ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА ВО ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЛАСТЯХ H II

Л. С. Пилюгин

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного, 27
e-mail: pilyugin@mao.kiev.ua

Рассматривается применение спектрального анализа, открытого Кирхгофом 150 лет назад, для определения физических характеристик и химического состава областей H II в нашей и других галактиках. Прослеживается зарождение и развитие основных идей, которые лежат в основе классических методов диагностики областей H II. Описаны эмпирические методы, разработанные в последние десятилетия для определения содержания кислорода в областях H II. Обсуждается достоверность определений химического состава в областях H II.

ВВЕДЕНИЕ

В 1835 году французский философ Огюст Конт (Auguste Comte) 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.” По иронии судьбы, Конт не дожил всего два года до того, как его утверждение было опровергнуто. Путь к решению задачи об определении химического состава космических тел (спектральный анализ) был открыт Кирхгофом в 1859 году [22, 23].[1]

Понятие спектр появилось около 350 лет назад. В 1666 году Ньютон открыл, что солнечный свет состоит из смеси лучей различных цветов [4]. Он установил, что существуют не только лучи, соответствующие наиболее сильным цветам, но и всем их промежуточным градациям, т. е. 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” [2]. В 1752 году шотландский физик Томас Мелвилл использовал призму для определения природы пламени. Мелвилл обнаружил, что спектры раскаленных газов совершенно непохожи 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 [45]. 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. Волластон открыл *линии поглощения* или *абсорбционный спектр*. Темные линии в спектре Солнца исследовал Фраунгофер. Он обнаружил, что спектр Солнца содержит не семь, а многие сотни линий поглощения [19]. Фраунгофер обнаружил, что в спектрах звезд также присутствуют линии поглощения, хотя спектры разных звезд различаются между собой и отличаются от спектра Солнца.

Ключ к интерпретации спектров был найден Кирхгофом, который в 1859 году сформулировал законы спектрального анализа [22, 23]. Кирхгоф установил, что каждый химический элемент имеет индивидуальный набор спектральных линий и, следовательно, линейчатый спектр объекта зависит от его химического состава. Он также установил три закона, которые объясняют типы спектров:

– нагретые до высокой температуры твердые или жидкие тела (или очень плотный газ) излучают непрерывный спектр,
– нагретый разреженный газ испускает яркий линейчатый (эмиссионный) спектр,
– 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).

[1]Автор благодарит Ю. С. Ефимова за перевод публикаций Кирхгофа.

Кирхгоф указал, что интенсивность линий в эмиссионном спектре зависит от физических характеристик излучающего газа.

Путем сопоставления линий известных элементов с фраунгоферовыми линиями солнечного спектра Кирхгоф установил присутствие на Солнце 22 элементов. 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. Спектральный анализ дает возможность определять химический состав в объектах нашей и других галактик.

Ключевую роль в исследовании химического состава галактик играют области H II. Исследование областей H II позволяет установить распределение химических элементов в близких галактиках и оценить химический состав в галактиках на больших расстояниях. Утверждение Кирхгофа в применении к областям H II можно выразить следующей общей формулой

$$\text{поток в эмиссионной линии} = f(T_e, n_e) \times \text{обилие элемента}. \tag{1}$$

Если известна функция $f(T_e, n_e)$ и содержание химического элемента в области H II, то можно вычислить поток излучения в линии от туманности. 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 в линии от туманности. Поиск функций $f(T_e, n_e)$ для разных линий различных атомов и ионов является важнейшей задачей теории свечения газовых туманностей.

СВЕЧЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ H II В РАЗРЕШЕННЫХ ЛИНИЯХ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО БАЛЬМЕРОВСКОМУ СКАЧКУ

Теория свечения газовых туманностей в линиях водорода была разработана Занстра в 1926 году [46]. Занстра обратил внимание на установленный Хабблом факт, что тип спектра диффузной туманности зависит от спектрального класса освещающей её звезды. Диффузная туманность имеет эмиссионный спектр только в том случае, если она связана с горячей звездой спектрального класса O или B0. 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. Эмиссионные линии водорода в спектрах областей H II возникают в результате переработки туманностью коротковолнового излучения (лаймановского континуума) возбуждающей звезды. В результате поглощения кванта лаймановского континуума атом водорода ионизуется. Через некоторое время электрон будет захвачен каким-нибудь ионом. Когда электрон попадает на один из верхних энергетических уровней и переходит на основной уровень (непосредственно или путём каскадных переходов), появляются кванты бальмеровской и других серий. Плотность излучения в туманности и концентрация свободных электронов настолько малы, что цепочка спонтанных переходов на нижние уровни не прерывается в подавляющем большинстве случаев.

Важнейшей характеристикой межзвёздного газа является степень его ионизации. В общем виде проблема ионизации и возбуждения межзвездного водорода была исследована Стремгреном в 1939 году [42]. Он показал, что межзвёздный водород практически полностью ионизован до некоторого расстояния S_0 от ионизующей звезды и остаётся практически полностью нейтральным на расстояниях, превышающих S_0, т. е. область ионизованного газа имеет резкую границу. Области ионизованного газа (области H II) иногда называют зонами Стремгрена, а величину S_0 принято называть радиусом зоны Стремгрена.

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 короче 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. Вклад в непрерывный спектр на длинах волн меньших 364.6 нм вносят рекомбинации на 2-й и более высокие уровни, на длинах волн бóльших 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. Распределение энергии в непрерывном спектре у предела пашеновской серии (820.3 нм) также возрастает скачком при переходе от бо́льших длин волн к меньшим (пашеновский скачок). Поскольку коэффициенты рекомбинаций зависят от электронной температуры в туманности, то величины бальмеровского и пашеновского скачков зависят от электронной температуры в туманности. Следовательно значение электронной температуры в туманности можно определить по измеренной величине бальмеровского (пашеновского) скачка. Пеймберт [31] первым использовал величину бальмеровского скачка для определения электронной температуры в туманности Ориона. Гусева и др. [17, 18] определили электронные температуры по бальмеровскому и пашеновскому скачкам для большой выборки внегалактических областей H II.

