки, соответствующей фотоионизационным моделям областей Н II Мак-Гоха, приведен в работе [281]:

$$\begin{aligned}
 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{R_{23},y} &= 7.07 + 4.25x - 3.35 \sin(x) - \\
 &- 0.26y - 0.12 \sin(y) \\
 &\text{(для } \lg([\text{N II}]\lambda 658.4/R_2) < -1) \\
 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{R_{23},y} &= 9.35 - 0.91x + 0.12y \sin(x) \\
 &\text{(для } \lg([\text{N II}]\lambda 658.4/R_2) > -1),
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

где аргументы тригонометрических функций даны в радианах. Кривые, соответствующие уравнениям (6.1) и (6.3), практически совпадают для нижней ветви диаграммы $R_{23} - \text{O}/\text{H}$, но очень различаются для верхней ветви диаграммы. По-видимому, уравнение (6.3) для верхней ветви диаграммы $R_{23} - \text{O}/\text{H}$ приведено неверно. Впрочем, для определения содержания кислорода в областях Н II при помощи теоретической параметрической

R_{23} -калибровки всегда используют уравнения (6.1). Под теоретической параметрической R_{23} -калибровкой будем подразумевать именно уравнения (6.1).

Параметр y , используемый в теоретической параметрической R_{23} -калибровке, связан с параметром возбуждения туманности P простым соотношением:

$$y = \lg \left(\frac{P}{1-P} \right). \quad (6.4)$$

Семейство кривых, соответствующих уравнениям (6.1) для трех разных значений параметра y , представлено на рис. 6.1. Этот рисунок прекрасно иллюстрирует выводы Мак-Гоха. На рис. 6.1 видно, что кривые для разных значений параметра y на верхней ветви диаграммы $R_{23} - O/H$ сливаются, т. е. фотоионизационные модели областей Н II Мак-Гоха предсказывают однозначное соответствие между параметром R_{23} и содержи-

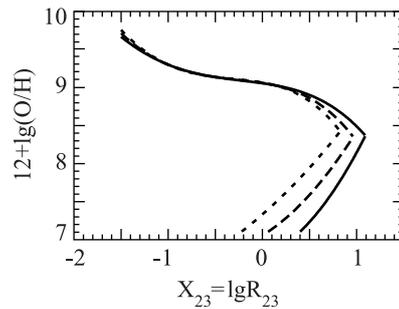


Рис. 6.1. Теоретическая параметрическая R_{23} -калибровка, основанная на моделях [313]. Линиями показано соотношение $O/H = f(R_{23}, y)$ для трех значений y : сплошная линия — для $y = 0.954$ ($P = 0.9$), штриховая линия — для $y = 0$ ($P = 0.5$), пунктирная линия — для $y = -0.954$ ($P = 0.1$)

ем кислорода O/H для областей Н II, лежащих на верхней ветви диаграммы. Кривые для разных значений параметра y на нижней ветви диаграммы $R_{23} - O/H$ существенно смещены относительно друг друга. Для определения содержания кислорода в

областях Н II, лежащих на нижней ветви диаграммы, в дополнение к R_{23} необходимо использовать параметр y .

Мак-Гох отметил, что содержания кислорода, полученные при помощи его калибровки, не совпадают с содержаниями кислорода, найденными при помощи T_e -метода: его калибровка дает содержания кислорода, которые больше содержаний кислорода, определенных T_e -методом, в среднем на 0.2 dex. Он предположил, что это различие вызвано тем, что модели точнее учитывают распределение температуры в туманности, чем T_e -метод.

6.1.2. Эмпирическая параметрическая R_{23} -калибровка. P -метод

Эмпирическая параметрическая R_{23} -калибровка была предложена в работе [385] для нижней ветви диаграммы $R_{23} - O/H$ и в работе [386] для верхней ветви диаграммы. В работе [401] уравнения эмпирической параметрической R_{23} калибровки для обеих ветвей диаграммы $R_{23} - O/H$ были уточнены с использованием большого количества калибровочных точек. Ниже приведено описание эмпирической параметрической R_{23} -калибровки на основе этих работ.

Нижняя ветвь наблюдаемой диаграммы $R_{23} - O/H$ исследована в работе [385]. Диаграмма $R_{23} - O/H$ построена для 151 области Н II в неправильных и спиральных галактиках, в которых содержание кислорода определено прямым методом. Было найдено, что положение области Н II с фиксированным значением суммарной интенсивности сильных кислородных линий R_{23} зависит от параметра возбуждения P , т. е. металличность O/H для области Н II с фиксированным значением R_{23} изменяется с изменением параметра возбуждения P . Этот факт свидетельствует о том, что для корректной оценки содержания кислорода в области Н II недостаточно использовать только R_{23} , а необходимо учитывать также параметр возбуждения туманности P . Иными словами, одномерная калибровка $O/H = f(R_{23})$ должна быть заменена параметрической (двухмерной) калибровкой $O/H = f(R_{23}, P)$. Исследование верхней ветви наблюдаемой диаграммы $R_{23} - O/H$ привело к такому же выводу [386].

Диаграмма $R_{23} - P$ на рис. 6.2 иллюстрирует выбор формы уравнения для эмпирической параметрической R_{23} -калибровки. Плюсами на рис. 6.2 показаны положения областей Н II с

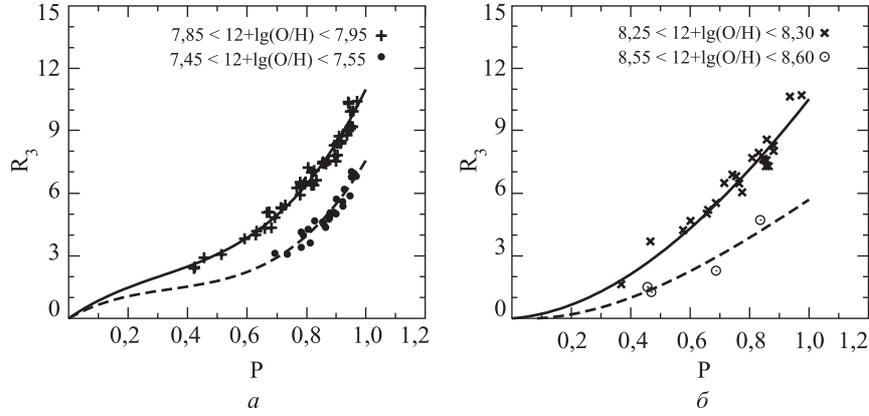


Рис. 6.2. Диаграмма $R_3 - P$ для областей Н II разной металличности. (а — низкой, б — высокой). Линиями показаны калибровочные соотношения для данных металличностей

$7.85 < 12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 7.95$, точками — положения областей Н II с $7.45 < 12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 7.55$, крестиками — положения областей Н II с $8.25 < 12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.30$, кружками — положения областей Н II с $8.55 < 12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.60$. На рис. 6.2, а представлены области Н II, которые лежат на нижней ветви диаграммы $R_{23} - \text{O}/\text{H}$. Области Н II, показанные на рис. 6.2, б, лежат на верхней ветви диаграммы $R_{23} - \text{O}/\text{H}$. Из рис. 6.2 следует, что соотношение между R_3 и P может быть аппроксимировано полиномом

$$k_0 R_3 = k_1 P + k_2 P^2 + k_3 P^3 \quad (6.5)$$

для областей Н II обеих ветвей диаграммы $R_{23} - \text{O}/\text{H}$. В правой части отсутствует член с нулевой степенью P , так как R_3 не может быть отличной от нуля при $P = 0$. На рис. 6.2 видно, что положение области Н II на диаграмме $R_3 - P$ зависит от ее металличности. Следовательно, коэффициенты в уравнении (6.5) должны зависеть от металличности:

$$k_j = a_j + b_j Z, \quad (6.6)$$

где обозначение $Z = 12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ используют ради компактности записи уравнений. С учетом уравнения (6.6) уравнение (6.5)

принимает вид

$$R_3 = \frac{(a_1 + b_1 Z)P + (a_2 + b_2 Z)P^2 + (a_3 + b_3 Z)P^3}{1 + b_0 Z}. \quad (6.7)$$

Коэффициент a_0 принят равным 1, так как числитель и знаменатель в правой части уравнения (6.7) можно поделить на a_0 . Решая уравнение (6.7) относительно Z , получаем

$$Z = \frac{R_3 - a_1 P - a_2 P^2 - a_3 P^3}{b_1 P + b_2 P^2 + b_3 P^3 - b_0 R_3}. \quad (6.8)$$

Так как по определению $R_3 = PR_{23}$, то уравнение (6.8) можно представить в виде

$$Z = \frac{R_{23} - a_1 - a_2 P - a_3 P^2}{b_1 + b_2 P + b_3 P^2 - b_0 R_{23}}. \quad (6.9)$$

Используя выборку областей Н II с измеренными содержаниями кислорода, коэффициенты $a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$ можно найти из требования, чтобы средняя разность между измеренными содержаниями кислорода и содержаниями, вычисленными при помощи уравнения (6.8) (или (6.9)), была минимальной.

Так как в эмпирической параметрической R_{23} -калибровке в дополнение к R_{23} использован параметр P ($O/H = f(R_{23}, P)$), то этот метод определения содержания кислорода в областях Н II получил название P -метод. Первые соотношения $O/H = f(R_{23}, P)$ приведены в [385] для нижней ветви $R_{23} - O/H$ диаграммы (для областей Н II низкой металличности, $12 + \lg(O/H) < 8.0$) и в [386] для верхней ветви $R_{23} - O/H$ диаграммы (для областей Н II высокой металличности, $12 + \lg(O/H) > 8.2$).

Пилюгин и Туан [401] собрали из литературных источников обширную коллекцию спектров областей Н II в спиральных и неправильных галактиках, в которых измерены интенсивности авроральных линий кислорода и/или азота. Коллекция содержит более 700 спектров, полученных с 1967 по 2004 год. Содержания кислорода были пересчитаны в единой системе, чтобы иметь однородную шкалу металличности. Выборка наиболее точных данных была использована для калибровки соотношения

$O/H = f(R_{23}, P)$, т. е. для нахождения коэффициентов $a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$. Для областей Н II верхней ветви диаграммы $R_{23} - O/H$ было получено выражение

$$Z = \frac{R_3 + 726.1 P + 842.2 P^2 + 337.5 P^3}{85.96 P + 82.76 P^2 + 43.98 P^3 + 1.793 R_3}, \quad Z > 8.25, \quad (6.10)$$

или

$$Z = \frac{R_{23} + 726.1 + 842.2 P + 337.5 P^2}{85.96 + 82.76 P + 43.98 P^2 + 1.793 R_{23}}, \quad Z > 8.25. \quad (6.11)$$

Для областей Н II нижней ветви диаграммы $R_{23} - O/H$ было найдено выражение

$$Z = \frac{R_3 + 106.4 P + 106.8 P^2 - 3.40 P^3}{17.72 P + 6.60 P^2 + 6.95 P^3 - 0.302 R_3}, \quad Z < 8.0, \quad (6.12)$$

или

$$Z = \frac{R_{23} + 106.4 + 106.8 P - 3.40 P^2}{17.72 + 6.60 P + 6.95 P^2 - 0.302 R_{23}}, \quad Z < 8.0. \quad (6.13)$$

Семейство кривых, соответствующих уравнениям (6.11), (6.13), представлено на рис. 6.3 вместе с наблюдательными данными.

Сравнение эмпирической и теоретической параметрических R_{23} -калибровок представлено на рис. 6.4. Точками показаны области Н II (выборка КТ118), в которых содержания кислорода определены при помощи T_e -метода. Из рис. 6.4 видно, что теоретическая R_{23} -калибровка дает более высокие значения содержания кислорода по сравнению с эмпирической R_{23} -калибровкой и по сравнению с T_e -методом (точки). Для областей Н II верхней ветви диаграммы $R_{23} - O/H$ различия очень большие.

Следует отметить две проблемы, возникающие при построении эмпирических калибровок.

Во-первых, измеренные интенсивности линий (особенно интенсивности слабых авроральных линий) и, следовательно, найденные при помощи T_e -метода содержания кислорода содержат ошибки. Поэтому соотношение $O/H = f(R_{23}, P)$, прокалиброванное на основе этих содержаний, также содержит ошибку. Если ошибки измерений интенсивностей линий являются случайными, то влияние этих ошибок на выводимое соотношение существенно уменьшается с увеличением количества калибровочных

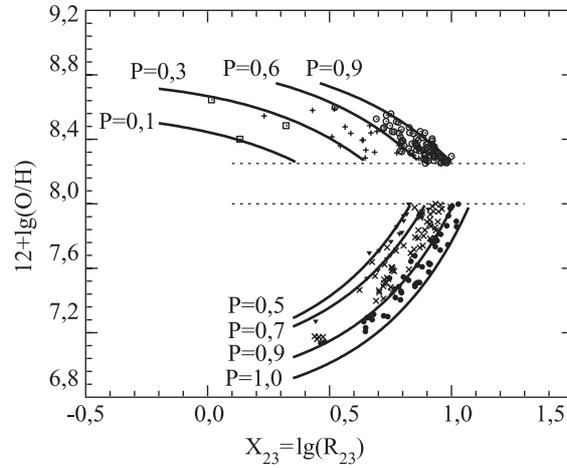


Рис. 6.3. Эмпирические диаграммы (6.11) и (6.13) для областей Н II при разных значениях параметра возбуждения P (сплошные линии) и соответствующие им значения содержания кислорода, определенные прямым методом: квадраты — для $0.0 < P < 0.3$, плюсы — $0.3 < P < 0.6$, кружки — $0.6 < P < 0.9$, треугольники — $0.5 < P < 0.7$, крестики — $0.7 < P < 0.9$, точки — $0.9 < P < 1.0$

точек. Важно то, что такой способ калибровки обеспечивает единую шкалу металличностей: содержания кислорода, полученные при помощи таких калибровок и прямым методом, согласуются между собой. Метод определения содержания при помощи соотношения $O/H = f(R_{23}, P)$, прокалиброванного на базе данных для реальных областей Н II, можно назвать методом определения содержания кислорода “по прецеденту”.

Во-вторых, достаточные по количеству и качеству определения содержания кислорода при помощи T_e -метода имеются для областей Н II в ограниченном диапазоне изменения параметра R_{23} и для ограниченного интервала значений параметра P . Для определения содержания кислорода в областях Н II со значениями параметров R_{23} и P , где нет калибровочных точек (нет “прецедентов”), приходится использовать экстраполяцию, что может приводить к большим ошибкам.

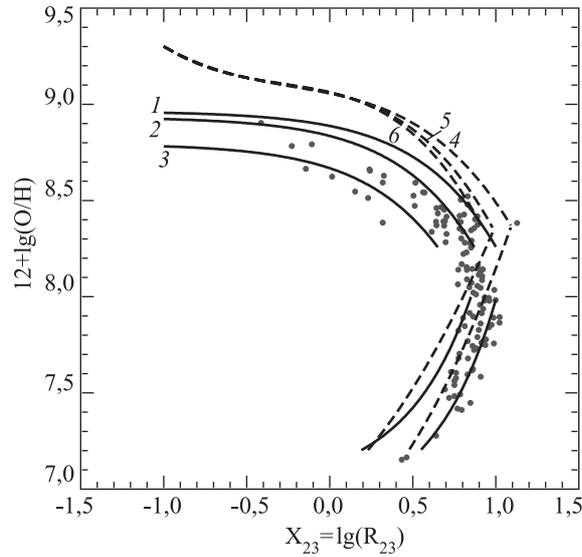


Рис. 6.4. Сравнение эмпирической (кривые 1–3) и теоретической (кривые 4–6) параметрических R_{23} -калибровок. Для верхней ветви R_{23} – O/H диаграммы показаны соотношения для трех значений: 1 и 4 – для $P = 0.9$, 2 и 5 – для $P = 0.6$, 3 и 6 – для $P = 0.3$. Для нижней ветви R_{23} – O/H диаграммы представлены кривые только для двух значений $P = 0.6$ и $P = 0.9$. Точки – области Н II из выборки КТ118

6.2. Параметрические N-калибровки

6.2.1. Предварительные замечания

Как отмечалось выше, классический T_e -метод является наиболее надежным методом определения электронной температуры в разных зонах области Н II. Точность определения электронной температуры при помощи T_e -метода теоретически возрастает с уменьшением электронной температуры туманности. Для определенности будем иметь ввиду определение температуры $t_{3,O}$. Индикатором электронной температуры $t_{3,O}$ в T_e -методе служит отношение $Q_{3,O}$ интенсивностей небулярных $[\text{O III}] \lambda 495.9 +$

+ λ 500.7) и авроральной ([O III] λ 436.3) линий кислорода. Как видно из рис. 3.2, чувствительность отношения $Q_{3,0}$ к изменению температуры возрастает с уменьшением температуры туманности. Действительно, при изменении электронной температуры на $\Delta t_3 = 0.1$ в горячих туманностях (например, от $t_3 = 1,5$ до $t_3 = 1,4$) отношение $Q_{3,0}$ изменяется на 20 %, тогда как при таком же изменении электронной температуры в холодных туманностях (например, от $t_3 = 0.8$ до $t_3 = 0.7$) отношение $Q_{3,0}$ изменяется примерно в 2 раза.

Именно высокая чувствительность индикатора $Q_{3,0}$ к изменению температуры при низких температурах туманности является слабым местом T_e -метода на практике. Интенсивность авроральной [O III] λ 436.3 линии кислорода в спектре холодной туманности становится столь малой, что ее невозможно измерить, и следовательно, невозможно определить отношение $Q_{3,0}$. Низкая интенсивность авроральной линии кислорода в спектрах холодных туманностей обусловлена тем, что эта линия образуется при переходе с уровня, энергия возбуждения которого больше 5.35 эВ (см. рис. 3.1). Поэтому этот уровень практически не населен в туманностях низкой температуры.

Идеология T_e -метода основывается на том, что отношение населенностей двух энергетических уровней с разной энергией возбуждения монотонно изменяется с температурой при прочих равных условиях, и следовательно, отношение интенсивностей двух запрещенных линий, образующихся при переходах с этих уровней, служит индикатором электронной температуры в туманности. Для холодных туманностей в качестве индикатора температуры следует выбрать отношение интенсивностей двух запрещенных линий, которые образуются при переходах с уровней, энергии возбуждения которых не очень большие, т. е. такие, чтобы уровни были достаточно населены при низких температурах.

Небулярные линии кислорода R_2 (= [O II] λ 372.7 + λ 372.9) образуются при переходе с энергетического уровня, энергия возбуждения которого составляет 3.32 эВ (схема нижних энергетических уровней ионов O^+ и N^+ представлена на рис. 3.3 и 3.5). Небулярные линии азота N_2 (= [N II] λ 654.8 + λ 658.4) образуются при переходе с энергетического уровня, энергия возбуждения которого составляет 1.90 эВ. С одной стороны, энергии возбуждения исходных уровней линий R_2 и N_2 не очень большие, поэтому

эти уровни заметно населены, и линии R_2 и N_2 имеют достаточно большую интенсивность в спектрах холодных туманностей. С другой стороны, разница между энергиями возбуждения исходных уровней линий R_2 и N_2 довольно большая, что позволяет ожидать, что отношение населенностей этих уровней достаточно чувствительно к электронной температуре в туманности.

Поток энергии $F_{k,j}(X)$ от туманности в эмиссионной линии иона X , образующейся при переходе с k -го на j -й уровень, находят по уравнению

$$F_{k,j}(X) = A_{k,j} \int_V n_k(t_e, n_e) X dV, \quad (6.14)$$

где $n_k(t_e, n_e)$ — населенность k -го уровня (см. уравнение (3.3)). В классическом T_e -методе определение физических условий в туманности основано на сравнении интенсивностей двух линий одного и того же иона. Поэтому отношение интенсивностей этих линий определяется отношением населенностей уровней:

$$\frac{F_{k,j}}{F_{i,n}} = \frac{\nu_{k,j}}{\nu_{i,n}} \frac{n_k(t_e)}{n_i(t_e)} \frac{A_{k,j}}{A_{i,n}} = f(t_e). \quad (6.15)$$

Так как мы рассматриваем только области Н II низкой плотности, то зависимость населенности от плотности опускаем.

Если же в качестве индикатора металличности использовать отношение интенсивностей линий ионов разных атомов, то ситуация значительно усложняется. Во-первых, зоны свечения этих ионов могут не совпадать. Тогда интегрирование уравнения (6.14) следует выполнять по разным объемам туманности. Так как потенциалы первой и второй ионизаций кислорода (13.618 и 35.117 эВ) и потенциалы первой и второй ионизаций азота (14.534 и 29.601 эВ) различаются не слишком сильно, то в первом приближении можно пренебречь различием между зонами свечения O^+ и N^+ [166, 362]. Во-вторых, отношение содержаний азота и кислорода N/O не является постоянным для всех областей Н II. Поэтому для отношения интенсивностей линий N_2/R_2 вместо уравнения (6.15) получаем

$$\frac{N_2}{R_2} = f(t_e) \frac{N}{O}. \quad (6.16)$$

При низких металличностях основной вклад в обогащение межзвездной среды азотом вносят массивные звезды. Азот синтезируется как первичный элемент, т. е. количество азота, который синтезируется и выбрасывается в межзвездную среду звездой данной массы, не зависит от начального химического состава звезды [92, 333, 381]. В областях Н II низкой металличности отношение N/O более или менее постоянно, области Н II низкой металличности образуют плато на диаграмме $N/O - O/H$ [227, 507]. Начиная с металличности $12 + \lg(O/H) \approx 8.3$, основной вклад в обогащение межзвездной среды азотом вносят звезды промежуточных масс. В этих звездах азот синтезируется как вторичный элемент, т. е. количество азота, который синтезируется и выбрасывается в межзвездную среду звездой данной массы, зависит от ее начального химического состава [299, 306, 423, 518]. При этих металличностях отношение содержаний азота и кислорода N/O увеличивается с возрастанием содержания кислорода [196, 403], т. е. отношение N/O зависит от металличности $N/O = f(O/H)$. Так как электронная температура области Н II тесно коррелирует с ее металличностью (см. рис. 4.1), то можно считать, что при высоких металличностях ($12 + \lg(O/H) > 8.3$) отношение N/O является функцией электронной температуры $N/O = f(T_e)$. Тогда уравнение (6.16) можно записать в символьном виде:

$$\frac{N_2}{R_2} = f(t_e) f_1(t_e). \quad (6.17)$$

Таким образом, отношение интенсивностей линий N_2/R_2 может служить индикатором электронной температуры в зоне свечения ионов O^+ и N^+ , хотя зависимость $t_2 = f(N_2/R_2)$ не является строгой.

Небулярные линии серы S_2 ($= [S II] \lambda 671.7 + \lambda 673.1$) образуются при переходе с энергетического уровня, энергия возбуждения которого составляет 1.84 эВ. Разница между энергиями возбуждения исходных уровней линий R_2 и S_2 почти такая же, как и разница между энергиями возбуждения исходных уровней линий R_2 и N_2 . С этой точки зрения отношение интенсивностей линий S_2/R_2 и N_2/R_2 являются потенциально одинаковыми индикаторами электронной температуры в туманности. Считается, что отношение S/O остается постоянным во всех областях Н II, так как кислород и сера синтезируются как первичные элементы

и выбрасываются в межзвездную среду одними и теми же массивными звездами при вспышках сверхновых II типа [264, 546]. Однако потенциалы первой и второй ионизаций кислорода и потенциалы первой и второй ионизаций серы (10.360 и 23.33 эВ) существенно различаются, потенциал второй ионизации кислорода (35.117 эВ) близок к потенциалу третьей ионизации серы (34.83 эВ). В грубом приближении, зона свечения иона O^+ покрывает зоны свечения двух ионов серы S^+ и S^{++} . Поэтому нельзя пренебрегать различием между зонами свечения O^+ и S^+ . Из общих соображений можно предположить, что отношение размеров зон свечения ионов O^+ и S^+ является функцией электронной температуры в туманности. Таким образом, отношение интенсивностей линий S_2/R_2 также может служить индикатором электронной температуры в зоне свечения ионов O^+ и S^+ , хотя зависимость $t_2 = f(S_2/R_2)$ также не является строгой.

Заключение о том, что отношения интенсивностей линий N_2/R_2 и S_2/R_2 являются индикаторами электронной температуры в туманности, можно проверить с помощью наблюдений. Так как электронная температура области H II тесно коррелирует с ее металличностью (см. рис. 4.1), то надежный индикатор электронной температуры должен быть также надежным индикатором металличности. Итак, для областей H II, для которых известны электронная температура и химический состав, отношения интенсивностей линий N_2/R_2 и S_2/R_2 должны показывать тесную корреляцию с температурой и металличностью.

6.2.2. Выборка калибровочных точек (КТ118)

Выборка (компиляция данных из литературы) спектральных данных для областей H II, в которых электронная температура и содержания элементов определены достаточно точно при помощи T_e -метода, сформирована в работе [409]. Выборка спектральных данных для областей H II высокой и умеренной металличности ($12 + \lg(O/H) > 8.0$) включает измерения областей H II в дисках близких спиральных галактик — NGC 300 [69], NGC 1365 [71], NGC 5194 = M 51 [68, 170], NGC 5236 = M 83 [71], NGC 5457 = M 101 [139, 169, 233, 249, 256, 298, 312, 421, 455, 512, 522], а также областей H II в неправильной галактике NGC 6822 [200, 202, 335, 369] и в Малом Магеллановом Облаке [130, 504, 505].

Для отбора наиболее точных спектральных измерений использовали следующие критерии.

1) Если в диске спиральной галактики установлено радиальное распределение содержания кислорода $O/H = f(R_G)$, то отбирали только те измерения, для которых отклонение содержания кислорода от установленной зависимости $O/H = f(R_G)$ не превышает 0.1 dex.

2) Если радиальное распределение содержания кислорода $O/H = f(R_G)$ в диске спиральной галактики не установлено, то отбирали только те области Н II, для которых два и более независимых определения содержания кислорода (например, измерены электронные температуры $t([N II])$, $t([O III])$ или/и $t([S III])$) различаются не более чем на 0.1 dex.

3) Так как в неправильных галактиках отсутствует радиальный градиент содержания кислорода, то среди областей Н II в неправильных галактиках отбирали только те, содержания кислорода в которых отличаются от среднего значения для данной галактики не более чем на 0.1 dex.

Согласно этим критериям были отобраны 72 измерения электронной температуры в областях Н II высокой и умеренной металличности ($12 + \lg(O/H) > 8.0$). Если в спектре были измерены как авроральная линия кислорода, так и авроральная линия азота, то эти измерения рассматривались как независимые. Данная выборка была дополнена высокоточными спектральными измерениями областей Н II низкой металличности ($12 + \lg(O/H) < 8.0$) из работы [233], которые использованы там для определения догалактического содержания гелия. Итоговая выборка содержит 118 измерений электронной температуры и, следовательно, 118 прямых определений $(O/H)_{T_e}$ - и $(N/H)_{T_e}$ -содержаний (так как в четырех спектрах надежно измерены электронные температуры t_2 и t_3 , то выборка содержит 114 спектров). Будем называть эту выборку КТ118 (табл. 6.1, 6.2). Эта выборка неоднократно использовалась выше.

Изменение интенсивностей линий и отношений интенсивностей линий в спектрах областей Н II в зависимости от их электронной температуры t_2 , содержания кислорода и содержания азота показаны на рис. 6.5—6.7. Видно, что изменения интенсивностей линий и отношений интенсивностей линий с температурой и металличностью показывают большое разнообразие. Однако

Таблица 6.1. Электронные температуры t_2 и t_3 и содержания кислорода и азота из выборки КТ118 областей Н II. Содержания элементов даны в стандартной шкале $Z_X = 12 + \lg(X/H)$. Интенсивности линий приведены в табл. 6.2

Номер	Область Н II	t_3	t_2	Z_O (t_3)	Z_O (t_2)	Z_N (t_3)	Z_N (t_2)
1	NGC 300 # 1	1.17	—	8.09	—	6.64	—
2	NGC 300 # 2	1.20	—	8.14	—	6.62	—
3	NGC 300 # 4	1.09	—	8.17	—	6.79	—
4	NGC 300 # 5	0.92	—	8.39	—	7.08	—
5	NGC 300 # 7	1.15	—	8.38	—	7.25	—
6	NGC 300 # 8	0.94	—	8.28	—	7.03	—
7	NGC 300 # 9	0.86	—	8.39	—	7.32	—
8	NGC 300 # 10	0.86	—	8.39	—	7.08	—
9	NGC 300 # 14	0.88	—	8.37	—	7.25	—
10	NGC 300 # 14	—	0.87	—	8.45	—	7.31
11	NGC 300 # 17	0.81	—	8.47	—	7.20	—
12	NGC 300 # 19	0.85	—	8.34	—	7.07	—
13	NGC 300 # 20	0.82	—	8.43	—	7.27	—
14	NGC 300 # 22	—	0.80	—	8.54	—	7.46
15	NGC 300 # 23	0.80	—	8.46	—	7.28	—
16	NGC 300 # 23	—	0.88	—	8.37	—	7.21
17	NGC 300 # 24	0.84	—	8.39	—	7.24	—
18	NGC 300 # 26	0.90	—	8.33	—	7.11	—
19	NGC 300 # 27	1.11	—	8.14	—	6.87	—
20	NGC 300 # 28	1.06	—	8.22	—	6.81	—
21	NGC 1365 # 15	—	0.79	—	8.53	—	7.84
22	M51 CCM 72	—	0.60	—	8.79	—	8.24
23	M51 CCM 72	—	0.61	—	8.66	—	8.14
24	M51 CCM 10	—	0.68	—	8.55	—	7.91
25	M51 CCM 53	—	0.69	—	8.66	—	8.04
26	M51 CCM 54	—	0.72	—	8.51	—	8.00
27	M51 CCM 55	—	0.65	—	8.62	—	8.16
28	M51 CCM 57A	—	0.78	—	8.59	—	7.96
29	M51 CCM 71A	—	0.78	—	8.38	—	7.81
30	M51 P 203	—	0.55	—	8.90	—	8.46

Продолжение табл. 6.1

Номер	Область H II	t_3	t_2	Z_O (t_3)	Z_O (t_2)	Z_N (t_3)	Z_N (t_2)
31	NGC 5236 # 03	—	0.80	—	8.54	—	7.78
32	NGC 5236 # 11	—	0.59	—	8.78	—	8.56
33	NGC 5236 # 16	—	0.68	—	8.66	—	8.04
34	M101 H1013	—	0.81	—	8.47	—	7.58
35	M101 H336	—	0.71	—	8.63	—	7.80
36	M101 H336	—	0.72	—	8.59	—	7.78
37	M101 NGC5461	0.85	—	8.42	—	7.51	—
38	M101 NGC5461	0.89	0.94	8.42	8.35	7.35	7.31
39	M101 NGC5461	0.92	0.89	8.39	8.50	7.31	7.38
40	M101 NGC5461	0.89	—	8.48	—	7.25	—
41	M101 NGC5461	0.91	—	8.43	—	7.29	—
42	M101 NGC5461	0.85	—	8.51	—	7.55	—
43	M101 NGC5461	0.86	—	8.52	—	7.25	—
44	M101 H1159	0.98	—	8.30	—	7.10	—
45	M101 H1176	1.00	—	8.28	—	7.13	—
46	M101 NGC5455	0.99	1.02	8.34	8.26	7.17	7.11
47	M101 NGC5455	0.97	—	8.40	—	7.15	—
48	M101 NGC5455	1.00	0.97	8.37	8.42	6.96	6.99
49	M101 NGC5471	1.26	—	8.16	—	6.71	—
50	M101 H149	0.96	—	8.34	—	7.28	—
51	M101 H128	—	1.01	—	8.23	—	7.14
52	M101 H67	1.04	—	8.28	—	6.85	—
53	M101 H70	1.13	—	8.15	—	6.82	—
54	M101 H1216	1.15	—	8.16	—	6.82	—
55	M101 H681	1.42	—	7.85	—	6.38	—
56	M101 H681	1.36	—	7.91	—	6.46	—
57	SMC N66NW	1.24	—	8.06	—	6.66	—
58	SMC N81	1.24	—	8.09	—	6.61	—
59	SMC N25	1.14	—	8.06	—	6.61	—
60	SMC N88B	1.27	—	8.02	—	6.66	—
61	NGC6822 H α V	1.18	—	8.13	—	6.67	—
62	NGC6822 # 15	1.22	—	8.05	—	6.50	—
63	NGC6822 H α X	1.21	—	8.11	—	6.59	—

Продолжение табл. 6.1

Номер	Область H II	t_3	t_2	Z_O (t_3)	Z_O (t_2)	Z_N (t_3)	Z_N (t_2)
64	NGC6822 H _u X	1.20	—	8.07	—	6.57	—
65	NGC6822 H _u X	1.21	—	8.11	—	6.44	—
66	CGCG 007-025 1	1.64	—	7.77	—	6.22	—
67	CGCG 007-025 2	1.65	—	7.73	—	6.17	—
68	HS 0122+0743	1.77	—	7.60	—	6.10	—
69	HS 0134+3415	1.63	—	7.87	—	6.47	—
70	HS 0811+4913	1.44	—	7.98	—	6.57	—
71	HS 0837+4717	1.94	—	7.58	—	6.43	—
72	HS 1028+3843	1.58	—	7.89	—	6.71	—
73	HS 1442+4250	1.77	—	7.62	—	6.26	—
74	HS 2236+1344	2.10	—	7.45	—	5.97	—
75	I Zw 18 SE 1	1.90	—	7.17	—	5.67	—
76	I Zw 18 SE 2	1.88	—	7.15	—	5.70	—
77	J0519+0007	2.06	—	7.41	—	6.07	—
78	M101 # 1	1.37	—	8.03	—	6.60	—
79	M101 # 2	1.37	—	8.00	—	6.65	—
80	M101 # 3	0.99	—	8.36	—	7.15	—
81	M101 # 4	1.03	—	8.29	—	7.04	—
82	Mrk 36	1.52	—	7.83	—	6.37	—
83	Mrk 600	1.59	—	7.84	—	6.20	—
84	Mrk 209	1.63	—	7.76	—	6.31	—
85	Mrk 71 # 1	1.57	—	7.85	—	6.40	—
86	Mrk 71 # 2	1.39	—	7.90	—	6.37	—
87	SBS 0335-052E1	2.02	—	7.28	—	5.84	—
88	SBS 0917+527	1.50	—	7.86	—	6.29	—
89	SBS 0940+544 # 1	2.00	—	7.42	—	5.90	—
90	SBS 0940+544 # 2	1.87	—	7.49	—	5.94	—
91	SBS 1030+583	1.55	—	7.79	—	6.22	—
92	SBS 1054+365	1.38	—	7.99	—	6.53	—
93	SBS 1128+573	1.69	—	7.75	—	6.30	—
94	SBS 1152+579	1.54	—	7.89	—	6.56	—
95	SBS 1159+545	1.83	—	7.48	—	6.00	—

Окончание табл. 6.1

Номер	Область H II	t_3	t_2	Z_O (t_3)	Z_O (t_2)	Z_N (t_3)	Z_N (t_2)
96	SBS 1205+557	1.61	—	7.74	—	6.28	—
97	SBS 1211+540	1.78	—	7.62	—	6.06	—
98	SBS 1222+614	1.40	—	7.98	—	6.45	—
99	SBS 1249+493	1.63	—	7.72	—	6.19	—
100	SBS 1331+493	1.66	—	7.75	—	6.27	—
101	SBS 1415+437 # 1	1.65	—	7.60	—	6.09	—
102	SBS 1415+437 # 2	1.60	—	7.61	—	6.13	—
103	SBS 1415+437 # 1	1.71	—	7.56	—	5.97	—
104	SBS 1415+437 # 1	1.69	—	7.58	—	6.10	—
105	SBS 1420+544	1.75	—	7.76	—	6.27	—
106	SBS 1437+370	1.41	—	7.94	—	6.46	—
107	SBS 1533+574 A	1.46	—	7.91	—	6.48	—
108	Tol 65	1.73	—	7.54	—	5.95	—
109	UGC 4483	1.70	—	7.52	—	5.94	—
110	UM 133	1.66	—	7.68	—	6.02	—
111	UM 420	1.39	—	7.96	—	6.89	—
112	UM 461	1.64	—	7.78	—	6.13	—
113	UM 462 SW	1.38	—	7.98	—	6.47	—
114	VII Zw 403	1.54	—	7.70	—	6.20	—

на всех рисунках видны закономерности в изменениях интенсивностей линий и отношений интенсивностей линий с температурой и металличностью, на всех диаграммах положения областей H II образуют отчетливые последовательности.

