

УДК 524.7

Галактики Вольфа — Райе

Н. Г. Гусева

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680, ГСП, Киев-127, Голосиив

Сделан обзор современного состояния проблемы исследования галактик Вольфа — Райе. Даны также основные характеристики WR-звезд, современные схемы количественных спектральных классификаций различных подтипов WR-звезд, эволюция одиночных и двойных массивных звезд, распределение WR-звезд в галактиках. Представлен обзор последних моделей эволюционного популяционного синтеза, включающих стадии WR-звезд с увеличенным темпом потери массы. На базе этих моделей анализируются наблюдения галактик, полученные на самых крупных современных телескопах, методы и результаты определения количества O- и WR-звезд в WR-галактиках, отношения количества разных подтипов WR-звезд, эффекты металличности при определении $N(WR)/N(O+WR)$ и $N(WC)/N(WN)$, ограничения на начальную функцию масс, определение возраста и длительности вспышки звездообразования, химическое обогащение межзвездной среды, происхождение небулярной эмиссионной линии He II λ 468.6 нм в WR-галактиках.

ГАЛАКТИКИ ВОЛЬФА — РАЙЕ, Гусева Н. Г. — Зроблено огляд сучасного стану проблеми дослідження галактик Вольфа — Райе. Подані також основні характеристики WR-зірок, сучасні схеми кількісних спектральних класифікацій різних підтипів WR-зірок, еволюція одиночних та подвійних масивних зірок, розподіл WR-зірок в галактиках. Подано огляд останніх моделей еволюційного популяційного синтезу, що включають стадії WR-зірок зі збільшеним темпом втрати маси. На базі цих моделей аналізуються спостереження галактик, отримані на найбільших сучасних телескопах, методи і результати визначення кількості O- і WR-зірок у WR-галактиках, відношення кількості різних підтипів WR-зірок, ефекти металічності при визначенні $N(WR)/N(O+WR)$ і $N(WC)/N(WN)$, обмеження на початкову функцію мас, визначення віку і тривалості спалаху зіркоутворення, хімічне збагачення міжзоряного середовища, походження небулярної емісійної лінії He II λ 468.6 нм у WR-галактиках.

WOLF-RAYET GALAXIES, by Guseva N. G. — The modern state of the investigations of the Wolf—Rayet galaxies is reviewed. The basic characteristics of WR stars, up-to-date quantitative schemes of spectral classification of different subtypes of WR stars, the evolution of single and binary massive stars, distribution of WR stars in the galaxies are also discussed. Survey of later

evolutionary synthesis models, including the WR stage with enhancement of mass loss rate, is made. On the basis of up-to-date models we analyze the galaxy observations obtained with the largest telescopes, the methods and results of determinations of the number of O and WR stars in WR galaxies, relative number of different subtypes of WR stars, the metallicity effects on the determination of $N(WR)/N(O+WR)$ and $N(WC)/N(WN)$, constraints on the initial mass function, the age and extension of star formation bursts, the chemical enrichment of interstellar matter, the origin of He II λ 468.6 nm emission line in WR galaxies.

ВВЕДЕНИЕ

Галактики с чертами звезд Вольфа — Райе (WR) в интегральных спектрах известны относительно давно, начиная с открытия таких особенностей в спектре голубой компактной галактики He 2-10 Алленом и др. [5]. Остерброк и Кохен [160], а позже Конти [17] ввели понятие галактик Вольфа — Райе как галактик с наличием широких звездных эмиссионных линий в спектрах. Галактики Вольфа — Райе — это галактики, интегральный спектр которых содержит прямые свидетельства наличия WR-звезд, наиболее часто в виде широких эмиссионных линий ионов высокого возбуждения (обычно He II λ 468.6 нм).

Обнаружение WR-галактик сильно зависит от спектрального разрешения, а также отношения сигнал/шум полученных спектров, расстояния, размеров галактики и положения WR-звезд в ней. На практике часто получают спектры не всей галактики, а отдельных ее частей. Поэтому всякая галактика называется WR-галактикой, если в спектре ее как целого или какой-либо ее части обнаружены WR-особенности, производимые неразрешенным на звезды скоплением или скоплениями. Термин WR-галактики, таким образом, отделяет такие галактики от более близких галактик, где можно наблюдать отдельные WR-звезды.

WR-звезды — это менее массивные эволюционные потомки наиболее массивных звезд большой светимости на стадии горения гелиевого ядра или более поздних стадиях, когда происходит интенсивная потеря массы, наблюдаемая как мощный звездный ветер [116]. Такой высокоскоростной звездный ветер проявляется широкими эмиссионными линиями в спектрах звезд.