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 рекомбинациях иона O^{++} и последующих каскадных переходах возникает излучение туманности в рекомбинационных линиях иона кислорода O^{+}. Соотношение между интенсивностью излучения в линии иона кислорода O^{+}, образующейся при переходах с j-го уровня на k-ый, и интенсивностью излучения в линии водорода H_β дается [33]

$$\frac{F_{j,k}(\mathrm{O}^+)}{F_{\mathrm{H}_\beta}} = \frac{\nu_{j,k}(\mathrm{O}^+)}{\nu_{4,2}(\mathrm{H})}\, \frac{\alpha_j^*(\mathrm{O}^+)}{\alpha_4^*(\mathrm{H})}\, \frac{\mathrm{O}^{++}}{\mathrm{H}^+}, \qquad (2)$$

где O^{++} и H^{+} – концентрация ионов дважды ионизованного кислорода и ионов водорода в туманности, α_j^* – эффективный рекомбинационный коэффициент на j-ый уровень, который учитывает как число рекомбинаций непосредственно на j-й уровень, так и число спонтанных переходов на данный уровень с вышележащих уровней. Для выбранной линии иона кислорода O^{+} уравнение (2) можно переписать в виде

$$\frac{\mathrm{O}^{++}}{\mathrm{H}^+} = K(T_e, n_e)\, \frac{F_{j,k}(\mathrm{O}^+)}{F_{\mathrm{H}_\beta}}. \qquad (3)$$

В 1993 году Пеймберт, Сторей и Торрес-Пеймберт [33] определили содержание дважды ионизованного кислорода O^{++}/H^{+} в галактических областях H II M 17 и M 42 по рекомбинационным линиям кислорода. К настоящему времени содержание ионов дважды ионизованного кислорода O^{++}/H^{+} определено для ряда галактических областей H II. Обсуждение этих результатов будет дано ниже.

КЛАССИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ЗАПРЕЩЕННЫМ ЛИНИЯМ

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 [9] показал, что линии "небулия" являются в действительности запрещенными линиями хорошо известных элементов. Все "правила запрета" связаны с тем или иным приближением при вычислении эйнштейновских коэффициентов вероятностей спонтанных переходов [1]. Если при вычислениях учитывают только дипольное излучение и пренебрегают квадрупольным и другими излучениями, то получают, что вероятности некоторых переходов равны нулю. На самом же деле вероятности запрещенных переходов отличны от нуля, но на много порядков ниже вероятностей разрешенных переходов. Запрещенные линии, образующиеся при переходах с уровней, с которых существуют разрешенные 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 низкой. Отсутствие запрещенных линий в "земных" спектрах говорит 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^{+}.

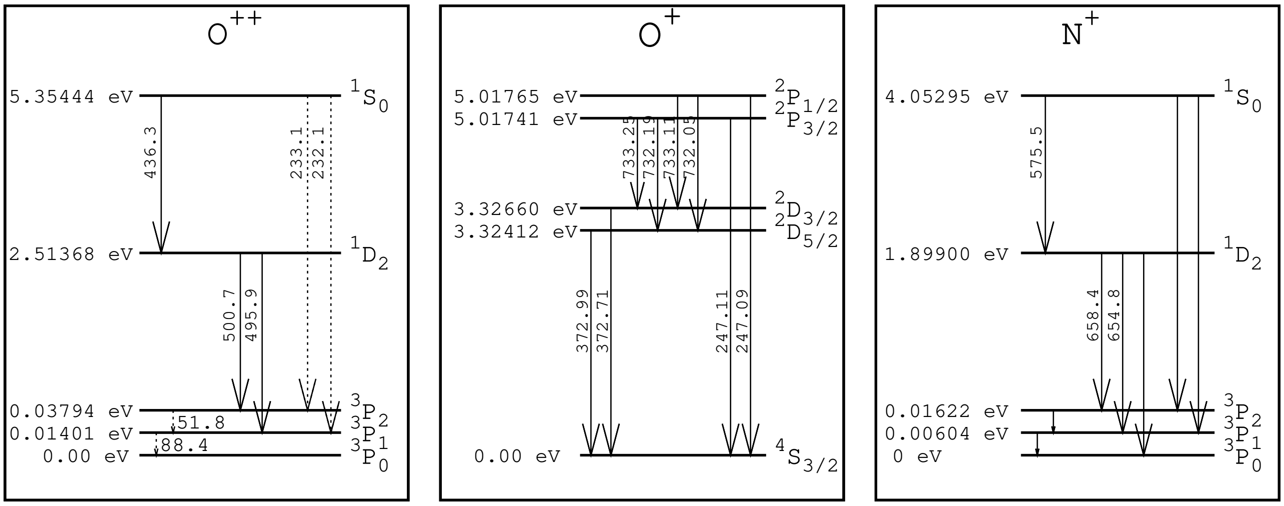

Рис. 1. Схемы нижних энергетических уровней ионов O^{++}, O^{+} и N^{+}. Расстояния между уровнями не соблюдаются

В частности, самая сильная линия (chief or principal line) с длиной волны 500.7 нм принадлежит иону дважды ионизованного кислорода (рис. 1). 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.

Основным источником информации о химическом составе и физических условиях в области H II являются интенсивности запрещенных линий в её спектре. Классический метод определения электронной температуры и электронной плотности в области H II основан на том благоприятном обстоятельстве, что основная электронная конфигурация с двумя и тремя p электронами имеет два метастабильных терма с энергией возбуждения в несколько электронвольт (рис. 1). Ионы O^{++} возбуждаются электронными ударами. С ростом электронной температуры туманности растет доля свободных электронов, которые обладают энергией, достаточной для возбуждения уровня $^1S_0$ и, следовательно, растет относительное число ионов в состоянии $^1S_0$ в сравнении с числом ионов в состоянии $^1D_2$. Поэтому с ростом 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 понижается. Это отношение $Q_{3,\mathrm{O}}$ = [O III] λ 495.9, 500.7/[O III] λ 436.3 является индикатором электронной температуры в зоне свечения иона O^{++} туманности. Для того, чтобы вывести соотношение между электронной температурой туманности и отношением $Q_{3,\mathrm{O}}$, необходимо найти населенности уровней иона O^{++}. Для определения населенности уровней используются уравнения стационарности, которые выражают тот факт, что число переходов в данное состояние равно числу переходов из данного состояния.

