

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР  
ОРДЕНА ЛЕНИНА БОРАКАНСКАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

ПЕТРОВ ГЕОРГИ ТРЕНДАФИЛОВ

СРАВНИТЕЛЬНОЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЯДЕР ГАЛАКТИК С ЭМИССИОННЫМИ ЛИНИЯМИ И ПЕКУЛЯРНЫХ  
ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Специальность - 01.03.02 - Астрофизика

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Заказ 979 Тираж 120  
Сдано в производство 9.04.1980г., подписано к печати 7.04.1980г., печ. 0,88 л, бумага № I, 60x84<sup>I</sup>/16  
Эчмиадзинская типография АН Армянской ССР

Е р е в а н - 1980

Работа выполнена на кафедре астрофизики о. на Трудового  
Красного Знамени Ереванского государственного университета.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук  
М.А.Аракелян.

Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник Э.А.Дибей  
(Государственный астрономический ин-  
ститут им.П.К.Штернберга, Москва),  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
А.Т.Каллоглян (Бюраканская астрофизичес-  
кая обсерватория АН Арм.ССР).

Ведущее предприятие – Крымская астрофизическая обсерватория  
АН СССР.

Защита состоится " " 1980 г. в час. на заседа-  
нии специализированного совета (Д.005.12.01) по специальности  
01.03.02 – "Астрофизика" при Бюраканской астрофизической обсер-  
ватории АН Арм.ССР, по адресу:  
378433 Арм.ССР, Аштаракский р-н, село Бюракан, Бюраканская астро-  
физическая обсерватория.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Бюраканской астрофизической обсерватории.

Автореферат разослан " " 1980 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета  
кандидат физико-математических наук

М.А.Игнацканди

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Спектрофотометрические исследования ядер галактик и, в частности, нормальных галактик крайне бедны. С точки зрения физических условий ядра нормальных галактик исследованы в гораздо меньшей степени, чем пекулярные внегалактические объекты. Имеющиеся данные указывают на существование заметных различий в параметрах, характеризующих условия в ядрах нормальных галактик с эмиссионными линиями, с одной стороны, и в спиральных рукавах, с другой. Наблюдения указывают и на возможное изменение химического состава при переходе от центральных областей галактик к периферийным. Среди галактик сейфертовского типа известны объекты с переменной интенсивностью эмиссионных линий.

Приведенные данные показывают целесообразность изучения физических условий в ядрах нормальных галактик с эмиссионными линиями и их сравнения, с одной стороны, с ядрами пекулярных внегалактических объектов, а с другой – с диффузными туманностями в нашей и ближайших галактиках.

Целью диссертационной работы является сравнительное спектрофотометрическое исследование ядер галактик, в разной степени проявляющих ту или иную форму активности. Для 50 галактик несейфертовского типа и для 20 сейфертовских галактик типа NGC 4151 определены эквивалентные ширины некоторых эмиссионных линий. По относительным интенсивностям запрещенных линий сделаны оценки электронных температур и электронных плотностей для примерно 130 галактик. При электронной температуре  $T_e = 10\ 000^\circ\text{K}$  оценено содержание некоторых ионов в примерно 230 эмиссионных объектах –

диффузных туманностях и ядрах галактик. Для описания некоторых наблюдательных фактов рассмотрены статистические зависимости, характерные для эмиссионных линий сейфертовских галактик типа NGC 4151. Проведено сравнение физических условий и содержания ионов в объектах с эмиссионными линиями.

Новизна работы состоит в следующем:

1. Получены спектры и определены эквивалентные ширины эмиссионных линий в красной области спектра для 50 ядер галактик, не относящихся к сейфертовскому типу, примерно для 40 из них впервые.

2. Определены относительные интенсивности эмиссионных линий и сделана оценка электронных плотностей в областях, излучающих в запрещенных линиях.

3. Примерно для 230 объектов с эмиссионными линиями оценено содержание некоторых ионов -  $O^+$ ,  $N^+$ ,  $S^+$ ,  $Ne^+$  и др.