По наблюдениям скопления R136a в Большом Магеллановом Облаке (БМО) [35, 36, 70, 135] показано, что широкие эмиссионные линии, в основном He II λ 468.6 нм, наряду с WR-звездами, наблюдаются также в спектрах массивных O-звезд главной последовательности (ГП). Спектры таких звезд представляют собой некий «гибрид» спектров звезд Вольфа — Райе и O-звезд. WR-феномен является следствием высокого темпа потери массы с единицы площади звездной поверхности вне зависимости от ее начальной массы, состава или эволюционного статуса. Возможно, большинство звезд с массами больше $15...20M_{\odot}$ в своей эволюции проходит стадию WR-звезд [70]. Однако звезды самой верхней части ГП с начальной массой больше $(70...80)M_{\odot}$, вероятно, становятся WR-звездами (богатыми водородом звездами азотной последовательности WNL), находясь еще на главной последовательности на стадии горения водорода в ядре (например, наиболее массивные звезды в переходной стадии Of \rightarrow Ofpe/WN9) [9, 73, 155]. Возможно также, что WR-феномен в этих звездах главной последовательности обусловлен увеличением скорости вращения звезды еще на стадии ее формирования, поскольку быстрое вращение сильно увеличивает темп потери массы звездой.

Феномен звезд Вольфа — Райе наблюдается также у центральных звезд планетарных туманностей — эмиссионных звезд меньших масс [37, 114]. Такие звезды предложено обозначать квадратными скобками (например, [WR]) [211], чтобы отличать от собственно WR-звезд I типа населения [83].

Невзирая на обнаруженные черты WR-звезд у наиболее массивных звезд ГП [70] и тот факт, что большую часть времени жизни ($> 75\%$) звезды проводят на ГП, большинство WR-галактик содержат классические проэволюционировавшие WR-звезды на стадии после главной последовательности. WR-галактики не могут состоять только из звезд ГП, все время пополняющихся звездообразованием с постоянным темпом — так как согласно [65] и [174] в подавляющем большинстве WR-галактик обнаружены эмиссионные линии C IV, принадлежащие WC-звездам, сильно проэволюционировавшим и короткоживущим звездам.

В данной работе представлены результаты исследований WR-галактик и используемые в этих исследованиях свойства WR-звезд. В первой главе даны характеристики индивидуальных WR-звезд, во второй — модели эволюции массивных звезд и эволюционного популяционного синтеза, в третьей главе представлены методы и результаты определения количества O- и WR-звезд, отношения количества углеродных и азотных WR-звезд в WR-галактиках; исследованы эффекты металличности, анализируются определения возраста и продолжительности вспышки звездообразования, ограничения на начальную функцию масс, взаимодействие WR-звезд с межзвездной средой, а также представлены результаты исследования происхождения небулярной линии He II λ 468.6 нм в WR-галактиках. В заключении даны основные выводы работы.

1. WR-ЗВЕЗДЫ

Исследование отдельных WR-звезд и их статистических зависимостей служит базой для понимания класса объектов, называемых WR-галактиками.

Однако отдельные WR-звезды наблюдались только в нашей Галактике [25, 30—32, 46, 68, 99, 128, 203], Магеллановых Облаках [9, 20, 26, 27, 29, 151, 169, 190, 215] и некоторых галактиках Местной Группы галактик: M31 и M33 [19, 33, 39, 129—131, 133, 182, 187, 218], IC 10 [127], NGC 6822, IC 1613, NGC 300 и NGC 55 [11, 133], NGC 2403 [43].

Спектральные, фотометрические и поляриметрические наблюдения дают возможность определить фундаментальные параметры наиболее массивных звезд. Температура, светимость, масса, расстояние, химический состав, темп потери массы, эволюционный статус, двойственность получены на базе наблюдений в диапазоне длин волн от гамма-, рентгеновского и далекого УФ- до радиодиапазона при использовании моделей атмосфер с учетом звездного ветра, отклонения от ЛТР, эффектов перемешивания вещества в звезде (конвективное перемешивание — радиальное, меридиональное), вращения звезд [107], а также эффекта бленкетирования, т. е. эффекта, связанного с наличием в УФ-области спектра частотола не очень сильных абсорбционных линий, приводящего к понижению теоретического уровня звездного континуума.

WR-звезды имеют необычный химический состав по сравнению с O-звездами. Как правило, это обогащенные азотом и гелием звезды азотной последовательности (WN-звезды), а также обогащенные углеродом и гелием звезды углеродной последовательности (WC-звезды).

Развитая в последнее десятилетие техника выделения WR-звезд с помощью узкополосной фотометрии с фильтрами шириной около 5 нм,

центрированных на основных линиях, характеризующих разные подтипы WR-звезд (например, He II λ 468.6, C III λ 465.0 нм) позволяет с существенно большей полнотой выделять отдельные WR-звезды всех спектральных типов в галактиках Местной Группы [43, 133]. Новые обзоры [133] показали, что предшествующие фотографические обзоры имели полноту около 50 %, да и то только для звезд WN-подтипов. В этой связи особенно важным становится использование не прямых методов исследования массивного населения галактик: по прямым доказательствам наличия потомков массивных звезд в интегральных спектрах галактик, а также по наблюдению эффектов взаимодействия массивных звезд, включающих и WR-звезды, с окружающей межзвездной средой.

Обладая мощной эмиссией в лаймановском континууме и сильным звездным ветром, WR-звезды вместе с O-звездами ионизируют межзвездную среду, создавая HII-области. Интенсивность небулярных рекомбинационных линий дает не прямую оценку числа возбуждающих OB+WR-звезд. Видимым проявлением взаимодействия массивных звезд с межзвездной средой являются кольцевые туманности, наблюдаемые вокруг некоторых WR-звезд, а также аркоподобные структуры, сверхгигантские оболочки [82, 154], расширяющиеся сверхпузыри, наблюдаемые в галактиках с активным звездообразованием [84, 162].