Из сравнения рис. 6.5 с рис. 3.2 и 3.6 видно, что изменение отношений интенсивностей линий N_2/R_2 и S_2/R_2 с температурой носит такой же характер, как и изменение классических индикаторов температуры $Q_{3,O}$ и $Q_{2,N}$ в T_e -методе. Как и классические индикаторы температуры, отношения интенсивностей линий N_2/R_2 и S_2/R_2 наиболее чувствительны к температуре при низких температурах, и их чувствительность к температуре уменьшается с увеличением температуры. Принципиально

Таблица 6.2. Интенсивности линий в спектрах областей Н II выборки КТ118 из табл. 6.1. Интенсивности линий исправлены за межзвездное поглощение и нормированы на интенсивность линии водорода H_{β}

Номер	[O II] λ 372.7 λ 372.9	[O III] λ 436.3	[O III] λ 500.7	[N II] λ 575.5	[N II] λ 658.4	[S II] λ 671.7 λ 673.1	Литературный источник
1	2.430	0.0338	3.210	—	0.135	0.221	[69]
2	1.660	0.0559	5.040	—	0.077	0.174	[69]
3	2.860	0.0214	2.530	—	0.204	0.332	[69]
4	2.960	0.0110	2.260	—	0.297	0.527	[69]
5	1.340	0.0907	9.080	—	0.156	0.349	[69]
6	3.070	0.0077	1.440	—	0.341	0.442	[69]
7	1.720	0.0089	2.350	—	0.325	0.331	[69]
8	1.800	0.0091	2.360	—	0.192	0.163	[69]
9	2.480	0.0075	1.810	—	0.411	0.416	[69]
10	2.480	—	1.810	0.0040	0.411	0.416	[69]
11	2.130	0.0059	1.920	—	0.276	0.273	[69]
12	1.920	0.0061	1.650	—	0.233	0.306	[69]
13	1.460	0.0071	2.270	—	0.239	0.200	[69]
14	2.700	—	0.770	0.0047	0.615	0.716	[69]
15	1.760	0.0057	1.980	—	0.278	0.280	[69]
16	1.760	—	1.980	0.0028	0.278	0.280	[69]
17	1.970	0.0062	1.800	—	0.324	0.303	[69]
18	1.600	0.0119	2.590	—	0.203	0.221	[69]
19	3.570	0.0159	1.780	—	0.318	0.817	[69]
20	3.140	0.0189	2.440	—	0.213	0.372	[69]
21	2.210	—	0.740	0.0092	1.280	0.560	[69]
22	0.670	—	0.082	0.0027	1.040	0.487	[170]
23	0.630	—	0.066	0.0028	1.000	0.460	[68]
24	1.260	—	0.121	0.0050	1.120	0.460	[68]
25	1.290	—	0.333	0.0054	1.200	0.410	[68]
26	1.150	—	0.415	0.0065	1.220	0.630	[68]
27	0.780	—	0.190	0.0043	1.170	0.410	[68]

Продолжение табл. 6.2

Номер	[O II] λ 372.7 λ 372.9	[O III] λ 436.3	[O III] λ 500.7	[N II] λ 575.5	[N II] λ 658.4	[S II] λ 671.7 λ 673.1	Литературный источник
28	1.040	—	1.686	0.0048	0.700	0.340	[68]
29	1.470	—	0.461	0.0079	1.160	0.690	[68]
30	0.320	—	0.049	0.0015	0.790	0.410	[68]
31	2.080	—	1.180	0.0074	0.980	0.430	[71]
32	0.470	—	0.090	0.0040	1.620	0.590	[71]
33	1.440	—	0.230	0.0060	1.350	0.510	[71]
34	1.880	—	1.030	0.0050	0.646	0.288	[249]
35	1.850	—	0.200	0.0049	0.980	0.680	[256]
36	1.780	—	0.230	0.0050	0.959	0.568	[249]
37	1.030	0.0110	3.020	—	0.290	0.212	[139]
38	1.850	0.0140	3.160	0.0040	0.334	0.241	[249]
39	2.138	0.0148	3.020	0.0037	0.363	0.225	[512]
40	2.455	0.0141	3.236	—	0.309	0.196	[421]
41	1.860	0.0160	3.450	—	0.282	0.188	[455]
42	1.915	0.0119	3.240	—	0.477	0.357	[298]
43	2.228	0.0134	3.424	—	0.265	0.173	[312]
44	1.980	0.0190	3.170	—	0.236	0.298	[249]
45	1.600	0.0240	3.690	—	0.212	0.230	[249]
46	2.180	0.0230	3.700	0.0040	0.273	0.312	[249]
47	3.090	0.0195	3.311	—	0.331	0.467	[512]
48	3.260	0.0220	3.370	0.0030	0.235	0.307	[455]
49	1.445	0.0871	6.761	—	0.074	0.145	[421]
50	2.120	0.0180	3.180	—	0.359	0.372	[249]
51	1.450	—	3.910	0.0030	0.208	0.233	[249]
52	3.000	0.0220	2.997	—	0.202	0.347	[522]
53	3.110	0.0250	2.670	—	0.236	0.472	[249]
54	1.510	0.0470	4.730	—	0.111	0.189	[249]
55	2.442	0.0520	3.054	—	0.108	0.269	[169]
56	2.130	0.0562	3.628	—	0.101	0.247	[522]
57	1.080	0.0610	5.010	—	0.064	0.144	[130]
58	1.280	0.0640	5.250	—	0.063	0.114	[130]

Продолжение табл. 6.2

Номер	[O II] λ 372.7 λ 372.9	[O III] λ 436.3	[O III] λ 500.7	[N II] λ 575.5	[N II] λ 658.4	[S II] λ 671.7 λ 673.1	Литературный источник
59	1.674	0.0310	3.190	—	0.095	0.217	[504]
60	1.900	0.0526	4.080	—	0.120	0.240	[505]
61	0.935	0.0579	5.350	—	0.051	0.117	[369]
62	2.128	0.0420	3.600	—	0.091	0.166	[200]
63	2.220	0.0500	4.340	—	0.100	0.220	[335]
64	1.467	0.0473	4.260	—	0.071	0.175	[369]
65	2.300	0.0480	4.200	—	0.073	0.180	[202]
66	1.072	0.1289	5.552	—	0.034	0.129	[233]
67	1.524	0.1073	4.587	—	0.047	0.197	[233]
68	0.708	0.1220	4.552	—	0.024	0.117	[233]
69	0.633	0.1707	7.442	—	0.029	0.137	[233]
70	1.166	0.1172	6.629	—	0.057	0.175	[233]
71	0.596	0.1784	5.655	—	0.041	0.069	[233]
72	0.545	0.1630	7.520	—	0.041	0.068	[233]
73	0.515	0.1352	5.023	—	0.024	0.076	[233]
74	0.586	0.1749	4.845	—	0.018	0.064	[233]
75	0.510	0.0550	1.799	—	0.016	0.072	[233]
76	0.579	0.0481	1.609	—	0.020	0.073	[233]
77	0.409	0.1530	4.371	—	0.017	0.042	[233]
78	1.221	0.1007	6.438	—	0.060	0.181	[233]
79	2.422	0.0730	4.637	—	0.147	0.402	[233]
80	2.291	0.0243	3.842	—	0.269	0.303	[233]
81	2.619	0.0244	3.398	—	0.267	0.368	[233]
82	1.307	0.0983	4.948	—	0.056	0.208	[233]
83	1.398	0.1258	5.786	—	0.037	0.175	[233]
84	0.727	0.1280	5.605	—	0.029	0.107	[233]
85	0.601	0.1422	6.649	—	0.025	0.089	[233]
86	1.576	0.0704	4.302	—	0.062	0.210	[233]
87	0.273	0.1041	3.082	—	0.009	0.041	[233]
88	1.844	0.0906	4.701	—	0.060	0.286	[233]
89	0.550	0.1330	4.008	—	0.016	0.075	[233]
90	0.455	0.1262	4.243	—	0.013	0.066	[233]

Окончание табл. 6.2

Номер	[O II] λ 372.7 λ 372.9	[O III] λ 436.3	[O III] λ 500.7	[N II] λ 575.5	[N II] λ 658.4	[S II] λ 671.7 λ 673.1	Литературный источник
91	0.980	0.1060	5.091	—	0.031	0.166	[233]
92	1.065	0.0957	6.024	—	0.049	0.162	[233]
93	0.873	0.1440	5.853	—	0.034	0.136	[233]
94	0.836	0.1360	6.648	—	0.046	0.146	[233]
95	0.654	0.1073	3.749	—	0.022	0.100	[233]
96	2.186	0.0850	3.798	—	0.085	0.320	[233]
97	0.816	0.1321	4.866	—	0.024	0.104	[233]
98	1.069	0.1000	6.071	—	0.041	0.162	[233]
99	1.220	0.1067	4.639	—	0.040	0.128	[233]
100	0.942	0.1334	5.596	—	0.034	0.120	[233]
101	0.968	0.0850	3.613	—	0.033	0.156	[233]
102	1.099	0.0710	3.210	—	0.042	0.187	[233]
103	1.133	0.0854	3.391	—	0.032	0.178	[233]
104	1.030	0.0881	3.557	—	0.038	0.159	[233]
105	0.558	0.1824	6.901	—	0.019	0.089	[233]
106	1.350	0.0889	5.290	—	0.058	0.246	[233]
107	2.765	0.0744	4.109	—	0.128	0.420	[233]
108	0.684	0.0956	3.721	—	0.019	0.113	[233]
109	1.293	0.0682	2.744	—	0.037	0.122	[233]
110	1.764	0.0899	3.777	—	0.043	0.202	[233]
111	2.523	0.0670	4.149	—	0.284	0.471	[233]
112	0.573	0.1426	6.136	—	0.015	0.098	[233]
113	1.820	0.0812	5.091	—	0.075	0.287	[233]
114	1.359	0.0720	3.522	—	0.051	0.182	[233]

важное отличие отношений N_2/R_2 и S_2/R_2 от классических индикаторов температуры состоит в том, что интенсивности линий в классических индикаторах различаются на 3—4 порядка при низких температурах (линии [O III] λ 495.9 + λ 500.7 и [O III] λ 436.3 в индикаторе температуры $Q_{3,O}$ и линии [N II] λ 654.8 + λ 658.4 и [N II] λ 575.5 в индикаторе температуры $Q_{2,N}$), в то время как интенсивности линий N_2 , R_2 и S_2 различаются в пределах одного порядка при низких температурах. Более того, линии N_2 и S_2 имеют максимальную интенсивность при низких температурах.

6.2.3. ONS-калибровка

Итак, отношения интенсивностей линий N_2/R_2 и S_2/R_2 являются хорошими индикаторами электронной температуры t_2 в туманности. Можно ожидать, что прокалиброванные соотношения $t_2 = f(N_2/R_2)$ и $t_2 = f(S_2/R_2)$ позволят найти приближенные значения t_2 . Для повышения надежности можно найти среднее значение t_2 . Можно действовать иначе — использовать одновременно оба индикатора температуры, т. е. прокалибровать соотношение $t_2 = f(N_2/R_2, S_2/R_2)$. Можно ожидать, что такое соотношение будет давать более надежные значения t_2 по сравнению с соотношениями, в которых используется только один индикатор температуры. Установленное выше ff -соотношение свидетельствует о том, что комбинация линий R_3 и R_2 (или комбинация R_3 и P) является хорошим индикатором электронной температуры t_3 в туманности. Так как наблюдается однозначная связь между t_2 и t_3 в туманности (или ситуация близка к таковой), то один и тот же индикатор можно использовать как для определения t_2 , так и для определения t_3 . Более того, из общих соображений понятно, что предпочтительнее строить калибровки, основанные на индикаторах, которые отображают условия как в зоне O^+ , так и в зоне O^{++} . Поэтому ниже получено соотношение для определения t_2 , в котором используются три индикатора температуры — отношения интенсивностей линий N_2/R_2 и S_2/R_2 и комбинация R_3 и P .

Из рис. 6.5—6.7 видно, что графики интенсивностей всех линий и их отношений в зависимости от температуры (металличности) не являются монотонными на всем интервале температур (металличностей). Детальный анализ показывает, что обла-

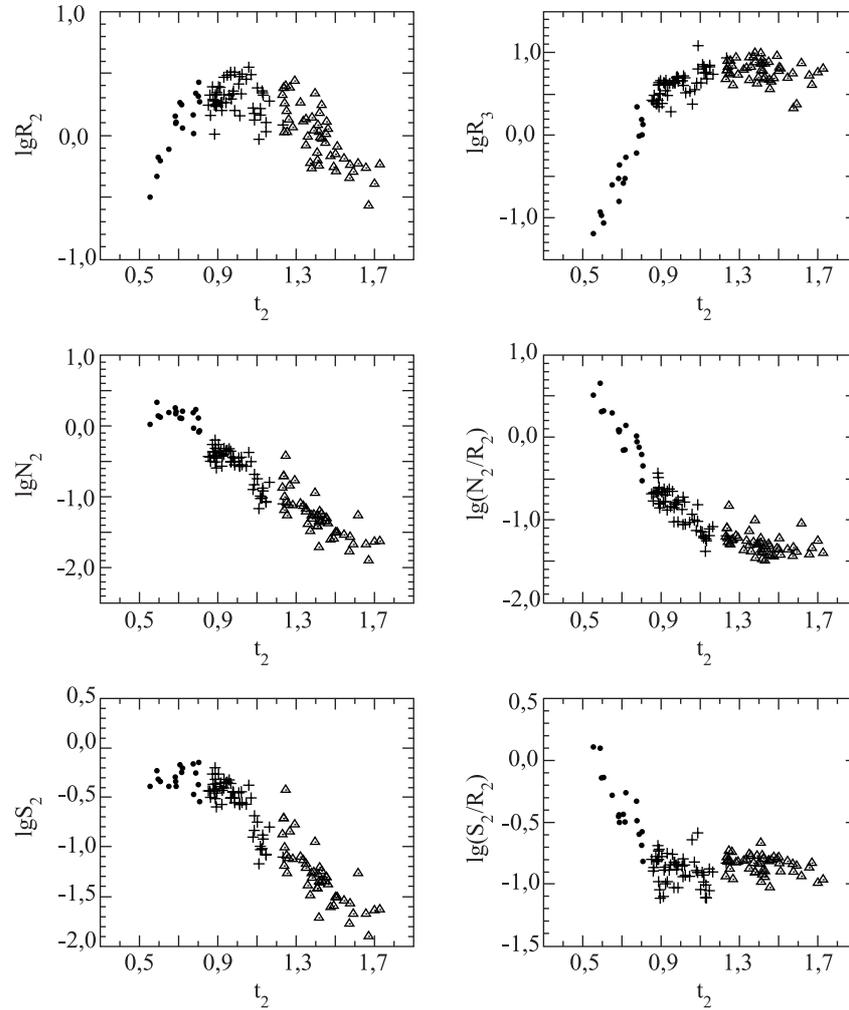


Рис. 6.5. Зависимости интенсивностей линий и отношений интенсивностей линий в спектрах областей Н II от электронной температуры t_2 . Точки — области Н II с $\lg N_2 > -0.1$ из выборки КТ118, плюсы — области Н II с $\lg N_2 < -0.1$ и $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) > 8.0$. Треугольники — области Н II с $\lg N_2 < -0.1$ и $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.0$

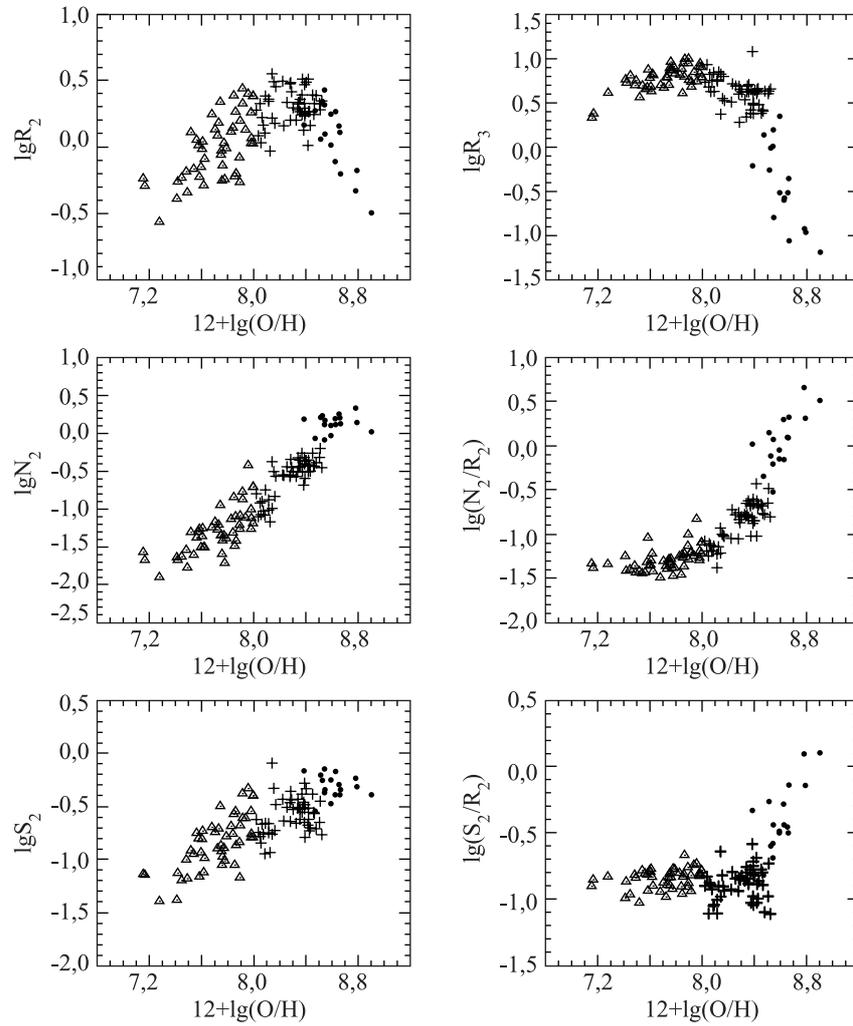


Рис. 6.6. Зависимость интенсивностей линий и отношений интенсивностей линий в спектрах областей Н II от содержания кислорода. Точки — области Н II с $\lg N_2 > -0.1$ из выборки КТ118, плюсы — области Н II с $\lg N_2 < -0.1$ и $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) > 8.0$, Треугольники — области Н II с $\lg N_2 < -0.1$ и $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.0$

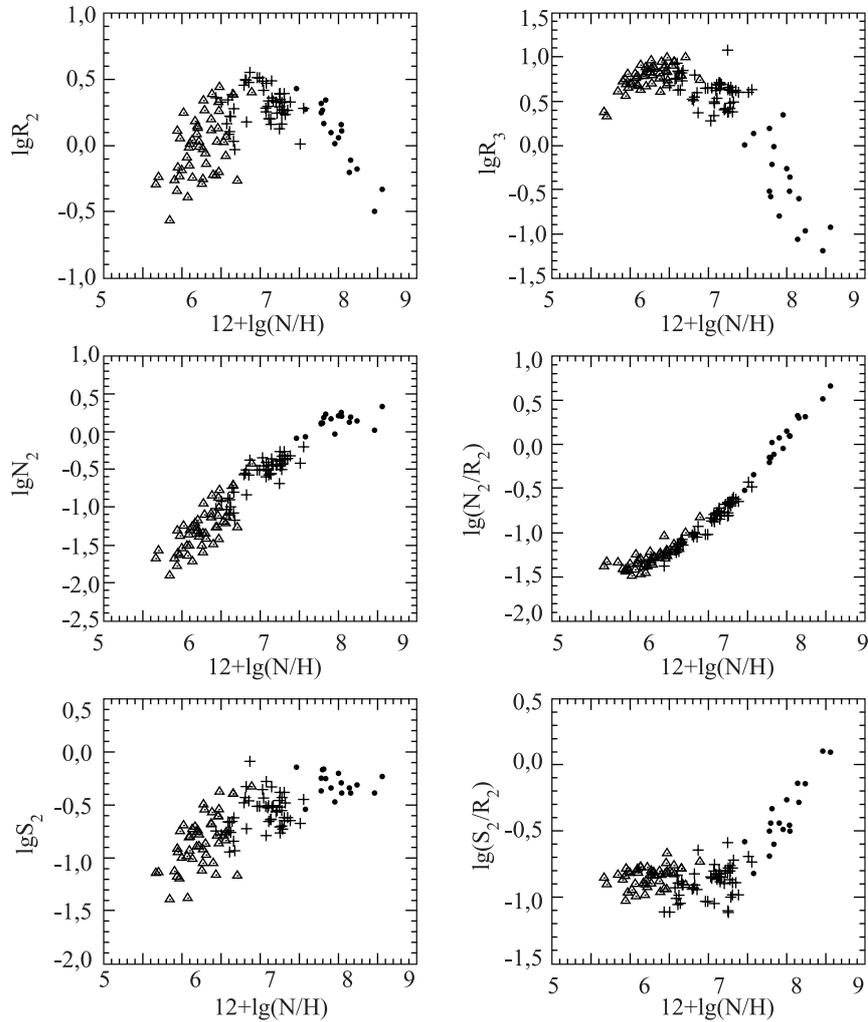


Рис. 6.7. Зависимость интенсивностей линий и отношений интенсивностей линий в спектрах областей Н II от содержания азота. Точки — области Н II с $\lg N_2 > -0.1$ из выборки КТ118, плюсы — области Н II с $\lg N_2 < -0.1$ и $12 + \lg(O/H) > 8.0$, треугольники — области Н II с $\lg N_2 < -0.1$ и $12 + \lg(O/H) < 8.0$

Таблица 6.3. Классификация областей Н II

Класс областей Н II	Критерий классификации	Интервал металличностей $Z=12+\lg(\text{O}/\text{H})$	Интервал температур
Холодные	$\lg(N_2) \geq -0.1$	$Z \geq 8.4$	$t_2 \leq 0.85$
Теплые	$\lg(N_2) < -0.1,$ $\lg(N_2/S_2) \geq -0.25$	$8.55 \geq Z \geq 8.0$	$1.2 \geq t_2 \geq 0.85$
Горячие	$\lg(N_2) < -0.1$ $\lg(N_2/S_2) < -0.25$	$Z \leq 8.0$	$t_2 \geq 1.2$

сти Н II можно разделить на три класса; холодные, теплые и горячие. Критерием, разделяющим холодные и теплые области Н II, служит значение $\lg N_2 = -0.1$ (рис. 6.8). В холодных областях Н II $\lg N_2 > -0.1$, в теплых $\lg N_2 < -0.1$. Граница между теплыми и горячими областями Н II менее очевидна. Критерием, разделяющим теплые и горячие области Н II, служит значение $\lg(N_2/S_2) = -0.25$ (см. рис. 6.8). В теплых областях Н II $\lg(N_2/S_2) > -0.25$, в горячих $\lg(N_2/S_2) < -0.25$. Принятые критерии классификации и характеристики трех классов областей Н II приведены в табл. 6.3.

Для каждого класса областей Н II получали уравнение для определения электронной температуры. Было принято простое выражение, связывающее электронную температуру и выбранные выше индикаторы:

$$t = \frac{1}{a_0 + a_1 P + a_2 \lg R_3 + a_3 \lg(N_2/R_2) + a_4 \lg(S_2/R_2)}. \quad (6.18)$$

Это выражение является аналогом уравнений для определения электронной температуры в классическом T_e методе (см. уравнения (3.13) и (3.15)). Численные значения коэффициентов в уравнении (6.18) находят из условия, чтобы средняя величина разброса относительно найденной зависимости σ_t , которая опреде-

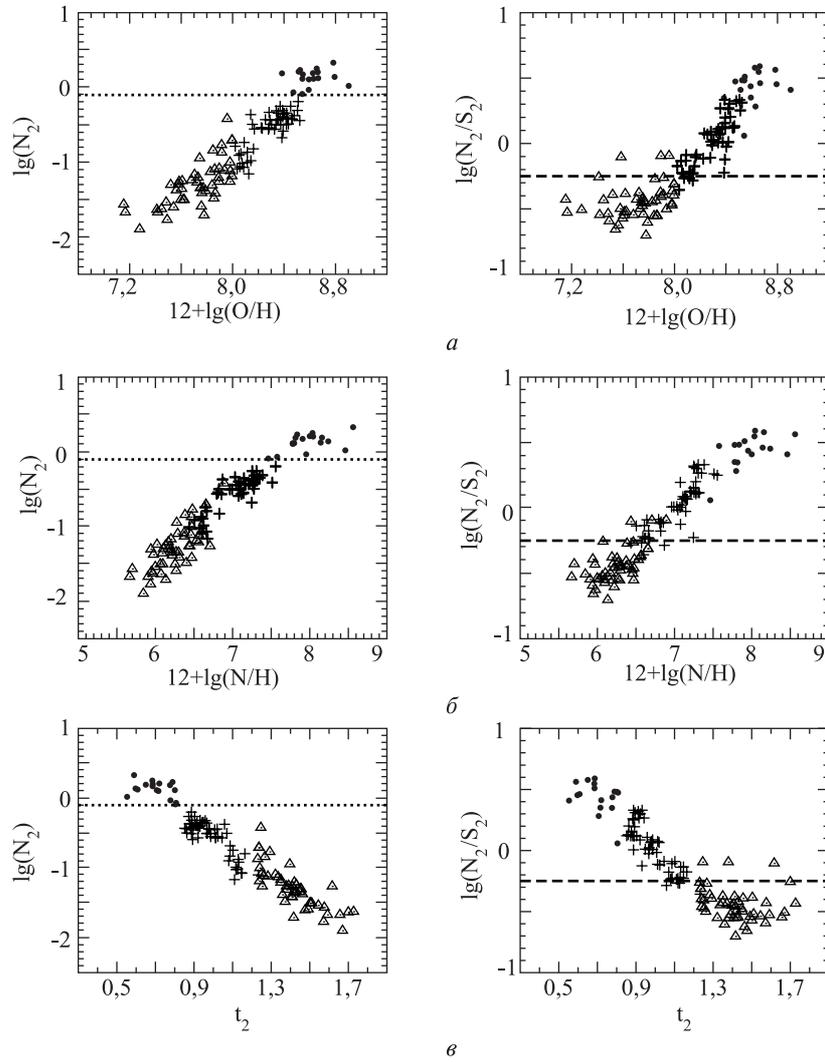


Рис. 6.8. Зависимости интенсивности эмиссионной линии N_2 и отношения интенсивностей N_2/S_2 от содержания кислорода $12 + \lg(O/H)$ (а), содержания азота $12 + \lg(N/H)$ (б) и электронной температуры t_2 (в) для выборки КТ118. Пунктирная линия — принятая граница между холодными и теплыми областями Н II. Штриховая линия — принятая граница между теплыми и горячими областями Н II (остальные обозначения см. на рис. 6.5)

ляется как

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{j=n} \left(\frac{t_j^{CAL}}{t_j^{OBS}} - 1 \right)^2}, \quad (6.19)$$

была минимальной. Здесь t_j^{CAL} — электронная температура t_2 , вычисленная из уравнения (6.18), а t_j^{OBS} — измеренная электронная температура t_2 в области Н II. Используя это условие и выборку КТ118 областей Н II в качестве калибровочных точек, в работе [409] получены следующие уравнения для определения электронной температуры:

$$\begin{aligned} t_{ONS} &= [1.111 + 0.505 P - 0.446 \lg R_3 + \\ &+ 0.081 \lg(N_2/R_2) - 0.008 \lg(S_2/R_2)]^{-1} \\ &\text{для } \lg N_2 > -0.1, \\ t_{ONS} &= [1.325 - 0.007 P - 0.229 \lg R_3 + \\ &+ 0.362 \lg(N_2/R_2) - 0.173 \lg(S_2/R_2)]^{-1} \\ &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \quad \lg(N_2/S_2) > -0.25, \\ t_{ONS} &= [1.318 - 0.649 P + 0.283 \lg R_3 + \\ &+ 0.115 \lg(N_2/R_2) + 0.151 \lg(S_2/R_2)]^{-1} \\ &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \quad \lg(N_2/S_2) < -0.25, \end{aligned} \quad (6.20)$$

где t_{ONS} обозначает электронную температуру t_2 .

Как отмечалось выше, эти же комбинации интенсивностей линий могут служить в качестве индикаторов металличности областей Н II. Для описания связи между содержанием кислорода и индикаторами металличности было принято следующее простое выражение:

$$\begin{aligned} 12 + \lg(\text{O}/\text{H}) &= \\ &= a_0 + a_1 P + a_2 \lg R_3 + a_3 \lg(N_2/R_2) + a_4 \lg(S_2/R_2). \end{aligned} \quad (6.21)$$

Численные значения коэффициентов в уравнении (6.21) находят из условия, что разброс $\sigma_{\text{O}/\text{H}}$ относительно полученной зависимости

$$\sigma_{\text{O}/\text{H}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{j=n} (\lg(\text{O}/\text{H})_j^{CAL} - \lg(\text{O}/\text{H})_j^{OBS})^2} \quad (6.22)$$

является минимальным. Здесь $(\text{O}/\text{H})_j^{CAL}$ — содержание кислорода, найденное из уравнения (6.21), а $(\text{O}/\text{H})_j^{OBS}$ — содержание кислорода, определенное при помощи T_e -метода. С использованием этого условия и выборки КТ118 в качестве калибровочных точек в работе [409] приведены следующие уравнения для определения содержания кислорода:

$$\begin{aligned}
 (\text{O}/\text{H})_{ONS}^* &= 8.277 + 0.657 P - 0.399 \lg R_3 - \\
 &- 0.061 \lg(N_2/R_2) + 0.005 \lg(S_2/R_2) \\
 &\text{для } \lg N_2 > -0.1, \\
 (\text{O}/\text{H})_{ONS}^* &= 8.816 - 0.733 P + 0.454 \lg R_3 + \\
 &+ 0.710 \lg(N_2/R_2) - 0.337 \lg(S_2/R_2) \quad (6.23) \\
 &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) > -0.25, \\
 (\text{O}/\text{H})_{ONS}^* &= 8.774 - 1.855 P + 1.517 \lg R_3 + \\
 &+ 0.304 \lg(N_2/R_2) + 0.328 \lg(S_2/R_2) \\
 &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) < -0.25,
 \end{aligned}$$

где $(\text{O}/\text{H})_{ONS}^* = 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{ONS}$. Несколько точек имеют большие отклонения (> 0.2 dex) от найденной зависимости. Эти точки отбрасывали и не учитывали при нахождении коэффициентов в уравнениях.

Аналогичным образом были получены уравнения для определения содержания азота в областях II:

$$\begin{aligned}
 (\text{N}/\text{H})_{ONS}^* &= 7.811 + 0.290 P - 0.081 \lg R_3 + \\
 &+ 0.877 \lg(N_2/R_2) + 0.002 \lg(S_2/R_2) \\
 &\text{для } \lg N_2 > -0.1, \\
 (\text{N}/\text{H})_{ONS}^* &= 8.241 - 0.781 P + 0.612 \lg R_3 + \\
 &+ 1.455 \lg(N_2/R_2) - 0.209 \lg(S_2/R_2) \quad (6.24) \\
 &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) > -0.25, \\
 (\text{N}/\text{H})_{ONS}^* &= 8.080 - 1.476 P + 1.349 \lg R_3 + \\
 &+ 1.259 \lg(N_2/R_2) + 0.004 \lg(S_2/R_2) \\
 &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) < -0.25,
 \end{aligned}$$

где $(\text{N}/\text{H})_{ONS}^* = 12 + \lg(\text{N}/\text{H})_{ONS}$. В этом случае несколько точек также имеют большие отклонения (> 0.2 dex) от найденной

зависимости. При нахождении коэффициентов эти точки отбрасывали.

На рис. 6.9 приведено сравнение электронных температур t_{ONS} , найденных при помощи уравнения (6.20), и измеренных температур t_{OBS} для калибровочных областей Н II. Видно, что

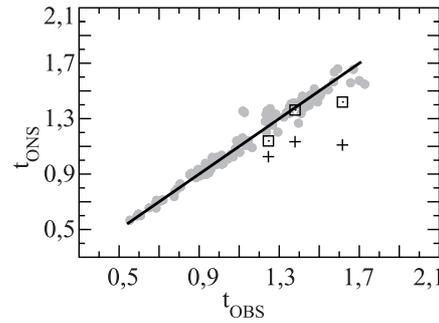


Рис. 6.9. Сравнение электронных температур t_{ONS} , найденных при помощи ONS-калибровки (6.20), и измеренных температур t_{OBS} для калибровочных областей Н II. Для трех областей Н II показаны два значения t_{ONS} , полученные из соотношений для теплых (плюсы) и горячих (квадраты) областей Н II (см. текст). Сплошная линия — равные значения t

значения температур t_{ONS} и t_{OBS} хорошо согласуются для большинства объектов. Однако для трех объектов (HS 0837 + 4717, HS 1028 + 3843 и UM 420) разница значений температур t_{ONS} и t_{OBS} велика. Отношение содержания азота и кислорода N/O в этих объектах увеличено, и линии азота в их спектрах усилены. Во всех галактиках с большим отношением N/O обнаружены признаки звезд типа Вольфа — Райе [296]. Это дает основание предположить, что повышенное отношение N/O обусловлено локальным обогащением межзвездной среды азотом, обусловленное выбросом обогащенного азотом вещества звездами типа Вольфа — Райе. В работе [414] приведено, что область современного звездообразования в галактике HS 0837 + 4717 содержит порядка 1000 звезд типа Вольфа — Райе. Тем не менее, нельзя с полной уверенностью сказать, что пекулярное отношение N/O в трех указанных галактиках вызвано локальным обогащением

межзвездной среды азотом звездами типа Вольфа — Райе. Следует отметить, что галактики с повышенным отношением содержания азота и кислорода встречаются очень редко [296, 414].