Метод определения электронной температуры туманности по измеренному отношению $Q_{3,\mathrm{O}}$ интенсивностей небулярных и авроральных линий иона O^{++} был предложен Амбарцумяном в 1939 году [1]. Он 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, и терм $^1S_0$ – как третий уровень (рис. 1). 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 [3] получили формулу, связывающую электронную температуру в зоне свечения дважды ионизованного кислорода $t_{3,\mathrm{O}}$ и отношение $Q_{3,\mathrm{O}}$ интенсивностей линий, в численном виде. По мере уточнения атомных данных уточнялось и соотношение между $t_{3,\mathrm{O}}$ и $Q_{3,\mathrm{O}}$. Это соотношение для современных атомных данных дается

$$t_{3,\mathrm{O}} = \frac{1.46}{\lg Q_{3,\mathrm{O}} - 0.88 - 0.17\,\lg t_{3,\mathrm{O}} + 0.030\,t_{3,\mathrm{O}}}. \qquad (4)$$

Соотношение $t_{3,\mathrm{O}} - Q_{3,\mathrm{O}}$ не зависит от электронной плотности в интересующем нас интервале плотностей.

Основная электронная конфигурация однажды ионизованного кислорода O^{+} также имеет два метастабильных терма с энергией возбуждения в несколько электронвольт (рис. 1). Отношение

$Q_{2,\mathrm{O}}$ интенсивностей небулярных [O II] λ 372.7, 372.9 и авроральных [O II] λ 732.0, 733.0 линий служит индикатором электронной температуры $t_{2,\mathrm{O}}$ в зоне свечения иона O^+. Уравнение, связывающее $Q_{2,\mathrm{O}}$ и $t_{2,\mathrm{O}}$

$$t_{2,\mathrm{O}} = \frac{0.96}{\lg Q_{2,\mathrm{O}} - 0.86 - 0.38\,\lg t_{2,\mathrm{O}} + 0.053\,t_{2,\mathrm{O}} + \lg(1 + 14.9\,x_{2,\mathrm{O}})}, \tag{5}$$

где

$$x_{2,\mathrm{O}} = 10^{-4}\,n_e\,t_{2,\mathrm{O}}^{-\frac{1}{2}}. \tag{6}$$

Соотношение $t_{2,\mathrm{O}}$ – $Q_{2,\mathrm{O}}$ ощутимо зависит от электронной плотности.

Ионы однажды ионизованного азота N^+ и дважды ионизованного кислорода O^{++} имеют схожие схемы нижних энергетических уровней (рис. 1). Отношение $Q_{2,\mathrm{N}}$ интенсивностей [N II] λ 654.8, 658.4 нм и [N II] λ 575.5 нм линий служит индикатором электронной температуры $t_{2,\mathrm{N}}$ в зоне свечения иона N^+. Поскольку зона свечения иона N^+ несколько меньше зоны свечения иона O^+ и полностью лежит в зоне свечения иона O^+, то электронная температура $t_{2,\mathrm{N}}$ характеризует электронную температуру в зоне свечения O^+. Уравнение, связывающее $Q_{2,\mathrm{N}}$ и $t_{2,\mathrm{N}}$

$$t_{2,\mathrm{N}} = \frac{1.12}{\lg Q_{2,\mathrm{N}} - 0.89 - 0.19\,\lg t_{2,\mathrm{N}} + 0.032\,t_{2,\mathrm{N}} + \lg(1 + 0.26\,x_{2,\mathrm{N}})}, \tag{7}$$

где

$$x_{2,\mathrm{N}} = 10^{-4}\,n_e\,t_{2,\mathrm{N}}^{-\frac{1}{2}}. \tag{8}$$

Предполагается, что значение электронной температуры $t_{2,\mathrm{O}}$, найденное при помощи уравнения (5), и значение $t_{2,\mathrm{N}}$, полученное с использованием уравнения (7), должны совпадать между собой или по крайней мере должны быть достаточно близки друг другу.

Определения электронной плотности во внегалактических областях H II показало, что электронная плотность в большинстве внегалактических областей H II ниже 100 см$^{-3}$ [10, 47]. Поэтому при исследовании внегалактических областей H II используется приближение низкой плотности.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА ПО ЗАПРЕЩЕННЫМ ЛИНИЯМ. T$_e$-МЕТОД (ПРЯМОЙ МЕТОД)

Содержание кислорода в области H II, в которой измерены авроральные линии кислорода (и, следовательно, измерены электронные температуры) определяется классическим методом, который часто называют T$_e$-методом или прямым методом. Исходным для определения химического состава в областях H II является уравнение (1). Если физические условия в туманности известны (установлены значения электронной температуры и электронной концентрации), то можно найти соотношение, связывающее интенсивность небулярных линий [O III] λ 495.9, 500.7 и содержание иона O^{++} в туманности

$$12 + \lg(\mathrm{O}^{++}/\mathrm{H}^+) = \lg\frac{[\mathrm{O\ III}]\lambda 495.9, 500.7}{\mathrm{H}_\beta} + 6.25 + 1.20/t_3 - 0.63\,\lg(t_3) - 0.012\,t_3. \tag{9}$$

Вообще говоря, для определения обилия иона кислорода O^{++} можно использовать любую линию этого иона. Ниже приведены уравнения для определения обилия иона кислорода O^{++} по интенсивностям запрещенных инфракрасных линий [O III] λ 51.8 мкм и [O III] λ 88.4 мкм

$$12 + \lg(\mathrm{O}^{++}/\mathrm{H}^+) = \lg\frac{[\mathrm{O\ III}]\lambda 51.8}{\mathrm{H}_\beta} + 8.25 - 0.058/t_3 - 0.65\,\lg(t_3) - 0.038\,t_3 + \lg(1 + 0.35\,x_3), \tag{10}$$

$$12 + \lg(\mathrm{O}^{++}/\mathrm{H}^+) = \lg\frac{[\mathrm{O\ III}]\lambda 88.4}{\mathrm{H}_\beta} + 7.98 - 0.049/t_3 - 0.56\,\lg(t_3) - 0.013\,t_3 + \lg(1 + 37.6\,x_3). \tag{11}$$

Очевидно, что если интенсивности линий измерены достаточно точно, то уравнения (9)–(11) дают одинаковые значения обилия иона кислорода O^{++} в области H II.