Класс задач, связанных с непрямым исследованием массивных звезд в галактиках, в том числе WR-звезд в WR-галактиках — это оценка состава массивного звездного населения (определения количества O- и WR-звезд, в том числе WN- и WC-звезд), зависимость количества этих звезд от металличности и возраста, определение возраста области звездообразования, длительности вспышки звездообразования, наблюдательные ограничения на верхний и нижний пределы масс M_{up} и M_{low} начальной функции масс (НФМ), наклон НФМ, влияние поглощения [7, 24, 123, 142, 172, 174, 204].

В последнее время наблюдается сближение этих двух традиционно разных областей «звездной» и «галактической» астрофизики.

Развиты «стандартные» модели WR-звезд со сферически симметричным и однородным звездным ветром [67, 75, 76, 152, 156]. Однако подтвержденная стохастическая переменность профилей линий [119] заставила пересмотреть «стандартные» модели WR-звезд и создать новые модели в предположении не-ЛТР-переноса, бленкетирования линий, рассеяния электронов в крыльях линий и клочковатости структуры ветра, описываемого фактором заполнения f [77]. Темп потери массы максимален при однородном ветре: $\dot{M} \approx 10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$, когда $f = 1$. При $f < 1$ (f изменяется в пределах 0.04...–0.25), \dot{M} уменьшается до $(1.5...3.7) \cdot 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$ (данные оптических, ИК- и радионаблюдений [153]), что существенно ниже величин, полученных из оптических и радионаблюдений для стандартных моделей с однородным ветром.

1.1. СПЕКТРАЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ WR-ЗВЕЗД

Поскольку основные спектральные особенности WR-звезд — яркие, широкие эмиссионные линии — возникают не в атмосферах этих звезд, а в быстром плотном звездном ветре, основой всякой спектральной классификации были качественные сравнения соотношений интенсивностей наиболее сильных линий, возникающих в звездном ветре, одного или двух элементов на разных стадиях ионизации. Это классификация по степени ионизации, зависящей от температуры звезды (в звездном ветре и фотосфере). В звездах азотной последовательности — это наличие и относительная интенсивность линий азота N III, N IV, N V, а также линий He I и He II, а в

звездах углеродной и кислородной последовательностей — С II, С III, С IV, а также О V и О VI соответственно. Степень ионизации, а значит и температура, увеличивается от наиболее поздних WN9-звезд до WN2, в углеродной последовательности — от WC9 до WC4 и в кислородной последовательности — от WO4(5) до WO1 [21, 79, 184, 190].

В последнее время с появлением линейных детекторов разработаны количественные схемы классификации WR-звезд: трехмерная количественная классификация WN-звезд [192] и количественная классификация WC-звезд [191]. Трехмерная классификация WN-звезд (от WN2 до WN9) [192] основана так же, как и прежние [79] на: 1) ионизационной последовательности, 2) разделении WN-звезд на два типа, со слабыми узкими и сильными широкими линиями (количественно первый критерий выполнен по отношениям линий (He II λ 541.1)/(He I λ 587.5), а второй — по ширине линии He II λ 468.6 нм и эквивалентной ширине W линии He II λ 541.1 нм), 3) содержании водорода. Все WR-звезды имеют дефицит водорода по сравнению с Солнцем и его массовая доля β_H для большинства WN-звезд составляет 10—30 % [69]. Количественно третий критерий выполняется по измерению пикеринговского декремента линий He II. Детальная количественная классификация выполнена на основании наблюдательных и модельных исследований большинства известных до настоящего времени WN-звезд Галактики [68, 212] и частично WN-звезд в БМО [10]. При практически одинаковой металличности наблюдаются явные различия в содержании водорода. Насколько эти различия существенны для малых Z , пока неясно.

Для самых поздних типов WN-последовательности (WN9—WN11) также развита количественная классификация [186].

Количественная классификация для WC4—WC9 и WO1—WO5 звезд была развита соответственно в [96] и [191] и является однопараметрической, использующей только степень возбуждения. В работе [28] эта схема была исследована для звезд WC4—WC11, которые классифицируются по W и отношениям интенсивностей линий (C IV λ 580.8)/(C III λ 569.6), и для звезд WO4—WO1 с использованием соотношения (O IV λ 381.8)/(O V λ 559.0). Схема содержит одновременные критерии для классификации WC-звезд, центральных звезд планетарных туманностей со слабыми эмиссионными линиями и O-звезд. Таким образом, по степени увеличения возбуждения (ионизации), а значит и температуры, можно ранжировать все WR-звезды:

$$\text{WN11} \rightarrow \dots \rightarrow \text{WN2}; \text{WC11} \rightarrow \dots \rightarrow \text{WC4} \rightarrow \text{WO4(5)} \rightarrow \dots \rightarrow \text{WO1},$$

помня при этом, что WN-последовательность разбивается на «слабую» и «сильную» ветки с наличием линий водорода и без.