Согласно принятым критериям классификации HS 0837 + 4717, HS 1028 + 3843 и UM 420 принадлежат к классу теплых областей Н II, тогда как измеренные температуры и содержания указывают, что эти объекты принадлежат к классу горячих областей Н II. Ошибочная классификация происходит из-за повышенного содержания азота в этих объектах. Электронные температуры t_{ONS} в HS 0837 + 4717, HS 1028 + 3843 и UM 420, найденные при помощи уравнения для горячих областей Н II, показаны на рис. 6.9 квадратами. В этом случае разница температур t_{ONS} и t_{OBS} в HS 0837 + 4717, HS 1028 + 3843 и UM 420 уменьшается.

Из рис. 6.9 видно, что разброс на диаграмме $t_{ONS} - t_{OBS}$ для холодных областей Н II меньше, чем для горячих областей Н II. Иными словами, ONS-калибровка дает более точные значения электронной температуры для холодных областей Н II, чем для горячих областей Н II. Это ожидаемый результат. Выше было отмечено, что отношения интенсивностей линий N_2/R_2 и S_2/R_2 , которые служат индикаторами температуры в ONS-калибровке, наиболее чувствительно к изменениям температуры в интервале низких температур (см. рис. 6.5).

На рис. 6.10, а показано сравнение измеренных содержаний кислорода $(O/H)_{OBS}$ и содержаний кислорода $(O/H)_{ONS}$, найденных при помощи ONS-калибровки (6.23). Видно, что значения содержаний $(O/H)_{OBS}$ и $(O/H)_{ONS}$ хорошо согласуются для большинства объектов. Существенные расхождения между $(O/H)_{OBS}$ и $(O/H)_{ONS}$ определены для тех же трех объектов (HS 0837 + 4717, HS 1028 + 3843 и UM 420), для которых была получена большая разница между температурами t_{ONS} и t_{OBS} . Содержания кислорода в этих объектах показаны на рис. 6.10 плюсами. Содержания $(O/H)_{ONS}$ в этих объектах заново переопределены с использованием уравнения ONS-калибровки для горячих областей Н II. Полученные значения $(O/H)_{ONS}$ показаны на рис. 6.10 квадратами. В этом случае расхождения между $(O/H)_{OBS}$ и $(O/H)_{ONS}$ в HS 0837 + 4717, HS 1028 + 3843 и UM 420 уменьшаются.

Используя ONS-калибровку, содержание кислорода в области Н II можно определить двумя способами. С помощью первого способа находят непосредственно содержания кислорода $(O/H)_{ONS}$ при помощи уравнения (6.23). С помощью второго

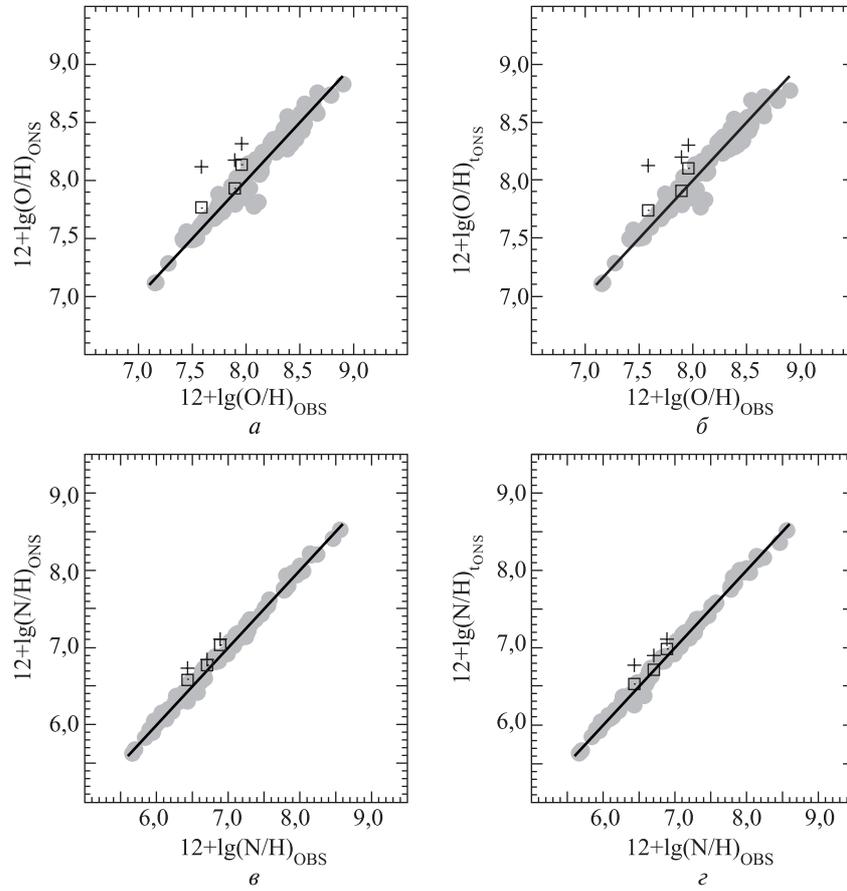


Рис. 6.10. Сравнение наблюдаемых содержаний кислорода $(\text{O}/\text{H})_{\text{OBS}}$ и азота $(\text{N}/\text{H})_{\text{OBS}}$ со значениями содержаний $(\text{O}/\text{H})_{\text{ONS}}$ и $(\text{N}/\text{H})_{\text{ONS}}$, найденными при помощи ONS-калибровки по уравнениям (6.23) и (6.24) (а, в), а также со значениями содержаний, вычисленными при помощи уравнений T_e -метода с электронной температурой t_{ONS} (б, г). Для трех областей Н II показаны два значения содержаний кислорода и азота, полученных из соотношений для теплых (плюсы) и горячих (квадраты) областей Н II (см. текст). Сплошная линия — равные значения

способа сначала определяют электронную температуру $t_2 = t_{ONS}$ в туманности из уравнения (6.20). Затем содержание кислорода $(O/H)_{t_{ONS}}$ находят при помощи стандартных уравнений T_e -метода с полученной электронной температурой t_{ONS} . На рис. 6.10, б показано сравнение найденных таким способом содержаний кислорода $(O/H)_{t_{ONS}}$ с измеренными содержаниями кислорода $(O/H)_{OBS}$. Снова для HS 0837 + 4717, HS 1028 + 3843 и UM 420 показаны два значения $(O/H)_{t_{ONS}}$. Сравнение рис. 6.10, а и рис. 6.10, б, позволяет сделать вывод, что оба указанных способа определения содержаний кислорода с использованием ONS-калибровки дают надежные значения содержания кислорода в большинстве областей Н II. Разброс в обоих случаях $\sigma_{(O/H)} \approx 0.075$ dex для 115 калибровочных точек, исключая три пекулярные объекта.

Может показаться странным, что уменьшение разброса на диаграмме $t_{ONS} - t_{OBS}$ при низких температурах не приводит к уменьшению разброса на диаграмме $(O/H)_{t_{ONS}} - (O/H)_{OBS}$ при больших содержаниях кислорода. Анализ уравнений T_e -метода для определения содержания ионов кислорода (уравнения (3.71) и (3.72)) дает естественное объяснение этому кажущемуся противоречию. Так как содержание ионов кислорода обратно пропорционально электронной температуре, то малая ошибка в определении электронной температуры при температуре $t \approx 0.6$ и в два раза большая ошибка в определении электронной температуры при температуре $t \approx 1.2$ дают примерно одинаковую ошибку содержания кислорода. Поэтому уменьшение разброса на диаграмме $t_{ONS} - t_{OBS}$ для холодных областей Н II не сопровождается уменьшением разброса на диаграмме $(O/H)_{t_{ONS}} - (O/H)_{t_{OBS}}$ для тех же областей Н II.

На рис. 6.10, в, г показано сравнение измеренных содержаний азота $(N/H)_{OBS}$ и содержаний азота, найденных двумя способами при помощи ONS-калибровки. Диаграмма $(N/H)_{ONS} - (N/H)_{OBS}$ представлена на рис. 6.10, в, диаграмма $(O/H)_{t_{ONS}} - (O/H)_{OBS}$ — на рис. 6.10, г. На основании этих диаграмм делаем вывод, что оба способа определения содержания азота с использованием ONS-калибровки дают надежные значения содержания азота в большинстве областей Н II. Разброс в обоих случаях $\sigma_{(N/H)} \approx 0.05$ dex для 115 калибровочных точек, исключая три пекулярные объекта. Следует отметить, что точность определения содержаний азота при помощи ONS-калибровки выше, чем точность определения содержания кислорода.

ONS-калибровка базируется на четырех ключевых пунктах:

- i*) выбор индикаторов металличности (и температуры),
- ii*) деление областей $H II$ на три класса,
- iii*) выбор критериев классификации областей $H II$,
- iv*) комбинированность, т. е. предположение о том, что калибровка должна основываться на индикаторах, которые отображают условия как в зоне O^+ , так и в зоне O^{++} .

Каждый из этих пунктов вытекает из анализа имеющихся наблюдательных и теоретических данных. Тем не менее каждый из этих пунктов в той или иной степени основан на предположениях. Высокая точность определения трех важнейших характеристик областей $H II$ (электронной температуры и содержаний кислорода и азота) при помощи ONS-калибровки во всем диапазоне металличностей (температур) областей $H II$ является веским свидетельством в пользу справедливости сделанных предположений.

6.2.4. ON и NS-калибровки

Комбинация параметров R_3 и P является индикатором физических условий во внутренней зоне области $H II$. Отношения интенсивностей линий N_2/R_2 и S_2/R_2 — индикаторами физических условий во внешней зоне области $H II$. Если оба индикатора физических условий во внешней зоне области $H II$ надежны, то для построения комбинированной калибровки достаточно использовать только один из них. В работе [409] построена ON-калибровка, в которой отношение интенсивностей линий N_2/R_2 используется в качестве индикатора физических условий в зоне свечения O^+ . Точность определения электронной температуры и содержаний кислорода и азота при помощи ON-калибровки сравнима с точностью этих величин, найденных с использованием ONS-калибровки, во всем диапазоне металличностей (температур) областей $H II$. В то же время OS-калибровка, в которой отношение интенсивностей линий S_2/R_2 используется в качестве индикатора физических условий в зоне свечения O^+ , дает высокую точность в одних случаях (например, содержание кислорода в холодных областях $H II$) и низкую точность в других случаях (содержание азота в теплых областях $H II$). Это может служить указанием на то, что отношение интенсивностей линий N_2/R_2 является более надежным индикатором физических условий во внешней зоне области $H II$, чем отношение интенсивностей линий S_2/R_2 .

Соотношения для определения содержаний кислорода и азота и электронной температуры в рамках ON-калибровки были получены при тех же условиях, что и соответствующие уравнения в рамках ONS-калибровки. При нахождении численных значений коэффициентов в соотношениях налагалось то же требование, чтобы разброс $\sigma_{O/H}$ относительно определенной зависимости был минимальным, и использовалась та же выборка калибровочных точек. Были получены следующие уравнения для определения содержаний кислорода:

$$\begin{aligned}
 (O/H)_{ON}^* &= 8.606 - 0.105 \lg R_3 - \\
 &- 0.410 \lg R_2 - 0.150 \lg(N_2/R_2) \\
 &\text{для } \lg N_2 > -0.1, \\
 (O/H)_{ON}^* &= 8.642 + 0.077 \lg R_3 + \\
 &+ 0.411 \lg R_2 + 0.601 \lg(N_2/R_2) \quad (6.25) \\
 &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) > -0.25, \\
 (O/H)_{ON}^* &= 8.013 + 0.905 \lg R_3 + \\
 &+ 0.602 \lg R_2 + 0.751 \lg(N_2/R_2) \\
 &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) < -0.25,
 \end{aligned}$$

где $(O/H)_{ON}^* = 12 + \lg(O/H)_{ON}$. Несколько точек с большими отклонениями (> 0.2 dex) отбрасывали и не учитывали при выводе конечного уравнения.

Аналогичным образом получены уравнения для определения содержания азота:

$$\begin{aligned}
 (N/H)_{ON}^* &= 7.955 + 0.048 \lg R_3 - \\
 &- 0.171 \lg N_2 + 1.015 \lg(N_2/R_2) \\
 &\text{для } \lg N_2 > -0.1, \\
 (N/H)_{ON}^* &= 7.928 + 0.291 \lg R_3 + \\
 &+ 0.454 \lg N_2 + 0.953 \lg(N_2/R_2) \quad (6.26) \\
 &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) > -0.25, \\
 (N/H)_{ON}^* &= 7.505 + 0.839 \lg R_3 + \\
 &+ 0.492 \lg N_2 + 0.970 \lg(N_2/R_2) \\
 &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) < -0.25,
 \end{aligned}$$

где $(N/H)_{ON}^* = 12 + \lg(N/H)_{ON}$.

Для определения электронной температуры $t_{ON} = t_2$ получены следующие уравнения:

$$\begin{aligned}
 t_{ON} &= [1.373 - 0.217 \lg R_3 - 0.325 \lg R_2 + \\
 &+ 0.006 \lg(N_2/R_2)]^{-1} \\
 &\text{для } \lg N_2 > -0.1, \\
 t_{ON} &= 1/[1.437 - 0.254 \lg R_3 + 0.013 \lg R_2 + \\
 &+ 0.302 \lg(N_2/R_2)] \\
 &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) > -0.25, \\
 t_{ON} &= 1/[0.999 + 0.110 \lg R_3 + 0.169 \lg R_2 + \\
 &+ 0.278 \lg(N_2/R_2)] \\
 &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) < -0.25.
 \end{aligned} \tag{6.27}$$

Снова несколько точек с большими отклонениями отбрасывали и не учитывали при выводе конечного уравнения. Разброс для 115 калибровочных точек, исключая три пекулярные объекта, составляет $\sigma_t \approx 5\%$.

Как и в случае ONS-калибровки, содержание кислорода (и азота) в области Н II можно определить двумя способами, используя ON-калибровку. При первом способе находят непосредственно содержания кислорода $(O/H)_{ON}$ при помощи уравнения (6.25). При втором способе сначала определяют электронную температуру $t_2 = t_{ON}$ в туманности из уравнения (6.27). Затем находят содержание кислорода $(O/H)_{t_{ON}}$ при помощи стандартных уравнений T_e -метода с определенной электронной температурой t_{ON} . На рис. 6.11 показано сравнение измеренных содержаний кислорода и азота $(N/H)_{OBS}$ и содержаний кислорода и азота, определенных двумя способами при помощи ON-калибровки. Сравнение рис. 6.11 и 6.10 наглядно показывает согласие между содержаниями, найденными при помощи ON и ONS-калибровок.

В рамках цифрового обзора неба Sloan (SDSS) [552] получено очень большое количество спектров областей Н II в близких спиральных и неправильных галактиках и интегральных спектров далеких галактик. SDSS-спектры покрывают интервал длин волн от 380 до 930 нм. Поэтому спектры близких объектов с красными смещениями, меньшими 0.023, не содержат небулярной линии кислорода R_2 . Отсутствие этой линии не позволяет применить ON- и ONS- (и другие) калибровки для определения химического состава близких объектов по SDSS-спектрам.

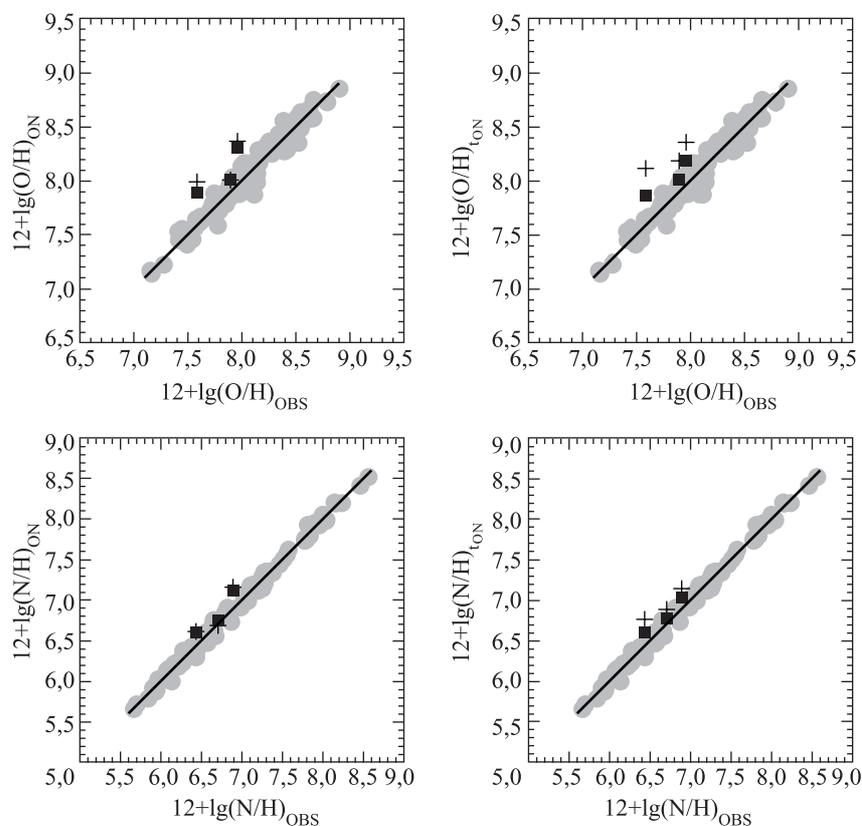


Рис. 6.11. Сравнение измеренных значений содержаний кислорода и азота со значениями содержаний, найденными при помощи ON-калибровки по уравнениям (6.25) и (6.26), а также значениями, определенными при помощи T_e -метода с электронной температурой t_{ON} . Для трех областей Н II показаны два значения t_{ONS} , полученных из соотношений для теплых (плюсы) и горячих (квадраты) областей Н II (см. текст). Сплошная линия — равные значения

Для определения химического состава близких объектов по SDSS-спектрам нужна калибровка, в которой не используется интенсивность небулярной линии кислорода R_2 . Такая калибров-

ка, названная NS-калибровкой, приведена в работе [399]. Уравнения NS-калибровки содержат интенсивности небулярных линий ионов O^{++} , N^+ и S^+ . В качестве индикатора физических условий во внешней зоне области Н II используется отношение интенсивностей линий азота и серы N_2/S_2 (поэтому калибровка и получила название NS-калибровка). Разница между энергиями возбуждения исходных уровней линий N_2 и S_2 мала. Предполагается, что чувствительность отношения интенсивностей линий N_2/S_2 к электронной температуре в туманности обусловлена двумя причинами. Во-первых, отношение размеров зон свечения ионов N^+ и S^+ является функцией электронной температуры туманности. Во-вторых, при высоких металличностях ($12 + \lg(O/H) > 8.3$) отношение содержаний азота и серы N/S коррелирует с содержанием кислорода, которое, в свою очередь, коррелирует с электронной температурой. Следовательно, при высоких металличностях отношение содержаний азота и серы N/S коррелирует с электронной температурой туманности.

Для описания связи между содержанием кислорода и интенсивностями линий было принято следующее простое выражение:

$$12 + \lg(O/H) = a_0 + a_1 \lg R_3 + a_2 \lg(N_2) + a_3 \lg(N_2/S_2). \quad (6.28)$$

При нахождении численных значений коэффициентов налагалось стандартное требование, чтобы разброс $\sigma_{O/H}$ относительно полученной зависимости был минимальным, и была использована выборка калибровочных точек, которая использовалась при построении ON- и ONS-калибровок. В холодных областях Н II высокой металличности интенсивность линии N_2 остается примерно постоянной (см. рис. 6.5–6.7). Для этих областей Н II вместо интенсивности линии N_2 использовалась интенсивность линии S_2 . Были получены следующие уравнения:

$$\begin{aligned} (O/H)_{NS}^* &= 8.454 - 0.216 \lg R_3 - 0.362 \lg S_2 - \\ &\quad - 0.101 \lg(N_2/S_2) \\ &\quad \text{для } \lg N_2 > -0.1, \\ (O/H)_{NS}^* &= 8.456 + 0.082 \lg R_3 + 0.391 \lg N_2 + \\ &\quad + 0.290 \lg(N_2/S_2) \\ &\quad \text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) > -0.25, \\ (O/H)_{NS}^* &= 7.881 + 0.929 \lg R_3 + 0.650 \lg N_2 + \\ &\quad + 0.025 \lg(N_2/S_2) \\ &\quad \text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) < -0.25, \end{aligned} \quad (6.29)$$

где $(\text{O}/\text{H})_{NS}^* = 12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{NS}$. Несколько точек с большими отклонениями (> 0.3 dex) отбрасывали и не учитывали при выводе конечного уравнения. Разброс для 115 калибровочных точек, исключая три пекулярные объекта, составляет $\sigma_{(\text{O}/\text{H})} \approx 0.08$ dex.

Для определения содержания азота были получены следующие уравнения:

$$\begin{aligned}
 (\text{N}/\text{H})_{NS}^* &= 7.414 - 0.383 \lg R_3 + 0.119 \lg S_2 + \\
 &+ 0.988 \lg(N_2/S_2) \\
 &\text{для } \lg N_2 > -0.1, \\
 (\text{N}/\text{H})_{NS}^* &= 7.250 + 0.078 \lg R_3 + 0.529 \lg N_2 + \\
 &+ 0.906 \lg(N_2/S_2) \\
 &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) > -0.25, \\
 (\text{N}/\text{H})_{NS}^* &= 6.599 + 0.888 \lg R_3 + 0.663 \lg N_2 + \\
 &+ 0.371 \lg(N_2/S_2) \\
 &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) < -0.25,
 \end{aligned} \tag{6.30}$$

где введено обозначение $(\text{N}/\text{H})_{NS}^* = 12 + \lg(\text{N}/\text{H})_{NS}$. Разброс для 115 калибровочных точек, исключая три пекулярные объекта, составляет $\sigma_{(\text{O}/\text{H})} \approx 0.11$ dex.

Для определения электронной температуры $t_{NS} = t_2$ получены следующие уравнения:

$$\begin{aligned}
 t^{-1} &= 1.185 - 0.351 \lg R_3 - 0.273 \lg S_2 + \\
 &+ 0.059 \lg(N_2/S_2) \\
 &\text{для } \lg N_2 > -0.1, \\
 t^{-1} &= 1.226 - 0.219 \lg R_3 + 0.133 \lg N_2 + \\
 &+ 0.225 \lg(N_2/S_2) \\
 &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) > -0.25, \\
 t^{-1} &= 0.953 + 0.117 \lg R_3 + 0.230 \lg N_2 + \\
 &+ 0.033 \lg(N_2/S_2) \\
 &\text{для } \lg N_2 < -0.1, \lg(N_2/S_2) < -0.25.
 \end{aligned} \tag{6.31}$$

Разброс для 115 калибровочных точек, исключая три пекулярные объекта, составляет $\sigma_t \approx 6\%$.

Как и в случае ONS- и ON-калибровок, содержание кислорода (и азота) в области Н II можно определить двумя способами, используя NS-калибровку. При первом способе находят непо-

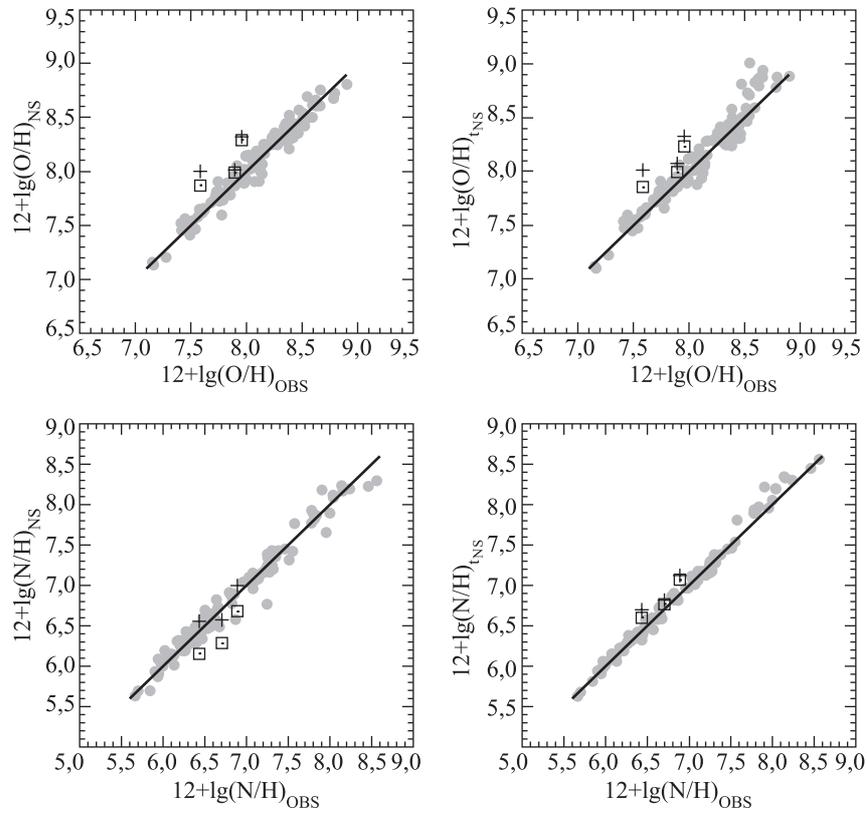


Рис. 6.12. Сравнение измеренных значений содержаний кислорода и азота со значениями содержаний, найденными при помощи NS-калибровки по уравнениям (6.29) и (6.30), а также значениями, найденными при помощи T_e -метода с электронной температурой t_{NS} . Для трех областей Н II показаны два значения t_{ONS} , полученных из соотношений для теплых (плюсы) и горячих (квадраты) областей Н II (см. текст). Линия соответствует равным значениям

средственно содержания кислорода $(O/H)_{NS}$ при помощи уравнения (6.29). При втором способе сначала определяют электронную температуру $t_2 = t_{NS}$ в туманности из уравнения (6.31). За-

тем содержание кислорода $(O/H)_{t_{NS}}$ находят при помощи стандартных уравнений T_e -метода с полученной электронной температурой t_{NS} . На рис. 6.12 показано сравнение измеренных содержаний кислорода $(O/H)_{OBS}$ и азота $(N/H)_{OBS}$ и содержаний кислорода и азота, определенных двумя способами при помощи NS-калибровки. Точность определения содержания кислорода с использованием трех комбинированных калибровок (ONS-, ON- и NS-калибровки) примерно одинакова (см. рис. 6.10 — 6.12). Точность определения содержания азота и электронной температуры выше при помощи ONS- и ON-калибровок, чем при помощи NS-калибровки.

Мотивом для построения NS-калибровки послужило отсутствие линии R_2 в SDSS-спектрах близких объектов. Однако эта калибровка может быть использована для определения электронной температуры и содержаний кислорода и азота в любой области H II, независимо от того, измерена или нет линия R_2 в ее спектре.

6.2.5. Тестирование параметрических N-калибровок

Тестирование достоверности содержаний кислорода, полученных при помощи одномерных калибровок, проводили сравнением этих содержаний с $(O/H)_{T_e}$ -содержаниями для выборки КТ118. При построении параметрических N-калибровок выборку КТ118 использовали в качестве калибровочных точек. При построении параметрических N-калибровок было показано, что они дают содержания кислорода (и азота), которые согласуются с $(O/H)_{T_e}$ -содержаниями для выборки КТ118. Дополнительное тестирование достоверности содержаний, полученных при помощи параметрических N-калибровок, можно провести с помощью сравнения радиального распределения этих содержаний в диске спиральной галактики M 101 с радиальным распределением содержаний, найденных прямым методом.

Для областей H II в диске спиральной галактики M 101, список которых приведен в табл. 3.7, были вычислены содержания кислорода $(O/H)_{ONS}$ при помощи ONS-калибровки и $(O/H)_{ON}$ при помощи ON-калибровки, используя интенсивности эмиссионных линий из табл. 3.8. На рис. 6.13, *a*, *в*, *д* показаны радиальные распределения содержаний кислорода, найденные разными методами. Видно, что содержания кислорода $(O/H)_{ONS}$ и

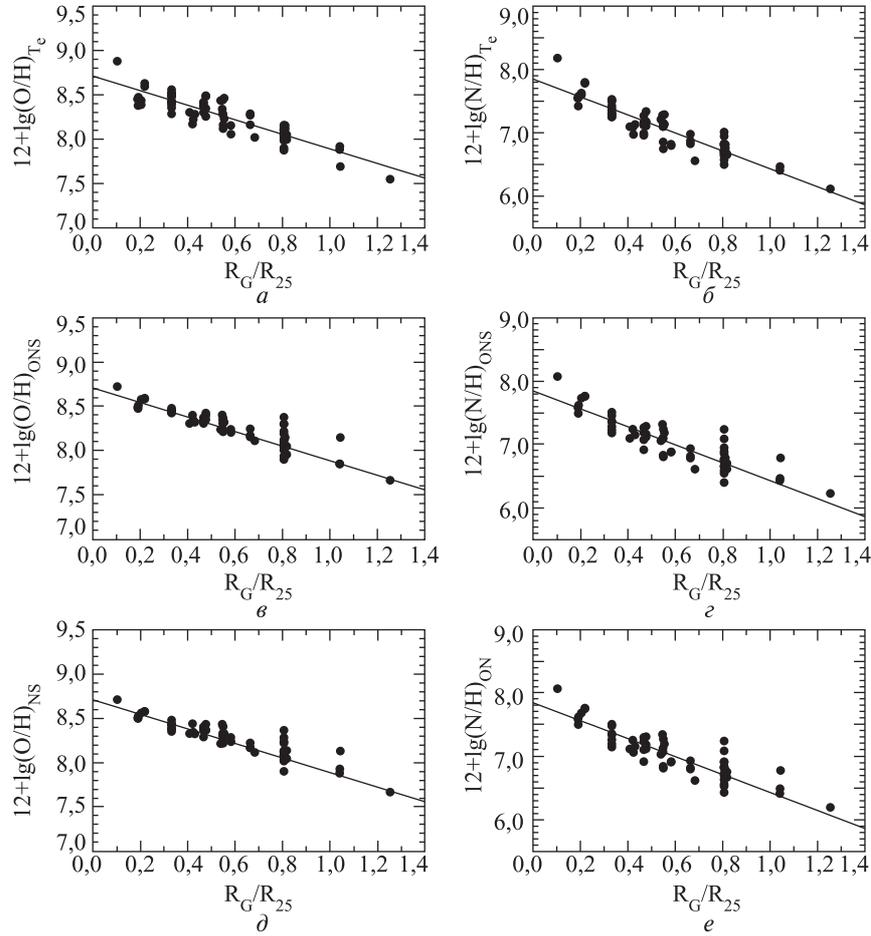


Рис. 6.13. Радиальное распределение содержаний кислорода и азота в диске спиральной галактики М 101 (*a*, *б*, *д*), вычисленных по данным табл. 3.7 и 3.8 при помощи разных методов. Сплошная линия — линейная зависимость $(\text{O}/\text{H})_{T_e} = f(R_G)$, найденная методом наименьших квадратов; *б*, *з*, *е* — то же, но для азота

$(\text{O}/\text{H})_{\text{ON}}$ в областях Н II в диске галактики М 101 следуют радиальному распределению металличности, найденному по $(\text{O}/\text{H})_{T_e}$ -содержаниям. Следует отметить, что в целом разброс точек на диаграммах $(\text{O}/\text{H})_{\text{ONS}} - R_G$ и $(\text{O}/\text{H})_{\text{ON}} - R_G$ даже меньше, чем на диаграмме $(\text{O}/\text{H})_{T_e} - R_G$, за исключением области Н II NGC 5471 на галактоцентрическом расстоянии $0.8R_{25}$. Однако значение этого разброса не может служить строгой характеристикой точности определения содержаний, так как разброс на диаграмме $(\text{O}/\text{H}) - R_G$ обусловлен не только ошибками определения химического состава в областях Н II, но и тем, что разные области Н II с близкими галактоцентрическими расстояниями могут иметь различный химический состав.

На рис. 6.13, *б, г, е* показаны радиальные распределения содержания азота $(\text{N}/\text{H})_{T_e}$ (рис. 6.13, *а*), $(\text{N}/\text{H})_{\text{ONS}}$ (рис. 6.13, *г*) и $(\text{N}/\text{H})_{\text{ON}}$ (рис. 6.13, *е*) в диске М 101 для областей Н II из табл. 3.7. На рисунках видно, что все три радиальные распределения содержания азота близки друг к другу. Это служит дополнительным подтверждением того, что ONS и ON-калибровки дают достоверные содержания кислорода и азота в областях Н II.

Для тестирования достоверности содержаний $(\text{O}/\text{H})_{\text{NS}}$ снова используем области Н II в диске спиральной галактики М 101. На рис. 6.14, *а* показаны радиальное распределение содержания кислорода $(\text{O}/\text{H})_{T_e}$ из табл. 3.7 (точки) и линейная зависимость $(\text{O}/\text{H})_{T_e} = f(R_G)$, найденная методом наименьших квадратов по этим точкам. Точками на рис. 6.14, *б* обозначены содержания $(\text{O}/\text{H})_{\text{NS}}$. Линией показана та же зависимость $(\text{O}/\text{H})_{T_e} = f(R_G)$, что и на рис. 6.14, *а*.