Для запрещенных оптических линий соотношения между интенсивностью линии и содержанием иона кислорода показывают сильную зависимость от электронной температуры в туманности, тогда как для запрещенных инфракрасных линий соотношения слабо зависят от электронной температуры. Этот факт имеет очевидное объяснение. Энергии возбуждения уровней, спонтанные переходы с которых дают кванты инфракрасных линий, ниже средней энергии свободных электронов, и практически любой свободный электрон способен возбудить эти уровни. Энергии возбуждения уровней, спонтанные переходы с которых дают кванты оптических линий, выше 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.

Для определения содержания иона кислорода O^+ обычно используются небулярные линии

$$12 + \lg(\mathrm{O}^+/\mathrm{H}^+) = \lg \frac{[\mathrm{O\ II}]\lambda 372.7, 372.9}{\mathrm{H}_\beta} + 5.92 + 1.60/t_2 - 0.65\,\lg(t_2) + 0.013\,t_2 + \lg(1 + 2.05\,x_2), \qquad (12)$$

где $t_2 = t_{2,\mathrm{O}}$ или $t_2 = t_{2,\mathrm{N}}$. Полное содержание кислорода в области H II

$$\frac{\mathrm{O}}{\mathrm{H}} = \frac{\mathrm{O}^+}{\mathrm{H}^+} + \frac{\mathrm{O}^{++}}{\mathrm{H}^+}. \qquad (13)$$

Приведенные здесь и в предыдущем разделе уравнения позволяют определить содержание кислорода в области H II по измеренным интенсивностям эмиссионных линий в спектре.

В спектрах внегалактических областей H II сравнительно редко удается измерить какую-либо одну авроральную линию кислорода и только в немногих случаях удается надежно измерить одновременно авроральные линии однажды и дважды ионизованного кислорода. Когда измеряется только одна авроральная линия и определяется только электронная температура в зоне свечения одного иона, электронная температура в зоне свечения другого иона оценивается при помощи соотношения, связывающего между собой t_2 и t_3. Для установления соотношения между t_2 и t_3 обычно используются модели областей H II. Предложено несколько вариантов соотношения $t_2 - t_3$. Наиболее широкое распространение получило соотношение, предложенное Кемпбелл, Терлевичем и Мельником [12]

$$t_2 = 0.7\,t_3 + 0.3. \qquad (14)$$

К настоящему времени содержания кислорода прямым методом определены для нескольких сотен областей H II в неправильных галактиках. Наиболее точные значения содержаний кислорода получены Изотовым и Туаном с сотрудниками, которые провели обширный ряд спектральных наблюдений H II-областей в голубых компактных карликовых галактиках [20, 21]. Они получили, что типичная ошибка их определений содержания кислорода не превышает ~ 0.1 dex, а в нескольких десятках исследованных ими областей H II ошибка не превышает 0.05 dex. Химический состав спиральных галактик исследован значительно хуже, хотя к настоящему времени опубликовано порядка трехсот спектров областей H II в спиральных галактиках, в которых измерены авроральные линии и, следовательно, содержания кислорода определены прямым методом. Во-первых, бóльшая часть этих спектров получена для областей H II в трех спиральных галактиках; M 101, M 33 и нашей Галактике. Во-вторых, точность определения обилия кислорода в областях H II в дисках спиральных галактик не очень высока. Это обусловлено тем, что большинство областей H II в спиральных галактиках имеет низкую электронную температуру, поэтому интенсивность авроральной линии [O III] λ 436.3 в их спектрах мала и измеряется с низкой точностью.

ПРОТИВОРЕЧИЕ МЕЖДУ ЗНАЧЕНИЯМИ СОДЕРЖАНИЙ КИСЛОРОДА, НАЙДЕННЫМИ ПО ЗАПРЕЩЕННЫМ И РАЗРЕШЕННЫМ ЛИНИЯМ

Содержание кислорода в области H II может быть определено не только по запрещенным, но и по разрешенным (рекомбинационным) линиям. Преимущество этого метода заключается в том, что интенсивности разрешенных линий сравнительно слабо зависят от электронной температуры. По этой причине отношение содержаний кислорода и водорода, определенное по разрешенным линиям практически не зависит от электронной температуры в области H II. Проблема заключается в том, что разрешенные линии ионов кислорода очень слабы. В 1993 году Пеймберт, Сторей и Торрес-Пеймберт [33] определили содержание дважды ионизованного кислорода $\mathrm{O}^{++}/\mathrm{H}^+$ в галактических областях H II M 17 и M 42 по разрешенным линиям. Они получили, что содержание $\mathrm{O}^{++}/\mathrm{H}^+$, найденное по разрешенным линиям, в два раза превышает содержание, найденное по запрещенным линиям. Величину расхождения 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 расхождения содержаний $ADF(\mathrm{O}^{++})$ определен для ряда областей H II в нашей и ближайших галактиках. Для большинства областей H II значения фактора расхождения содержаний $ADF(\mathrm{O}^{++})$ 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 значения фактора расхождения содержаний примерно одинаково для всех ионов [25]. 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^{++}), определенных по разрешенным и запрещенным линиям, согласуются между собой. Барлоу и др. [8] определили содержание магния по рекомбинационным линиям в 10 планетарных туманностях, для которых значения фактора расхождения содержаний для иона кислорода O^{++} (и других элементов второго ряда периодической таблицы Менделеева) лежат в диапазоне от ~ 2 до 10 и выше. Они нашли, что, в противоположность ситуации с содержаниями кислорода, значения 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 место только для элементов второго ряда периодической таблицы Менделеева.