Вне этих классификационных схем остаются WN-звезды с необычными проявлениями углеродных линий (WN/C-звезды). Первые предположения о том, что это могут быть двойные системы с WN+WC-компонентами [20, 132], маловероятны из-за не вписывающихся в эту схему соотношений интенсивностей линий (C IV λ 580.8)/(C III λ 569.6)/(C IV λ 464.0) [163].

1.2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ WR-ЗВЕЗД В ГАЛАКТИКАХ

Только в нашей и ближайших к нам галактиках Местной группы можно наблюдать индивидуальные WR-звезды, исследуя их основные характеристики (абсолютные величины, цвета, избытки цветов) и распределение подтипов WR-звезд в галактиках (с галактоцентрическим расстоянием). Основные выводы этих исследований основаны на изучении звезд в нашей

галактике, БМО и Малом Магеллановом Облаке (ММО). Медер [117], Хидаят [74] и Мейлан [144] в начале 1980-х гг. инициировали изучение распределения разных подтипов WR-звезд в Галактике и БМО. Основные исследования для галактик Местной группы выполнены в работах [18, 22, 188, 212]. Было подтверждено найденное в работах Смит в конце 1960-х — начале 1970-х гг. изменение количества WR-звезд по отношению ко всем O-звездам в разных галактиках с активным звездообразованием зависимостью от металличности ($N(WR)/N(O)=0.01...0.2$). Найдена также концентрация поздних WC-звезд в направлении центра Галактики. Медер, Лекю, Азопарди [117] предложили объяснить наблюдаемое различие в частоте WR-звезд зависимостью между локальной металличностью и потерей массы.

2. ЭВОЛЮЦИЯ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД И МОДЕЛИ ПОПУЛЯЦИОННОГО СИНТЕЗА

Эволюция массивных звезд, включающая эволюцию одиночных и двойных звезд, а также основанный на этих расчетах метод эволюционного популяционного синтеза служат базой в изучении WR-населения в WR-галактиках.

2.1. ЭВОЛЮЦИЯ ОДИНОЧНЫХ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД

Конти [16] в 1976 г. впервые предложил объяснить существование широких эмиссионных линий в WR-звездах истечением вещества в виде звездного ветра, движимого лучистым давлением. Эта схема получила название «сценария Конти». Основные его положения представлены современными количественными расчетами [116].

Эволюционные модели массивных звезд с интенсивной потерей массы показывают, что необычный химический состав WR-звезд по сравнению с O- и B-звездами является результатом перемешивания и выноса на поверхность звезды продуктов горения в ядре звезды с предварительной потерей массы звездой.

Расчитаны сетки моделей эволюционных треков или изохрон, представляющие массы, светимости, эффективные температуры $T_{\text{эф}}$, содержания различных элементов, время жизни, и другие параметры для звезд разных масс.

Общая схема эволюции наиболее массивных звезд солнечной металличности заключается в следующем: наиболее массивные звезды с $M \approx 85M_{\odot}$ рождаются как звезды O3V с $T_{\text{эф}} = 50000$ К и проводят около 2.8 млн лет на ГП, т. е. на стадии горения водорода с темпом потери массы $\dot{M} \approx \approx 10^{-5}M_{\odot}/\text{год}$. Таким образом, к концу стадии горения водорода в ядре звезда теряет 30 % первоначальной массы и при постоянной болометрической светимости $M_{\text{bol}} = -10.3...-10.6$ сходит с главной последовательности и охлаждается до $T_{\text{эф}} = 28000$ К [181], попадая в полосу нестабильности (luminous blue variable, LBV-фаза). И хотя эта фаза очень короткая, порядка 10^4 лет, в эпизодических взрывах теряется около $10M_{\odot}$. После LBV-фазы и сброса внешних слоев звезда идентифицируется как WR-звезда WN-типа, и на этой стадии \dot{M} увеличивается примерно в 10 раз. В результате дальнейшей потери массы звездой на стадии горения гелия в ядре и перемешивания она превращается в звезду WC-типа [125].

Модели предсказывают существование звезд даже больших масс ($> 120 M_{\odot}$) с существенно большими темпами потери массы и перемешивания, так что звезда входит в WN-фазу, находясь еще на стадии горения водорода в ядре, что нашло недавнее подтверждение для скопления R136a в 30 Dor БМО [36, 70, 135], где обнаружены звезды с массами

(120...150) M_{\odot} и возрастом порядка 1 млн лет.

Для звезд меньших масс предшественниками WR-звезд являются не LBV звезды, а красные сверхгиганты (КСГ) [78]. Ниже некоторого предела масс (около $40M_{\odot}$), звезды не достигают WC-стадии, заканчивая стадию горения гелия все еще оставаясь WN-звездами.

Звезды с массой $M \leq 20M_{\odot}$ никогда не достигают WR-стадии, оставаясь голубыми и красными сверхгигантами. Эта схема эволюции одиночных WR-звезд верна только для звезд с солнечным содержанием тяжелых элементов $Z = 0.020$.