NS-калибровку строили для определения физических условий и химического состава областей Н II, для которых нет данных об интенсивности линии кислорода R_2 , в частности для определения химического состава близких объектов по SDSS-спектрам. В спектральной базе данных SDSS содержится несколько десятков спектров областей Н II в диске спиральной галактики М 101. Измерения потоков в эмиссионных линиях в SDSS-спектрах проводились разными группами. Здесь использованы измерения MPA/JHU (Max-Planck Institute for Astrophysics/Johns Hopkins University) группы, которые, по-видимому, наиболее точные. Применяемая методология измерения потоков в эмиссионных линиях и анализ ошибок измерений описаны в [72, 514] и

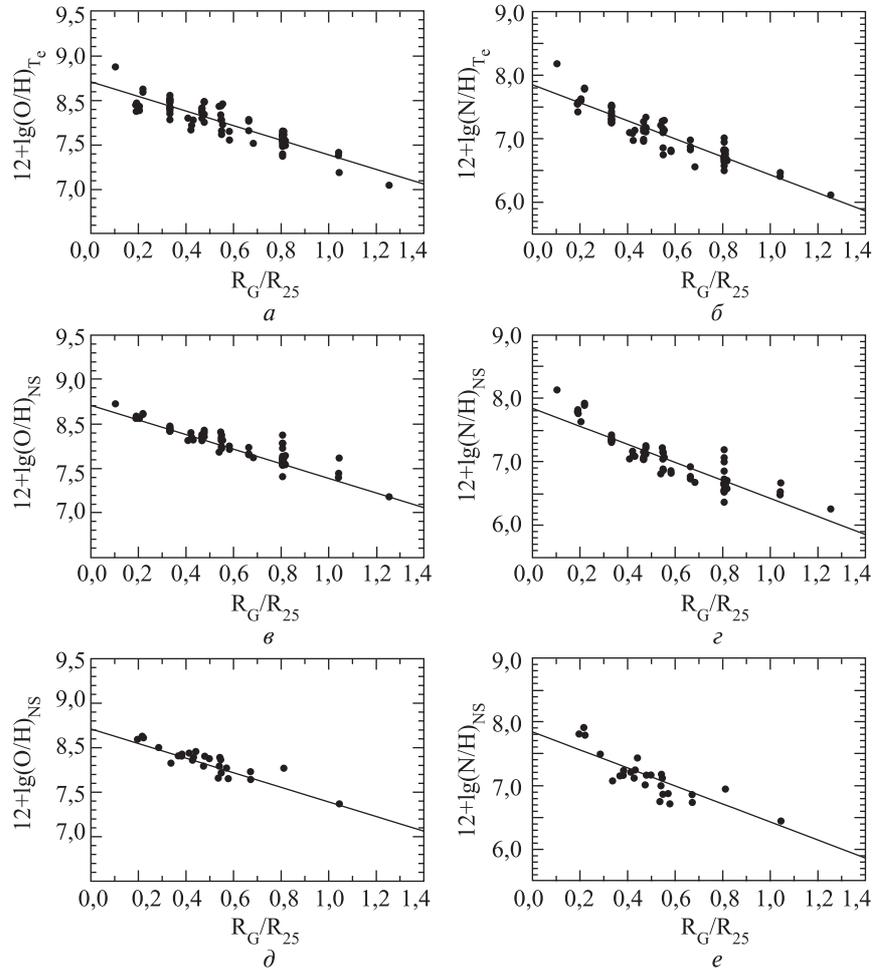


Рис. 6.14. То же, что на рис. 6.13; д, е — получены на основе базы данных SDSS

других публикациях этой группы. Каталог измеренных потоков доступен на сайте <http://www.mpa-garching.mpg.de/SDSS/>. Из каталога MPA/JHU были выбраны спектры областей H II в диске галактики M 101, в которых эквивалентные ширины линий $\text{H}\alpha$,

H_{β} , [O III] λ 495.9, [O III] λ 500.7, [N II] λ 658.4, [S II] λ 671.7 и [S II] λ 673.1 больше 0.3 нм. Так как поток в линии [N II] λ 658.4 в три раза больше, чем поток в линии [N II] λ 654.8, то точность измерения первого потока также выше. Так как линии [N II] λ 658.4 и [N II] λ 654.8 образуются при переходах с одного уровня (см. рис. 3.5), то отношение интенсивностей линий [N II] λ 658.4/[N II] λ 654.8 определяется только отношением эйнштейновских коэффициентов спонтанных переходов и близко к 3 [494]. Поэтому суммарный поток вычисляли как $N_2 = 1.33([\text{N II}] \lambda 658.4)$, а не $N_2 = ([\text{N II}] \lambda 658.4 + [\text{N II}] \lambda 654.8)$. Эмиссионные линии были исправлены за межзвездное покраснение, используя теоретическое значение H_{α}/H_{β} и аналитическое выражение для закона межзвездного покраснения Уитфорда [541] из работы [231]. Найденные интенсивности линий использовали для определения $(\text{O}/\text{H})_{NS}$ -содержаний.

На рис. 6.14, *d* показано радиальное распределение содержания кислорода $(\text{O}/\text{H})_{NS}$ в диске М 101 на основе спектров областей Н II из базы данных SDSS. Галактоцентрические расстояния SDSS-областей Н II вычислены по SDSS-координатам с использованием параметров диска из табл. 3.6. Линией показана та же зависимость $(\text{O}/\text{H})_{T_e} = f(R_G)$, что и на рис. 6.14, *a*. Видно, что содержания кислорода $(\text{O}/\text{H})_{NS}$ для обеих выборок областей Н II хорошо следуют радиальному распределению металличности, найденному по $(\text{O}/\text{H})_{T_e}$ -содержаниям.

На рис. 6.14, *b*, *z*, *e* показаны радиальные распределения содержания азота $(\text{N}/\text{H})_{T_e}$ (рис. 6.14, *b*) и $(\text{N}/\text{H})_{NS}$ (рис. 6.14, *z*) в диске М 101 для областей Н II из табл. 3.7 и $(\text{N}/\text{H})_{NS}$ для SDSS областей Н II (рис. 6.14, *e*). Видно, что содержания азота $(\text{N}/\text{H})_{NS}$ для обеих выборок областей Н II также следуют радиальному распределению содержания азота, найденному по $(\text{N}/\text{H})_{T_e}$ -содержаниям. Это служит подтверждением того, что NS-калибровка дает реальные содержания кислорода и азота в областях Н II.

Лопез-Санчез и Эстебан [296] сравнили содержания кислорода, найденные при помощи разных калибровок. Они пришли к выводу, что наиболее точные содержания кислорода дает параметрическая R_{23} -калибровка (P -метод). Исследование Лопез-Санчеза и Эстебана [296] было проведено до опубликования параметрических N -калибровок. Поэтому здесь мы сравним точ-

ность определения содержаний кислорода при помощи параметрических N-калибровок (для определенности взята ON-калибровка) и при помощи *P*-метода. Для этого сравним согласие содержаний кислорода $(O/H)_{ON}$ и $(O/H)_P$ с содержаниями $(O/H)_{Te}$ для выборки КТ118.

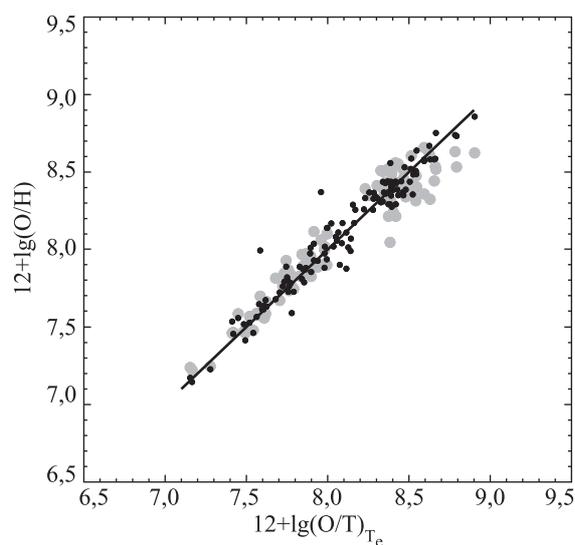


Рис. 6.15. Сравнение значений содержаний кислорода $(O/H)_{Te}$ для выборки КТ118 со значениями, полученными при помощи параметрической N-калибровки (ON-калибровка, черные точки) и при помощи параметрической R_{23} -калибровки (*P*-метод, серые точки). Сплошная линия — равные значения

Черными точками на рис. 6.15 показаны содержания кислорода $(O/H)_{ON}$ в зависимости от содержания $(O/H)_{Te}$, а кружками — содержания $(O/H)_P$. Видно, что значения $(O/H)_P$ и $(O/H)_{Te}$ согласуются удовлетворительно. Однако параметрические N-калибровки имеют ряд преимуществ по сравнению с *P*-методом. Во-первых, хорошо видно, что параметрические N-калибровки дают более точные содержания кислорода, особенно в диапазоне высоких металличностей. Во-вторых, параметрические N-калибровки применимы во всем диапазоне металличностей областей

Н II, тогда как P -метод нельзя использовать для областей Н II переходной зоны (в интервале металличности от $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 8.0$ до $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 8.3$). В-третьих, при применении P -метода необходимо заранее знать, к какой из ветвей на диаграмме $\text{O}/\text{H} - R_{23}$ принадлежит область Н II. В случае параметрической N -калибровки классификация областей Н II осуществляется по наблюдаемым интенсивностям линий. Проблема классификации возникает только для горячих областей Н II с высоким отношением содержаний азота и кислорода N/O . Однако такие объекты встречаются очень редко.

Таким образом, параметрические N -калибровки имеют существенные преимущества по сравнению с другими калибровками. С их помощью получают более точные содержания кислорода в областях Н II. Более того, параметрические N -калибровки позволяют определить содержания азота и электронные температуры t_2 .

6.3. Применение параметрических калибровок

Параметрические R_{23} -калибровки построены около десяти лет назад, и за прошедшее десятилетие они использованы во многих работах. Параметрические N -калибровки опубликованы совсем недавно (в 2010 г.) и говорить об их применении еще рано. К параметрическим калибровкам можно отнести также описанное в главе 4 ff -соотношение. Параметрические R_{23} -калибровки построены для обеих ветвей диаграммы $R_{23} - \text{O}/\text{H}$. В спектрах большого числа областей Н II низкой металличности измерена авроральная линия дважды ионизованного кислорода [O III] λ 436.3, что дает возможность использовать T_e -метод для определения их химического состава. Поэтому значимость калибровок для нижней ветви диаграммы $R_{23} - \text{O}/\text{H}$ не так уж и высока, хотя параметрические калибровки довольно часто применяются для исследования областей Н II низкой металличности ([216, 281, 317, 388, 442, 520, 529] и др.). Напротив, значимость калибровок для верхней ветви диаграммы $R_{23} - \text{O}/\text{H}$ очень высока, так как калибровки являются основным методом определения химического состава областей Н II высокой металличности ([76, 91, 125, 177, 296, 342, 407, 475] и многие другие).

Основные сведения о химическом составе областей Н II в спиральных галактиках получены при помощи калибровок. Содержания кислорода, найденные при помощи параметрических калибровок, использовали для исследования радиального распределения содержания кислорода в дисках спиральных галактик и для установления зависимостей между содержанием кислорода и другими макроскопическими характеристиками спиральных галактик. Ниже описаны некоторые результаты, полученные для близких спиральных галактик, содержание кислорода в которых определено из анализа спектров областей Н II. Для далеких галактик содержание кислорода определяют из анализа интегральных спектров. Эта проблема рассмотрена в следующей главе.

6.3.1. Диаграмма “светимость — металличность” для галактик поздних морфологических типов

Гарнетт и Шиелдс [171] обнаружили, что содержание кислорода в диске спиральной галактики тесно коррелирует со светимостью галактики. В работе [557] было показано, что зависимость “светимость — металличность” для спиральных галактик плавно переходит в зависимость “светимость — металличность” для неправильных галактик, т. е. галактики поздних морфологических типов (спиральные и неправильные) подчиняются единой зависимости. Зависимость “светимость — металличность” для близких спиральных галактик исследовалась во многих работах ([168, 296, 342, 407, 557] и др.). В последнее время исследуется также зависимость “светимость — металличность” для галактик с разными красными смещениями [137, 290, 508, 514] и эволюционные изменения этой зависимости [102, 301, 444, 508].

В работе [407] рассмотрено радиальное распределение содержания кислорода и азота в дисках 54 близких спиральных галактик. Были собраны данные об интенсивностях эмиссионных линий в спектрах более 1000 областей Н II в этих галактиках. Рассматривались только спиральные галактики, для которых имелись спектральные измерения не менее четырех областей Н II. Содержания кислорода и азота в областях Н II были определены при помощи эмпирической параметрической R_{23} -калибровки (при помощи P -метода). На основе полученных данных были

установлены радиальные распределения содержаний кислорода и азота в дисках галактик.

Содержание кислорода в межзвездной среде в диске спиральной галактики изменяется с галактоцентрическим расстоянием. При исследовании зависимостей между содержанием кислорода и макроскопическими характеристиками спиральных галактик используют так называемое характерное содержание кислорода. В работе [557] предложено рассматривать в качестве характерного содержания кислорода в спиральной галактики содержание кислорода на галактоцентрическом расстоянии, равном 0.4 изофотного радиуса. На рис. 6.16 показана зависимость содержания кислорода от абсолютной звездной величины галактики в фотометрической полосе B , построенная по данным из [407]. Сплошной линией показано соотношение

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 6.04 (\pm 0.09) - 0.124 (\pm 0.005) M_B, \quad (6.32)$$

найденное для спиральных и неправильных галактик методом наименьших квадратов. Пунктирной линией показано соотношение

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_P = 6.92 (\pm 0.37) - 0.080 (\pm 0.018) M_B, \quad (6.33)$$

полученное для спиральных галактик. Штриховой линией показано соотношение

$$12 + \lg(\text{O}/\text{H})_P = 5.80 (\pm 0.17) - 0.139 (\pm 0.011) M_B \quad (6.34)$$

для неправильных галактик.

Следует отметить большой разброс точек на диаграмме $\text{O}/\text{H} - M_B$ для спиральных галактик. На рис. 6.16 видно, что разброс значений O/H для фиксированного значения M_B сравним с “систематическим” изменением O/H с M_B , т. е. разность между средним значением O/H в спиральных галактиках высокой светимости ($M_B \approx -22^m$) и средним значением O/H в спиральных галактиках низкой светимости ($M_B \approx -18^m$) сравнима с разбросом O/H для фиксированного значения M_B .

В рамках программы *SINGS* (Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey), целью которой является всестороннее исследование 75 близких (до 30 Мпк) галактик [248], исследован химический состав этих галактик [342]. Характерное содержание кислорода

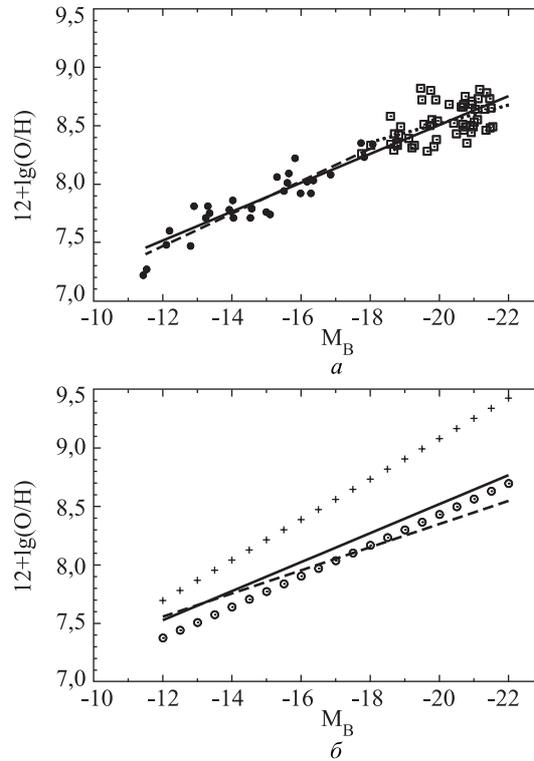


Рис. 6.16. Диаграмма “светимость — металличность” по данным работы [407] (а): квадраты, точки — характерные содержания кислорода в спиральных галактиках и в неправильных галактиках соответственно; пунктирная линия — соотношение $\text{O}/\text{H} - M_B$ для спиральных галактик, штриховая — для неправильных галактик, сплошная — для спиральных и неправильных галактик вместе. Сравнение зависимостей $\text{O}/\text{H} - M_B$ для галактик поздних морфологических типов, полученных в разных работах (б): сплошная линия — [407], штриховая — [296], кружки и плюсы — [342] (эмпирическая и теоретическая калибровки соответственно)

находили как из анализа радиального распределения содержания кислорода в диске, которое определяли при помощи областей H II, так и из анализа наблюдаемых интегральных спектров галактик. Содержания кислорода определяли как при по-

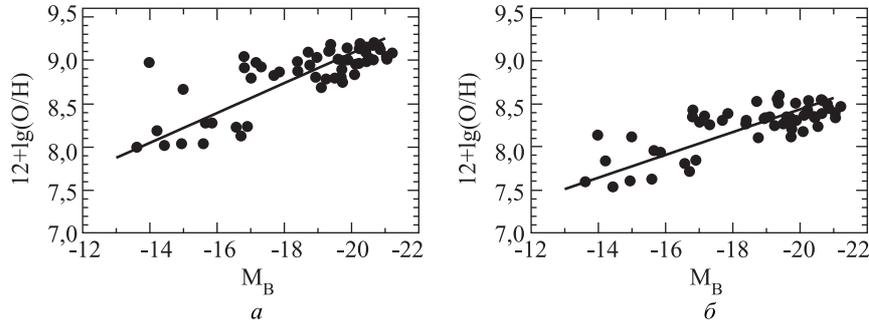


Рис. 6.17. Диаграмма “светимость — металличность” из [342]. Точками показаны характерные содержания кислорода в галактиках, найденные при помощи теоретической параметрической (а) и эмпирической параметрической (б) R_{23} -калибровки. Сплошные линии — соответствующие соотношения $O/H - M_B$

мощи теоретической, так и эмпирической параметрических R_{23} -калибровок. Диаграмма $O/H - M_B$ для случая, когда содержания кислорода определяли при помощи теоретической параметрической R_{23} -калибровки, представлена на рис. 6.17, а. Для этого случая было получено

$$12 + \lg(O/H)_Y = 5.62 (\pm 0.24) - 0.173 (\pm 0.012) M_B. \quad (6.35)$$

Эта зависимость показана сплошной линией на рис. 6.17, а. Диаграмма $O/H - M_B$ для случая, когда содержания кислорода определяли при помощи эмпирической параметрической R_{23} -калибровки, представлена на рис. 6.17, б. Для этого случая была найдена зависимость

$$12 + \lg(O/H)_P = 5.79 (\pm 0.21) - 0.132 (\pm 0.011) M_B, \quad (6.36)$$

которая показана сплошной линией на рис. 6.17, б.

Лопез-Санчез и Эстебан детально исследовали выборку галактик Вольфа — Райе [296]. Для этой выборки они нашли следующее соотношение “светимость — металличность”:

$$12 + \lg(O/H) = 6,37 (\pm 0.37) - 0.099 (\pm 0.019) M_B. \quad (6.37)$$

В большинстве объектов этой выборки содержание кислорода определено при помощи T_e -метода.

Сравнение зависимостей $O/H - M_B$ для галактик поздних морфологических типов, приведенных в разных работах, показано на рис. 6.16, б. Соотношения $O/H - M_B$, полученные на основе содержаний кислорода, найденных при помощи T_e -метода или R -метода, удовлетворительно согласуются между собой. Соотношение, полученное на основе содержаний кислорода, найденных при помощи теоретической параметрической R_{23} -калибровки, дает значительно более высокие содержания кислорода для галактик высокой светимости. В работе [407] отмечено, что соотношение “светимость — металличность” для спиральных галактик имеет меньший наклон, чем соотношение “светимость — металличность” для неправильных галактик. Однако большой разброс точек на диаграмме $O/H - M_B$ не позволяет считать этот вывод надежно установленным.

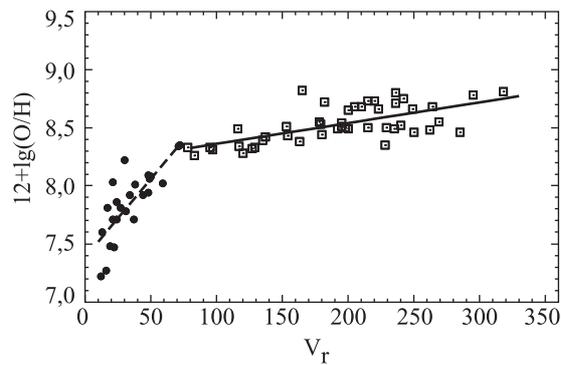


Рис. 6.18. Диаграмма “скорость вращения — металличность”. Квадраты, точки — характерные содержания кислорода в спиральных галактиках и в неправильных галактиках соответственно; сплошная линия — соотношение $O/H - V_r$ для спиральных галактик, штриховая — для неправильных галактик

Содержание кислорода в спиральных и неправильных галактиках коррелирует не только со светимостью галактики, но и с другими макроскопическими параметрами галактики (морфологический тип галактики, скорость ее вращения V_r) [168, 526, 557].

На рис. 6.18 представлена диаграмма $O/H - V_r$ для спиральных и неправильных галактик, построенная по данным работы [407]. Корреляция между O/H и V_r более тесная, чем между O/H и M_B . На рис. 6.18 хорошо видно, что зависимость между скоростью вращения и металличностью для спиральных галактик имеет существенно меньший наклон, чем зависимость для неправильных галактик. Следует отметить, что наличие изгиба в зависимости $O/H - V_r$ не подразумевает обязательного наличия изгиба в зависимости $O/H - M_B$, так как изгиб наблюдается в зависимости $V_r - M_B$ [407].

6.3.2. Максимально достижимое содержание кислорода в межзвездной среде

Галактики формируются из газа, в котором содержание кислорода равно нулю. Кислород синтезируется в массивных звездах и поставляется в межзвездную среду при вспышках сверхновых. Каждое последующее поколение звезд формируется из газа, обогащенного кислородом массивными звездами предыдущих поколений. Содержание кислорода в галактике возрастает по мере уменьшения доли массы газа μ , которую определяют как

$$\mu = \frac{\text{масса газа}}{\text{полная масса}} = \frac{\text{масса газа}}{\text{масса газа} + \text{масса звезд}}. \quad (6.38)$$

Сколько кислорода будет содержаться в межзвездной среде, когда галактика заканчивает свою эволюцию, т. е. когда $\mu \rightarrow 0$? Насколько ли отличается содержание кислорода в межзвездной среде спиральных галактик от максимально достижимого содержания кислорода?

В принципе ответ на первый вопрос легко может быть получен в рамках теории химической эволюции галактик. Теория химической эволюции галактик предсказывает, что содержание кислорода в галактике зависит от:

1) выхода кислорода Y_O , который определяют как отношение массы кислорода, синтезируемого и выбрасываемого в межзвездную среду популяцией звезд, к массе этой популяции, заключенной в звездных остатках (белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры) и звездах малой массы, время жизни которых превышает возраст Вселенной;

2) доли массы галактики, перешедшей в звезды (или доли массы галактики, оставшейся в газе μ);

3) обмена веществом между галактикой и окружающей средой (аккреция, галактический ветер). Известно [109, 134], что для фиксированного значения μ металличность газа максимальна в галактике, которая эволюционирует без обмена веществом с окружающей средой (закрытая модель — closed-box model).

Таким образом, максимально достижимое содержание кислорода в галактике можно вычислить в рамках закрытой модели как предел при стремлении μ к нулю, если известен выход кислорода Y_O . Чтобы вычислить выход кислорода, необходимо иметь надежные данные о количестве кислорода, синтезируемого и выбрасываемого в межзвездную среду звездами разных масс и металличностей, и о начальной функции масс звезд (IMF — initial mass function), которая описывает распределение рождающихся звезд по массам. Как синтез кислорода в звездах, так и параметры начальной функции масс звезд (верхний и нижний пределы и наклон) неизвестны точно. Поэтому теоретическое значение выхода кислорода Y_O может содержать большую ошибку. На практике часто рассматривают обратную задачу, т. е. измеренные содержания кислорода в галактике используют для нахождения выхода кислорода Y_O [68, 168, 171, 407, 514].

Вопрос о максимальном наблюдаемом содержании кислорода в спиральных галактиках рассмотрен в [404, 405]. Стратегия поиска максимального содержания кислорода в спиральных галактиках основывается на двух фактах. Во-первых, наличие зависимости “светимость — металличность” для спиральных галактик указывает на то, что максимальное содержание кислорода следует ожидать в спиральных галактиках высокой светимости. Во-вторых, ненулевой радиальный градиент содержания кислорода в дисках спиральных галактик указывает на то, что максимальное содержание кислорода имеет место в центрах дисков спиральных галактик. Согласно этим двум фактам максимальное содержание кислорода должно быть в центрах спиральных галактик наивысшей светимости. В [405] найдено радиальное распределение содержания кислорода в дисках четырех галактик наивысшей светимости: NGC 1068 с абсолютной звездной величиной $M_B = -22.18^m$, NGC 6384 с $M_B = -22.22^m$, NGC 7331 с $M_B = -22.20^m$, IC 342 с $M_B = -22.27^m$. Содержания кислоро-

да были определены при помощи ff -соотношения. Радиальные распределения содержания кислорода в дисках этих спиральных галактик представлены на рис. 6.19. Видно, что содержание кислорода в центрах спиральных галактик наивысшей светимости составляет $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 8.75$.

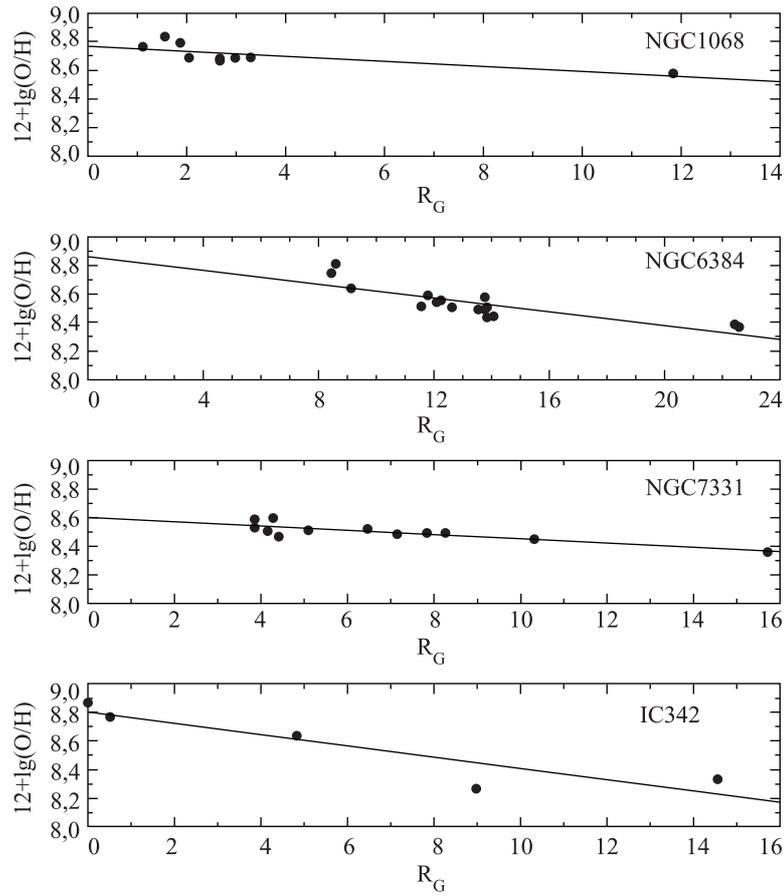


Рис. 6.19. Радиальное распределение содержания кислорода в дисках четырех спиральных галактик высокой светимости

Следует отметить, что в работах по исследованию химического состава спиральных галактик, в которых для определения содержания кислорода использовали теоретические калибровки, найдены значительно более высокие содержания в центрах некоторых спиральных галактик. Вила-Костас и Эдмундс (1992) [526] определили содержание кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 9.54$ в центре диска М 51 (NGC 5194), Заритский, Кенникатт и Хахра (1994) [557] получили содержание кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 9.41$ в центре диска NGC 3351, Гарнетт и др. (1997) [173] нашли содержание кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 9.64$ в центре диска NGC 6744, ван Зи и др. (1998) [522] определили содержание кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 9.50$ в центре диска NGC 3184. В настоящее время содержание кислорода в ряде областей Н II в диске М 51 определено при помощи T_e -метода и найдено радиальное распределение O/H в межзвездной среде в диске этой галактики [68, 170] (см. п. 3.8.3). Содержание кислорода в центре диска М 51 оказалось равным $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{T_e} = 8.72 \pm 0.09$, что на 0.8 dex ниже, чем оценки [526].

Таким образом, содержание кислорода в центрах спиральных галактик наивысшей светимости составляет $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 8.75$. Действительно ли содержание кислорода максимально именно в этих галактиках, как следует ожидать из зависимости “светимость — металличность”? На рис. 6.20 показана зависимость содержания кислорода в центре диска спиральной галактики от ее светимости, построенная по данным из [405]. Эта диаграмма отличается от “стандартной” диаграммы “светимость — металличность” для спиральных галактик (см. рис. 6.16) только тем, что при ее построении используются содержания кислорода в центре диска спиральной галактики, тогда как при построении стандартной диаграммы $\text{O}/\text{H} - M_B$ используют характерные содержания кислорода в дисках спиральных галактик (содержания кислорода на галактоцентрическом расстоянии, равном 0.4 изометрического радиуса).

Из рис. 6.20 видно, что содержания кислорода в центрах спиральных галактик со светимостью $M_B = -20.25^m$ лежат в том же интервале, что и содержания кислорода в центрах галактик со светимостью $M_B = -22.25^m$. Другими словами, для спиральных галактик высокой светимости исчезает зависимость между содержанием кислорода в центре диска и светимостью галактики.

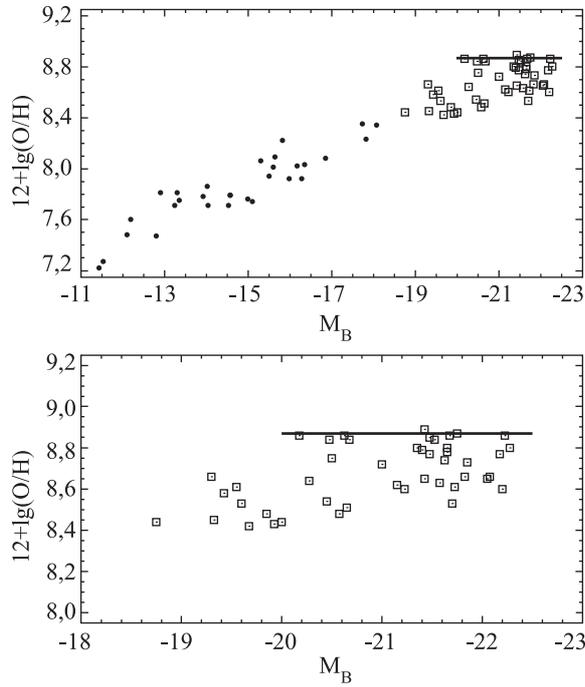


Рис. 6.20. Диаграмма “светимость — металличность” для галактик: квадраты — содержания кислорода $(\text{O}/\text{H})_{ff}$ в центрах спиральных галактик, точки — содержания кислорода в неправильных галактиках (внизу — фрагмент диаграммы в увеличенном масштабе)

Положения спиральных галактик высокой светимости образуют плато на диаграмме “светимость — металличность” в центре диска. Вообще говоря, плато наблюдается и на “стандартной” диаграмме “светимость — характерная металличность” (см. рис. 6.16 и 6.17).

Что означает наличие плато на диаграмме “светимость — металличность” для спиральных галактик? Сам факт зависимости “светимость — металличность” для галактик может быть обусловлен действием двух причин. Первой является зависимость выноса тяжелых элементов из галактики путем (обогащенного)

галактического ветра от светимости (массы) галактики: галактики большей светимости (массы) теряют меньше тяжелых элементов. В этом случае зависимость “светимость — металличность” отображает способность галактик удерживать тяжелые элементы, а не способность производить их. Есть основания полагать, что галактический ветер не играет заметной роли в химической эволюции массивных галактик [168, 407, 514]. Второй предполагаемой причиной зависимости “светимость — металличность” является то, что более массивные галактики содержат больше тяжелых элементов, так как они прошли больший путь эволюции, т. е. большая часть газа перешла в звезды. Это согласуется с наблюдательными данными: доля массы газа увеличивается с уменьшением массы галактики [89, 90, 314, 441]. Наличие плато для галактик высокой светимости указывает на то, что доля газа примерно одинакова в центрах дисков этих галактик.

Разброс значений содержания кислорода среди галактик высокой светимости довольно большой ($\Delta \lg(\text{O}/\text{H}) \approx 0.25$). Часть этого разброса обусловлена ошибками определения содержаний кислорода, но часть (возможно, большая) является реальной. Разброс содержания кислорода O/H может быть вызван разбросом доли массы газа μ среди галактик фиксированной светимости. Простая модель химической эволюции галактик предсказывает, что уменьшение μ на 0.1 приводит к повышению содержания кислорода на 0.13 dex, в диапазоне изменения μ от 0.50 до 0.05. Таким образом, разброс содержаний кислорода $\Delta \lg(\text{O}/\text{H}) = 0.25$ соответствует разбросу $\Delta \mu \approx 0.2$ среди галактик данной светимости.

Доля массы газа в рассмотренных спиральных галактик высокой светимости мала ($\mu < 0.25$ [168, 407]), т. е. сравнима с разбросом μ среди галактик, образующих плато на диаграмме “светимость — металличность”. Другими словами, газ в центрах дисков галактик с наиболее высокими металличностями практически полностью перешел в звезды. Следовательно, верхняя граница содержаний кислорода в центрах дисков галактик плато соответствует максимально достижимому содержанию кислорода в галактиках. Это дает естественное объяснение появления плато и верхней границы содержаний кислорода на диаграмме “светимость — металличность” для спиральных галактик.

Таким образом, максимально достижимое содержание кислорода в межзвездном газе галактик составляет $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.87$. Из анализа эмиссионных спектров областей H II опре-

деляют содержание кислорода в газовой фазе межзвездной среды. Некоторая доля кислорода (~ 0.08 dex [141]) содержится в пылинках. С учетом этого максимально достижимое содержание кислорода в межзвездной среде галактик составляет $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.95$, что в два раза больше содержания кислорода на Солнце [41].

6.3.3. Эмпирическая оценка выхода кислорода

Простая модель химической эволюции галактик предсказывает, что содержание кислорода Z_{O} (по массе) в межзвездной среде галактики выражается через долю массы газа в галактике μ и выход кислорода Y_{O} простой формулой:

$$Y_{\text{O}} = \frac{Z_{\text{O}}}{\ln(1/\mu)}, \quad (6.39)$$

где выход кислорода Y_{O} определяется как отношение массы кислорода, который синтезируется и выбрасывается в межзвездную среду популяцией звезд, к массе этой популяции, которая заключена в звездных остатках (белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры) и звездах малой массы, время жизни которых превышает возраст Вселенной. Следует подчеркнуть, что по уравнению (6.39) получают близкий к истинному выход кислорода только в том случае, если галактика эволюционирует как замкнутая система. Обмен веществом между галактикой и окружающей средой в процессе ее эволюции изменяет это соотношение, имитируя изменение выхода кислорода. В этом случае простая модель химической эволюции галактик используется для определения так называемого эффективного выхода кислорода [134, 526].

Строго говоря, уравнение (6.39) не дает истинного выхода кислорода даже в том случае, если галактика эволюционирует как замкнутая система. Простая модель химической эволюции галактик базируется на предположении, что химические элементы синтезируются и выбрасываются звездами в межзвездную среду сразу после их формирования (мгновенный кругооборот вещества), т. е. пренебрегают временем жизни звезды. Кислород синтезируется и выбрасывается в межзвездную среду массивными звездами, время жизни которых мало по сравнению со

временем эволюции галактик. С этой точки зрения приближение мгновенного кругооборота оправдано для случая кислорода.