Противоречие между содержаниями ионов, найденными по запрещенным и разрешенным линиям, вызывает вопрос о надежности определения химического состава в областях H 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. На основе анализа сетки моделей областей H II Стасинска [41] пришла к выводу, что содержания элементов, найденные в областях H II высокой металличности прямым методом, занижены из-за наличия радиального градиента электронной температуры в туманности. Более 40 лет назад Пеймберт предположил [31], что в планетарных туманностях и областях H II могут существовать мелкомасштабные пространственные флуктуации электронной температуры и плотности, которые могут существенно влиять на обилия, найденные по оптическим запрещенным линиям. Достоверность электронной температуры $t_{3,\mathrm{O}}$ в областях H II можно оценить путем сравнения с электронной температурой, определенной по бальмеровскому скачку t_{Ba} [31]. Гусева и др. [17, 18] определили электронные температуры по бальмеровскому и пашеновскому скачкам для большой выборки областей H II низкой металличности. Они пришли к выводу, что электронные температуры $t_{3,\mathrm{O}}$ и t_{Ba} не отличаются 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 значение электронной температуры $t_{3,\mathrm{O}}$ не соответствует реальной электронной температуре в туманности, то определения содержаний по инфракрасным запрещенным линиям давали бы обилия, которые согласуются с обилиями, найденными по разрешенным линиям. Действительно, содержания иона кислорода, найденные по оптическим запрещенным линиям, сильно зависят от электронной температуры в туманности, тогда как для инфракрасных линий эта зависимость очень слабая (см. уравнения (9)–(11)). Тсамис и др. [43] сравнили обилия, найденные по запрещенным оптическим и инфракрасным линиям в 4 областях H II, и нашли, что эти обилия согласуются между собой в пределах 20%–30%, причем ИК обилия в двух областях H II (M 42 и M 17) ниже и в двух областях H II (NGC 3576 и 30 Doradus) выше. В работе [24] также сделан вывод, что содержания, определенные по инфракрасным и оптическим запрещенным линиям в областях H II NGC 3603, 30 Doradus и N66, согласуются между собой. Рудольф с соавторами [39] нашли, что в галактических областях H II содержания кислорода, определенные по запрещенным инфракрасным линиям, в среднем даже ниже, 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 значение электронной температуры $\mathrm{t}_{3,\mathrm{O}}$ не соответствует реальной электронной температуре в туманности.

Вильямс и др. [44] получили спектры нескольких ядер планетарных туманностей в ультрафиолетовом диапазоне 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. Они нашли, что лучевые концентрации, определенные по резонансным линиям поглощения и по запрещенным эмиссионным линиям, совпадают между собой в пределах ошибок.

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 обилий не содержит каких-либо предположений, т. е. является модельно независимым. Измерения линии кислорода O I $\lambda\,135.6$ 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 кпк вокруг Солнца) составляет $12+\lg(\mathrm{O/H}) \sim 8.50$ [7, 13, 27, 28]. Туманность Ориона, расстояние до которой ~ 0.5 кпк, является частью межзвездной среды в солнечной окрестности. Содержание кислорода в туманности Ориона определялось прямым методом по запрещенным оптическим линиям во многих работах и составляет: $12+\lg(\mathrm{O/H}) = 8.51$ [14], 8.47 [15], 8.51 [16], 8.49 [29], 8.52 [32]. Согласие между содержаниями кислорода в межзвездной среде в солнечной окрестности, найденное по резонансным линиям поглощения, и в туманности Ориона, найденное 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. Однако, до тех пор, пока не будет установлена причина расхождений между содержаниями кислорода, определенными по разрешенным и запрещенным линиям, сомнения в достоверности содержаний кислорода, определенных по запрещенным линиям, будут иметь место.

ЭМПИРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА

Одномерные калибровки. Большинство областей H II в спиральных галактиках имеет низкую электронную температуру. Интенсивность авроральных линий в их спектрах ниже порога обнаружения. Невозможность применить прямой метод для определения обилий кислорода в таких областях H II привела к разработке других методов, в которых используются интенсивности сильных линий. Предположение о том, что некоторые комбинации интенсивностей сильных линий в спектрах областей H II являются индикаторами их металличности, высказал Сирл в 1971 году [40]. Сирл измерил интенсивности сильных линий в спектрах областей H II в спиральных галактиках Sc-типа и обнаружил, что отношение $[\mathrm{O\,III}]/\mathrm{H}_\beta$ в спектрах систематически возрастает, а отношение $[\mathrm{N\,II}]/\mathrm{H}_\alpha$ 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 отображают эти изменения.

В 1979 году Пейджел и др. [30] предложили использовать суммарную интенсивность сильных линий кислорода $R_{23} = ([\mathrm{O\,II}]\,\lambda\,372.7,\ 372.9 + [\mathrm{O\,III}]\,\lambda\,495.9,\ 500.7)/\mathrm{H}_\beta$ для оценки обилия кислорода в областях H II и предложили соотношение $\mathrm{O/H} = f(R_{23})$. Такие соотношения называют калибровками. Предложенный ими подход нашел широкое применение. Метод, в котором обилие кислорода в области H II определяется при помощи калибровок, называют методом сильных линий или эмпирическим методом. Для установления калибровки типа $\mathrm{O/H} = f(R_{23})$ использовались модели H II-областей. Было предложено несколько вариантов R_{23}-калибровки. Содержания кислорода, определенные при помощи разных вариантов R_{23}-калибровки, плохо согласуются между собой. Зарицкий, Кенникатт и Хахра [47] построили R_{23}-калибровку путем усреднения вариантов R_{23}-калибровки из разных работ

$$12+\lg(\mathrm{O/H})_{R_{23}} = 9.265 - 0.33x - 0.202x^2 - 0.207x^3 - 0.333x^4, \tag{15}$$

где $x = \lg R_{23}$. Существенной проблемой при оценке обилий кислорода по R_{23} является тот факт, что одному значению R_{23} соответствуют два значения O/H. Диаграмма R_{23} – O/H для областей H II, в которых обилие кислорода определено прямым методом, представлена на рис. 2, *а*. Как видно из рисунка, соотношение между интенсивностями сильных линий R_{23} и обилием кислорода распадается на две ветви – верхнюю и нижнюю.