В последних работах [31] по изучению WR-звезд в нашей Галактике и WNL-звезд в БМО авторы [29] получили эволюционную схему, в которой наиболее массивные O-звезды (за исключением звезд с массами (120...150) M_{\odot} , найденных в туманности 30 Dor) эволюционируют через стадии O3 If \rightarrow WN6 \rightarrow WN6-7 без промежуточной LBV-фазы. И наоборот, звезды с более низкой начальной массой эволюционируют через LBV-фазу, проходя стадию WN9—WN11, а затем WN8.

Поскольку темп потери массы тесно связан с металличностью, эволюционные треки для звезд с металличностью, не равной солнечной, существенно отличны от описанных ранее. При большей металличности непрозрачность газа становится больше во внешних слоях звездных атмосфер, и лучистое давление также увеличивается, что приводит к большей потере массы в массивных O-звездах через более интенсивный звездный ветер. При малой металличности нижний предел масс звезд, достигающих стадии WR-звезд, увеличивается, и, как следствие, количество WR-звезд по отношению к полному количеству массивных звезд ($N(WR)/N(O+WR)$) существенно уменьшается [115]. Для металличностей, больших солнечной, — картина обратная. Поскольку теряемую массу движет радиационное давление через ионизацию линий металлов (высокой степени ионизации), принятый темп потери массы, играющий важную роль в эволюции звезды, зависит от светимости и содержания тяжелых элементов $\dot{M} \propto L^{0.7} Z^{0.5}$ [34, 52].

Форма эволюционных треков, время жизни массивных звезд на различных стадиях эволюции (главная последовательность, сверхгиганты, LBV), количество WR-звезд, отношение $N(WC)/N(WN)$, а также вклад массивных звезд в обогащение межзвездной среды вновь синтезированными элементами, — все это имеет сильную зависимость от принятого темпа потери массы звездой. Существующие наблюдательные данные для \dot{M} (по наблюдаемым вариациям орбитальных периодов в двойных системах) не обладают достаточной точностью, особенно для верхней части диаграммы ГР, где эффекты звездного ветра наиболее важны. Для разных эволюционных фаз (горение водорода в ядре, фаза слоевого горения водорода, горения гелия в ядре звезды) принимаются разные скорости потери массы звездой, основанные на классических расчетах [34], а также на детальных исследованиях отдельных звезд с современными инструментами, включающими IRAS, HST, «Hipparcos».

В последних моделях по исследованию WR-населения [143, 197] используются значения темпа потери массы около $8 \cdot 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$ для WNL-звезд, т. е. в два раза больше по сравнению со стандартным [34]. Модели с высоким темпом потери массы хорошо согласуются с наблюдаемой статистикой массивных звезд как в областях с постоянным темпом звездообразованием [118], так и в областях с кратковременной вспышкой звездообразования [65]. Только в рамках таких моделей с высоким темпом потери массы удается предсказать длительное существование WC-фазы и объяснить нали-

чие существенного количества WC-звезд в сценарии кратковременной вспышки звездообразования при очень низких металличностях [65, 174, 180]. Однако предположение об однородном звездном ветре (без включения клочковатости) может приводить к переоценке темпа потери массы примерно в два раза [67].

Для данной металличности модели с бóльшим темпом потери массы дают более низкие величины минимальной массы звезд, эволюционирующих через стадию WR, а значит бóльшую величину $N(WR)/N(O)$ и $N(WC)/N(WN)$ при интегрировании по спектру масс.

2.2. ЭВОЛЮЦИЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Высокоскоростной плотный звездный ветер от O- и WR-звезд обеспечивает тепловое ИК-, радиоизлучение, и слабую рентгеновскую светимость порядка $L_x/L_{bol} \approx 10^{-7}$. Обнаружение переменного нетеплового радиоизлучения, а также избытков в рентгеновской светимости отдельных WR-звезд привело к развитию теории двойных звезд с эффектами взаимодействия неоднородного клочковатого звездного ветра от двух компонентов WR+OB и WR+c (c — компактный спутник) [4, 213].

После серии работ по изучению двойных звезд с WR-компонентами (см., например, [124]), серьезным шагом в исследовании WR-звезд, в частности надежного определения масс звезд, стало изучение поляризации излучения двойных звезд [42, 148, 149]. В результате получены массы WR-звезд углеродной и азотной последовательности: $M_{WN} = (6...40)M_{\odot}$, $M_{WC} = (5...20)M_{\odot}$.