Однако выход кислорода зависит не только от количества кислорода, синтезируемого и выбрасываемого в межзвездную среду популяцией звезд, но и от полной массы газа, возвращаемого популяцией звезд в межзвездную среду. Предположение о мгновенном кругообороте вещества эквивалентно предположению, что следующая популяция звезд образуется тогда, когда все звезды предыдущей популяции заканчивают свою эволюцию. Очевидно, что в реальных галактиках это не так. Как следствие, с помощью простой модели предсказывают более высокое содержание элементов, чем с помощью численной модели химической эволюции галактики с реалистичной историей звездообразования [16]. Однако в случае кислорода эта разница сравнительно мала, и ею можно пренебречь.

При описании химической эволюции нашей Галактики простая модель сталкивается с парадоксом G -карликов. Он заключается в том, что наблюдают значительно меньшее количество звезд низкой металличности, чем предсказывают с помощью простой модели [204, 356, 361, 547]. Наблюдаемое распределение звезд по металличностям удается описать в рамках модели химической эволюции, в которой постулируется приток газа в диск в течение длительного времени [93, 304, 384, 394, 395, 509]. Общеизвестно, что закрытая модель неприменима для описания химической эволюции гигантских спиральных галактик, так как приток газа (аккреция) играет важную роль в их эволюции.

Тем не менее, простую модель химической эволюции можно применить к гигантским спиральным галактикам для определения выхода кислорода. С одной стороны, темп притока газа в диск экспоненциально уменьшается со времени [394, 395, 422, 513, 550]. С другой, положение системы на диаграмме $\mu - O/H$ определяется ее эволюцией в недавнем прошлом и слабо зависит от эволюции в далеком прошлом [109, 396]. Поэтому положение гигантских спиральных галактик в современную эпоху на диаграмме $\mu - O/H$ на треке, предсказываемом простой моделью, не противоречит тому, что приток газа играл важную роль в их эволюции в раннюю эпоху. Таким образом, с помощью уравнения (6.39) можно получить близкий к истинному выход кислорода Y_O в случае гигантских спиральных галактик.

В общем случае для определения выхода кислорода из наблюдений необходимо измерить содержание кислорода, массу газа и массу звезд в системе (см. уравнения (6.39) и (6.38)). Определение массы звезд в галактике представляет собой весьма сложную задачу. Масса звезд в галактике обычно оценивается по ее светимости. Переход от светимости к массе звезд зависит от принятой модели, в частности, от принятого нижнего предела начальной функции масс. Определение массы газа в галактиках также не является тривиальной задачей. Масса молекулярного водорода в галактике обычно оценивается по светимости галактик в линиях CO. Переходный множитель (отношение массы молекулярного водорода к потоку излучения в линии CO) может изменяться от галактики к галактике более чем на порядок величины [60]. Ошибки определения массы газа и массы звезд в галактике влияют на полученный выход кислорода.

Использование максимально достижимого содержания кислорода для определения выхода кислорода позволяет обойти проблему определения масс газа и звезд. На рис. 6.21 показана предсказываемая простой моделью зависимость между содержанием кислорода и долей μ массы газа для выхода кислорода $Y_O = 0.0030$ (сплошная линия) и для $Y_O = 0.0035$ (штриховая линия). Простая модель перестает работать при приближении μ к нулю. Содержание кислорода при $\mu = 0$ для модели находят экстраполяцией (пунктирные линии на рис. 6.21). Приведенное выше максимально достижимое содержание кислорода в газовой составляющей межзвездной среды соответствует простой модели химической эволюции галактик при выходе кислорода $Y_O = 0.0030$. Если принять, что часть кислорода (0.08 dex) содержится в пылинках, то выход кислорода будет $Y_O = 0.0035$.

В ряде работ получены оценки Y_O из уравнения (6.39) на основе определения O/H и μ в спиральных галактиках. В работе [68] использованы содержания O/H, найденные при помощи T_e -метода, и было получено $Y_O = 0.0032$, в работе [407] использованы содержания O/H, найденные при помощи P -метода, и получено $Y_O = 0.0027$, в работе [168] использованы содержания O/H, найденные при помощи теоретической калибровки, и получено $Y_O = 0.010$. Таким образом, оценка выхода кислорода, основанная на максимально достижимом содержании кислорода в газовой составляющей межзвездной среды спиральных галак-

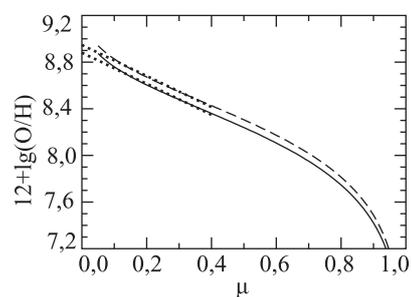


Рис. 6.21. Зависимость между содержанием кислорода и долей массы газа, предсказываемая с помощью простой модели химической эволюции галактик, для двух значений выхода кислорода: $Y_{\text{O}} = 0.0035$ (штриховая линия) и $Y_{\text{O}} = 0.0030$ (сплошная линия). Экстраполяция зависимостей к $\mu = 0$ показана пунктиром

тик, хорошо согласуется с другими оценками, в которых используются содержания кислорода, найденные при помощи T_e -метода или эмпирических калибровок.

Глава 7

Определение химического состава по интегральному эмиссионному спектру галактики

Изложенные выше методы определения химического состава подразумевают анализ эмиссионных спектров отдельных областей Н II. Эти методы применимы только для достаточно близких галактик, для которых пространственное разрешение позволяет получить спектры отдельных областей Н II. Для далеких галактик можно получить только интегральный спектр (спектр всей галактики или большей ее части). Во многих работах последних лет для определения содержания кислорода используются интегральные спектры галактик ([136, 194, 292, 439, 510, 514, 553] и др.). При этом неявно подразумевается, что методы, разработанные для определения содержания кислорода в отдельных областях Н II, применимы также для определения содержания кислорода в галактиках по их интегральным спектрам. Справедливость такого обобщения далеко не очевидна, поскольку интегральный спектр представляет собой суммарный спектр излучения многих областей Н II, которые могут иметь разную электронную температуру, разные содержания кислорода и других элементов. К настоящему времени проблема определения содержания кислорода по интегральному спектру галактики рассматривалась только в

трех работах [265, 341, 393]. Эта глава базируется на результатах этих работ.

Интегральные спектры галактик можно условно разделить на три типа. К первому типу отнесем интегральные спектры, в которых доминирует излучение одной (сверх)гигантской области H II. Такой интегральный спектр ожидается для галактики с мощной вспышкой звездообразования. Ко второму типу отнесем интегральные спектры, создаваемые многими областями H II, которые имеют близкий химический состав и различаются электронной температурой. Такой интегральный спектр ожидается для неправильной галактики. К третьему типу отнесем интегральные спектры, создаваемые многими областями H II, которые различаются химическим составом и электронной температурой. Такой интегральный спектр ожидается для спиральной галактики.

Как неоднократно отмечалось, наиболее достоверные значения содержания кислорода и других элементов в областях H II могут быть найдены при помощи T_e -метода. В настоящее время авроральная линия [O III] λ 436.3 измерена в спектрах ряда галактик с красными смещениями до $z \approx 1$ [206, 207, 239] и в одной галактике с красным смещением $z = 1.7$ [554]. Содержания кислорода в этих галактиках определены при помощи T_e -метода. Однако правомерность использования T_e -метода для определения химического состава по интегральному спектру второго или третьего типа вызывает большие сомнения. Действительно, в этом случае смысл электронной температуры становится неясным. Вопрос о том, что представляет собой содержание кислорода, найденное при помощи T_e -метода по интегральному спектру второго типа, был поставлен в работе Кобульницкого, Кенникатта и Пизагно [265]. Они рассмотрели семь близких неправильных галактик (NGC 1569, NGC 3125, NGC 4214, NGC 4449, NGC 4861, NGC 5253 и IC 4249), для которых авроральная линия дважды ионизованного кислорода [O III] λ 436.3 измерена как в интегральных спектрах, так и в спектрах отдельных областей H II. Это позволяет определить содержание кислорода в этих галактиках при помощи T_e -метода как по интегральным спектрам, так и по спектрам отдельных областей H II. (Для краткости содержание кислорода, найденное по интегральному спектру галактики, будем называть интегральным содержанием кислорода.) Они по-

казали, что интегральное содержание кислорода в неправильной галактике на 0.05—0.20 dex меньше, чем среднее содержание кислорода, найденное по спектрам отдельных областей H II. Так как химический состав в неправильной галактике является более или менее однородным, то различие между интегральным и средним содержаниями кислорода свидетельствуют о том, что содержание кислорода, найденное по интегральному спектру неправильной галактики при помощи T_e -метода, меньше реального содержания кислорода в галактике.

Области H II в спиральных галактиках имеют, как правило, высокую металличность. Интенсивности авроральных линий редко удается измерить в таких областях H II. Содержание кислорода в областях H II в спиральных галактиках обычно определяется при помощи калибровок. Так как содержание кислорода в межзвездной среде в диске спиральной галактики изменяется с галактоцентрическим расстоянием, то содержание кислорода в диске спиральной галактики принято характеризовать содержанием кислорода на некотором фиксированном галактоцентрическом расстоянии. В работе [557] предложено рассматривать в качестве характерного содержания кислорода в спиральной галактики содержание кислорода на галактоцентрическом расстоянии, равном 0.4 изофотного радиуса. Ниже станет понятно, что такой выбор характерного содержания кислорода в спиральной галактики оказался весьма удачным.

Кобульницкий, Кенникатт и Пизагно [265] попытались выяснить также, что представляет собой содержание кислорода, найденное по интегральному спектру спиральной галактики (интегральный спектр третьего типа) при помощи одномерной R_{23} -калибровки Зарицкого, Кенникатта и Хахра [557]. Были рассмотрены спиральные галактики с установленным радиальным распределением содержания кислорода в диске. Радиальное распределение O/H в диске галактики считалось установленным, если в галактике измерены спектры не менее восьми областей H II, которые рассредоточены вдоль большей части радиуса галактики. Интегральные спектры спиральных галактик были вычислены следующим образом. Диск галактики разбивали на кольцевые зоны. Спектр каждой зоны определяли усреднением спектров отдельных областей H II, попадающих в эту зону. Интегральный спектр галактики находили суммированием спектров кольцеоб-

разных зон с учетом площади зоны и ее светимости в линии H_{α} . Такой подход позволяет выяснить влияние изменения содержания кислорода с галактоцентрическим расстоянием в диске галактики на получаемое интегральное содержание кислорода. Показано, что интегральное содержание кислорода хорошо согласуется с характерным содержанием кислорода. Средняя разность между интегральным и характерным содержаниями кислорода для 22 рассмотренных спиральных галактик составляет 0.05 dex.

В рамках такого же подхода в работе [393] рассмотрено определение интегральных содержаний кислорода и азота в дисках спиральных галактик при помощи параметрической R_{23} -калибровки (P -метод) [385,386]. Показано, что как и в случае одномерной R_{23} -калибровки, интегральное содержание кислорода, определенное при помощи P -метода, близко к характерному содержанию кислорода в спиральной галактике, если большая часть областей $H II$ в галактике принадлежит одной ветви на диаграммы $O/H - R_{23}$, т. е. либо большая часть областей $H II$ лежит на верхней ветви и имеет высокую металличность $12 + \lg(O/H) > 8.2$, либо большая часть областей $H II$ лежит на нижней ветви и имеет низкую металличность $12 + \lg(O/H) < 8.0$. В той же работе P -метод был применен для определения интегральных содержаний кислорода и азота в выборке далеких галактик из [496]. В эту выборку включены галактики высокой светимости в ультрафиолетовом диапазоне спектра с красными смещениями в интервале $0 < z < 0.4$. Интенсивности эмиссионных линий в интегральных спектрах этих галактик приведены в работе [99]. Интегральные содержания кислорода и азота, найденные при помощи P -метода, лежат на диаграмме $O/H - N/O$ в той же области, что и содержания кислорода и азота, определенные по спектрам отдельных областей $H II$.

Итак, моделированием интегральных спектров спиральных галактик в [265, 393] определено, что интегральное содержание кислорода близко к характерному содержанию кислорода в спиральной галактике. В этих работах интегральный спектр галактики смоделирован суммированием наблюдаемых спектров отдельных областей $H II$. В рамках такого подхода невозможно учесть такой важный фактор, как вклад диффузного ионизованного газа в интегральный спектр галактики. Диффузный ионизованный газ дает свечение малой поверхностной яркости, которое

наблюдается в нашей и в ближайших галактиках [181, 424, 560]. Источник ионизации диффузного ионизованного газа пока не установлен [54, 274]. Вклад диффузного ионизованного газа в полную светимость спиральной галактики в линии H_{α} может достигать 30–50 % [77, 349].

Влияние обоих эффектов (изменение содержания кислорода с галактоцентрическим расстоянием в диске галактики и вклад диффузного ионизованного газа в интегральный спектр галактики) на интегральное содержание кислорода исследовано в работе Моустакаса и Кенникатта [341], которая основана на наблюдаемых интегральных спектрах. Они рассмотрели 14 близких спиральных галактик, для которых наблюдали интегральные спектры и спектры более 250 отдельных областей $H\ II$. Интегральные содержания кислорода определяли двумя методами: при помощи теоретической параметрической R_{23} -калибровки из [313] и эмпирической параметрической R_{23} -калибровки (P -метода из [401]). Моустакас и Кенникатт нашли сильную корреляцию между интегральным и характерным содержаниями кислорода в диске спиральной галактики для обеих калибровок, несмотря на то, что интегральные (и характерные) содержания кислорода, полученные при помощи этих калибровок, различаются между собой в 2 — 3 раза. Типичная разность между интегральным и характерным содержаниями кислорода составляет ± 0.1 dex для обеих рассмотренных калибровок. Разность между интегральным и характерным содержаниями кислорода не зависит ни от радиального градиента содержания кислорода в диске галактики, ни от содержания пыли, ни от поверхностной яркости в линии H_{α} , ни от угла наклона галактики.

Таким образом, результаты работ [265, 341, 393] показывают, что: 1) содержание кислорода, найденное по интегральному спектру неправильной галактики при помощи T_e -метода, меньше реального содержания кислорода в галактике; 2) содержание кислорода, определенное по интегральному спектру спиральной галактики при помощи одномерной или параметрической R_{23} -калибровок, можно интерпретировать как характерное содержание кислорода в диске спиральной галактики; 3) интегральные содержания кислорода и азота, найденные при помощи эмпирической параметрической R_{23} -калибровки, лежат на диаграмме

O/H — N/O в той же области, что и содержания кислорода и азота, определенные по спектрам отдельных областей H II.

В последние годы получено большое количество интегральных спектров галактик с эмиссионными линиями. Это обусловлено тем, что проведено несколько больших спектральных обзоров неба. Около миллиона спектров галактик с эмиссионными линиями получено в рамках цифрового обзора неба Sloan (SDSS) [552]. Спектры SDSS получены с фиксированной апертурой (круглое отверстие диаметром 3"). Эта апертура соответствует области с линейными размерами около 1.5 кпк для объекта с красным смещением $z = 0.025$ и области с диаметром 10 кпк для объекта с красным смещением $z = 0.17$. Для далеких объектов SDSS-спектры представляют собой интегральные спектры галактик.

Эмиссионные SDSS-спектры использованы для определения химического состава во многих работах [40, 95, 135, 225, 262, 334, 508, 514] и др. Интенсивности авроральных линий измеряют в спектрах сравнительно большого количества SDSS-галактик [224, 225, 262, 406, 458, 551] и др. Содержание химических элементов в таких объектах находят при помощи T_e -метода. Для близких объектов SDSS-спектры представляют собой спектры отдельных областей H II. Для этих объектов содержания кислорода, найденные по SDSS-спектрам и по обычным целевым спектрам, хорошо согласуются между собой [225, 402]. Целесообразно предположить, что для многих далеких объектов SDSS-спектры являются интегральными спектрами второго или третьего типа.

В рамках проекта "Galaxy Zoo" [291] проведена визуальная морфологическая классификация около миллиона SDSS-галактик. При этом была выделена немногочисленная группа галактик, изображения которых представляют собой зеленоватые диски малого диаметра. Следует отметить, что в рамках SDSS-классификации большинство таких галактик были классифицированы как звезды. Эти галактики получили название "Зеленые Горошины". Кардамон и др. [83] исследовали выборку 80 галактик "Зеленые Горошины". Красные смещения исследованных ими галактик лежат в интервале от $z = 0.112$ до $z = 0.360$. Фотометрическое разрешение SDSS-обзора слишком малое для того, чтобы аккуратно измерить размеры этих галактик и позволяет оценить только верхний предел радиуса, который составляет

5 кпк. Кардамон и др. нашли изображения трех галактик из их выборки в фотометрическом архиве космического телескопа Хаббла. Оказалось, что изображения галактик “Зеленые Горошины” имеют сложную структуру. Изображения содержат “пятна”, которые могут быть отдельными областями звездообразования, и “хвосты”, которые могут быть признаками слияния галактик. Кардамон и др. нашли, что массы галактик “Зеленые Горошины” лежат в интервале от $10^{8.5} M_{\odot}$ до $10^{10.5} M_{\odot}$, среднее значение массы составляет $10^{9.5} M_{\odot}$. Эти галактики характеризуются экстремально высоким темпом звездообразования (до $30 M_{\odot}/\text{год}$).

Аморин и др. [38] определили содержания кислорода и азота в галактиках “Зеленые Горошины” по SDSS-спектрам. В спектрах 70 % галактик из выборки Кардамона и др. они измерили интенсивность авроральной линии дважды ионизованного кислорода [O III] λ 436.3 и нашли содержания кислорода и азота при помощи T_e -метода. Из рис. 7.1 видно, что положения ряда галактик “Зеленые Горошины” на диаграмме O/H — N/O смещены в сторону малых содержаний кислорода или/и в сторону больших содержаний азота по сравнению с положениями областей H II в близких галактиках.

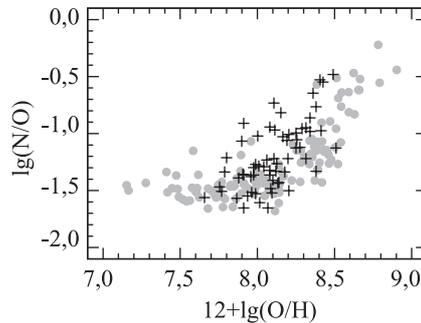


Рис. 7.1. Диаграмма O/H — N/O. Плюсы — положения галактик “Зеленые Горошины”, содержания кислорода и азота взяты из [38]. Серые точки — положения областей H II в близких галактиках, для которых содержания кислорода определены T_e -методом (выборка КТ118)

Являются ли содержания кислорода и азота, найденные в галактиках “Зеленые Горошины” при помощи T_e -метода по интегральным спектрам, достоверными? Если это так, то большие отношения N/O в ряде галактик свидетельствует об их нестандартной (химической) эволюции. Или смещение положений этих галактик на диаграмме O/H — N/O обусловлены тем, что найденные интегральные содержания кислорода в этих галактиках занижены, как это было обнаружено Кобульницким, Кенникатом и Пизагно для близких неправильных галактик? Выше было отмечено, что интегральные содержания кислорода и азота, найденные при помощи калибровки в далеких галактиках с высокой светимостью в ультрафиолетовом диапазоне, лежат на диаграмме O/H — N/O в той же области, что и содержания, определенные по спектрам отдельных областей H II.

Представляет интерес найти интегральные содержания кислорода и азота в галактиках “Зеленые Горошины” при помощи калибровки. Мы будем использовать современную ON-калибровку [409]. Аморин и др. [38] не опубликовали измеренные ими интенсивности линий. Мы измерили интенсивности линий в SDSS-спектрах галактик “Зеленые Горошины” при помощи пакета IRAF. В 29 спектрах авроральная линия [O III] λ 436.3 измеряется достаточно надежно, ее эквивалентная ширина больше 0.5 нм. Для этих галактик мы определили содержания кислорода и азота T_e -методом (рис. 7.2). Содержания кислорода и азота в этих же галактиках были найдены параметрической ON-калибровкой. Сравнение рис. 7.2, а и рис. 7.2, б показывает, что интегральные содержания кислорода и азота в галактиках “Зеленые Горошины”, определенные T_e -методом, имеют смещение в сторону малых содержаний кислорода или/и в сторону больших содержаний азота по сравнению с положениями областей H II в близких галактиках. В то же время, интегральные содержания кислорода и азота в этих галактиках, определенные ON-калибровкой, лежат на диаграмме O/H — N/O в полосе, занимаемой областями H II в близких галактиках.

Аналогичное сравнение можно провести еще для одной выборки SDSS-галактик. В работе [406] построена выборка SDSS-галактик, в спектрах которых одновременно измеряются авроральные линии [O III] λ 436.3 и [O II] λ 732.5. В 46 спектрах эквивалентная ширина линии [O III] λ 436.3 больше 5 Å. Для этих галактик мы определили O/H и N/O как при помощи T_e -метода, так и при помощи ON-калибровки. Плюсами на рис. 7.3, а пока-

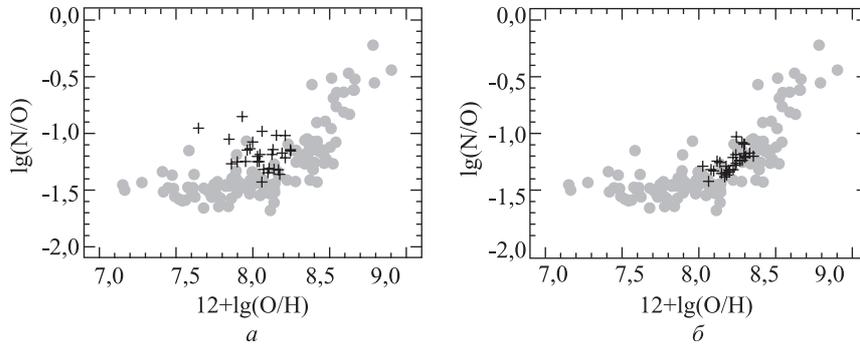


Рис. 7.2. Диаграмма O/H—N/O: *a*) плюсы — положения галактик “Зеленые Горошины” для случая, когда содержания кислорода и азота определены T_e -методом. Серые точки — положения областей H II в близких галактиках, для которых надежно определены содержания кислорода и азота (выборка KT118); *б*) то же, но содержания кислорода и азота в галактиках “Зеленые Горошины” определены параметрической N-калибровкой (ON-калибровка)

заны положения SDSS-галактик на диаграмме O/H — N/O для случая, когда содержания определены при помощи T_e -метода, а на рис. 7.3, *б* показаны положения этих же галактик на диаграмме O/H — N/O для случая, когда содержания определены при помощи ON-калибровки. Сравнение рис. 7.3, *a* и рис. 7.3, *б* показывает, что интегральные содержания кислорода и азота в этой выборке SDSS-галактик, определенные при помощи T_e -метода, также демонстрируют смещение в сторону низких содержаний кислорода или/и в сторону высоких содержаний азота по сравнению с положениями областей H II в близких галактиках. А интегральные содержания кислорода и азота в этих галактиках, определенные при помощи ON-калибровки, лежат на диаграмме O/H — N/O в полосе, занимаемой областями H II в близких галактиках.

Таким образом, положение ряда далеких галактик на диаграмме O/H — N/O зависит от метода определения интегральных содержаний кислорода и азота. Если эти галактики имеют “типичный” химический состав, то их положение на диаграмме

O/H — N/O свидетельствует о том, что калибровки дают более достоверные значения интегральных содержаний кислорода и азота, чем T_e -метод. Если же T_e -метод дает реальные значения интегральных содержаний кислорода и азота, то смещение положений этих галактик на диаграмме O/H — N/O свидетельствует о том, что (химическая) эволюция этих галактик является нетипичной. Разрешение этой дилеммы чрезвычайно важно для исследования далеких галактик.

Определение химического состава по интегральному спектру представляет интерес не только для случая далеких галактик. Кенникатт получил интегральные спектры 90 близких галактик разных морфологических типов [246, 247]. К настоящему времени интегральные спектры получены для нескольких сотен близких галактик [175, 235, 236, 340, 342]. Первоначально интегральные спектры использовали для выявления связи между характером интегрального спектра галактики и ее морфологическим типом и для выяснения возможности использования интенсивностей разных эмиссионных линий (в частности, небулярной линии

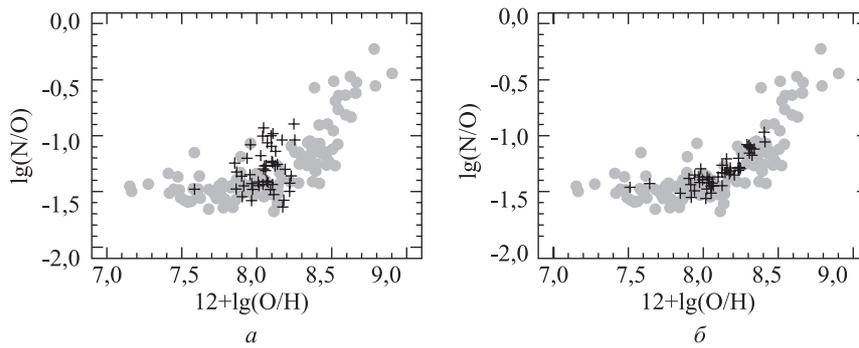


Рис. 7.3. Диаграмма O/H—N/O: а) плюсы — положения SDSS-галактик для случая, когда содержания кислорода и азота определены T_e -методом. Серые точки — положения областей H II в близких галактиках, для которых надежно определены содержания кислорода и азота (выборка КТ118); б) то же, но содержания кислорода и азота в SDSS-галактиках определены ON-калибровкой

ионизованного кислорода [O II] λ 372.7) в интегральном спектре в качестве индикатора темпа звездообразования в галактике в современную эпоху.

В 2003 году была принята программа SINGS (Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey), целью которой является всестороннее исследование 75 близких (до 30 Мпк) галактик [248]. В рамках этой и других программ проводят обширные фотометрические и спектральные наблюдения выборки близких галактик в инфракрасном диапазоне спектра [59, 110, 127], в линии H_α [108, 122, 251, 331], в линиях молекулярного водорода H_2 [428] и молекулы CO [536, 544], в радиолинии атомарного водорода 21 см [534], в радиоконтинууме на длинах волн 18 и 22 см [66]. Эти наблюдательные данные позволяют выявить новые и уточнить известные закономерности среди характеристик галактик. Многие процессы в межзвездной среде галактик зависят от металличности [49, 58, 78, 79, 178, 303]. Поэтому для корректной интерпретации наблюдательных данных необходимо знать химический состав межзвездной среды. Металличности галактик необходимо также знать для аккуратного определения расстояний до галактик по наблюдениям цефеид, так как зависимость “период — светимость” для цефеид зависит от металличности [56, 57, 148]. Для ряда близких галактик из выборки SINGS нет спектральных наблюдений отдельных областей H II, но получены интегральные спектры. В этом случае интегральные спектры дают единственную возможность оценить металличность этих галактик.

Заключение

Химический состав космического тела является одной из его фундаментальных характеристик. Области H II — основные источники информации о химическом составе галактик. Данные о химическом составе галактик играют важную роль в разнообразных исследованиях. Например, наиболее надежные расстояния до галактик определяют при помощи соотношения “период — светимость” для цефеид. Это соотношение зависит от металличности, поэтому для нахождения точного расстояния до галактики этим способом необходимо знать ее химический состав. Решение многих задач внегалактической астрономии в той или иной степени зависит от достоверности определения химического состава галактик.

Около 150 лет назад Кирхгоф указал путь к решению задачи определения физических характеристик и химического состава космических тел, в том числе газовых туманностей. За прошедшие годы усилиями многих астрономов и физиков общие идеи Кирхгофа получили воплощение в конкретных методах диагностики областей H II. Получены соотношения, связывающие наблюдаемые интенсивности эмиссионных линий в спектрах областей H II с физическими характеристиками и содержанием химических элементов в туманности. Содержания кислорода и азота определены для большого количества областей H II в нашей и других галактиках. Получена общая качественная картина распределения содержания кислорода и азота в галактиках. Установлены зависимости между металличностью и другими макроскопическими характеристиками галактик.

Однако количественная картина химического состава галактик еще далека от совершенства. Если относительные содержания кислорода (например, радиальное распределение содержа-

ний кислорода в диске галактики) определяются более или менее удовлетворительно, то шкала абсолютных содержаний кислорода в областях H II является предметом дискуссий.

Эмпирическая шкала металличности областей H II, установленная на основе реальных областей H II, в которых содержание тяжелых элементов определено T_e -методом, не согласуется с теоретической шкалой металличности, установленной на основе фотоионизационных моделей областей H II. Какая шкала металличности является более достоверной? С одной стороны, тот факт, что теоретические шкалы металличности областей H II, установленные на основе разных фотоионизационных моделей областей H II, не согласуются между собой, указывает на то, что современные модели областей H II далеки от совершенства. Здесь уместно привести выдержку из работы Стасинской [485], признанного специалиста по расчету моделей областей H II. “Широко распространено мнение о том, что наиболее точные значения содержаний элементов в области H II могут быть получены путем построения фотоионизационной модели, которая воспроизводит наблюдаемый спектр. Это было бы так, если бы входные параметры модели были бы достаточно многочисленными (не только интенсивности эмиссионных линий, но также спектральное распределение ионизирующего излучения и распределение плотности газа внутри туманности), и если бы фотоионизационная модель адекватно описывала все физические процессы, и если бы используемые атомные данные были бы точными. Эти условия никогда не реализуются на практике.”

Однако, в главе 3 были приведены весомые аргументы в пользу того, что электронная температура и содержания тяжелых элементов, определенные классическим T_e -методом, являются реалистичными. На основании этого сделано заключение, что эмпирическая шкала металличности областей H II, установленная на основе реальных областей H II, в которых содержание тяжелых элементов определено T_e -методом, более достоверна, чем теоретические шкалы металличности, установленные на основе фотоионизационных моделей областей H II.

В принципе достоверность определения абсолютных содержаний кислорода в областях H II может быть проверена сравнением с содержаниями кислорода в звездах ранних спектральных классов. Так как время жизни этих звезд мало, то они образова-

лись сравнительно недавно и следовательно, химический состав их атмосфер отображает химический состав межзвездной среды в современную эпоху. Однако ситуация с определением содержания кислорода в звездах также далека от совершенства. Обычно предполагается, что наиболее изученной звездой является Солнце. Как отмечалось выше, содержание кислорода на Солнце в последние годы пересмотрено и изменено на 0.2 dex.

Итак, в настоящее время наиболее обоснованной является шкала металличностей областей Н II, которая основывается на классическом T_e -методе. Поэтому наиболее целесообразно, на наш взгляд, определение содержания кислорода именно в этой шкале с использованием следующих методов.

— Если в спектре области Н II можно измерить какую-либо авроральную линию ([O III] λ 436.3, [N II] λ 575.5 или [S III] λ 631.2), то для определения содержания кислорода и азота (и других химических элементов) следует использовать T_e -метод.

— Если в спектре не удастся измерить авроральные линии, но измерены небулярные линии [O II], [O III], [N II] и [S II], то для определения содержания кислорода и азота следует использовать параметрические N-калибровки. Во-первых, эти калибровки обеспечивают удовлетворительную точность во всем диапазоне металличностей областей Н II. Во-вторых, сформулированы простые критерии для выбора уравнения, которое следует использовать для определения содержания в конкретной области Н II. В-третьих, в рамках параметрических N-калибровок получены уравнения не только для определения содержания кислорода, но и для определения содержания азота и электронной температуры.

— Можно использовать также одномерные N-калибровки и P -метод. В этом случае следует обратить особое внимание на то, чтобы не выходить за пределы применимости выбранной калибровки.

Однако до тех пор, пока не будут установлены причины расхождений между содержаниями кислорода (и других химических элементов), определенными по разрешенным и запрещенным линиям в областях Н II; между содержаниями кислорода, определенными T_e -методом и с использованием фотоионизационных моделей областей Н II; между содержаниями кислорода в межзвездной среде и атмосферах звезд ранних спектральных

классов, будут иметь место сомнения в достоверности шкалы металличностей областей Н II. Только устранение этих расхождений позволит создать единую, действительно достоверную шкалу металличностей космических тел. С одной стороны, базой для решения этой важнейшей задачи должны послужить высокоточные спектральные измерения в оптическом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах достаточно большой выборки областей Н II разных металличностей (и температур). С другой стороны, большое влияние окажет совершенствование моделей областей Н II (если бы удалось убрать все “если бы”, перечисленные Стасинской) и звездных атмосфер.

Список литературы

- [1] *Аллер Л., Лиллер У.* Планетарные туманности. — М.: Мир, 1971.—149 с.
- [2] *Амбарцумян В.А.* Теоретическая астрофизика. — Л.-М.: ГОНТИ, 1939.—255 с.
- [3] *Боярчук А.А., Гершберг Р.Е., Проник В.И.* Формулы, графики и номограммы для количественного анализа спектров эмиссионных объектов // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1963.—**29**.—С. 291—314.
- [4] *Вавилов С.И.* Примечания к переводу оптических мемуаров Ньютона // Успехи физ. наук.—1927.—**7**, № 2.—С. 1—163.
- [5] *Головатий В.В., Мелех Б.Я. Гаврилова Н.В.* Фізика газових туманностей. Лабораторний практикум. — Львів: Вид-во Львів. нац. ун-ту, 2006.—78 с.
- [6] *Гурзадян Г.А.* Планетарные туманности. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1962.—392 с.
- [7] *Каплан С.А., Пикельнер С.Б.* Межзвездная среда. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1963.—532 с.
- [8] *Каплан С.А., Пикельнер С.Б.* Физика межзвездной среды. — М.: Наука, 1979.—592 с.
- [9] *Киппер А.Я.* Теория двойного излучения световых квантов для атома водорода // Публ. Тартусской астрон. обсерватории.—1952.—**32**.—С. 63—93.
- [10] *Кларк А.* Общедоступная история астрономии в XIX столетии. — Одесса: Типография Акционерного Южно-Русского Общества Печатного дела, 1913.—656 с.