Таким образом, использование суммарной интенсивности сильных линий кислорода R_{23} для определения обилия кислорода O/H в области H II имеет два слабых места. Во-первых, точность определения обилия кислорода низка. Во-вторых, соотношение распадается на две ветви, что затрудняет его применение, так как необходимо априори знать, к какой ветви принадлежит рассматриваемая область H II. Поэтому усилия были направлены на поиски другого индикатора (другой комбинации сильных линий), который был бы свободен от указанных трудностей. Как индикаторы металличности области H II рассматривались $\mathrm{N2} = \lg([\mathrm{N\,II}]\,\lambda\,658.4/\mathrm{H}_\alpha)$, $\mathrm{O3N2} = \lg([\mathrm{O\,III}]\,\lambda\,500.7/\mathrm{H}_\beta)/([\mathrm{N\,II}]\,\lambda\,658.4/\mathrm{H}_\alpha)$ и другие комбинации сильных линий. Различия между содержаниями кислорода, найденными при помощи разных калибровок в областях H II, достигают множителя 3 [11].

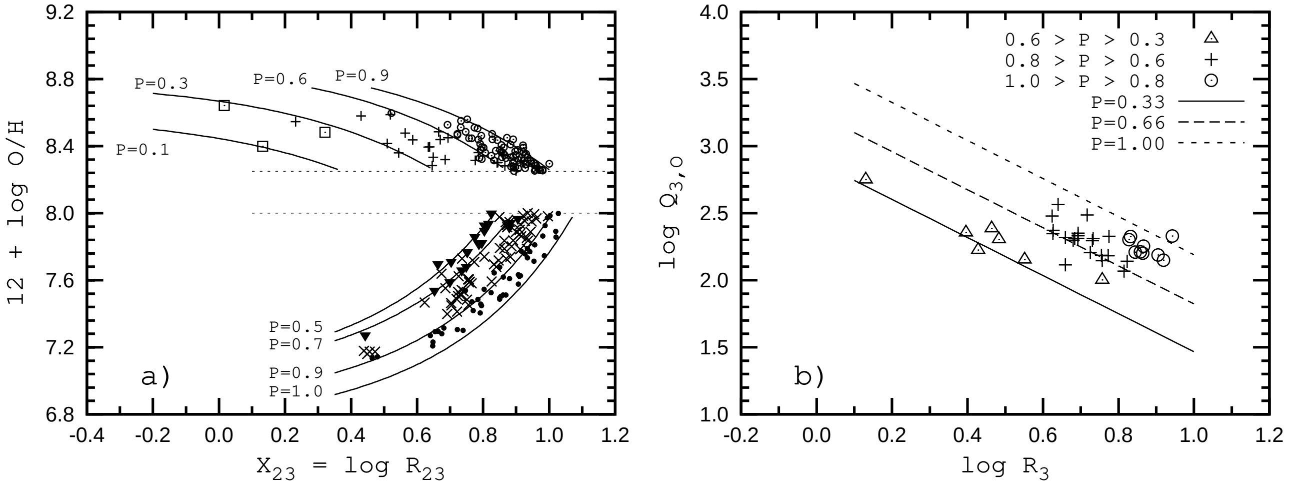

Рис. 2. Диаграмма R_{23} – O/H для областей H II, в которых содержания кислорода определены прямым методом. Области H II с разными значениями параметра возбуждения P показаны разными символами. На наблюдаемые данные наложено семейство кривых, соответствующих уравнениям (16), (17). Каждая кривая помечена значением P (*a*). Зависимость между индикатором электронной температуры $Q_{3,\mathrm{O}}$ и интенсивностью линии кислорода R_3. Области H II с разными значениями параметра возбуждения P представлены разными символами. Линии показывают зависимости, соответствующие уравнению (18), для трех значений P (*b*)

Двухмерная (параметрическая) калибровка. Вообще говоря, еще в работе 1979 года [30], в которой Пейджел и др. предложили первую одномерную калибровку O/H $= f(R_{23})$, они указали, что суммарная интенсивность сильных линий кислорода R_{23} в спектре области H II изменяется монотонно с изменением обилия кислорода в области H II и с изменением эффективной температуры возбуждающей звезды. Другими словами, соотношение между обилием кислорода и интенсивностью сильных линий должно быть параметрическим (двухмерным), а не одномерным. МакГох [26] рассчитал сетку моделей областей H II и построил диаграмму R_{23} – O/H. Он пришел к выводу, что при определении обилия кислорода в областях H II низкой металличности (нижняя ветвь диаграммы R_{23} – O/H) в дополнение к величине R_{23} необходимо использовать отношение [O III] $\lambda\,495.9, 500.7$/[O II] $\lambda\,372.7, 372.9$. МакГох отметил, что сильные линии кислорода содержат достаточно информации для определения точных металличностей в областях H II нижней ветви диаграммы R_{23} – O/H.

В работе [34] исследована нижняя ветвь диаграммы R_{23} – O/H, построенная для областей H II с наиболее надежными значениями обилий кислорода, определенными прямым методом. Было найдено, что для областей H II с фиксированным значением суммарной интенсивности сильных кислородных линий R_{23} металличность O/H изменяется с изменением параметра возбуждения P. Этот факт свидетельствует о том, что для корректной оценки обилия кислорода в области H II недостаточно использовать только величину R_{23}, а необходимо учитывать также параметр возбуждения туманности P. Другими словами, одномерная калибровка O/H $= f(R_{23})$ должна быть заменена параметрической (двухмерной) калибровкой O/H $= f(R_{23}, P)$. Исследование верхней ветви диаграммы R_{23} – O/H привело к такому же выводу [35]. Первые соотношения O/H $= f(R_{23}, P)$ получены в [34] для нижней ветви диаграммы R_{23} – O/H (для областей H II низкой металличности, $12 + \lg(\mathrm{O/H}) < 8.0$) и в [35] для верхней ветви диаграммы R_{23} – O/H (для областей H II высокой металличности, $12 + \lg(\mathrm{O/H}) > 8.2$). Метод определения обилий кислорода в областях H II при помощи соотношения O/H $= f(R_{23}, P)$ получил название параметрического или P-метода.