4. На основе наблюдательного материала, предоставленного Д. В. Видманом, определены эквивалентные ширины эмиссионных линий для сейфертовских галактик типа NGC 4151, для некоторых - впервые.

5. На большом наблюдательном материале обсуждены некоторые зависимости между показателями цвета и светимостями и потоками в линиях для сейфертовских галактик типа NGC 4151, рассмотренные ранее Аракелян.

Научная ценность работы состоит в том, что она представляет вклад в исследование физических условий в ядрах ряда галактик. Приведенные эквивалентные ширины линий могут быть основой для дальнейшего изучения галактик с эмиссионными линиями.

Апробация работы: Некоторые результаты настоящей диссертации докладывались на конференции молодых астрофизиков, проводившейся в Бракане в октябре 1978 года и на семинарах секции Астрономии Болгарской Академии Наук и кафедры Астрономии Физического факультета Софийского университета.

Публикации: По теме диссертации опубликовано шесть статей и одна принята к печати.

Объем диссертации: Работа состоит из введения и четырех глав. Содержит 126 страниц, в том числе 18 рисунков и 25 таблиц. Список цитируемой литературы насчитывает 185 названий.

На защиту выносятся результаты спектрофотометрического исследования, определение физических условий и химического состава ядер 50 галактик с эмиссионными линиями в плане сравнения с внегалактическими объектами высокой активности - сейфертовскими галактиками и радиогалактиками.

## II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении кратко излагается современное состояние исследования галактик с эмиссионными линиями. Более подробно рассмотрены сейфертовские галактики, исследованные гораздо лучше остальных. Приведены некоторые сведения о галактиках Маркарьяна и галактиках высокой поверхностной яркости, а также компактных галактиках Цвикки, среди которых встречаются объекты сейфертовского типа.

В качестве нормальных в настоящей работе рассматриваются галактики, не входящие ни в одну из упомянутых выше групп. Приведены результаты Мейола, Бэрбидж и Бэрбиджа, а также Пейджа, иллюстрирующие высокую частоту встречаемости в ядрах нормаль-

ных галактик не только линии  $[O II] \lambda 3727$ , но и  $H_{\alpha}$ ,  $[N II] \lambda 6584$ ,  $[\zeta II] \lambda \lambda 6717, 6731$ ,  $[O III] \lambda \lambda 4959, 5007$ .

Отмечены некоторые различия условий в ядерных областях галактик и их спиральных рукавах, различия в значениях отношения  $[N II] \lambda 6584 / H_{\alpha}$ , обнаруженные Бэрбидж и Бэрбиджем, и изменение химического состава газа от ядра к спиральным рукавам, обнаруженные Пеймбертом и др., рассмотрены некоторые возможные объяснения этих фактов.

В введении же сформулированы задачи диссертационной работы и приведено краткое содержание последующих глав.

В первой главе "Спектрофотометрическое исследование ядер галактик с эмиссионными линиями" рассматриваются вопросы, связанные с программой наблюдений, аппаратурой и методикой.

В § I обсуждаются программа и постановка задачи. Из примерно 4500 объектов, приведенных по Второму пересмотренному каталогу ярких галактик Вокулера и др., спектрофотометрически исследована только 171 галактика, из них лишь 71 галактика несейфертовского типа. После выхода в свет этого каталога появились новые спектрофотометрические данные, но в основном для сейфертовских галактик.

С другой стороны, Пеймбертом и Вернером показано, что ядра нормальных галактик это не просто колоссальные области  $H II$ . В ядрах часто наблюдаются сильная линия  $[O I] \lambda 6300$ , линии  $[\zeta II] \lambda \lambda 6717, 6731$  тоже очень сильны, линия  $H_{\alpha}$  обычно сильнее  $[O II] \lambda 3727$ .

С целью получения достаточного по объему материала для сравнительного изучения физических условий, содержания ионов и химического состава ядер "нормальных" галактик было подобрано около

200 сравнительно ярких объектов несейфертовского типа, в спектрах которых ранее наблюдались эмиссионные линии.