- [11] *Клейн*. Астрономические вечера / Ред. К.П. Пятницкий. — СПб.: Знание, 1900.—448 с.
- [12] *Мензел Д., Бэкер Д., Аллер Л. и др.* Физические процессы в газовых туманностях. — М.: Гос. изд-во иностр. лит., 1948.—204 с.
- [13] *Ньютон И.* Новая теория света и цветов / Пер. С.И.Вавилова // *Успехи физ. наук.*—1927.—**7**.—С. 123—134.
- [14] *Паннекук А.* История астрономии. — М.: Наука, 1966.—592 с.
- [15] *Пикельнер С.Б.* Ионизация гелия в туманностях и температуры *O*-звезд // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1953.—**10**. — С. 183—199.
- [16] *Пилюгин Л.С.* Влияние галактического ветра на химическую эволюцию неправильных галактик. Численное моделирование и аналитическое описание // *Астрон. журн.*—1994.—**71**, № 6.— С. 825—832.
- [17] *Пилюгин Л.С.* Влияние галактического ветра на химическую эволюцию неправильных галактик. Проблема определения догалактического обилия гелия // *Астрон. журн.*—1994.—**71**, № 6.— С. 833—836.
- [18] *Пилюгин Л.С.* О точности определения электронных температур в областях *H II* // *Кинематика и физика небес. тел.*—2010.—**26**, № 2.— С. 3—19.
- [19] *Пилюгин Л.С., Изотова И.Ю., Шолудченко Ю.С.* Содержание кислорода в близких галактиках на основе спектров *H II* областей из цифрового обзора неба Sloan. II. Взаимодействующие галактики NGC 4631 и NGC 4656 // *Кинематика и физика небес. тел.*—2008.—**24**, № 4.—С. 263—277.
- [20] *Проник В.И.* К определению электронных температур диффузных газовых туманностей // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1957.—**17**.—С. 14—41.
- [21] *Соболев В.В.* Курс теоретической астрофизики. — М.: Наука, 1967.—528 с.
- [22] *Физика космоса: маленькая энциклопедия* / Под ред. Р.А. Сюняева. — М.: Сов. энциклопедия, 1986.—783 с.
- [23] *Хромов Г.С.* Планетарные туманности: физика, эволюция, космогония. — М.: Наука, 1985.—296 с.

- [24] Шкварун Р.В., Пиллогин Л.С. Распределение содержания кислорода в дисках восьми спиральных галактик // Кинематика и физика небес. тел.—2004.—**20**, № 1.— С. 68—75.
- [25] Шкловский И.С. Монохроматическое радиоизлучение Галактики и возможность его наблюдения // Астрон. журн.—1949.—**26**.—С. 10—21.
- [26] Шкловский И.С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. — М.: Наука, 1975.—368 с.
- [27] Шпольский Э.В. Столетие спектрального анализа // Успехи физ. наук.—1959.—**39**.—С. 658—678.
- [28] Шолудченко Ю.С., Изотова И.Ю., Пиллогин Л.С. Содержание кислорода в областях H II спиральной галактики M 101 на основе спектров из цифрового обзора неба Sloan // Кинематика и физика небес. тел.—2007.—**23**, № 4.— С. 230—240.
- [29] Aggarwal K.M. Electron excitation rates among fine structure levels in O III // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1983.—**52**.— P. 387—398.
- [30] Aggarwal K.M., Keenan F.P. Excitation rate coefficients for fine-structure transitions in O III // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1999.—**123**.—P. 311—349.
- [31] Afllerbach A., Churchwell E., Werner M.W. Galactic abundance gradients from infrared fine-structure lines in compact H II regions // *Astrophys. J.*—1997.—**478**.—P. 190—205.
- [32] Alexander T., Sturm E., Lutz D., et al. Infrared spectroscopy of NGC 4151: probing the obscured ionizing active galactic nucleus continuum // *Astrophys. J.*—1999.—**512**.—P. 204—223.
- [33] Allende Prieto C., Lambert D.L., Asplund M. The forbidden abundance of oxygen in the Sun // *Astrophys. J.*—2001.—**556**.—P. L63—L66.
- [34] Aller L.H. The spectra of the emission nebulosities in Messier 33 // *Astrophys. J.*—1942.—**95**.—P. 52—57.
- [35] Aller L.H. Physics of thermal gaseous nebulae. — Dordrecht: Reidel, 1984.—360 p.
- [36] Alloin D., Collin-Souffrin S., Joly M., Vigroux L. Nitrogen and oxygen abundances in galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1979.—**78**.—P. 200—216.

- [37] *Alves D.R., Cook K.H.* Ground-based discovery of Cepheids and Miras in M 101 // *Astron. J.*—1995.—**110**.—P. 192–198.
- [38] *Amorín R.O., Pérez-Montero E., Vílchez J.M.* On the oxygen and nitrogen chemical abundances and the evolution of the “Green Pea” galaxies // *Astrophys. J.*—2010.—**715**.—P. L128–L132.
- [39] *André M.K., Oliveira C.M., Howk J.C., et al.* Oxygen gas-phase abundance revisited // *Astrophys. J.*—2003.—**591**.—P. 1000–1012.
- [40] *Asari N.V., Cid Fernandes R., Stasińska G., et al.* The history of star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**381**.—P. 263–279.
- [41] *Asplund M., Grevesse N., Sauval A.J., et al.* Line formation in solar granulation. IV. [O I], O I and OH lines and the photospheric O abundance // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**417**.—P. 751–768.
- [42] *Baldwin J.A., Phillips M.M., Terlevich R.* Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1981.—**93**.—P. 5–19.
- [43] *Baldwin J.A., Verner E.M., Verner D.A., et al.* High-resolution spectroscopy of faint emission lines in the Orion nebula // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2000.—**129**.—P. 229–246.
- [44] *Barlow M.J., Liu X.-W., Péquignot D., et al.* Recombination-line abundances for the third-row element, magnesium // *Planetary nebulae: their evolution and role in the universe* / Eds S. Kwok, M. Dopita, R. Sutherland. — San Francisco, 2003.— P. 373–374.— (Proc. IAU Symp. N 209).
- [45] *Beckman J.E., Rozas M., Zurita A., et al.* Populations of high-luminosity density-bounded H II regions in spiral galaxies: evidence and implications // *Astron. J.*—2000.—**119**.—P. 2728–2744.
- [46] *Begum A., Chengalur J.N.* A search for H I in some peculiar faint dwarf galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*— 2005.—**362**.—P. 609–611.
- [47] *Beirão P., Armus L., Appleton P.N., et al.* Far-infrared line imaging of the starburst ring in NGC 1097 with the *Herschel*/ PACS spectrometer // *Astron. and Astrophys.*—2010.—**518**.—P. L60.
- [48] *Belley J., Roy J.-R.* The abundance gradients across the spiral galaxies NGC 628 and NGC 6946 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1992.—**78**.—P. 61–85.

- [49] *Bendo G.J., Wilson C.D., Warren B.E., et al.* The JCMT Nearby Galaxies Legacy Survey — III. Comparisons of cold dust, polycyclic aromatic hydrocarbons, molecular gas and atomic gas in NGC 2403 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**402**.—P. 1409–1425.
- [50] *Bergvall N.* Star formation and chemical abundances in the blue compact galaxy ESO 338-IG04 // *Astron. and Astrophys.*—1985.—**146**.—P. 269–281.
- [51] *Bernard-Salas J., Spoon H.W.W., Charmandaris V., et al.* A Spitzer high-resolution mid-infrared spectral atlas of starburst galaxies // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2009.—**184**.—P. 230–247.
- [52] *Bhatia A.K., Kastner S.O.* Collision strengths and transition rates for O III // *Atom. Data and Nucl. Data Tables.*—1993.—**54**.—P. 133–164.
- [53] *Biemont E., Bromage C.E.* Transition probabilities for forbidden lines — The silicon isoelectronic sequence from S III to Sn XXXVII // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1983.—**205**.—P. 1085–1096.
- [54] *Binette L., Flores-Fajardo N., Raga A.C., et al.* Photoionized mixing layer models of the diffuse ionized gas // *Astrophys. J.*—2009.—**695**.—P. 552–560.
- [55] *Blagrove K.P.M., Martin P.G.* On the O II ground configuration energy levels // *Astrophys. J.*—2004.—**610**.—P. 813–819.
- [56] *Bono G., Caputo F., Fiorentino G., et al.* Cepheids in external galaxies. I. The maser-host galaxy NGC 4258 and the metallicity dependence of period — luminosity and period — wesenheit relations // *Astrophys. J.*—2008.—**684**.—P. 102–117.
- [57] *Bono G., Caputo F., Marconi M., Musella I.* Insights into the Cepheid distance scale // *Astrophys. J.*—2010.—**715**.—P. 277–291.
- [58] *Boquien M., Calzetti D., Kennicutt R.C. (Jr), et al.* Star-forming or starbursting? The ultraviolet conundrum // *Astrophys. J.*—2009.—**706**.—P. 553–570.
- [59] *Boquien M., Bendo G., Calzetti D., et al.* Total infrared luminosity estimation of resolved and unresolved galaxies // *Astrophys. J.*—2010.—**713**.—P. 626–636.
- [60] *Boselli A., Lequeux J., Gavazzi G.* Molecular gas in normal late-type galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**384**.—P. 33–47.

- [61] *Bowen I.S.* The origin of the chief nebular lines // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1927.—**39**.—P. 295–297.
- [62] *Bowen I.S.* The origin of the nebular lines and the structure of the planetary nebulae // *Astrophys. J.*—1928.—**67**.—P. 1–15.
- [63] *Bowen I.S.* The excitation of the permitted O III nebular lines // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1934.—**46**.—P. 146–148.
- [64] *Bowen I.S.* Wave lengths of forbidden lines. II // *Astrophys. J.*—1960.—**132**.—P. 1–17.
- [65] *Bowen I.S., Wyse A.B.* The spectra and chemical composition of the gaseous nebulae, NGC 6572, 7027, 7662 // *Lick Observ. Bull.*—1939.—**19**.—P. 1–16.
- [66] *Braun R., Oosterloo T.A., Morganti R., et al.* The Westerbork SINGS survey. I. Overview and image atlas // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**461**.—P. 455–470.
- [67] *Bresolin F.* The oxygen abundance in the inner H II regions of M 101. Implications for the calibration of strong-line metallicity indicators // *Astrophys. J.*—2007.—**656**.—P. 186–197.
- [68] *Bresolin F., Garnett D.R., Kennicutt R.C., (Jr.)* Abundances of metal-rich H II regions in M 51 // *Astrophys. J.*—2004.—**615**.—P. 228–241.
- [69] *Bresolin F., Gieren W., Kudritzki R.-P., et al.* Extragalactic chemical abundances: do H II regions and young stars tell the same story? The case of the spiral galaxy NGC 300 // *Astrophys. J.*—2009.—**700**.—P. 309–330.
- [70] *Bresolin F., Ryan-Weber E., Kennicutt R.C., Goddard Q.* The flat oxygen abundance gradient in the extended disk of M 83 // *Astrophys. J.*—2009.—**695**.—P. 580–595.
- [71] *Bresolin F., Schaerer D., González Delgado R.M., Stasińska G.* A VLT study of metal-rich extragalactic H II regions. I. Observations and empirical abundances // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**441**.—P. 981–997.
- [72] *Brinchmann J., Charlot S., White S.D.M., et al.* The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—**351**.—P. 1151–1179.

- [73] *Brown W.R., Kewley L.J., Geller M.J.* MMT extremely metal-poor galaxy survey. I. An efficient technique for identifying metal-poor galaxies // *Astron. J.*—2008.—**135**.—P. 92–98.
- [74] *Butler S.E., Dalgarno A.* Charge transfer between N^+ and H // *Astrophys. J.*—1979.—**234**.—P. 765–767.
- [75] *Cai W., Pradhan A.K.* Excitation rate coefficients and line ratios for the optical and ultraviolet transitions in S II // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1993.—**88**.—P. 329–356.
- [76] *Cairós L.M., Caon N., García-Lorenzo B., et al.* Spectrophotometric investigations of blue compact dwarf galaxies: Markarian 35 // *Astrophys. J.*—2007.—**669**.—P. 251–268.
- [77] *Calzetti D., Harris J., Gallagher J.S., et al.* The ionized gas in local starburst galaxies: global and small-scale feedback from star formation // *Astron. J.*—2004.—**127**.—P. 1405–1430.
- [78] *Calzetti D., Kennicutt R.C. (Jr), Engelbracht C.W., et al.* The calibration of mid-infrared star formation rate indicators // *Astrophys. J.*—2007.—**666**.—P. 870–895.
- [79] *Calzetti D., Wu S.-Y., Hong S., et al.* The calibration of monochromatic far-infrared star formation rate indicators // *Astrophys. J.*—2010.—**714**.—P. 1256–1279.
- [80] *Campbell A.* Physical conditions in H II galaxies // *Astrophys. J.*—1988.—**335**.—P. 644–657.
- [81] *Campbell A., Terlevich R., Melnick J.* The stellar populations and evolution of H II galaxies — I. High signal-to-noise optical spectroscopy // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1986.—**223**.—P. 811–825.
- [82] *Caplan J., Deharveng L., Peña M., et al.* Oxygen and helium abundances in Galactic H II regions — I. Observations // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2000.—**311**.—P. 317–328.
- [83] *Cardamone C., Schawinski K., Sarzi M., et al.* Galaxy Zoo Green Peas: discovery of a class of compact extremely star-forming galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2009.—**399**.—P. 1191–1205.
- [84] *Cardelli J.A., Meyer D.M., Jura M., Savage B.D.* The abundance of interstellar carbon // *Astrophys. J.*—1996.—**467**.—P. 334–340.
- [85] *Carollo C.M., Lilly S.J.* The metallicity of $0.5 < z < 1$ field galaxies // *Astrophys. J.*—2001.—**548**.—P. L153–L157.

- [86] *Cartledge S.I.B., Lauroesch J.T., Meyer D.M., Sofia U.J.* The homogeneity of interstellar elemental abundances in the galactic disk // *Astrophys. J.*—2006.—**641**.—P. 327–346.
- [87] *Castellanos M., Díaz A.I., Terlevich E.* A comprehensive study of reported high-metallicity giant H II regions. — I. Detailed abundance analysis // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2002.—**329**.—P. 315–335.
- [88] *Castellanos M., Díaz A.I., Terlevich E.* A comprehensive study of reported high-metallicity giant H II regions. — II. Ionizing stellar populations // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2002.—**337**.—P. 540–552.
- [89] *Catinella B., Haynes M.P., Giovanelli R., et al.* A pilot survey of H I in field galaxies at redshift $z \approx 0.2$ // *Astrophys. J.*—2008.—**685**.—P. L13–L17.
- [90] *Catinella B., Schiminovich D., Kauffmann G., et al.* The GALEX Arecibo SDSS Survey — I. Gas fraction scaling relations of massive galaxies and first data release // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**403**.—P. 683–708.
- [91] *Cedrés B., Urbaneja M.A., Cepa J.* The oxygen abundance gradient in M 101: The reliability of the P method // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**422**.—P. 511–514.
- [92] *Chiappini C., Matteucci F., Meynet G.* Stellar yields with rotation and their effect on chemical evolution models // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**410**.—P. 257–267.
- [93] *Chiappini C., Matteucci F., Romano D.* Abundance gradients and the formation of the Milky Way // *Astrophys. J.*—2001.—**554**.—P. 1044–1058.
- [94] *Christensen T., Petersen L., Gammelgaard P.* A sulphur abundance study of NGC 300 by an empirical calibration method // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**322**.—P. 41–48.
- [95] *Cid Fernandes R., Asari N.V., Sodr  L., et al.* Uncovering the chemical enrichment and mass-assembly histories of star-forming galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**375**.—P. L16–L20.
- [96] *Cilli  G.* The hydrogen emission in gaseous nebulae // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1932.—**92**.—P. 820–831.

- [97] *Cillié G.G.* The theoretical capture spectrum of hydrogen // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1936.—**96**.—P. 771—779.
- [98] *Colgan S.W.J., Haas M.R., Erickson E.F., et al.* Detection of the [N II] 122 and 205 micron lines: densities in G333.6-0.2 // Astrophys. J.—1993.—**413**.—P. 237—241.
- [99] *Contini T., Treyer M.A., Sullivan M., Ellis R.S.* Chemical abundances in a UV-selected sample of galaxies // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2002.—**330**.—P. 75—91.
- [100] *Copetti M.V.F., Writzl B.C.* Study of electron density in planetary nebulae. A comparison of different density indicators // Astron. and Astrophys.—2002.—**382**.—P. 282—290.
- [101] *Corbin M.R., Vacca W.D.* Pox 186: a dwarf galaxy in the process of formation? // Astrophys. J.—2002.—**581**.—P. 1039—1046.
- [102] *Cowie L.L., Barger A.J.* An integrated picture of star formation, metallicity evolution, and galactic stellar mass assembly // Astrophys. J.—2008.—**686**.—P. 72—116.
- [103] *Crockett N.R., Garnett D.R., Masey P., Jacoby G.* Neon and oxygen abundances in M 33 // Astrophys. J.—2006.—**637**.—P. 741—751.
- [104] *Croxall K.V., van Zee L., Lee H., et al.* Chemical abundances of seven irregular and three tidal dwarf galaxies in the M 81 Group // Astrophys. J.—2009.—**705**.—P. 723—738.
- [105] *Curtis H.R.* The Nebulae (the Adolfo Stahl lectures in astronomy) // Publs Astron. Soc. Pacif.—1917.—**29**.—P. 91—103.
- [106] *Czyzak S.J., Krueger T.K.* Forbidden transition probabilities for some P, S, Cl and A ions // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1963.—**126**.—P. 177—194.
- [107] *Czyzak S.J., Krueger T.K., de Martins A.P., et al.* Collision strengths for transitions in ions with configurations $3p^3$ // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1970.—**148**.—P. 361—365.
- [108] *Daigle O., Carignan C., Amram P., et al.* H_α kinematics of the SINGS nearby galaxies survey — I // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2006.—**367**.—P. 469—512.
- [109] *Dalcanton J.J.* The metallicity of galaxy disks: infall versus outflow // Astrophys. J.—2007.—**658**.—P. 941—959.

- [110] Dale D.A., Bendo C.J., Engelbracht C.W., et al. Infrared spectral energy distributions of nearby galaxies // *Astrophys. J.*—2005.—**633**.—P. 857—870.
- [111] Dale D.A., Smith J.D.T., Schlawin E.A., et al. The Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey: a high-resolution spectroscopy anthology // *Astrophys. J.*—2009.—**693**.—P. 1821—1834.
- [112] Davidson K., Kinman T.D. Primordial helium, spectrophotometric technique, and I Zw 18 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1985.—**58**.—P. 321—340.
- [113] de Blok W.J.G., van der Hulst J.M. Star formation and the interstellar medium in low surface brightness galaxies. I. Oxygen abundances and abundance gradients in low surface brightness disk galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**335**.—P. 421—430.
- [114] de Blok W.J.G., Walter F., Brinks E., et al. High-resolution rotation curves and galaxy mass models from THINGS // *Astron. J.*—2008.—**136**.—P. 2648—2719.
- [115] Deharveng L., Peña M., Caplan J., Costero R. Oxygen and helium abundances in Galactic H II regions — II. Abundance gradients // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2000.—**311**.—P. 329—345.
- [116] Denicolo G., Terlevich R., Terlevich E. New light on the search for low-metallicity galaxies — I. The N2 calibrator // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2002.—**330**.—P. 69—74.
- [117] De Robertis M.M., Dufour R.J., Hunt R.W. A five-level program for ions of astrophysical interest // *J. Roy. Astron. Soc. Can.*—1987.—**81**.—P. 195—220.
- [118] De Robertis M.M., Osterbrock D.E., McKee C.F. The splitting of the $2s^2 2p^3 \ ^2P$ term in O II // *Astrophys. J.*—1985.—**293**.—P. 459—462.
- [119] de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corvin H.G., et al. Third reference catalogue of bright galaxies. — Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1991.—2069 p.
- [120] Díaz A.I., Pérez-Montero E. An empirical calibration of nebular abundances based on the sulphur emission lines // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2000.—**312**.—P. 130—138.
- [121] Díaz A.I., Terlevich E., Vílchez J.M., et al. Abundance analysis of giant H II regions in M 51 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1991.—**253**.—P. 245—255.

- [122] *Dicaire I., Carignan C., Amram P., et al.* H α kinematics of the Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey – II // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2008.—**385**.—P. 553–605.
- [123] *Dopita M.A., Evans I.N.* Theoretical models for H II regions. II. — The extragalactic H II region abundance sequence // *Astrophys. J.*—1986.—**307**.—P. 431–440.
- [124] *Dopita M.A., Fischera J., Sutherland R.S., et al.* Modelling the panspectral energy distribution of starburst galaxies. III. Emission line diagnostics of ensembles of evolving H II regions // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2006.—**167**.—P. 177–200.
- [125] *Dors O.L., Copetti M.V.F.* Abundance gradients in a sample of barred spiral galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**437**.—P. 837–847.
- [126] *Doublier V., Kunth D., Courbin F., Magain P.* Pox 186: the ultracompact blue compact dwarf galaxy reveals its nature // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**353**.—P. 887–892.
- [127] *Draine B.T., Dale D.A., Bendo G., et al.* Dust masses, PAH abundances, and starlight intensities in the SINGS galaxy sample // *Astrophys. J.*—2007.—**663**.—P. 866–894.
- [128] *Dudik R.P., Weingartner J.C., Satyapal S., et al.* Mid-infrared fine-structure line ratios in active galactic nuclei observed with the *SPITZER* IRS: evidence for extinction by the torus // *Astrophys. J.*—2007.—**664**.—P. 71–87.
- [129] *Dufour R.J.* The chemical composition of selected H II regions in the Magellanic Clouds // *Astrophys. J.*—1975.—**195**.—P. 315–332.
- [130] *Dufour R.J., Shields G.A., Talbot R.J.* The carbon abundance in the Magellanic Clouds from IUE observations of H II regions // *Astrophys. J.*—1982.—**252**.—P. 461–473.
- [131] *Dunkley J., Komatsu E., Nolte M.R., et al.* Five-year *Wilkinson Microwave Anisotrope Probe* observations: likelihoods and parameters from the *WMAP* data // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2009.—**180**.—P. 306–329.
- [132] *Edlén B.* Comparison of theoretical and experimental level values of the n=2 configurations in the carbon isoelectronic sequence // *Phys. scr.*—1985.—**31**.—P. 345–358.

- [133] *Edmunds M.G., Pagel B.E.J.* On the composition of H II regions in southern galaxies — III. NGC 2997 and 7793 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1984.—**211**.—P. 507–519.
- [134] *Edmunds M.G.* General constraints on the effect of gas flows in the chemical evolution of galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1990.—**246**.—P. 678–685.
- [135] *Ellison S.L., Patton D.R., Simard L., McConnachie A.W.* Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey. I. Star formation, active galactic nucleus fraction, and the luminosity/mass–metallicity relation // *Astron. J.*—2008.—**135**.—P. 1877–1899.
- [136] *Erb D.K., Pettini M., Shapley A.E., et al.* Physical conditions in a young, unreddened, low-metallicity galaxy at high redshift // *Astrophys. J.*—2010.—**719**.—P. 1168–1190.
- [137] *Erb D.K., Shapley A.E., Pettini M., et al.* The mass–metallicity relation at $z > 2$ // *Astrophys. J.*—2006.—**644**.—P. 813–828.
- [138] *Eriksson K.B.S.* Accurate wavelengths in O II // *J. Opt. Soc. Amer., B: Opt. Phys.*—1987.—**4**.—P. 1369–1371.
- [139] *Esteban C., Bresolin F., Peimbert M., et al.* Keck HIRES spectroscopy of extragalactic H II regions: C and O abundances from recombination lines // *Astrophys. J.*—2009.—**700**.—P. 654–678.
- [140] *Esteban C., Peimbert M., García-Rojas J., et al.* A reappraisal of the chemical composition of the Orion nebula based on Very Large Telescope echelle spectrophotometry // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—**355**.—P. 229–247.
- [141] *Esteban C., Peimbert M., Torres-Peimbert S., Escalante V.* Chemical composition of the Orion nebula derived from echelle spectrophotometry // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—**295**.—P. 401–422.
- [142] *Esteban C., Peimbert M., Torres-Peimbert S., García-Rojas J.* Chemical composition and temperature fluctuations in M 17 // *Rev. mex. astron. y astrofís.*—1999.—**35**.—P. 65–83.
- [143] *Esteban C., Peimbert M., Torres-Peimbert S., Rodríguez M.* Optical recombination lines of heavy elements in giant extragalactic H II regions // *Astrophys. J.*—2002.—**581**.—P. 241–257.
- [144] *Feldmeier J.J., Ciardullo R., Jacoby G.H.* Planetary nebulae as standard candles. XI. Application to spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1997.—**479**.—P. 231–243.

- [145] *Ferguson A.M.N., Gallagher J.S., Wyse R.F.G.* The extreme outer regions of disk galaxies. I. Chemical abundances of H II regions // *Astron. J.*—1998.—**116**.—P. 673–690.
- [146] *Ferguson A.M.N., Wyse R.F.G., Gallagher J.S. III, Hunter D.A.* Diffuse ionized gas in spiral galaxies: probing Lyman continuum photon leakage from H II regions? // *Astron. J.*—1996.—**111**.—P. 2265–2279.
- [147] *Ferland G.J.* Hazy, a brief introduction to Cloudy 90 // Lexington: KY: Univ. Kentucky Internal Report.—1996.—565 p.
- [148] *Fiorentino G., Marconi M., Musella I., Caputo F.* Classical Cepheid pulsation models. XI. Effects of convection and chemical composition on the period — luminosity and period — wesenheit relations // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**476**.—P. 863–879.
- [149] *Fischer J., Sturm E., González-Alfonso E., et al.* Herschel PACS spectroscopic diagnostics of local ULIRGs: conditions and kinematics in Mrk 231 // *Astron. and Astrophys.*—2010.—**518**.—P. L41.
- [150] *Fowler A.* The spectrum of ionized oxygen (O II) // *Proc. Roy. Soc. London A.*—1926.—**110**.—P. 476–501.
- [151] *Fowler A.* The spectrum of doubly ionized oxygen (O III) // *Proc. Roy. Soc. London A.*—1928.—**117**.—P. 317–330.
- [152] *Fraunhofer J.* Bestimmung des Brechungs und Farbersteuerungs Vermogen verschiedener Glassorten in Bezug auf die Vervollkommung achromatischer Fernröhre // *Denkschr München Akad. Wiss.*— 1817.—**5**.—P. 193–226.
- [153] *Freedman W.L., Madore B.F., Gibson B.K., et al.* Final results from the Hubble Space Telescope Key Project to measure the Hubble constant // *Astrophys. J.*—2001.—**553**.—P. 47–72.
- [154] *French H.B.* Galaxies with the spectra of giant H II regions // *Astrophys. J.*—1980.—**240**.—P. 41–59.
- [155] *Froese Fischer C.* <http://hf8.vuse.vanderbilt.edu>
- [156] *Froese Fischer C., Tachiev G.* Breit-Pauli energy levels, lifetimes, and transition probabilities for the beryllium-like to neon-like sequences // *Atom. Data and Nucl. Data Tables.*— 2004.—**87**.—P. 1–184.

- [157] *Froese Fischer C., Tachiev G., Irimia A.* Relativistic energy levels, lifetimes, and transition probabilities for the sodium-like to argon-like sequences // *Atom. Data and Nucl. Data Tables.*—2006.—**92**.—P. 607–812.
- [158] *Froese Fischer C., Tachiev G., Rubin R.H., Rodríguez M.* Analysis of Breit-Pauli transition probabilities for lines O III // *Astrophys. J.*—2009.—**703**.—P. 500–506.
- [159] *Fukugita M., Kawasaki M.* Primordial helium abundance: a reanalysis of the Izotov-Thuan spectroscopic sample // *Astrophys. J.*—2006.—**646**.—P. 691–695.
- [160] *Galavís M.E., Mendoza C., Zeippen C.J.* Atomic data from the IRON Project. X. Effective collision strengths for infrared transitions in silicon- and sulphur-like ions // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—**111**.—P. 347–357.
- [161] *Galavís M.E., Mendoza C., Zeippen C.J.* Atomic data from the IRON Project. XXII. Radiative rates for forbidden transitions within the ground configuration of ions in the carbon and oxygen isoelectronic sequences // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1997.—**123**.—P. 159–171.
- [162] *García-Rojas J., Esteban C., Peimbert M., et al.* Faint emission lines in the Galactic H II regions M 16, M 20 and NGC 3603 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**368**.—P. 253–279.
- [163] *García-Rojas J., Esteban C., Peimbert A., et al.* Deep echelle spectrophotometry of S 311, a Galactic H II region located outside the solar circle // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2005.—**362**.—P. 301–312.
- [164] *García-Rojas J., Esteban C., Peimbert M., et al.* Chemical abundances of the Galactic H II region NGC 3576 derived from Very Large Telescope echelle spectrophotometry // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2004.—**153**.—P. 501–522.
- [165] *García-Rojas J., Esteban C., Peimbert A., et al.* The chemical composition of the Galactic H II regions M 8 and M 17. A revision based on deep VLT echelle spectrophotometry // *Rev. Mex. Astron. y Astrofís.*—2007.—**43**.—P. 3–31.
- [166] *Garnett D.R.* Nitrogen in irregular galaxies // *Astrophys. J.*—1990.—**363**.—P. 142–153.

- [167] *Garnett D.R.* Electron temperature variations and the measurement of nebular abundances // *Astron. J.*—1992.—**103**.—P. 1330—1337.
- [168] *Garnett D.R.* The luminosity-metallicity relation, effective yields, and metal loss in spiral and irregular galaxies // *Astrophys. J.*—2002.—**581**.—P. 1019—1031.
- [169] *Garnett D.R., Kennicutt R.C. (Jr)* A very metal poor H II region in the outer disk of M 101 // *Astrophys. J.*—1994.—**426**.—P. 123—130.
- [170] *Garnett D.R., Kennicutt R.C. (Jr), Bresolin F.* The first measured electron temperatures for metal-rich H II regions in M 51 // *Astrophys. J.*—2004.—**607**.—P. 21L—24L.
- [171] *Garnett D.R., Shields G.A.* The composition gradient across M 81 // *Astrophys. J.*—1987.—**317**.—P. 82—101.
- [172] *Garnett D.R., Shields G.A., Peimbert M., et al.* Carbon in spiral galaxies from Hubble Space Telescope spectroscopy // *Astrophys. J.*—1999.—**513**.—P. 168—179.
- [173] *Garnett D.R., Shields G.A., Skillman E.D., et al.* Interstellar abundance gradients in NGC 2403: comparison to M 33 // *Astrophys. J.*—1997.—**489**.—P. 63—86.
- [174] *Garstang R.H.* Energy levels and transition probabilities in p^2 and p^4 configurations // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1951.—**111**.—P. 115—124.
- [175] *Gavazzi G., Zaccardo A., Sanvito G., et al.* Spectrophotometry of galaxies in the Virgo cluster. II. The data // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**417**.—P. 499—514.
- [176] *Gerhard O., Arnaboldi M., Freeman K.C., Okamura S.* Isolated star formation: a compact H II region in the Virgo cluster // *Astrophys. J.*—2002.—**580**.—P. L121—L124.
- [177] *Gil de Paz A., Madore B.F., Boissier S., et al.* Chemical and photometric evolution of extended ultraviolet disks: optical spectroscopy of M 83 (NGC 5236) and NGC 4625 // *Astrophys. J.*—2007.—**661**.—P. 115—134.
- [178] *Goddard Q.E., Kennicutt R.C. (Jr), Ryan-Weber E.V.* On the nature of star formation at large galactic radii // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**405**.—P. 2791—2809.
- [179] *González-Delgado R.M., Pérez E., Díaz Á.I., et al.* The starburst galaxy NGC 7714 // *Astrophys. J.*—1995.—**439**.—P. 604—622.

- [180] *González-Delgado R.M., Pérez E., Tenorio-Tagle G., et al.* Violent star formation in NGC 2363 // *Astrophys. J.*—1994.—**437**.—P. 239–261.
- [181] *Greenawalt B., Walterbos R.A.M., Thilker D., Hoopes C.G.* Diffuse ionized gas in M 51/NGC 5195 and M 81 // *Astrophys. J.*—1998.—**506**.—P. 135–151.
- [182] *Grevesse N., Noels A., Sauval A.J.* Standard abundances // *Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.*—1996.—**99**.—P. 117–126.
- [183] *Guseva N.G., Izotov Y.I., Papaderos P., Fricke K.J.* Balmer jump temperature determination in a large sample of low-metallicity H II regions // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**464**.—P. 885–893.
- [184] *Guseva N.G., Izotov Y.I., Thuan T.X.* A spectroscopic study of a large sample of Wolf-Rayet galaxies // *Astrophys. J.*—2000.—**531**.—P. 776–803.
- [185] *Guseva N.G., Izotov Y.I., Thuan T.X.* Balmer and Paschen jump temperature determinations in low-metallicity emission-line galaxies // *Astrophys. J.*—2006.—**644**.—P. 890–906.
- [186] *Guseva N.G., Papaderos P., Izotov Y.I., et al.* Pox 186: an ultracompact galaxy with dominant ionized gas emission // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**421**.—P. 519–528.
- [187] *Guseva N.G., Papaderos P., Meyer H.T., et al.* An investigation of the luminosity — metallicity relation for a large sample of low-metallicity emission-line galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**505**.—P. 63–72.
- [188] *Gutiérrez L., Beckman J.E.* The galaxy-wide distributions of mean electron density in the H II regions of M 51 and NGC 4449 // *Astrophys. J.*—2010.—**710**.—P. L44–L48.
- [189] *Hägele G.F., Díaz Á.I., Terlevich E., et al.* Precision abundance analysis of bright H II galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2008.—**383**.—P. 209–229.
- [190] *Hägele G.F., Pérez-Montero E., Díaz Á.I., et al.* The temperature and ionization structure of the emitting gas in H II galaxies: implications for the accuracy of abundance determinations // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**372**.—P. 293–312.
- [191] *Hagen H.-J., Grootte D., Engels D., et al.* A new supergiant H II region in galaxy HS 1227 + 4758 // *Astrophys. J.*—1988.—**195**.—P. 15–20.

- [192] *Hakobyan A.A., Petrosian A.R., Yeghazaryan A.A., Boulesteix J.* Study of the H II regions in the spiral galaxy NGC 6384 // *Astrofizika*.—2007.—**50**.—P. 426–439.
- [193] *Hartmann J.* Investigations on the spectrum and orbit of δ Orionis // *Astrophys. J.* 1904.—**19**.—P. 268–286.
- [194] *Hayashi M., Motohara K., Shimasaku K., et al.* Star formation rates and metallicities of K-selected star-forming galaxies at $z \approx 2$ // *Astrophys. J.* 2009.—**691**.—P. 140–151.
- [195] *Henry R.B.C., Balkowski C., Cayatte V., et al.* The effects of cluster environment on the chemical evolution of galaxies. III. — NGC 753 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1996.—**283**.—P. 635–647.
- [196] *Henry R.B.C., Edmunds M.G., Köppen J.* On the cosmic origin of carbon and nitrogen // *Astrophys. J.*—2000.—**541**.—P. 660–674.
- [197] *Henry R.B.C., Howard J.W.* The form of abundance gradients in three nearby spiral galaxies: M 33, M 81 and M 101 // *Astrophys. J.*—1995.—**438**.—P. 170–180.
- [198] *Henry R.B.C., Pagel B.E.J., Chincarini G.L.* The effects of cluster environment on the chemical evolution of galaxies. II. — NGC 4254 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1994.—**266**.—P. 421–430.
- [199] *Henry R.B.C., Pagel B.E.J., Lasseter D.F., Chincarini G.L.* The effects of cluster environment on the chemical evolution of galaxies. I.—NGC 4303 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1992.—**258**.—P. 321–333.
- [200] *Hernández-Martínez L., Peña M., Carigi L., García-Rojas J.* Chemical behavior of the dwarf irregular galaxy NGC 6822. Its PN and H II region abundances // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**505**.—P. 1027–1039.
- [201] *Hidalgo-Gómez A.M., Olofsson K.* The Z–L relationship of dwarf irregular galaxies I. First results // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**334**.—P. 45–56.
- [202] *Hidalgo-Gómez A.M., Olofsson K., Masegosa J.* The chemical abundances in a sample of dwarf irregular galaxies. I. Small scale variations within NGC 6822? // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**367**.—P. 388–404.
- [203] *Hodge P.W., Gurwell M., Goldader D., Kennicutt R.C.* The H II regions of M 101. I.—An atlas of 1264 emission regions // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1990.—**73**.—P. 661–670.