В последних моделях WR-галактик учитываются эффекты эволюции массивных звезд в двойных системах [118, 180, 208]. В первом приближении эволюцию широких двойных систем с WR-компонентами можно моделировать как эволюцию одиночных звезд. Эволюцию первичных массивных компонентов в тесных двойных системах с массами первичных компонентов $M \geq (40...50)M_{\odot}$ также можно рассматривать без учета обмена массами между компонентами, т. е. так же, как эволюцию одиночных звезд [207, 180] (первичная звезда в классической схеме эволюции двойных звезд определяется как звезда, которая первоначально имела бóльшую массу (бóльшую светимость)). Только для начальных масс первичных компонентов тесных двойных систем с массами $(9...40)M_{\odot}$ эволюция рассчитывается с учетом обмена массами между компонентами путем перетекания вещества из одной полости Роша в другую через внутреннюю точку Лагранжа. Возможность последующего образования WR-звезды в тесных двойных системах из вторичного компонента принимается равной нулю [180]. Звезды с массами меньше $20M_{\odot}$ могут становиться WR-звездами только в результате перетекания вещества из одной полости Роша в другую через внутреннюю точку Лагранжа в тесных двойных системах и/или через бóльшую потерю массы на протяжении стадии КСГ [110]. При таких упрощающих предположениях f остается свободным параметром модели (f — часть всех массивных звезд, эволюционирующих с перетеканием вещества из одной полости Роша в другую через внутреннюю точку Лагранжа) и определяется из сравнения модельно полученных интенсивностей, эквивалентных ширин WR-звезд и статистики WR-звезд с наблюдениями (в моделях [180] принимается $f = 0.2$).

В работе [118] показано, что для областей с постоянным звездообразованием и содержанием тяжелых элементов от $0.1Z_{\odot}$ (ММО) до $1.75Z_{\odot}$ (M31) можно получить согласие с наблюдениями, если только несколько процен-

тов O-звезд становятся WR-звездами, преимущественно WNE-подтипов в результате перетекания вещества из одной полости Роша в другую через внутреннюю точку Лагранжа. Этот процент, однако, может быть достаточно большим (до 100 %) при самых низких металличностях [118].

В БМО и ММО найдено большое количество WNE-звезд, которое не удается объяснить моделями с учетом эволюции только одиночных звезд [115]. Большое относительное количество WNE-звезд можно получить только с учетом эволюции массивных звезд относительно малых масс в тесных двойных системах [115, 118, 150]. Учет формирования WR-звезд в тесных двойных системах при моделировании мгновенной вспышки звездообразования увеличивает период существования WR-фазы до 11—13 млн лет (и даже до 15—20 млн лет, если включен механизм образования WR-звезд в тесных двойных системах из вторичного компонента) по сравнению с 5—7 млн лет в моделях с одиночными звездами, причем после 7—8 млн лет доминируют WNE-звезды [180]. Это происходит из-за того, что предшественниками WR-звезд могут быть звезды с массами, существенно меньшими, чем предел масс звезд, которые эволюционируют как одиночные WR-звезды [14, 210].

Длительность WR-фазы при включении канала формирования WR-звезд через тесные двойные системы не зависит существенно от металличности, в противоположность результатам, полученным только по одиночным звездам.

Однако до сих пор эволюция WR-звезд в двойных системах еще недостаточно разработана и результаты не дают такой точности, как для одиночных массивных звезд.

2.3. МОДЕЛИ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПОПУЛЯЦИОННОГО СИНТЕЗА

Используя модели атмосфер звезд разных масс и эволюционные треки, задавая наклон НФМ, верхний и нижний предел масс НФМ и интегрируя по заданному спектру масс с нормировкой на $1M_{\odot}$, можно получить изменение со временем основных интегральных параметров заданного таким способом звездного скопления. Для корректного учета WR-фазы в эволюции массивных звезд необходимо учитывать:

1) темп потери массы для звезды на стадии Вольфа — Райе на один-два порядка величины больше, чем для O-звезд [50];

2) химическую эволюцию WR-звезд, когда химические элементы He, C, N, O, образующиеся в ядерных реакциях, становятся преобладающими на поверхности звезд;

3) время задержки в образовании WR-звезд после образования O-звезд, которое зависит от принятых в моделях механизмов удаления газа с поверхности звезды — радиационно/пульсационный звездный ветер [16], или гравитационный (во взаимодействующих двойных системах) [208].

Эти свойства служат основой для моделирования WR-населения в скоплениях. Такие модели эволюционного популяционного синтеза предсказывают, как образовавшиеся в звездном ветре WR-звезд линии (такие как He II λ 468.6 нм или C IV λ 580.8 нм) изменяются со временем.

Первые модельные расчеты количественного описания WR-населения в областях звездообразования были проведены в [7]. Сравнение этих моделей с наблюдениями позволило сделать основные выводы, полностью подтвержденные в дальнейшем: 1) интенсивность WR-линий по отношению к H_{β} в интегральных спектрах увеличивается с увеличением массовой доли тяжелых элементов Z и 2) отношения $N(WR)/N(O)$ свидетельствуют о короткой шкале периода звездообразования.

Современные полуэмпирические эволюционные модели популяционно-го синтеза, описывающие WR-фазу в областях звездообразования [51, 100, 111, 142, 180], используют последние эволюционные звездные треки (изохроны), теоретические звездные спектры, полученные из моделей звездных атмосфер, рассчитанные с учетом отклонений от ЛТР и эффектов бленкетирования линий, с включением звездного ветра, а также наблюдаемые интенсивности эмиссионных линий WR-звезд разных подтипов [194]. К построенному таким образом звездному континууму добавляется рассчитанный небулярный континуум для сравнения с реально наблюдаемым спектром областей звездообразования [64, 65, 154, 180]. Широко используемые модели атмосфер Куруча [105] с ЛТР-приближением и учетом эффекта бленкетирования не учитывали звездный ветер массивных звезд, поэтому плохо описывали верхнюю часть НФМ, наиболее важную для исследования WR-галактик.