Часть намеченной наблюдательной программы удалось осуществить на телескопе Э Т Э 125 см Крымской станции ГАИШ.

В § 2 описывается аппаратура - телескоп Э Т Э и спектрографы УАГС и А - спектрограф, с помощью которых получен наблюдательный материал. Во всех случаях спектры получались при помощи однокаскадного электроннооптического преобразователя с электростатической фокусировкой. На электроды подавалось ускоряющее напряжение 12 - 13 киловольт. Применялась пленка А 600 с предварительной подсветкой до плотности около 0,3, а также пленка Кодак 103а 0 или 103а D как с подсветкой, так и без подсветки.

В § 3 описывается методика исследований - относительная фотографическая спектрофотометрия. Калибровка фотоматериалов проводилась обычным способом. Запись спектров в интенсивностях производилась на микрофотометре Г - III Крымской астрофизической обсерватории.

В § 4 описан полученный наблюдательный материал. Всего было обработано 113 спектров 100 галактик. Из них 42 получены автором. Во всех случаях обратная дисперсия была около 100 А/мм, соответствующая разрешению около 5 А. Ширина щели бралась 3 - 3,5". Спектры 38 галактик Маркаряна были получены Аракелянном, Дибам и Есиповым, а 33 спектра галактик высокой поверхностной яркости - Дорошенко и Терезьяном. Эти спектры получены с обратной дисперсией около 230 А/мм, что соответствует спектральному разрешению 10 А. Наблюдательные данные представлены в таблице 3.

В § 5 приводятся эквивалентные ширины эмиссионных линий в

ядрах галактик сейфертовского типа. В таблицах 5 - 7 с краткими комментариями приведены соответствующие данные для 10 ярких галактик, 28 галактик Маркаряна и 12 галактик высокой поверхностной яркости.

§ 6 посвящен изучению отношения  $[N II] \lambda 6584 / H_{\alpha}$  в ядрах галактик. Отмечается результат Бэрбидж и Бэрбиджа об изменении отношения  $[N II] \lambda 6584 / H_{\alpha}$  от 0,2 - 0,3 в спиральных рукавах до 1 и больше в ядрах галактик. Сопоставление этих результатов с результатами исследования диффузных туманностей в Галактике показывает, что в диффузных туманностях не наблюдается ни одного случая, когда видна линия  $[N II] \lambda 6584$ , а  $H_{\alpha}$  не присутствует. Между тем Бэрбидж и Бэрбидж не отмечают ни одного случая, когда в ядре галактики наблюдается линия  $H_{\alpha}$ , а линия  $[N II] \lambda 6584$  не видна. Указанное различие представляется нам принципиальным с той точки зрения, что оно может являться указанием на отличия в состояниях газа в ядрах галактик и диффузных туманностях.

Результаты наших наблюдений ядер ярких галактик находятся в хорошем согласии с результатами Бэрбидж и Бэрбиджа. Галактики же Маркаряна и галактики высокой поверхностной яркости с точки зрения отношения  $[N II] \lambda 6584 / H_{\alpha}$  ближе к диффузным туманностям.

Вторая глава - "Физические условия в ядрах нормальных галактик с эмиссионными линиями" - посвящена определению электронных плотностей в ядрах наблюдавшихся объектов.

В § 1 обсуждаются методы определения электронных температур и электронных плотностей. Описан метод энергетического баланса. Подробно рассмотрены методы определения  $n_e$  и  $T_e$  по отно-

сительным интенсивностям запрещенных линий. Рабочие формулы для некоторых практически важных линий приведены в таблице, взятой из работы Калера и др. Комментируется вопрос об определении  $n_e$  и  $T_e$  по линиям  $[S II]$  или  $[O II]$  и  $[O III]$ . Отмечается некорректность этой операции, поскольку в ней не учитываются эффекты стратификации излучения, а также возможные случаи, когда плотность  $n_e > 10^4 \text{ см}^{-3}$ .