- [204] *Holmberg J., Nordström B., Andersen J.* The Geneva — Copenhagen survey of the Solar neighbourhood II. New *uvby* calibrations and rediscussion of stellar ages, the G dwarf problem, age—metallicity diagram, and heating mechanisms of the disk // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**475**.—P. 519—537.
- [205] *Hopkins A.M., Schulte-Ladbeck R.E., Drozdovsky I.O.* Star formation rates of local blue compact dwarf galaxies. I. 1.4 GHz and 60 micron luminosities // *Astron. J.*—2002.—**124**.—P. 862—876.
- [206] *Hoyos C., Koo D.C., Phillips A.C., et al.* The DEEP2 galaxy redshift survey: discovery of luminous, metal-poor star-forming galaxies at redshifts $z \approx 0.7$ // *Astrophys. J.*—2005.—**635**.—P. L21—L24.
- [207] *Hu E.M., Cowie L.L., Kakazu Y., Barger A.J.* Deep spectroscopy of ultra-strong emission-line galaxies // *Astrophys. J.*—2009.—**698**.—P. 2014—2022.
- [208] *Hubble E.* A general study of diffuse galactic nebulae // *Astrophys. J.*—1922.—**56**.—P. 162—199.
- [209] *Hubble E.* The source of luminosity in galactic nebulae // *Astrophys. J.*—1922.—**56**.—P. 400—438.
- [210] *Hubble E.* A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.*—1929.—**15**.—P. 168—173.
- [211] *Hudson C.E., Bell K.L.* Effective collision strengths for transitions in singly ionized nitrogen // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—**348**.—P. 1275—1281.
- [212] *Hudson C.E., Bell K.L.* Effective collision strengths for fine-structure transitions for the electron impact excitation of N II // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**430**.—P. 725—729.
- [213] *Huggins W.* On the spectra of some of the nebulae // *Phil. Trans. Roy. Soc. London.*—1864.—**154**.—P. 437—444.
- [214] *Hunter D.A., Gallagher J.S., Rautenkranz D.* Global properties of irregular galaxies // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1982.—**49**.—P. 53—88.
- [215] *Ichikawa K., Sekiguchi T., Takahashi T.* Primordial helium abundance from CMB: A constraint from recent observations and a forecast // *Phys. Rev. D—Part. and Fields.*—2008.—**78**.—043509.

- [216] *Iglesias-Páramo J., van Driel W., Duc P.-A., et al.* A study of H I — selected galaxies in the Hercules cluster // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**406**.—P. 453–469.
- [217] *Indebetouw R., de Messières G.E., Madden S., et al.* Physical conditions in the ionized gas of 30 Doradus // *Astrophys. J.*—2009.—**694**.—P. 84–106.
- [218] *Irimia A., Froese Fischer C.* <http://hf8.vuse.vanderbilt.edu> (Data file 21, energy adjusted)
- [219] *Irimia A., Froese Fischer C.* Breit-Pauli oscillator strengths, lifetimes, and Einstein A coefficients in singly ionized sulphur // *Phys. scr.*—2005.—**71**.—P. 172–184.
- [220] *Izotov Y.I., Chaffee F.H., Foltz C.B., et al.* Helium abundance in the most metal-deficient blue compact galaxies: I Zw 18 and SBSS 0335-052 // *Astrophys. J.*—1999.—**527**.—P. 757–777.
- [221] *Izotov Y.I., Guseva N.G., Lipovetskii V.A., et al.* Unusually low heavy-element abundance found in the blue compact dwarf galaxy SBS 0335-052 // *Nature*.—1990.—**343**.—P. 238–240.
- [222] *Izotov Y.I., Guseva N.G., Lipovetskii V.A., et al.* New blue compact dwarf galaxies with low heavy-element abundances // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**247**.—P. 303–306.
- [223] *Izotov Y.I., Papaderos P., Guseva N.G., et al.* Two extremely metal-poor emission-line galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**454**.—P. 137–141.
- [224] *Izotov Y.I., Stasińska G., Guseva N.G., Thuan T.X.* Abundance patterns in the low-metallicity emission-line galaxies from the Early Data Release of the Sloan Digital Sky Survey // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**415**.—P. 87–94.
- [225] *Izotov Y.I., Stasińska G., Meynet G., et al.* The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**448**.—P. 955–970.
- [226] *Izotov Y.I., Thuan T.X.* The primordial abundance of ^4He revisited // *Astrophys. J.*—1998.—**500**.—P. 188–216.
- [227] *Izotov Y.I., Thuan T.X.* Heavy-element abundances in blue compact galaxies // *Astrophys. J.*—1999.—**511**.—P. 639–659.

- [228] *Izotov Y.I., Thuan T.X.* MMT observations of new extremely metal-poor emission-line galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J.*—2007.—**665**.—P. 1115—1128.
- [229] *Izotov Y.I., Thuan T.X.* The primordial abundance of ^4He : evidence for non-standard Big Bang nucleosynthesis // *Astrophys. J.*—2010.—**710**.—P. L67—L71.
- [230] *Izotov Y.I., Thuan T.X., Guseva N.G.* SBS 0335-052W: the lowest-metallicity star-forming galaxy known // *Astrophys. J.*—2005.—**632**.—P. 210—216.
- [231] *Izotov Y.I., Thuan T.X., Lipovetsky V.A.* The primordial helium abundance from a new sample of metal-deficient blue compact galaxies // *Astrophys. J.*—1994.—**435**.—P. 647—667.
- [232] *Izotov Y.I., Thuan T.X., Lipovetsky V.A.* The primordial helium abundance: systematic effects and a new determination // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1997.—**108**.—P. 1—39.
- [233] *Izotov Y.I., Thuan T.X., Stasińska G.* The primordial abundance of ^4He : a self-consistent empirical analysis of systematic effects in a large sample of low-metallicity H II regions // *Astrophys. J.*—2007.—**662**.—P. 15—38.
- [234] *James P.A.* Near-infrared imaging of dwarf ellipticals, irregulars and blue compact galaxies in the Virgo cluster // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1994.—**269**.—P. 176—190.
- [235] *Jansen R.A., Fabricant D., Franx M., Caldwell N.* Spectrophotometry of nearby field galaxies: the data // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2000.—**126**.—P. 331—397.
- [236] *Jansen R.A., Franx M., Fabricant D.* [O II] as a tracer of current star formation // *Astrophys. J.*—2001.—**551**.—P. 825—832.
- [237] *Johansson L., Magnusson C.E., Joelsson I., Zetterberg P.O.* A spectroscopic study of S III // *Phys. scr.*—1992.—**46**.—P. 221—224.
- [238] *Jurcevic J.S., Pierce M.J., Jacoby G.H.* Period-luminosity relations for red supergiant variables — II. The distance to M 101 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2000.—**313**.—P. 868—880.
- [239] *Kakazu Y., Cowie L.L., Hu E.M.* Mapping extremely low metallicity galaxies to redshift one // *Astrophys. J.*—2007.—**668**.—P. 853—875.

- [240] *Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Huchtmeier W.K., Makarov D.I.* A catalog of neighboring galaxies // *Astron. J.*—2004.—**127**.—P. 2031—2068.
- [241] *Kauffmann G., Heckman T.M., Tremonti C., et al.* The host galaxies of active galactic nuclei // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—**346**.—P. 1055—1077.
- [242] *Keenan F.P., Aller L.H., Bell K.L., et al.* Emission lines of [O II] in the optical and ultraviolet spectra of planetary nebulae // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1999.—**304**.—P. 27—34.
- [243] *Keenan F.P., Aller L.H., Bell K.L., et al.* Auroral and nebular emission lines of [S II] in the optical spectra of planetary nebulae // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1996.—**281**.—P. 1073—1080.
- [244] *Kelson D.D., Illingworth G.D., Freedman W.F., et al.* The extragalactic Distance Scale Key Project. III. The discovery of Cepheids and a new distance to M 101 using the Hubble Space Telescope // *Astrophys. J.*—1996.—**463**.—P. 26—59.
- [245] *Kennicutt R.C. (Jr).* Properties of H II region populations in galaxies. I. — The first-ranked H II regions // *Astrophys. J.*—1988.—**334**.—P. 144—158.
- [246] *Kennicutt R.C. (Jr).* The integrated spectra of nearby galaxies — General properties and emission-line spectra // *Astrophys. J.* — 1992.—**388**.—P. 310—327.
- [247] *Kennicutt R.C. (Jr)* A spectrophotometric atlas of galaxies // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1992.—**79**.—P. 255—284.
- [248] *Kennicutt R.C. (Jr), Armus L., Bendo G., et al.* SINGS: The SIRTf Nearby Galaxies Survey // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—2003.—**115**.—P. 928—952.
- [249] *Kennicutt R.C. (Jr), Bresolin F., Garnett D.R.* The composition gradient in M 101 revisited. II. Electron temperatures and implications for the nebular abundance scale // *Astrophys. J.*—2003.—**591**.—P. 801—820.
- [250] *Kennicutt R.C. (Jr), Garnett D.R.* The composition gradient in M 101 revisited. I. H II region spectra and excitation properties // *Astrophys. J.*—1996.—**456**.—P. 504—518.
- [251] *Kennicutt R.C. (Jr), Lee J.C., Funes S.J., et al.* An H α imaging survey of galaxies in the local 11 Mpc volume // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2008.—**178**.—P. 247—279.

- [252] *Kewley L.J., Brown W.R., Geller M.J., et al.* SDSS 0809+1729: connections between extremely metal-poor galaxies and gamma-ray burst hosts // *Astron. J.*—2007.—**133**.—P. 882–888.
- [253] *Kewley L.J., Dopita M.A.* Using strong lines to estimate abundances in extragalactic H II regions and starburst galaxies // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2002.—**142**.—P. 35–52.
- [254] *Kewley L.J., Dopita M.A., Sutherland R.S., et al.* Theoretical modeling of starburst galaxies // *Astrophys. J.*—2001.—**556**.—P. 121–140.
- [255] *Kingdon J.B., Ferland G.J.* Temperature fluctuations in photoionized nebulae // *Astrophys. J.*—1995.—**450**.—P. 691–704.
- [256] *Kinkel U., Rosa M.R.* How metal-rich are metal-rich H II regions // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**282**.—P. L37–L40.
- [257] *Kinman T.D., Davidson K.* Spectroscopic observations of 10 emission-line dwarf galaxies // *Astrophys. J.*—1981.—**243**.—P. 127–139.
- [258] *Kirchhoff G.R.* Über die Fraunhofer'schen Linien // *Monatsber. König. Preuss. Akad. Wiss. Berlin.*—1859.—P. 662–665.
- [259] *Kirchhoff G.R.* Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht and Wärme // *Monatsber. König. Preuss. Akad. Wiss. Berlin.*—1859.—P. 783–787.
- [260] *Kisielius R., Storey P.J., Ferland G.J., Keenan F.P.* Electron impact excitation of O II fine-structure levels // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2009.—**397**.—P. 903–912.
- [261] *Kniazev A.Y., Grebel E.K., Hao L., et al.* Discovery of eight new extremely metal-poor galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J.*—2003.—**593**.—P. L73–L76.
- [262] *Kniazev A.Y., Pustilnik S.A., Grebel E.K., et al.* Strong emission line H II galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. I. Catalog of DR1 objects with oxygen abundances from T_e measurements // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2004.—**153**.—P. 429–445.
- [263] *Kniazev A.Y., Pustilnik S.A., Masegosa J., et al.* HS 0822+3542 — a new nearby extremely metal-poor galaxy // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**357**.—P. 101–110.

- [264] *Kobayashi C., Umeda H., Nomoto K., et al.* Galactic chemical evolution: carbon through zinc // *Astrophys. J.*—2006.—**653**.—P. 1145—1177.
- [265] *Kobulnicky H.A., Kennicutt R.C. (Jr), Pizagno J.L.* On measuring nebular chemical abundances in distant galaxies using global emission-line spectra // *Astrophys. J.*—1999.—**514**.—P. 544—557.
- [266] *Kobulnicky H.A., Skillman E.D.* Elemental abundance variations and chemical enrichment from massive stars in starbursts. I. NGC 4214 // *Astrophys. J.*—1996.—**471**.—P. 211—236.
- [267] *Kobulnicky H.A., Skillman E.D.* Elemental abundance variations and chemical enrichment from massive stars in starbursts. II. NGC 1569 // *Astrophys. J.*—1997.—**489**.—P. 636—655.
- [268] *Kunth D., Joubert M.* Wolf-Rayet stars in “lazy” galaxies. — A statistical approach // *Astron. and Astrophys.*—1985.—**142**.—P. 411—420.
- [269] *Kunth D., Maurogordato S., Vigroux L.* CCD observations of blue compact galaxies — A mixed bag of morphological types // *Astron. and Astrophys.*—1988.—**204**.—P. 10—20.
- [270] *Kunth D., Östlin G.* The most metal-poor galaxies // *Astron. and Astrophys. Rev.*—2000.—**10**.—P. 1—79.
- [271] *Kunth D., Sargent W.L.W.* Spectrophotometry of 12 metal-poor galaxies — Implications for the primordial helium abundance // *Astrophys. J.*—1983.—**273**.—P. 81—89.
- [272] *Kunth D., Sargent W.L.W.* I Zw 18 and the existence of very metal-poor blue compact dwarf galaxies // *Astrophys. J.*—1986.—**300**.—P. 496—499.
- [273] *Kunth D., Sargent W.L.W., Kowal C.* A spectroscopic survey of emission-line objects in two fields // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1981.—**44**.—P. 229—239.
- [274] *Kwang-Il S.* Can the Lyman continuum leaked out of H II region explain diffuse ionized gas? // *Astrophys. J.*—2009.—**703**.—P. 1159—1167.
- [275] *Kwitter K.B., Aller L.H.* Chemical compositions of H II regions in the Triangulum spiral, M 33 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1981.—**195**.—P. 939—957.

- [276] *Lamareille F., Brinchmann J., Contini T., et al.* Physical properties of galaxies and their evolution in the VIMOS VLT Deep Survey. I. The evolution of the mass-metallicity relation up to $z \approx 0.9$ // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**495**.—P. 53–72.
- [277] *Lamareille F., Mouhcine M., Contini T., et al.* The luminosity–metallicity relation in the local Universe from the 2dF Galaxy Redshift Survey // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—**350**.—P. 396–406.
- [278] *Lambert D.L.* The abundances of the elements in the solar photosphere — VIII. Revised abundances of carbon, nitrogen and oxygen // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1978.—**182**.—P. 249–271.
- [279] *Lara-López M.A., Cepa J., Bongiovanni A., et al.* Study of star-forming galaxies in SDSS up to redshift 0.4. I. Metallicity evolution // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**505**.—P. 529–539.
- [280] *Lebouteiller V., Bernard-Salas J., Brandl B., et al.* Chemical composition and mixing in giant H II regions: NGC 3603, 30 Doradus, and N 66 // *Astrophys. J.*—2008.—**680**.—P. 398–419.
- [281] *Lee H., Grebel E.K., Hodge P.W.* Nebular abundances of nearby southern dwarf galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**401**.—P. 141–159.
- [282] *Lee H., McCall M.L., Kingsburgh R.L., et al.* Uncovering additional clues to galaxy evolution. I. Dwarf irregular galaxies in the field // *Astron. J.*—2003.—**125**.—P. 146–165.
- [283] *Lee H., Skillman E.D., Venn K.A.* The spatial homogeneity of nebular and stellar oxygen abundances in the Local Group dwarf irregular galaxy NGC 6822 // *Astrophys. J.*—2006.—**642**.—P. 813–833.
- [284] *Lee H., Zucker D.B., Grebel E.K.* Interstellar medium oxygen abundances of dwarf irregular galaxies in Centaurus A and nearby groups // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**376**.—P. 820–840.
- [285] *Leitherer C., Schaerer D., Goldader J.D., et al.* StarBurst99: synthesis models for galaxies with active star formation // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1999.—**123**.—P. 3–40.
- [286] *Lennon D.J., Burke V.M.* Atomic data from the IRON project II. Effective collision strengths for infrared transitions in carbon-like ions // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1994.—**103**.—P. 273–277.

- [287] *Lequeux J., Peimbert M., Rayo J.F., et al.* Chemical composition and evolution of irregular and blue compact galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1979.—**80**.—P. 155–166.
- [288] *Lequeux J., Viallefond F.* H I observations and star formation in the blue compact galaxy I Zw 18 // *Astron. and Astrophys.*—1980.—**91**.—P. 269–275.
- [289] *Lester D.F., Dinerstein H.L., Werner M.W., et al.* A far-infrared study of the N/O abundance ratio in galactic H II regions // *Astrophys. J.*—1983.—**271**.—P. 618–624.
- [290] *Lilly S.J., Carollo C.M., Stockton A.N.* The metallicities of star-forming galaxies at intermediate redshifts $0.47 < z < 0.92$ // *Astrophys. J.*—2003.—**597**.—P. 730–750.
- [291] *Lintott C.J., Schawinski K., Slosar A., et al.* Galaxy Zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from the Sloan Digital Sky Survey // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2008.—**389**.—P. 1179–1189.
- [292] *Liu X., Shapley A.E., Coil A.L., et al.* Metallicities and physical conditions in star-forming galaxies at $z \approx 1.0$ –1.5 // *Astrophys. J.*—2008.—**678**.—P. 758–779.
- [293] *Liu X.-W.* Optical recombination lines and temperature fluctuations // *Rev. Mex. Astron. y Astrofís. Ser. Conf.*—2002.—**17**.—P. 70–76.
- [294] *Liu X.-W., Luo S.-G., Barlow M.J., et al.* Chemical abundances of planetary nebulae from optical recombination lines— III. The Galactic bulge PN M 1-42 and M 2-36 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2001.—**327**.—P. 141–168.
- [295] *Liu X.-W., Storey P.J., Barlow M.J., et al.* NGC 6153: a super-metal-rich planetary nebula? // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2000.—**312**.—P. 585–628.
- [296] *López-Sánchez Á.R., Esteban C.* Massive star formation in Wolf-Rayet galaxies. IV. Colours, chemical composition analysis and metallicity – luminosity relations // *Astron. and Astrophys.*—2010.—**517**.—A85.
- [297] *López-Sánchez Á.R., Esteban C., Carcía-Rojas J., et al.* The localized chemical pollution in NGC 5253 revisited: Results from deep echelle spectrophotometry // *Astrophys. J.*—2007.—**656**.—P. 168–185.

- [298] *Luridiana V., Esteban C., Peimbert M., Peimbert A.* Chemical abundances of NGC 5461 and NGC 5471 derived from echelle spectrophotometry // *Rev. Mex. Astron. y Astrofís.*—2002.—**38**.—P. 97–109.
- [299] *Maeder A.* Stellar yields as a function of initial metallicity and mass limit for black hole formation // *Astron. and Astrophys.*—1992.—**264**.—P. 105–120.
- [300] *Magrini L., Vílchez J.M., Mampaso A., et al.* The metallicity gradient of M 33: chemical abundances of H II regions // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**470**.—P. 865–874.
- [301] *Maiolino R., Nagao T., Grazian A., et al.* AMAZE. I. The evolution of the mass-metallicity relation at $z > 3$ // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**488**.—P. 463–479.
- [302] *Malhotra S., Kaufman M.J., Hollenbach D., et al.* Far-infrared spectroscopy of normal galaxies: physical conditions in the interstellar medium // *Astrophys. J.*—2001.—**561**.—P. 766–786.
- [303] *Marble A.R., Engelbracht C.W., van Zee L., et al.* An aromatic inventory of the local volume // *Astrophys. J.*—2010.—**715**.—P. 506–540.
- [304] *Marcon-Uchida M.M., Matteucci F., Costa R.D.D.* Chemical evolution models for spiral disks: the Milky Way, M 31, and M 33 // *Astron. and Astrophys.*—2010.—**520**.—P. A35.
- [305] *Marconi G., Matteucci F., Tosi M.* Element abundances in blue compact galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1994.—**270**.—P. 35–45.
- [306] *Marigo P.* Chemical yields from low- and intermediate-mass stars: Models predictions and basic observational constraints // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**370**.—P. 194–217.
- [307] *Martin P., Roy J.-R.* The oxygen abundance gradient in the barred spiral galaxy NGC 4303 // *Astrophys. J.*—1992.—**397**.—P. 463–476.
- [308] *Martin W.C., Kaufman V., Musgrove A.* A compilation of energy levels and wavelengths for the spectrum of singly-ionized oxygen (O II) // *J. Phys. and Chem. Ref. Data.*—1993.—**22**.—P. 1179–1212.
- [309] *Martin W.C., Zalubas R., Musgrove A.* Energy levels of sulfur, S I through S XVI // *J. Phys. and Chem. Ref. Data.*—1990.—**19**.—P. 821–880.

- [310] *Mathis J.S., Chu Y.-H., Peterson D.E.* Spectrophotometry and chemical composition of the 30 Doradus nebula // *Astrophys. J.*—1985.—**292**.—P. 155–163.
- [311] *McCall M.L.* Emission coefficients for gaseous nebulae: three-level atom approximations // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1984.—**208**.—P. 253–259.
- [312] *McCall M.L., Rybski P.M., Shields G.A.* The chemistry of galaxies. I. The nature of giant extragalactic H II regions // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1985.—**57**.—P. 1–62.
- [313] *McGaugh S.S.* H II region abundances: model oxygen line ratios // *Astrophys. J.*—1991.—**380**.—P. 140–150.
- [314] *McGaugh S.S., de Blok W.J.G.* Gas mass fractions and the evolution of spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1997.—**481**.—P. 689–702.
- [315] *McLaughlin B.M., Bell K.L.* Effective collision strengths for O II // *Astrophys. J.*—1993.—**408**.—P. 753–757.
- [316] *McLaughlin B.M., Bell K.L.* Electron-impact excitation of the fine-structure levels ($1s^2 2s^2 2p^3 \ ^4S_{3/2}^o, \ ^2D_{5/2,3/2}^o, \ ^2P_{3/2,1/2}^o$) of singly ionized atomic oxygen // *J. Phys. B: Atom. and Mol. Phys.*—1998.—**31**.—P. 4317–4329.
- [317] *Melbourne J., Phillips A., Salzer J.J., et al.* Metal abundances of KISS galaxies. II. Nebular abundances of 12 low-luminosity emission-line galaxies // *Astron. J.*—2004.—**127**.—P. 686–703.
- [318] *Melbourne J., Salzer J.J.* Metal abundances of KISS galaxies. I. Coarse metal abundances and the metallicity – luminosity relation // *Astron. J.*—2002.—**123**.—P. 2302–2311.
- [319] *Meléndez J.* A low solar oxygen abundance from the first-overtone OH lines // *Astrophys. J.*—2004.—**615**.—P. 1042–1047.
- [320] *Melnick J., Terlevich R., Eggleton P.P.* Studies of violent star formation in extragalactic systems – I. Population synthesis model for the ionizing clusters of giant H II regions and H II galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1985.—**216**.—P. 255–271.
- [321] *Mendes de Oliveira C., Cypriano E.S., Sodré L. (Jr), Balkowski C.* A nursery of young objects: intergalactic H II regions in Stephan quintet // *Astrophys. J.*—2004.—**605**.—P. L17–L20.

- [322] *Mendes de Oliveira C.L., Temporin S., Cypriano E.S., et al.* The K luminosity – metallicity relation for dwarf galaxies and the tidal dwarf galaxies in the tails of HCG 31 // *Astron. J.*—2006.—**132**.—P. 570–581.
- [323] *Mendoza C.* Electron impact excitation of the forbidden transitions of S III and calculated term structure of S II // *J. Phys. B: Atom. and Mol. Phys.*—1982.—**15**.—P. 867–876.
- [324] *Mendoza C.* Recent advances in atomic calculations and experiments of interest in the study of planetary nebulae // *Planetary Nebulae: Proc. of IAU Symp. N 103 / Ed. by D.R. Flower.* — Dordrecht: Reidel, 1983.—P. 143–172.
- [325] *Mendoza C., Zeippen C.J.* Transition probabilities for forbidden lines in the $3p^3$ configuration // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1982.—**198**.—P. 127–139.
- [326] *Mendoza C., Zeippen C.J.* Transition probabilities for forbidden lines in the $3p^2$ configuration — II // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1982.—**199**.—P. 1025–1032.
- [327] *Mesa-Delgado A., Esteban C.* Small-spatial-scale variations of nebular properties and the abundance discrepancy in three Galactic H II regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**405**.—P. 2651–2667.
- [328] *Mesa-Delgado A., Esteban C., García-Rojas J.* Small scale behavior of the physical conditions and the abundance discrepancy in the Orion nebula // *Astrophys. J.*—2008.—**675**.—P. 389–404.
- [329] *Mesa-Delgado A., Esteban C., García-Rojas J., et al.* Properties of the ionized gas in HH 202. II: Results from echelle spectrophotometry with Ultraviolet Visual Echelle Spectrograph // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2009.—**395**.—P. 855–876.
- [330] *Mesa-Delgado A., López-Martín L., Esteban C., et al.* Properties of the ionized gas in HH 202. I. Results from integral field spectroscopy with PMAS // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2009.—**394**.—P. 693–703.
- [331] *Meurer G.R., Hanish D.J., Ferguson H.C., et al.* The survey for ionization in neutral gas galaxies. I. Description and initial results // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2006.—**165**.—P. 307–337.
- [332] *Meyer D.M., Jura M., Cardelli J.A.* The definitive abundance of interstellar oxygen // *Astrophys. J.*—1998.—**493**.—P. 222–229.

- [333] *Meynet G., Maeder A.* The origin of primary nitrogen in galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**381**.—P. L25–L28.
- [334] *Michel-Dansac L., Lambas D.G., Sol Alonso A., Tissera P.* The mass-metallicity relation of interacting galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2008.—**386**.—P. L82–L86.
- [335] *Miller B.W.* The star formation histories of Sculptor group dwarf galaxies. I. Current star formation rates and oxygen abundances // *Astron. J.*—1996.—**112**.—P. 991–1008.
- [336] *Moles M., Aparicio A., Masegosa J.* The metal content of GR 8 and Sextants B // *Astron. and Astrophys.*—1990.—**228**.—P. 310–314.
- [337] *Montenegro M., Eissner W., Nahar S.N., Pradhan A.K.* Relativistic and correlation effects in electron impact excitation of forbidden transitions of O II // *J. Phys. B: Atom. and Mol. Phys.*—2006.—**39**.—P. 1863–1878.
- [338] *Moorwood A.F.M., Baluteau J.-P., Anderegg M., et al.* Infrared line emission from H II regions. III. Airborne observations of [S III] (18 μm and 33 μm), [O III] (52 μm and 88 μm), and [N III] (57 μm) on M 17 // *Astrophys. J.*—1980.—**238**.—P. 565–576.
- [339] *Moorwood A.F.M., Salinari P., Furniss I., et al.* Infrared spectroscopy with a balloon borne Michelson interferometer. II. Observation of O III, O I, and N III fine structure lines in H II regions // *Astron. and Astrophys.*—1980.—**90**.—P. 304–310.
- [340] *Moustakas J., Kennicutt R.C. (Jr)* An integrated spectrophotometric survey of nearby star-forming galaxies // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2006.—**164**.—P. 81–98.
- [341] *Moustakas J., Kennicutt R.C. (Jr)* Integrated nebular abundances of disk galaxies // *Astrophys. J.*—2006.—**651**.—P. 155–166.
- [342] *Moustakas J., Kennicutt R.C. (Jr), Tremonti C.A., et al.* Optical spectroscopy and nebular oxygen abundances of the SPITZER/SING galaxies // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2010.—**190**.—P. 233–266.
- [343] *Moy E., Rocca-Volmerange B., Fioc M.* Evolution of photoionization and star formation in starbursts and H II galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**365**.—P. 347–359.
- [344] *Nagao T., Maiolino R., Marconi A.* Gas metallicity diagnostics in star-forming galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**459**.—P. 85–101.

- [345] *Nussbaumer H., Rusca C.* Forbidden transition in the C I sequence // *Astron. and Astrophys.*—1979.—**72**.—P. 129–133.
- [346] *Nussbaumer H., Storey P.J.* Dielectronic recombination at low temperatures // *Astron. and Astrophys.*—1983.—**126**.—P. 75–79.
- [347] *Oey M.S., Kennicutt R.C. (Jr.)* Abundances of H II regions in early-type spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1993.—**411**.—P. 137–152.
- [348] *Oey M.S., Kennicutt R.C. (Jr.)* LMC H II region luminosities versus observed ionizing stars // *Proc. Astron. Soc. Austral.*—1998.—**15**.—P. 141–143.
- [349] *Oey M.S., Meyer G.R., Yelda S., et al.* The survey for ionization in neutral gas galaxies. III. Diffuse, warm ionized medium and escape of ionizing radiation // *Astrophys. J.*—2007.—**661**.—P. 801–814.
- [350] *Oey M.S., Shields J.C.* Calibration of nebular emission-line diagnostics. II. Abundances // *Astrophys. J.*—2000.—**539**.—P. 687–705.
- [351] *Olive K.A., Skillman E.D.* A realistic determination of the error on the primordial helium abundance: steps toward nonparametric nebular helium abundances // *Astrophys. J.*—2004.—**617**.—P. 29–49.
- [352] *Oliveira C.M., Dupius J., Chayer P., Moos H.W.* O/H in the local bubble // *Astrophys. J.*—2005.—**625**.—P. 232–241.
- [353] *Osterbrock D.E.* *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei.* — Mill Valley: Univ. Sci. Books, 1989.—422 p.
- [354] *Osterbrock D.E., Tran H.D., Veilleux S.* Faint emission lines in the spectrum of the Orion nebula and the abundances of some of the rarer elements // *Astrophys. J.*—1992.—**389**.—P. 305–324.
- [355] *Page T.L.* Chemical composition of the planetary nebulae // *Nature*.—1936.—**138**.—P. 503–504.
- [356] *Pagal B.E.J.* *Nucleosynthesis and chemical evolution of galaxies.* — Cambridge: Univ. Press, 1997.—392 p.
- [357] *Pagal B.E.J.* CNO abundances in dwarf and spiral galaxies // *ASP Conf. Ser.*—2003.—**304**.—P. 187–196.—(CNO in the universe: Proc. conf. / Eds C. Charbonell, D. Schaerer, G. Meynet).

- [358] *Pagel B.E.J., Edmunds M.G., Blackwell D.E., et al.* On the composition of H II regions in southern galaxies — I. NGC 300 and 1365 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1979.—**189**.—P. 95—113.
- [359] *Pagel B.E.J., Edmunds M.G., Fosbury R.A.E., Webster B.L.* A survey of chemical compositions of H II regions in the Magellanic Clouds // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1978.—**184**.—P. 569—592.
- [360] *Pagel B.E.J., Edmunds M.G., Smith G.* On the composition of H II regions in southern galaxies— II. NGC 6822 and 1313 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1980.—**193**.—P. 219—230.
- [361] *Pagel B.E.J., Patchett B.E.* Metal abundances in nearby stars and the chemical history of the solar neighborhood // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1975.—**172**.—P. 13—40.
- [362] *Pagel B.E.J., Simonson E.A., Terlevich R.J., Edmunds M.G.* The primordial helium abundance from observations of extragalactic H II regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1992.—**255**.—P. 325—345.
- [363] *Papaderos P., Guseva N.G., Izotov Y.I., et al.* New southern blue compact dwarf galaxies in the 2dF Galaxy redshift survey // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**457**.—P. 45—59.
- [364] *Papaderos P., Izotov Y.I., Guseva N.G., et al.* Oxygen abundance variations in the system of the two blue compact dwarf galaxies SBS 0335-052E and SBS 0335-052W // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**454**.—P. 119—123.
- [365] *Pasternack S.* Transition probabilities of forbidden lines // *Astrophys. J.*—1940.—**92**.—P. 129—155.
- [366] *Pastoriza M.G., Dottori H.A., Terlevich E., et al.* Optical and near-IR spectrophotometry of the galaxy NGC 3310 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1993.—**260**.—P. 177—190.
- [367] *Pease F.G.* The rotation and radial velocity of the spiral nebula NGC 4594 // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.*—1916.—**2**.—P. 517—521.
- [368] *Peimbert A.* Chemical abundances of the 30 Doradus Nebula derived from Very Large Telescope echelle spectrophotometry // *Astrophys. J.*—2003.—**584**.—P. 735—750.
- [369] *Peimbert A., Peimbert M., Ruiz M.T.* Chemical composition of two H II regions in NGC 6822 based on VLT spectroscopy // *Astrophys. J.*—2005.—**634**.—P. 1056—1066.

- [370] *Peimbert M.* Temperature determination of H II regions // *Astrophys. J.*—1967.—**150**.—P. 825–834.
- [371] *Peimbert M., Costero R.* Chemical abundances in galactic H II regions // *Bol. observ. Tonantzintla y Tacubaya.*— 1969.—**5**.—P. 3–22.
- [372] *Peimbert M., Luridiana V., Peimbert A.* Revised primordial helium abundance based on new atomic data // *Astrophys. J.*—2007.—**666**.—P. 636–646.
- [373] *Peimbert M., Peimbert A., Ruiz M.T.* The chemical composition of the Small Magellanic Cloud H II region NGC 346 and the primordial helium abundance // *Astrophys. J.*—2000.—**541**.—P. 688–700.
- [374] *Peimbert M., Storey P.J., Torres-Peimbert S.* The O^{++}/H^{+} abundance ratio in gaseous nebulae derived from recombination lines // *Astrophys. J.*—1993.—**414**.—P. 626–631.
- [375] *Peimbert M., Torres-Peimbert S.* Chemical composition of H II regions in the Large Magellanic Cloud and its cosmological implications // *Astrophys. J.*—1974.—**193**.—P. 327–333.
- [376] *Peimbert M., Torres-Peimbert S.* Chemical composition of H II regions in the Small Magellanic Cloud and the pregalactic helium abundance // *Astrophys. J.*—1976.—**203**.—P. 581–586.
- [377] *Peimbert M., Torres-Peimbert S.* Chemical composition of the Orion nebula // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1977.—**179**.—P. 217–234.
- [378] *Peña M., Stasińska G., Richer M.G.* The chemical composition of planetary nebulae and H II regions in NGC 3109 // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**476**.—P. 745–758.
- [379] *Pérez-Montero E., Díaz Á.I.* Line temperatures and elemental abundances in H II galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*— 2003.—**346**.—P. 105–118.
- [380] *Pettini M., Pagel B.E.J.* [O III]/[N II] as an abundance indicator at high redshift // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*— 2004.—**348**.—P. L59–L63
- [381] *Pignatari M., Gallino R., Meynet G., et al.* The *s*-process in massive stars at low metallicity: the effect of primary ^{14}N from fast rotating stars // *Astrophys. J.*—2008.—**687**.—P. L95–L98.