В моделях популяционного синтеза [14, 122] использованы наблюдаемые интенсивности голубой и красной особенностей («blue» and «red» bump) близ $\lambda = 465.0$ нм и $\lambda = 580.8$ нм в WR-звездах. Однако в таких моделях невозможно учесть вклад разных подтипов WR-звезд, так как WR-особенность в области $\lambda \approx 465.0$ нм состоит из линий, принадлежащих разным подтипам WR-звезд, а также небулярным эмиссионным линиям. В работе [100] впервые созданы модели популяционного синтеза, в которых используются отдельные линии He II $\lambda 468.6$ нм и углерода. В моделях популяционного синтеза [51, 111, 142] детально исследованы эффекты влияния изменения темпа звездообразования, различных параметров НФМ (наклона, M_{up} , M_{low}), возраста и металличности на массивное звездное население в областях звездообразования.

Абсолютные потоки в отдельных эмиссионных линиях, полученные из спектральных наблюдений высокого качества (для WN-звезд — работы [26, 192], для O3f/WN-звезд — [35], для WC/WO-звезд — [190, 191]) позволили создать новые модели популяционного синтеза [180], определяющие параметры процесса звездообразования (возраст, протяженность, НФМ и др.), а также описывающие интенсивности и эквивалентные ширины W основных линий, отношение количества звезд $N(\text{WR})/N(\text{O})$, $N(\text{WC})/N(\text{WN})$ в зависимости от металличности и от возраста вспышки звездообразования.

В настоящий момент несколько основных научных групп рассчитывают модели эволюционного популяционного синтеза для исследования WR-галактик: это группа из Балтимора (Лейзерер с сотрудниками [110, 111]), мадридская группа (Червиньо и Мас Хесс [13, 14]) и тулузская группа (Шарер [172—180]), которые используют различные степени вклада одиночных и двойных звезд (от 0 до 50 %) в образование WR-звезд, разные модели атмосфер [105, 177, 183], и женеvские эволюционные треки. В результате основные параметры, используемые для сравнения с наблюдениями: $N(\text{WR})/N(\text{O})$, $N(\text{WC})/N(\text{WN})$, интенсивность и эквивалентные ширины наиболее сильных WR-линий в УФ- и видимом диапазоне (He II $\lambda 164.0$, N III $\lambda 464.0$, C III $\lambda 465.0$, He II $\lambda 468.6$, He II + H β $\lambda 486.1$, He II $\lambda 541.2$, C III $\lambda 569.6$, C IV $\lambda 580.8$, He II + H α $\lambda 656.0$ нм) различаются в разных моделях в 2-3 раза [110].

Детальный анализ областей звездообразования необходим для тестирования моделей массивных звезд. Это особенно важно для областей с экстремально низким содержанием тяжелых элементов $Z < 1/20Z_{\odot}$, наблюдаемых в ГКГ [157, 179].

3. WR-ГАЛАКТИКИ

Из определения WR-галактик следует, что они принадлежат к широкому и морфологически весьма неоднородному классу объектов с активными процессами звездообразования от маломассивных неправильных галактик, голубых компактных галактик (ГКГ) до массивных спиралей с активными процессами звездообразования в центральных областях галактик (SB) [158] и взаимодействующих галактик ярких в далеком ИК-диапазоне — IRAS-галактик [6, 178].

Наличие активных процессов звездообразования в галактике проявляется в наблюдаемых сильных узких небулярных эмиссионных рекомбинационных линиях водорода и гелия, возникающих в ионизованном газе и предполагающих наличие большого количества горячих O-звезд, ионизирующих межзвездную среду. Таким образом, традиционные WR-галактики (НП-галактики, галактики с эмиссионными линиями, SB галактики) имеют фотоионизационный спектр звездной природы с прямым свидетельством наличия массивных звезд в галактиках — широких эмиссионных линий WR-звезд в видимой области спектра и абсорбционных линий O-звезд (часто с профилями P Cygni) в УФ-области спектра. Такое излучение накладывается на подложку старого звездного населения галактики, в которой наблюдается область звездообразования. Степень вклада излучения галактики в излучение текущей вспышки звездообразования может быть различной. Предельным случаем являются ГКГ с наиболее низким содержанием тяжелых элементов, в котором старое звездное население не обнаружено [89]. По-видимому, голубые компактные галактики с металличностью $Z < 1/20Z_{\odot}$ переживают свою первую или одну из первых вспышек звездообразования и являются абсолютно молодыми галактиками с возрастом от $(3...4) \cdot 10^6$ до 10^8 лет [162].

Типичный возраст вспышки звездообразования в WR-галактиках составляет менее 10 млн лет [180] при наличии звезд с начальными массами $M_{ini} > 20 M_{\odot}$ [116].

Изучение звездного населения в звездных скоплениях и сверхскоплениях в WR-галактиках [23, 145] имеет значение для усовершенствования моделей эволюции массивных звезд, в том числе для экстремально низких металличностей.