В § 2 обсуждаются методы определения химического состава излучающего газа. Описан практический способ, предложенный Боярчуком и др. Для дальнейшей работы принята схема, предложенная Пеймбертом, так как она была применена к ядрам галактик M 51 и M 81. Приведены рабочие формулы для определения относительного содержания ионов  $O^+$ ,  $O^{++}$ ,  $N^+$ ,  $S^+$ ,  $He^+$  и  $He^{++}$ , а также, выведенные Пеймбертом соотношения, связывающие содержание ионов и полное содержание элементов.

В § 3 приведены оценки физических условий -  $n_e$  и  $T_e$  и содержание некоторых ионов в ядрах галактик с эмиссионными линиями, не относящихся к сейфертовскому типу. Поскольку в большинстве случаев мы располагали только "красными" спектрами, центрированными на линию  $H_{\alpha}$ , возможности получения прямых оценок электронной температуры мы не имели. По относительным интенсивностям линий  $[S II] I \lambda 6717 / I \lambda 6731$  определялась величина  $X = 10^2 n_e T_e^{-1/2}$ , которая близка к электронной плотности  $n_e$  в зонах  $[O II]$  излучающего газа. За неимением лучшего, с целью получения количественных оценок, нами были определены содержания ионов  $N^+$  и  $S^+$  для двух значений электронной температуры -  $7500^\circ$  и  $10000^\circ \text{ K}$ . В таблицах 9- II приведены также относитель-

ные интенсивности линий  $[N II] \lambda 6584$  и  $[S II] \lambda \lambda 6717, 6731$  по отношению к интенсивности линии  $H_{\alpha}$  для 50 галактик несейфертовского типа. Отмечается, что поскольку значения  $lg X$  близки к значениям  $lg n_e$  в довольно широком интервале электронных температур, то в зонах  $[O II]$  галактик несейфертовского типа  $lg n_e \approx 3$ . При этом замечается небольшая разница между средними  $n_e$  по галактикам, взятым случайно, с одной стороны, и галактикам Маркаряна и галактикам высокой поверхностной яркости, с другой.

В третьей главе "Физические условия в ядрах пекулярных объектов" приведены содержания ионов и некоторые физические параметры ( $n_e$  и  $T_e$ ) в ядрах сейфертовских галактик и радиогалактик.

В § 1 сделан краткий обзор работ по изучению физических условий в галактиках.

В § 2 рассматриваются зависимости светимости и потока в линиях от показателя цвета для сейфертовских галактик типа NGC 4151. На большем и более однородном с точки зрения классификации галактик Сейферта наблюдательном материале заново были рассмотрены зависимости от показателя цвета  $U - V$  эквивалентных ширин линий  $H_{\beta}$  и  $[O III]$  и их отношения, изученные ранее Аракелянцем. Наблюдательный материал, любезно предоставленный нам Д. В. Видманом, включает сканы 25 сейфертовских галактик типа NGC 4151, полученные на телескопах 2,1 и 4 м обсерваторий Мак Дональд и Кит Пик.

Нами определены эквивалентные ширины линий  $H_{\alpha}, H_{\beta}, [O III] \lambda \lambda 4959, 5007$ . Принимая, что спектральное распределение энергии яд-

ра описывается степенным законом виде  $F_{\nu} = c \nu^{-n}$  и используя исправленные за покраснение в Галактике показатели цвета  $(B - V)_0$ , для каждой галактики был подобран показатель  $n$  и соответственно были вычислены потоки и светимости в линиях  $H_{\beta}$  и  $[O III]$ .

Представленные на рисунках II - III зависимости эквивалентных ширин и потоков в линиях от показателей цвета и абсолютной звездной величины  $M_{U_0}$ , а также коэффициенты регрессии и корреляции, собранные в таблице I3а, б, указывают на то, что чем синее галактика, тем интенсивнее водородные линии. Эквивалентные ширины запрещенных линий, однако, практически не зависят от показателя цвета  $(U - V)_0$ . Рассмотрены также зависимости между светимостями в линиях и мощностью рентгеновского излучения для 10 сейфертовских галактик типа NGC 4151. Полученные результаты свидетельствуют о том, что с ростом рентгеновской светимости возрастает светимость в линиях  $H_{\alpha}, [O III]$  и  $H_{\epsilon} II$ .