Пилюгин и Туан [37] собрали из литературы обширную коллекцию спектров областей H II в спиральных и неправильных галактиках, в которых измерены интенсивности авроральных линий кислорода или других атомов. Коллекция содержит более 700 спектров, полученных разными авторами за период с 1967 по 2004 гг. Содержания кислорода были перевычислены в единой системе, чтобы иметь однородную шкалу металличности. Выборка наиболее точных данных была использована для калибровки соотношения O/H $= f(R_{23}, P)$. Для областей H II верхней ветви диаграммы R_{23} – O/H было найдено

$$Z = \frac{R_3 + 726.1\,P + 842.2\,P^2 + 337.5\,P^3}{85.96\,P + 82.76\,P^2 + 43.98\,P^3 + 1.793\,R_3}, \quad Z > 8.25, \tag{16}$$

где $Z = 12 + \lg(\mathrm{O/H})_P$. Для областей H II нижней ветви диаграммы $R_{23} - \mathrm{O/H}$ было найдено

$$Z = \frac{R_3 + 106.4\,P + 106.8\,P^2 - 3.40\,P^3}{17.72\,P + 6.60\,P^2 + 6.95\,P^3 - 0.302\,R_3}, \quad Z < 8.0. \tag{17}$$

Семейство кривых, соответствующих уравнениям (16), (17), представлено на рис. 2, *a* вместе с наблюдательными данными. Содержания кислорода, найденные при помощи параметрической калибровки, близки к содержаниям, найденным прямым методом.

ff-соотношение. Классический T_e-метод является логически безупречным методом определения электронной температуры в разных зонах области H II. Однако применимость этого метода ограничена. Интенсивность авроральных линий низка в сравнении с интенсивностями небулярных линий и/или бальмеровских линий водорода даже в областях H II с высокой электронной температурой. По мере уменьшения электронной температуры интенсивность авроральной линии слабеет и в спектрах холодных областей H II ее интенсивность становится ниже порога обнаружения. Отсутствие измеримой авроральной линии в спектрах холодных областей H II препятствует применению классического метода для определения электронной температуры. К сожалению, авроральные линии не удается измерить в подавляющем большинстве областей H II в спиральных галактиках.

В недавней работе [36] была найдена возможность применения классического метода для определения электронной температуры в холодных областях H II, в спектрах которых невозможно измерить авроральные линии. Было показано, что существует соотношение между интенсивностями небулярных и авроральных линий (flux-flux, ff-соотношение) в спектрах областей H II. Существование ff-соотношения можно предположить на основе анализа закона сохранения энергии свободных электронов.[2] Для того, чтобы найти выражения для зависимостей между интенсивностями небулярных и авроральных линий кислорода в спектрах областей H II, необходимо знать распределение энергии в коротковолновой части спектра ионизующей звезды и адекватно описать все физические процессы, протекающие в туманности. К сожалению, как модели звездных атмосфер, так и модели областей H II пока далеки от совершенства. Поэтому пока не удается вывести теоретически указанные зависимости строго.

Существует другой подход к решению этой задачи, который можно назвать эмпирическим. Если ожидаемые зависимости между интенсивностями небулярных и авроральных линий кислорода в спектрах областей H II существуют, то измеренные интенсивности линий в спектрах областей H II должны следовать этим зависимостям. Рис. 2, *b*, показывает диаграмму $Q_{3,\mathrm{O}} - R_3$ для измеренных интенсивностей линий в спектрах областей H II. Эмпирические данные подтверждают существование ожидаемой зависимости между измеренными интенсивностями небулярных и авроральных линий кислорода в спектрах областей H II. На основе этих данных получено следующее ff-соотношение

$$\lg Q_{3,\mathrm{O}} = 2.53 + 1.08\,P - 1.42\,\lg R_3. \tag{18}$$

Найденная зависимость показана на рис. 2, *b* для трех значений параметра возбуждения туманности P.

Таким образом, уравнение (18) позволяет вычислить отношение $Q_{3,\mathrm{O}} = R_3/R$ (и, следовательно, интенсивность авроральной линии R) по измеренным интенсивностям небулярных линий R_3 и R_2 в спектре области H II. Но если определено значение $Q_{3,\mathrm{O}}$, то электронная температура в области H II может быть найдена при помощи классического метода (уравнение (4)). Электронные температуры, найденные при помощи ff-соотношения, согласуются с электронными температурами, найденными по измеренным $Q_{3,\mathrm{O}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 химическим составом. Содержание кислорода найдено для большого количества областей H II в нашей и других галактиках. Установлена общая качественная картина распределения содержания кислорода (и других химических элементов) в галактиках.

[2] Методы определения электронной температуры туманности, основанные на законе сохранения энергии свободных электронов, были предложены Соболевым [6] и Проником [5]. Эти методы пока не нашли широкого применения для определения электронных температур областей H II, так как для их использования необходимо знать либо распределение энергии в коротковолновой части спектра ионизующей звезды, либо содержание кислорода в области H II.

[1] *Амбарцумян В. А.* Теоретическая астрофизика. – Л.-М.: ГОНТИ, Редакция технико-теоретической литературы, 1939. – 255 с.

[2] *Вавилов С. И.* Примечания к переводу оптических мемуаров Ньютона // Успехи физических наук. – 1927. – **7**, № 2. – С. 1–163.

[3] *Мензел Д., Бэкер Д., Аллер Л. и др.* Физические процессы в газовых туманностях. – М.: Государственное издательство Иностранной литературы, 1948. – 204 с.

[4] *Ньютон И.* Новая теория света и цветов (Перевод С. И. Вавилова) // Успехи физических наук. – 1927. – **7**, № 2. – С. 123–134.

[5] *Проник В. И.* К определению электронных температур диффузных газовых туманностей // Изв. Крымской астрофиз. обсерв. – 1957. – **17**. – С. 14–41.