- [382] *Pilyugin L.S.* On the evolution of helium, nitrogen and oxygen abundances in dwarf irregular galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1993.—**277**.—P. 42–52.
- [383] *Pilyugin L.S.* The chemical evolution of irregular galaxies with mass loss // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**287**.—P. 387–389.
- [384] *Pilyugin L.S.* Chemical evolution of the Milky Way Galaxy. III. Is the disk formed through mergers of fragments? // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**313**.—P. 803–809.
- [385] *Pilyugin L.S.* On the oxygen abundance determination in H II regions. The problem of the line intensities — oxygen abundance calibration // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**362**.—P. 325–332.
- [386] *Pilyugin L.S.* On the oxygen abundance determination in H II regions. High-metallicity regions // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**369**.—P. 594–604.
- [387] *Pilyugin L.S.* The oxygen abundance distribution in M 101 // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**373**.—P. 56–62.
- [388] *Pilyugin L.S.* Oxygen abundances in dwarf irregular galaxies and the metallicity — luminosity relationship // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**374**.—P. 412–420.
- [389] *Pilyugin L.S.* The bends in the slopes of radial abundance gradients in the disks of spiral galaxies — Do they exist? // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**397**.—P. 109–114.
- [390] *Pilyugin L.S.* Abundance determinations in H II regions. Model fitting versus T_e —method // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**399**.—P. 1003–1007.
- [391] *Pilyugin L.S.* On the relationship between auroral and nebular oxygen line intensities in spectra of H II regions // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**436**.—P. L1–L4.
- [392] *Pilyugin L.S.* On the electron temperature determination in high-metallicity H II regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**375**.—P. 685–690.
- [393] *Pilyugin L.S., Contini T., Vílchez J.M.* Chemical abundances in spiral and irregular galaxies. O and N abundances derived from global emission-line spectra // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**423**.—P. 427–440.

- [394] *Pilyugin L.S., Edmunds M.G.* Chemical evolution of the Milky Way Galaxy. I. On the infall model of galactic chemical evolution // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**313**.—P. 783–791.
- [395] *Pilyugin L.S., Edmunds M.G.* Chemical evolution of the Milky Way Galaxy. II. On the origin of scatter in the age-metallicity relation // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**313**.—P. 792–802.
- [396] *Pilyugin L.S., Ferrini F.* On the oxygen abundance deficiency in spiral galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**336**.—P. 103–115.
- [397] *Pilyugin L.S., Ferrini F.* On the origin of the luminosity – metallicity relation for late-type galaxies. Spirals to irregulars transition // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**358**.—P. 72–76.
- [398] *Pilyugin L.S., Ferrini F., Shkvarun R.V.* On the oxygen abundance in our Galaxy // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**401**.—P. 557–563.
- [399] *Pilyugin L.S., Mattsson L.* Abundance determination in H II regions from spectra without [O II] λ 3727+ λ 3729 line // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 2011. — **412** — P. 1145–1150.
- [400] *Pilyugin L.S., Mattsson L., Vílchez J.M., Cedrés B.* On the electron temperatures in high-metallicity H II regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2009.—**398**.—P. 485–496.
- [401] *Pilyugin L.S., Thuan T.X.* Oxygen abundance determination in H II regions: the strong line intensities – abundance calibration revisited // *Astrophys. J.*—2005.—**631**.—P. 231–243.
- [402] *Pilyugin L.S., Thuan T.X.* The oxygen abundance of nearby galaxies from Sloan Digital Sky Survey spectra // *Astrophys. J.*—2007.—**669**.—P. 299–314.
- [403] *Pilyugin L.S., Thuan T.X., Vílchez J.M.* On the origin of nitrogen // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**397**.—P. 487–501.
- [404] *Pilyugin L.S., Thuan T.X., Vílchez J.M.* Oxygen abundances in the most oxygen-rich spiral galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**367**.—P. 1139–1146.
- [405] *Pilyugin L.S., Thuan T.X., Vílchez J.M.* On the maximum value of the cosmic abundance of oxygen and the oxygen yield // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**376**.—P. 353–360.

- [406] *Pilyugin L.S., Vílchez J.M., Cedrés B., Thuan T.X.* The electron temperatures of SDSS high-metallicity giant extragalactic H II regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**403**.—P. 896–905.
- [407] *Pilyugin L.S., Vílchez J.M., Contini T.* Oxygen and nitrogen abundances in nearby galaxies. Correlations between oxygen abundance and macroscopic properties // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**425**.—P. 849–869.
- [408] *Pilyugin L.S., Vílchez J.M., Thuan T.X.* On the relation between electron temperatures in the O^+ and O^{++} zones in high-metallicity H II regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**370**.—P. 1928–1934.
- [409] *Pilyugin L.S., Vílchez J.M., Thuan T.X.* New improved calibration relations for the determination of electron temperatures and oxygen and nitrogen abundances in H II regions // *Astrophys. J.*—2010.—**720**.—P. 1738–1751.
- [410] *Pradhan A.K.* Collision strengths for O II and S II // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1976.—**177**.—P. 31–38.
- [411] *Pradhan A.K.* Fine-structure transitions by electron impact in singly-ionized sulphur // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1978.—**183**.—P. 89P–92P.
- [412] *Pradhan A.K., Montenegro M., Nahar S.N., Eissner W.* [O II] line ratios // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**366**.—P. L6–L9. *Astrophys. J.*—2001.—**556**.—P. L63–L66.
- [413] *Pustilnik S.A., Engels D., Ugryumov A.V., et al.* The Hamburg/SAO survey for emission-line galaxies II. The second list of 128 galaxies // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1999.—**137**.—P. 299–304.
- [414] *Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., Pramskij A.G., et al.* HS 0837+4717 — a metal-deficient blue compact galaxy with large nitrogen excess // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**419**.—P. 469–484.
- [415] *Pustilnik S.A., Kniazev A.Y., Pramskij A.G.* Study of DDO 68: nearest candidate for a young galaxy? // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**443**.—P. 91–102.
- [416] *Pustilnik S.A., Tepliakova A.L., Kniazev A.Y., et al.* SDSS J092609.45 + 334304.1: a nearby unevolved galaxy // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**401**.—P. 333–341.

- [417] *Raimann D., Storchi-Bergmann T., Bica E., et al.* Gas properties of H II and starburst galaxies: relation with the stellar population // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2000.—**316**.—P. 559–568.
- [418] *Ramsay W.* On a gas showing the spectrum of helium, the reputed cause of D₃, one of the lines in the coronal spectrum. Preliminary note // *Proc. Roy. Soc. London.*—1895.—**58**.—P. 65–67.
- [419] *Ramsbottom C.A., Bell K.L.* Effective collision strengths for astrophysically important quartet-quartet ultraviolet transitions in S II // *Phys. scr.*—1996.—**54**.—P. 357–361.
- [420] *Ramsbottom C.A., Bell K.L., Stafford R.P.* Effective collision strengths for electron impact excitation of singly ionized sulfur // *Atom. Data and Nucl. Data Tables.*—1996.—**63**.—P. 57–91.
- [421] *Rayo J.F., Peimbert M., Torres-Peimbert S.* Gradients in the physical conditions of M 101 and the pregalactic helium abundance // *Astrophys. J.*—1982.—**255**.—P. 1–10.
- [422] *Renda A., Kawata D., Fenner Y., Gibson B.K.* Contrasting the chemical evolution of the Milky Way and Andromeda // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2005.—**356**.—P. 1071–1078.
- [423] *Renzini A., Voli M.* Advanced evolutionary stages of intermediate-mass stars. I. Evolution of surface compositions // *Astron. and Astrophys.*—1981.—**94**.—P. 175–193.
- [424] *Reynolds R.J.* A measurement of the hydrogen recombination rate in the diffuse interstellar medium // *Astrophys. J.*—1984.—**282**.—P. 191–196.
- [425] *Richer M.G., McCall M.L.* Oxygen abundances in diffuse ellipticals and the metallicity – luminosity relations for dwarf galaxies // *Astrophys. J.*—1995.—**445**.—P. 642–659.
- [426] *Rodriguez M., Garcia-Rojas J.* Temperature structure and metallicity in H II regions // *Astrophys. J.*—2010.—**708**.—P. 1551–1559.
- [427] *Rosolowsky E., Simon J.D.* The M 33 metallicity project: resolving the abundance gradient discrepancies in M 33 // *Astrophys. J.*—2008.—**675**.—P. 1213–1222.
- [428] *Roussel H., Helou G., Hollenbach D.J., et al.* Warm molecular hydrogen in the Spitzer SINGS galaxy sample // *Astrophys. J.*—2007.—**669**.—P. 959–981.

- [429] *Roy J.-R., Belley J., Dutil Y., Martin P.* The O/H distribution in the low-mass galaxies NGC 2366 and NGC 4395 // *Astrophys. J.*—1996.—**460**.—P. 284–294.
- [430] *Roy J.-R., Walsh J.R.* The abundance gradient of NGC 1365: evidence for a recently formed bar in an archetypal barred spiral galaxy? // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1997.—**288**.—P. 715–725.
- [431] *Rozas M., Zurita A., Heller C.H., Beckman J.E.* Global properties of the population of H II regions in NGC 7479 from photometric H α imaging // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1999.—**135**.—P. 145–158.
- [432] *Rubin R.H.* Noncollisional excitation of low-lying states in gaseous nebulae // *Astrophys. J.*—1986.—**309**.—P. 334–341.
- [433] *Rubin R.H.* The effect of density variations on elemental abundance ratios in gaseous nebulae // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1989.—**69**.—P. 897–910.
- [434] *Rubin R.H., Bhatt N.J., Dufour R.J., et al.* Temperature variations from *Hubble Space Telescope* imagery and spectroscopy of NGC 7009 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2002.—**334**.—P. 777–786.
- [435] *Rubin R.H., Simpson J.P., Lord S.D., et al.* Nebular properties from far-infrared spectroscopy // *Astrophys. J.*—1994.—**420**.—P. 772–782.
- [436] *Rubin R.H., Simpson J.P., O'Dell C.R., et al.* Spitzer reveals what's behind Orion's bar // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**410**.—P. 1320–1348.
- [437] *Rudolph A.L., Fich M., Bell G.R., et al.* Abundance gradients in the Galaxy // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2006.—**162**.—P. 346–374.
- [438] *Rudolph A.L., Simpson J.P., Haas M.R., et al.* Far-infrared abundance measurements in the outer Galaxy // *Astrophys. J.*—1997.—**489**.—P. 94–101.
- [439] *Rupke D.S.N., Veilleux S., Baker A.J.* The oxygen abundances of luminous and ultraluminous infrared galaxies // *Astrophys. J.*—2008.—**674**.—P. 172–193.
- [440] *Ryan-Weber E.V., Meurer G.R., Freeman K.C., et al.* Intergalactic H II regions discovered in SINGG // *Astron. J.*—2004.—**127**.—P. 1431–1440.

- [441] *Salpeter E.E., Hoffman G.L.* Correlation statistics of irregular and spiral galaxies mapped in H I // *Astrophys. J.*—1996.—**465**.—P. 595–607.
- [442] *Salzer J.J., Lee J.C., Melbourne J., et al.* Metal abundances of KISS galaxies. IV. Galaxian luminosity–metallicity relations in the optical and near-infrared // *Astrophys. J.*—2005.—**624**.—P. 661–679.
- [443] *Sargent W.L.W., Searle L.* Isolated extragalactic H II regions // *Astrophys. J.*—1970.—**162**.—P. L155–L160.
- [444] *Savaglio S., Glazebrook K., Le Borgne D., et al.* The Gemini deep deep survey. VII. The redshift evolution of the mass-metallicity relation // *Astrophys. J.*—2005.—**635**.—P. 260–279.
- [445] *Saviane I., Ivanov V.D., Held E.V., et al.* Luminosity – metallicity relation for dIrr galaxies in the near-infrared // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**487**.—P. 901–920.
- [446] *Schmidt B.P., Kirshner R.P., Eastman R.G., et al.* The distances to five Type II supernovae using the expanding photosphere method, and the value of H_0 // *Astrophys. J.*—1994.—**432**.—P. 42–48.
- [447] *Scott P., Asplund M., Grevesse N., Sauval J.* On the solar nickel and oxygen abundances // *Astrophys. J.*—2009.—**691**.—P. L119–L122.
- [448] *Scowen P.A., Dufour R.J., Hester J.J.* The H II regions of the galaxy M 101 // *Astron. J.*—1992.—**104**.—P. 92–110.
- [449] *Searle L.* Evidence for composition gradients across the disks of spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1971.—**168**.—P. 327–341.
- [450] *Searle L., Sargent W.L.W.* Inferences from the composition of two dwarf blue galaxies // *Astrophys. J.*—1972.—**173**.—P. 25–33.
- [451] *Seaton M.J.* Electron excitation of forbidden lines occurring in gaseous nebulae // *Proc. Roy. Soc. London A.*—1953.—**218**.—P. 400–416.
- [452] *Seaton M.J.* Electron temperatures and electron densities in planetary nebulae // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1954.—**114**.—P. 154–171.
- [453] *Seaton M.J.* Collision strengths for [N II], [O III], [Ne II] and [Ne III] // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1975.—**170**.—P. 475–486.

- [454] *Seaton M.J., Osterbrock D.E.* Relative [O II] intensities in gaseous nebulae // *Astrophys. J.*—1957.—**125**.—P. 66–83.
- [455] *Sedwick K.E., Aller L.H.* Spectrophotometry of H II regions in the spiral galaxy M 101 // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.*—1981.—**78**.—P. 1994–1997.
- [456] *Shaver P.A., McGee R.X., Newton L.M., et al.* The galactic abundance gradient // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1983.—**204**.—P. 53–112.
- [457] *Shaw R.A., Dufour R.J.* Software for the analysis of emission-line nebulae // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1995.—**107**.—P. 896–906.
- [458] *Shi F., Kong X., Cheng F.Z.* Oxygen abundance in the Sloan Digital Sky Survey // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**453**.—P. 487–492.
- [459] *Shi F., Kong X., Li C., Cheng F.Z.* Spectroscopic study of blue compact galaxies V. Oxygen abundance and the metallicity–luminosity relation // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**437**.—P. 849–859.
- [460] *Shi F., Zhao G., Liang Y.C.* [Ne III]/[O II] as an oxygen abundance indicator in the H II regions and H II galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**475**.—P. 409–414.
- [461] *Shields G.A., Searle L.* The composition gradient across M 101 // *Astrophys. J.*—1978.—**222**.—P. 821–832.
- [462] *Simpson J.P., Colgan S.W.J., Rubin R.H., et al.* Far-infrared lines from H II regions: abundance variations in the Galaxy // *Astrophys. J.*—1995.—**444**.—P. 721–738.
- [463] *Simpson J.P., Rubin R.H., Erickson E.F., Haas M.R.* The ionization structure of the Orion nebula: infrared line observations and models // *Astrophys. J.*—1986.—**311**.—P. 895–908.
- [464] *Skillman E.D.* Spatial variations in the physical conditions in the giant extragalactic H II region NGC 5471 // *Astrophys. J.*—1985.—**290**.—P. 449–461.
- [465] *Skillman E.D.* Empirical oxygen abundances and physical conditions for relatively low abundance H II regions // *Astrophys. J.*—1989.—**347**.—P. 883–893.
- [466] *Skillman E.D., Côté S., Miller B.W.* Interstellar medium abundances in Sculptor group dwarf irregular galaxies // *Astron. J.*—2003.—**125**.—P. 610–625.

- [467] *Skillman E.D., Kennicutt R.C. (Jr), Hodge P.W.* Oxygen abundances in nearby dwarf irregular galaxies // *Astrophys. J.*—1989.—**347**.—P. 875–882.
- [468] *Skillman E.D., Kennicutt R.C. (Jr)* Spatially resolved optical and near-infrared spectroscopy of I Zw 19 // *Astrophys. J.*—1993.—**411**.—P. 655–666.
- [469] *Skillman E.D., Kennicutt R.C. (Jr), Shields G.A., Zaritsky D.* Chemical abundances in Virgo spiral galaxies. II. Effects of cluster environment // *Astrophys. J.*—1996.—**462**.—P. 147–162.
- [470] *Skillman E.D., Melnick J., Terlevich R., Moles M.* The extremely low oxygen abundance of GR 8: a very low luminosity dwarf irregular galaxy // *Astron. and Astrophys.*—1988.—**196**.—P. 31–38.
- [471] *Skillman E.D., Terlevich R.J., Kennicutt R.C. (Jr), et al.* Spatially resolved optical and near-infrared spectroscopy of the low-metallicity galaxy UGC 4483 // *Astrophys. J.*—1994.—**431**.—P. 172–187.
- [472] *Slipher V.M.* The detection of nebular rotation // *Lowell Observ. Bull.*—1914.—**2**.—P. 66–66.
- [473] *Slipher V.M.* Nebulae // *Proc. Amer. Phil. Soc.*—1917.—**56**.—P. 403–409.
- [474] *Smith H.E.* Spectrophotometric observations of ionized hydrogen regions in nearby spiral and irregular galaxies // *Astrophys. J.*—1975.—**199**.—P. 591–610.
- [475] *Spavone M., Iodice E., Arnaboldi M., et al.* Chemical abundances in the polar disk of NGC 4650A: implications for cold accretion scenario // *Astrophys. J.*—2010.—**714**.—P. 1081–1095.
- [476] *Spergel D.N., Bean R., Doré O., et al.* Three-year *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)* observations: implications for cosmology // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2007.—**170**.—P. 377–408.
- [477] *Spitzer L., Greenstein J.L.* Continuous emission from planetary nebulae // *Astrophys. J.*—1951.—**114**.—P. 407–420.
- [478] *Stafford R.P., Bell K.L., Hibbert A., Wijesundera W.P.* Electron impact excitation of N II: fine-structure collision strengths and Maxwellian-averaged rate coefficients // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1994.—**268**.—P. 816–820.

- [479] *Stasińska G.* Empirical methods for determining elemental abundances tested on model H II regions // *Astron. and Astrophys.*—1978.—**66**.—P. 257–267.
- [480] *Stasińska G.* Some comments on the analysis of extragalactic H II regions spectra // *Astron. and Astrophys.*—1980.—**84**.—P. 320–328.
- [481] *Stasińska G.* A catalogue of model H II regions // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1982.—**48**.—P. 299–304.
- [482] *Stasińska G.* A grid of model H II regions for extragalactic studies // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1990.—**83**.—P. 501–538.
- [483] *Stasińska G.* Biases in abundance derivations for metal-rich nebulae // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**434**.—P. 507–520.
- [484] *Stasińska G.* [Ar III]/[O III] and [S III]/[O III]: well-behaved oxygen abundance indicators for H II regions and star forming galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**454**.—P. L127–L130.
- [485] *Stasińska G.* Abundance determinations in H II regions and planetary nebulae // *Cosmochemistry. XIII Canary Islands Winter School of Astrophysics / Eds C. Esteban, R.J.G. López, A. Herrero, F. Sánchez.* — Cambridge: Univ. Press, 2004.—P. 115–170.
- [486] *Stasińska G., Cid Fernandes R., Mateus A., et al.* Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies — III. How to distinguish AGN hosts // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**371**.—P. 972–982.
- [487] *Stasińska G., Izotov Y.I.* Modeling the emission line sequence of H II galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**397**.—P. 71–85.
- [488] *Stasińska G., Schaerer D.* Combined stellar structure and atmosphere models for massive stars IV. The impact on the ionization structure of single star H II regions // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**322**.—P. 615–623.
- [489] *Stauffer J.R., Bothun G.D.* Metallicity estimates for H II regions in M 81 // *Astron. J.*—1984.—**89**.—P. 1702–1704.
- [490] *Steigman C.* Primordial nucleosynthesis: successes and challenges // *Int. J. Mod. Phys. E.*—2006.—**15**.—P. 1–35.
- [491] *Storchi-Bergmann T., Calzetti D., Kinney A.L.* Ultraviolet to near-infrared spectral distributions of star-forming galaxies: metallicity and age effects // *Astrophys. J.*—1994.—**429**.—P. 572–581.

- [492] *Storey P.J.* Dielectronic recombination at nebular temperatures // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1981.—**195**.—P. 27P–31P.
- [493] *Storey P.J., Hummer D.G.* Recombination line intensities for hydrogen ions — IV. Total recombination coefficients and machine-readable tables for $Z = 1$ to 8 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1995.—**272**.—P. 41–48.
- [494] *Storey P.J., Zeippen C.J.* Theoretical values for the [O III]5007/4959 line-intensity ratio and homologous cases // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2000.—**312**.—P. 813–816.
- [495] *Strömberg B.* The physical state of interstellar hydrogen // Astrophys. J.—1939.—**89**.—P. 526–547.
- [496] *Sullivan M., Treyer M.A., Ellis R.S., et al.* An ultraviolet-selected galaxy redshift survey — II. The physical nature of star formation in an enlarged sample // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—2000.—**312**.—P. 442–464.
- [497] *Tachiev G.L., Froese Fischer C.* Breit-Pauli energy levels and transition rates for nitrogen-like and oxygen-like sequence // Astron. and Astrophys.—2002.—**385**.—P. 716–723.
- [498] *Tayal S.S.* Effective collision strengths for electron impact excitation of inelastic transitions in S III // Astrophys. J.—1997.—**481**.—P. 550–556.
- [499] *Tayal S.S.* Oscillator strengths and electron collision rates for fine-structure transitions in O II // Astrophys. J. Suppl. Ser.—2007.—**171**.—P. 331–348.
- [500] *Tayal S.S., Gupta G.P.* Collision strengths for electron collision excitation of fine-structure levels in S III // Astrophys. J.—1999.—**526**.—P. 544–548.
- [501] *Tayal S.S., Henry R.J.W., Nakazaki S.* Effective collision strengths for electron impact excitations in S II // Astrophys. J.—1987.—**313**.—P. 487–493.
- [502] *Tayal S.S., Zatsarinny O.* Breit-Pauli transition probabilities and electron excitation collision strengths for singly ionized sulfur // Astrophys. J. Suppl. Ser.—2010.—**188**.—P. 32–45.
- [503] *Terlevich R., Melnick J., Masegosa J., et al.* A spectrophotometric catalogue of H II galaxies // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1991.—**91**.—P. 285–324.

- [504] *Testor G.* Detection and study of the compact H II region N 26A-B in the Small Magellanic Cloud // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**372**.—P. 667—675.
- [505] *Testor G., Lemaire J.L., Field D.* The physical properties of the compact star forming region N 88A and its neighbourhood in the SMC. I. Excitation and abundances // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**407**.—P. 905—912.
- [506] *Thuan T.X.* Near-infrared photometry and stellar populations in dwarf elliptical and irregular galaxies // *Astrophys. J.*—1985.—**299**.—P. 881—895.
- [507] *Thuan T.X., Izotov Y.I., Lipovetsky V.A.* Heavy element abundances in a new sample of low-metallicity blue compact galaxies // *Astrophys. J.*—1995.—**445**.—P. 108—123.
- [508] *Thuan T.X., Pilyugin L.S., Zinchenko I.A.* The redshift evolution of oxygen and nitrogen abundances in emission-line SDSS galaxies // *Astrophys. J.*—2010.—**712**.—P. 1029—1048.
- [509] *Tinsley B.M.* Evolution of stars and gas in galaxies // *Fund. Cosmic Phys.*—1980.—**5**.—P. 287—388.
- [510] *Tollerud E.J., Barton E.J., van Zee L., Cooke J.* The WHIQII survey: metallicities and spectroscopic properties of luminous compact blue galaxies // *Astrophys. J.*—2010.—**708**.—P. 1076—1091.
- [511] *Torres-Peimbert S., Peimbert M.* Photoelectric photometry and physical conditions of planetary nebulae // *Rev. Mex. Astron. y Astrofis.*—1977.—**2**.—P. 181—207.
- [512] *Torres-Peimbert S., Peimbert M., Fierro J.* Physical conditions of H II regions in M 101 and the pregalactic helium abundance // *Astrophys. J.*—1989.—**345**.—P. 186—195.
- [513] *Tosi M.* Models of galactic chemical evolution: the problem of uniqueness // *Astron. and Astrophys.*—1988.—**197**.—P.33—46.
- [514] *Tremonti C.A., Heckman T.M., Kauffmann G., et al.* The origin of the mass — metallicity relation: insight from 53000 star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J.*—2004.—**613**.—P. 898—913.

- [515] *Tsamis Y.G., Barlow M.J., Liu X.-W., et al.* Heavy elements in Galactic and Magellanic Cloud H II regions: recombination-line versus forbidden-line abundances // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—**338**.—P. 687—710.
- [516] *Vaduvescu O., McCall M.L., Richer M.G.* Chemical properties of star-forming dwarf galaxies // *Astron. J.*—2007.—**134**.—P. 604—616.
- [517] *van de Hulst H.C.* Radiogolven mit hat wereldrium. I. Outvangst der radiogolven. // *Ned. tijdschr. natuurk.*—1945.—**11**.—P. 201—210.
- [518] *van den Hoek L.B., Groenewegen M.A.T.* New theoretical yields of intermediate mass stars // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1997.—**123**.—P. 305—328.
- [519] *van Zee L.* Discovery of an extremely metal-poor galaxy: optical spectroscopy of UGCA 292 // *Astrophys. J.*—2000.—**543**.—P. L31—L34.
- [520] *van Zee L., Haynes M.P.* Oxygen and nitrogen in isolated dwarf irregular galaxies // *Astrophys. J.*—2006.—**636**.—P. 214—239.
- [521] *van Zee L., Haynes M.P., Salzer J.J.* Optical colors and metallicities of gas-rich quiescent dwarf galaxies // *Astron. J.*—1997.—**114**.—P. 2479—2496.
- [522] *van Zee L., Salzer J.J., Haynes M.P., et al.* Spectroscopy of outlying H II regions in spiral galaxies: abundances and radial gradients // *Astron. J.*—1998.—**116**.—P. 2805—2833.
- [523] *van Zee L., Skillman E.D., Haynes M.P.* Oxygen and nitrogen in Leo A and GR 8 // *Astrophys. J.*—2006.—**637**.—P. 269—282.
- [524] *Veilleux S., Osterbrock D.E.* Spectral classification of emission-line galaxies // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1987.—**63**.—P. 295—310.
- [525] *Vermeij R., van der Hulst J.M.* The physical structure of Magellanic Cloud H II regions. II. Elemental abundances // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**391**.—P.1081—1095.
- [526] *Vila-Costas M.B., Edmunds M.G.* The relation between abundance gradients and physical properties of spiral galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1992.—**259**.—P. 121—145.
- [527] *Vílchez J.M., Esteban C.* The chemical composition of H II regions in the outer Galaxy // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1996.—**280**.—P. 720—734.

- [528] *Vílchez J.M., Iglesias-Páramo J.* Bidimensional spectroscopic mapping and chemical abundances of star-forming dwarf galaxy I Zw 18 // *Astrophys. J.*—1998.—**508**.—P. 248–261.
- [529] *Vílchez J.M., Iglesias-Páramo J.* Spectroscopy of dwarf galaxies in the Virgo cluster. I. Data, chemical abundances, and ionization structure // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2003.—**145**.—P. 225–244.
- [530] *Vílchez J.M., Pagel B.E.J., Diaz A.I., et al.* The chemical composition gradient across M 33 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1988.—**235**.—P. 633–653.
- [531] *Vogel H.C.* Orbit and mass of Algol // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1890.—**2**.—P. 27–27.
- [532] *Walsh J.R., Roy J.-R.* The abundance gradient across the galaxy NGC 2997 // *Astrophys. J.*—1989.—**341**.—P. 722–732.
- [533] *Walsh J.R., Roy J.-R.* Optical spectroscopic and abundance mapping of the amorphous galaxy NGC 5253 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1989.—**239**.—P. 297–324.
- [534] *Walter F., Brinks E., de Blok W.J.C., et al.* THINGS: The H I nearby galaxy survey // *Astron. J.*—2008.—**136**.—P. 2563–2647.
- [535] *Wang W., Liu X.-W., Zhang Y., Barlow M.J.* A reexamination of electron density diagnostics for ionized gaseous nebulae // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**427**.—P. 873–886.
- [536] *Warren B.E., Wilson C.D., Israel F.P., et al.* The James Clerk Maxwell Telescope nearby galaxies legacy survey. II. Warm molecular gas and star formation in three field spiral galaxies // *Astrophys. J.*—2010.—**714**.—P. 571–588.
- [537] *Webster B.L., Smith M.G.* Abundance gradients in galaxies in the Sculptor and Centaurus groups // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1983.—**204**.—P. 743–763.
- [538] *Wenaker I.* The spectrum of singly ionized oxygen, O II // *Phys. scr.*—1990.—**42**.—P. 667–684.
- [539] *Werk J.K., Putman M.E., Meurer G.R., et al.* Isolated OB associations in stripped H I gas clouds // *Astrophys. J.*—2008.—**678**.—P. 888–906.

- [540] *Werner K., Rauch T., Kruk J.W.* Discovery of photospheric Ca X emission lines in the far-UV spectrum of the hottest known white dwarf (KPD 0005+5106) // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**492**.—P. 43L—47L.
- [541] *Whitford A.E.* The law of interstellar reddening // *Astron. J.*—1958.—**63**.—P. 201—207.
- [542] *Williams R., Jenkins E.B., Baldwin J.A., Shapree B.* Comparative absorption and emission abundance analyses of nebulae: ion emission densities for IC 418 // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—2003.—**115**.—P. 178—187.
- [543] *Williams R., Jenkins E.B., Baldwin J.A., et al.* Independ emission and absorption abundances for planetary nebulae // *Astrophys. J.*—2008.—**677**.—P. 1100—1119.
- [544] *Wilson C.D., Warren B.E., Israel F.P., et al.* The James Clerk Maxwell Telescope nearby galaxies legacy survey. I. Star-forming molecular gas in Virgo Cluster spiral galaxies // *Astrophys. J.*—2009.—**693**.—P. 1736—1748.
- [545] *Wollaston W.H.* A method of examining refractive and dispersive powers, by prismatic Reflection // *Phil. Trans. Roy. Soc. London.*—1802.—**92**.—P. 365—381.
- [546] *Woosley S.E., Weaver T.A.* The evolution and explosion of massive stars. II. Explosive hydrodynamics and nucleosynthesis // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1995.—**101**.—P. 181—235.
- [547] *Worthey G., Dorman B., Jones L.A.* The G dwarf problem exists in other galaxies // *Astron. J.*—1996.—**112**.—P. 948—953.
- [548] *Wright E.L., Mather J.C., Bennett C.L., et al.* Preliminary spectral observations of the Galaxy with a 7° beam by the *Cosmic Background Explorer (COBE)* // *Astrophys. J.*—1991.—**381**.—P. 200—209.
- [549] *Wyse A.B.* The spectra of ten gaseous nebulae // *Astrophys. J.*—1942.—**95**.—P. 356—385.
- [550] *Yin J., Hou J.L., Prantzos N., et al.* Milky Way versus Andromeda: a tale of two disks // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**505**.—P. 497—508.

- [551] *Yin S.Y., Liang Y.C., Hammer F., et al.* Empirical strong-line oxygen abundance calibrations from galaxies with electron-temperature measurements // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**462**.—P. 535–546.
- [552] *York D.G., Adelman J., Anderson J.E., et al.* The Sloan Digital Sky Survey: technical summary // *Astron. J.*—2000.—**120**.—P. 1579–1587.
- [553] *Yoshikawa T., Akiyama M., Kajisawa M.* MOIRCS Deep Survey: VI. Near-infrared spectroscopy of K-selected star-forming galaxies at $z \approx 2$ // *Astrophys. J.*—2010.—**718**.—P. 112–132.
- [554] *Yuan T.-T., Kewley L.J.* First direct metallicity measurement of a lensed star-forming galaxy at $z = 1.7$ // *Astrophys. J.*—2009.—**699**.—P. L161–L164.
- [555] *Zanstra H.* An application of the quantum theory to the luminosity of diffuse nebulae // *Astrophys. J.*—1927.—**65**.—P. 50–70.
- [556] *Zaritsky D.* The radial distribution of oxygen in disk galaxies // *Astrophys. J.*—1992.—**390**.—P. L73–L76.
- [557] *Zaritsky D., Kennicutt R.C. (Jr), Huchra J.P.* H II regions and the abundance properties of spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1994.—**420**.—P. 87–109.
- [558] *Zeippen C.J.* Transition probabilities for forbidden lines in the $2p^3$ configuration // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1982.—**198**.—P. 111–125.
- [559] *Zeippen C.J.* Improved radiative transition probabilities for O II forbidden lines // *Astron. and Astrophys.*—1987.—**173**.—P. 410–414.
- [560] *Zurita A., Rozas M., Beckman J.E.* The origin of the ionization of the diffuse interstellar medium in spiral galaxies. I. Photometric measurements // *Astron. and Astrophys.*—2000.—**363**.—P. 9–28.
- [561] *Zwicky F.* Compact galaxies and compact parts of galaxies. II. // *Astrophys. J.*—1966.—**143**.—P. 192–202.

Наукове видання

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

ПЛЮГІН Леонід Степанович

**ІОНІЗОВАНИЙ ГАЗ
У ГАЛАКТИКАХ:
ФІЗИЧНИЙ СТАН
І ХІМІЧНИЙ СКЛАД**

(російською мовою)

Київ, Науково-виробниче підприємство
«Видавництво “Наукова думка” НАН України», 2013

Художній редактор *І. Р. Сільман*
Технічний редактор *Т. С. Березяк*
Комп’ютерна верстка *Л. В. Багненко*

На обложке — гигантская спиральная галактика NGC 1232,
диаметр которой в два раза превышает диаметр нашей Галактики.
Изображение получено в Европейской южной обсерватории
(ESO/IDA/Danish 1.5 m/R.Gendler and A. Hornstrup).

Підп. до друку 00.00.2013. Формат 60 × 90. Папір офс. №1.
Гарн. Computer Modern. Друк офс. Ум. друк. арк. 00,0.
Ум. фарбо-відб. 00,0. Обл.-вид. арк. 00.00.
Тираж 300 прим. Зам.

НВП « Видавництво “Наукова думка” НАН України»
Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи
до Державного реєстру ДК № 2440 від 15.03.2006 р.
01601 Київ 1, вул. Терещенківська, 3

ЗАТ фірма “Віпол”
03151 Київ 151, вул Волинська, 60
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
серія ДК № 752 від 27.12.2001