Наши данные согласуются с подобными данными других авторов, приведенными в диссертации.

Рассмотренные зависимости интерпретируются как указание на то, что в зонах  $[O III]$  ядер сейфертовских галактик электронные плотности очень высоки ( $10^6 - 10^7 \text{ см}^{-3}$ ).

В § 3 произведены прямые оценки электронных плотностей и электронных температур в ядрах сейфертовских галактик типа NGC 4151. Использованы данные Остерброка для 36 сейфертовских галактик и 5 радиогалактик с широкими линиями. Методом пересечения кривых Ситона в варианте, предложенном Боярчуком и др. определены  $n_e$  и  $T_e$  для зон  $[O III]$  и  $[O II]$ . При этом из-за недостатка наблюдательных данных были сделаны следующие допущения:

химический состав газа принимался в соответствии с моделями I, 2 и 3 Дэвидсона. Степень ионизации водорода принималась 0,5, а кислорода - 0,5 и 0,75. В результате для зон [O III] получилось, что для 50% ионизации кислорода  $\overline{\lg T_e} = 3,89, \sigma^2(\lg T_e) = 0,002$  и  $\overline{\lg n_e} = 6,72, \sigma^2(\lg n_e) = 0,113$ .

Для 75% ионизации кислорода  $\overline{\lg T_e} = 3,95, \sigma^2(\lg T_e) = 0,014$  и  $\overline{\lg n_e} = 6,60$  и  $\sigma^2(\lg n_e) = 0,078$ .

Для определения  $n_e$  и  $T_e$  в зонах [O II] делалось допущение, что  $I \lambda 5755 [N II] = 0,005 I N_B$  и  $I \lambda \lambda (4068 + 4086) [S II] = 0,005 I N_B$ . По полученным результатам вычислялась величина  $X_{\text{выч.}} = 10^{-2} n_e T_e^{-1/2}$  и сравнивалась с той же величиной, непосредственно определяемой по отношению интенсивностей линий [S II]  $\lambda 6717$  и  $\lambda 6731$ . Полученное согласие хорошее, а оценки  $n_e$  и  $T_e$  таковы:  $\overline{\lg T_e} = 4,23, \sigma^2(\lg T_e) = 0,13$  и  $\overline{\lg n_e} = 3,07, \sigma^2(\lg n_e) = 0,76$ .

Для сравнения в таблице 16 приводятся физические характеристики ряда сейфертовских галактик и радиогалактик, определенные ранее другими авторами. Согласие в общем очень хорошее.

В § 4 для 36 сейфертовских галактик типа NGC 4151 и 15 радиогалактик с широкими линиями оценено содержание ионов  $O^0, O^+, O^{++}, N^+, S^+, He^+$  и  $He^{++}$  и на их основе - полное содержание элементов  $H_\alpha, N$  и  $O$ , принимая, что  $\lg T_e = 4$ . Относительные интенсивности линий брались из литературы и исправлялись за покраснение света в Галактике. Поглощение  $S$  определялось по бальмеровскому декременту. Данные представлены в таблицах 18 и 19.

В § 5 рассматриваются физические условия и содержание

ионов в ядрах сейфертовских галактик типа NGC 1068 и радиогалактик с узкими линиями. Используются данные о 23 сейфертовских галактиках и 16 радиогалактиках - в основном результаты Коски.

Значение  $n_e$  и  $T_e$  нами вычислены заново с учетом стратификации излучения. Для зон [O II] получено  $\overline{\lg T_e} = 3,92$   $\sigma^2(\lg T_e) = 0,23$  и  $\overline{\lg n_e} = 4,38, \sigma^2(\lg n_e) = 0,51$ .