[6] *Соболев В. В.* Курс теоретической астрофизики. – М.: Наука, 1967. – 528 с.

[7] *André M. K., Oliveira C. M., Howk J. C., et al.* Oxygen gas-phase abundance revisited // Astrophys. J. – 2003. – **591**, N 2. – P. 1000–1012.

[8] *Barlow M. J., Liu X.-W., Péquignot D., et al.* Recombination-line abundances for the third-row element, magnesium // IAU Symp. N 209. – 2003. – P. 373–374.

[9] *Bowen I. S.* The origin of the chief nebular lines // Publ. Astron. Soc. Pacific. – 1927. – **39**, N 231. – P. 295–297.

[10] *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**, N 3. – P. 981–997.

[11] *Bresolin F., Ryan-Weber E., Kennicutt R. C., Goddard Q.* The flat oxygen abundance gradient in the extended disk of M83 // Astrophys. J. – 2009. – **695**, N 1. – P. 580–595.

[12] *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**, N 4. – P. 811–825.

[13] *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**, N 1. – P. 327–346.

[14] *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**, N 2. – P. 329–345.

[15] *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**, N 2. – P. 401–422.

[16] *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**, N 1. – P. 229–247.

[17] *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**, N 2. – P. 890–906.

[18] *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**, N 3. – P. 885–893.

[19] *Fraunhofer J.* Bestimmung des Brechungs und Farbzersteuungs Vermogen verschidener Glassorten in Bezug auf die Vervolkommung achromatischer Fernröhre // Denkschriften der München Akademie der Wissenschaften. – 1817.– **5.** – P. 193–226.

[20] *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**, N 3. – P. 647–667.

[21] *Izotov Y. I., Thuan T. X.* Heavy-element abundances in blue compact galaxies // Astrophys. J. – 1999. – **511**, N 2. – P. 639–659.

[22] *Kirchhoff G. R.* Über die Fraunhofer'schen Linien // Monatsberichte der Königlichen Preussische Akademie des Wissenschaften zu Berlin. – 1859. – P. 662–665.

[23] *Kirchhoff G. R.* Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht and Wärme // Monatsberichte der Königlichen Preussische Akademie des Wissenschaften zu Berlin. – 1859. – P. 783–787.

[24] *Lebouteiller V., Bernard-Salas J., Brandl B., et al.* Chemical composition and mixing in giant H II regions: NGC 3603, 30 Doradus, and N66 // Astrophys. J. – 2008. – **680**, N 1. – P. 398–419.

[25] *Liu X.-W.* Optical recombination lines and temperature fluctuations // Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferecias). – 2002. – **17**. – P. 70–76.

[26] *McGaugh S. S.* H II region abundances: model oxygen line ratios // Astrophys. J. – 1991. – **380**, N 1. – P. 140–150.

[27] *Meyer D. M., Jura M., Cardelli J. A.* The definitive abundance of interstellar oxygen // Astrophys. J. – 1998. – **493**, N 1. – P. 222–229.

[28] *Oliveira C. M., Duplus J., Chayer P., Moos H. W.* O/H in the local bubble // Astrophys. J. – 2005. – **625**, N 1. – P. 232–241.

[29] *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**, N 1. – P. 305–324.

[30] *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**, N 1. – P. 95–113.

[31] *Peimbert M.* Temperature determination of H II regions // Astrophys. J. – 1967. – **150**, N 3. – P. 825–834.

[32] *Peimbert M., Torres-Peimbert S.* Chemical composition of the Orion nebula // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1977. – **179**, N 2. – P. 217–234.

[33] *Peimbert M., Storey P. J., Torres-Peimbert S.* The O^{++}/H^{+} abundance ratio in gaseous nebulae derived from recombination lines // Astrophys. J. – 1993. – **414**, N 2. – P. 626–631.

[34] *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**, N 1. – P. 325–332.

[35] *Pilyugin L. S.* On the oxygen abundance determination in H II regions. High-metallicity regions // Astron. and Astrophys. – 2001. – **369**, N 2. – P. 594–604.

[36] *Pilyugin L. S.* On the relationship between auroral and nebular oxygen line intensities in spectra of H II regions // Astron. and Astrophys. – 2005. – **436**, N 1. – P. L1–L4.

[37] *Pilyugin L. S., Thuan T. X.* Oxygen abundance determination in H II regions: the strong line intensities – abundance calibration revisited // Astrophys. J. – 2005. – **631**, N 1. – P. 231–243.

[38] *Ramsay W.* On a gas showing the spectrum of helium, the reputed cause of D_3, one of the lines in the coronal spectrum. Preliminary note // Proceedings of the Royal Society of London. – 1895. – **58**. – P. 65–67.

[39] *Rudolph A. L., Fich M., Bell G. R., et al.* Abundance gradients in the Galaxy // Astrophys. J. Suppl. Ser.– 2006. – **162**, N 2. – P. 346–374.

[40] *Searle L.* Evidence for composition gradients across the disks of spiral galaxies // Astrophys. J. – 1971. – **168**, N 3. – P. 327–341.

[41] *Stasińska G.* Biases in abundance derivations for metal-rich nebulae // Astron. and Astrophys. – 2005. – **434**, N 2. – P. 507–520.

[42] *Strömgren B.* The physical state of interstellar hydrogen // Astrophys. J. – 1939. – **89**, N 4. – P. 526–547.

[43] *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**, N 3. – P. 687–710.

[44] *Williams R., Jenkins E. B., Baldwin J. A., et al.* Independent emission and absorption abundances for planetary nebulae // Astrophys. J. – 2008. – **677**, N 2. – P. 1100–1119.

[45] *Wollaston W. H.* A method of examining refractive and dispersive powers, by prismatic Reflection // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. – 1802. – **92**. – P. 365–381.

[46] *Zanstra H.* An application of the quantum theory to the luminosity of diffuse nebulae // Astrophys. J. – 1927. – **65**. – P. 50–70.

[47] *Zaritsky D., Kennicutt R. C. (Jr), Huchra J. P.* H II regions and the abundance properties of spiral galaxies // Astrophys. J. – 1994. – **420**, N 1. – P. 87–109.