Для зон [O III] электронные температуры определялись по относительным интенсивностям линий [O III]  $I \lambda 4363 / I \lambda \lambda (4959 + 5007)$ . При этом соответствующее уравнение решалось для трех значений электронной плотности:  $\lg n_e = 5,5; 6,0$  и  $6,5$ . Соответствующие значения электронных температур  $\lg T_e = 4,14; 4,00$  и  $3,88$  качественно согласуются с более ранними определениями других авторов. На основании этого при  $\lg T_e = 4,00$  определено содержание ионов  $O^0, O^+, O^{++}, N^+, S^+, He^+$  и  $He^{++}$  и оценено полное содержание элементов  $He, N$  и  $O$ . Данные приведены в таблице 20.

Сравнение полученных результатов указывает на то, что сейфертовские галактики типа NGC 4151 и радиогалактики с широкими линиями возможно содержат в среднем больше гелия, и меньше кислорода, азота и серы, чем сейфертовские галактики типа NGC 1068 и радиогалактики с узкими линиями.

Намечается некоторая корреляция между активностью ядра и отношением  $[N II] / H_\alpha$  в том смысле, что активность больше при больших отклонениях отношения  $[N II] / H_\alpha$  от его значения, соответствующего областям H II.

В главе четвертой "Сравнение физических условий в туманностях, ядрах нормальных галактик и пекулярных внегалактических объектов" суммированы все полученные результаты.

В § I применением той же методики определены физические условия и содержание ионов  $H_e^+$ ,  $N^+$ ,  $O^+$  и  $S^+$  для 95 диффузных туманностей нашей и ближайших галактик. Соответствующие спектрофотометрические данные брались из каталога Калера.

Для электронной плотности получены два значения: по линиям  $[O II] \lambda 3726, \lambda 3729$  и  $[S II] \lambda 6717, \lambda 6731$ . Полученные результаты:  $\lg n_e = 2,86, \sigma^2(\lg n_e) = 0,27$  и  $\lg n_e = 2,90, \sigma^2(\lg n_e) = 0,39$ , соответственно, находятся в хорошем взаимном согласии,

В § 2 проведено сравнение физических параметров во всех рассмотренных нами группах объектов.

Широкий диапазон значений отношения  $[N II] / H_\alpha$  объясняется наличием или отсутствием плотных водородных зон, в которых линии азота не светятся. Если это верно, то ядра сейфертовских галактик типа NGC 4151 и радиогалактик с широкими линиями следует рассматривать как объекты с наибольшей массой вещества в зонах  $[O III]$ , а ядра нормальных галактик - как объекты с минимальными зонами  $[O III]$ . Галактики Маркаряна и галактики высокой поверхностной яркости занимают промежуточное положение.

В подтверждение того, что полученные различия в содержании ионов в разных группах объектов реальны, сделана оценка электронной температуры, при которой наблюдаемые интенсивности линий приведут к содержанию элементов, близкому к солнечному. Для сейфертовских галактик типа NGC 4151 и радиогалактик с широкими линиями получено значение  $T_e$  около 5000 К - т.е. аномалия химического состава, по - видимому, реальна.

В § 3 перечислены основные результаты, представленные в дис-

сертации.

Основные результаты, полученные в диссертации, изложены в следующих статьях:

1. Г.Т.Петров, Зависимость интенсивности эмиссионных линий от показателя цвета для сейфертовских галактик типа I. *Астрофизика*, 15, 56, 1979.
2. Г.Т.Петров, Физические условия в ядрах сейфертовских галактик типа I. *Астрофизика*, 15, 383, 1979.
3. Г.Т.Петров, Физические условия в ядрах галактик с эмиссионными линиями. *Письма в АЖ*, 5, 267, 1979.
4. Г.Т.Петров, Химический состав радиогалактик и сейфертовских галактик. Всесоюзная конференция молодых астрофизиков, посвященная семидесятилетию В.А.Амбарцумяна, стр.12, Ереван, 1979.
5. Г.Т.Петров, Содержание ионов и химический состав в ядрах сейфертовских галактик типа I и радиогалактик с широкими линиями. Доклады АН Арм.ССР, 69, 52, 1979.
6. Г.Т.Петров, Содержание ионов и химический состав в ядрах сейфертовских галактик типа 2 и радиогалактик с узкими линиями. Доклады АН Арм.ССР, 70, 46, 1980.