Однако в последнее время WR-особенности обнаружены также в галактиках со сверхвысокой светимостью в дальнем ИК-диапазоне [6], галактиках с активными ядрами (AGN) [71] и так называемых LINER-галактиках (эмиссионных галактиках низкой степени возбуждения) [45]. В последние годы получены теоретические и наблюдательные доказательства важной роли процессов звездообразования в феномене сейфертовских галактик [15, 164]. Использование популяционного синтеза с включением WR-стадии дает возможность объяснить соотношение УФ- и ИК-континуумов в ядрах Sy2-галактик звездной природой. Наряду с традиционным объяснением природы AGN аккрецией вещества на релятивистский объект, наблюдение WR-феномена в этих объектах свидетельствует о возможной звездообразовательной природе явлений AGN [71].

В областях с металличностью, близкой к металличности Солнца, а также в небольших пределах металличности выше солнечной (внутренние области Галактики) и ниже солнечной (БМО, ММО и других галактиках Местной Группы Галактик — МГГ), свойства отдельных WR-звезд достаточно хорошо изучены как в наблюдательном аспекте, так и по результатам моделирования атмосфер и эволюции массивных звезд.

Однако ситуация оказывается существенно менее изученной при пере-

ходе к галактикам с экстремально низкой металличностью, таким как ГКГ. Прямых наблюдений WR-звезд в таких галактиках с содержанием тяжелых элементов $Z = (1/10 \dots 1/50) Z_{\odot}$ не существует. В последнее время появились работы по моделированию эволюции скоплений массивных звезд с очень низкой металличностью. Однако из теории следует, что в галактиках с экстремально низкой металличностью количество WR-звезд по отношению к наиболее массивным звездам стремится к нулю. В этой связи наиболее интересным результатом оказалось обнаружение WR-звезд в голубых компактных галактиках с рекордно малым содержанием тяжелых элементов (I Zw 18 [38, 86, 108] и SBS 0335-052 [84, 162]).

С другой стороны, накоплено большое количество наблюдений массивных галактик, центральных областей массивных галактик с активным звездообразованием, галактик с активными ядрами, галактик, со сверхвысокой светимостью в дальнем ИК-диапазоне [72], [66]. Металличность в таких галактиках превышает солнечную в 2–3 раза, а в квазарах — в 10 раз. Невзирая на растущее количество наблюдательных данных, свойства и эволюция звезд большой массы, их начальная функция масс в богатом тяжелыми элементами окружении все еще плохо известны.

3.1. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ WR-ЗВЕЗД В WR-ГАЛАКТИКАХ

Первый систематический поиск WR-особенностей (широких эмиссионных избытков в области длин волн $\lambda = 460 \dots 470$ нм) в интегральных спектрах эмиссионных галактик был проведен в работе [102]. Большинство WR-галактик обнаружены по эмиссионным избыткам в области так называемого «blue bump» (WR-особенности) ($\lambda \approx 465.0$ нм), состоящего из неразрешенной бленды эмиссионных линий N III $\lambda 464.0$, C III $\lambda 465.0$, C IV $\lambda 465.8$, He II $\lambda 468.6$ нм [60].

В 1991 г. в работе [185] было найдено, что необходимым условием наличия WR-особенностей является значение содержания кислорода $12 + \lg(O/H) > 7.9$. При этом в WR-галактиках были обнаружены WR-звезды исключительно WNL-подтипов [58, 104], и очень редко WCE.

Однако модели эволюционного популяционного синтеза предсказывают существенную долю WR-галактик, в которых доминируют WC-звезды (около 30 % для массовой доли тяжелых элементов $1/5 Z_{\odot} \leq Z \leq 1 Z_{\odot}$ и от 0 до 50 % в зависимости от принятой эволюционной модели и металличности), излучающие в основном в линиях C III/C IV $\lambda 465.0$ и C IV $\lambda 580.8$ нм [142, 173].

В 1997 г. было известно около 70 WR-галактик, и только в нескольких были обнаружены WC-особенности (C IV $\lambda 580.8$ нм): He 2-10 [204], NGC 4214 [122, 170], IC 131 [214], NGC 2363 [59, 94, 95], NGC 5253 [173]. В работе [174] найдены WC-звезды в пяти WR-галактиках: He2-10, NGC 3049, NGC 3125, NGC 5253 и Tol 89 по линиям C IV $\lambda 580.8$ нм. Формы некоторых широких бленд в области $\lambda \approx 465.0$ нм [170] предполагали наличие WC-звезд. В одной галактике NGC 3049 [174], с металличностью, слегка превышающей солнечную, обнаружена линия C III $\lambda 569.6$ нм.

Поскольку эмиссия C IV $\lambda 580.8$ нм обычно слабее, чем WR-особенность в голубой части спектра, только с вводом в строй телескопов нового поколения (4-, 8-, 10-м и космических) и обеспечением высокого качества наблюдательного материала (отношение сигнал/шум 20—30 и даже 40) удалось разрешить имеющиеся разногласия. Ситуация резко изменилась после получения спектров большой однородной выборки голубых компактных галактик [62, 64, 65, 94, 95, 178].

В работе [94] из 15 WR-галактик яркие WC-особенности обнаружены у

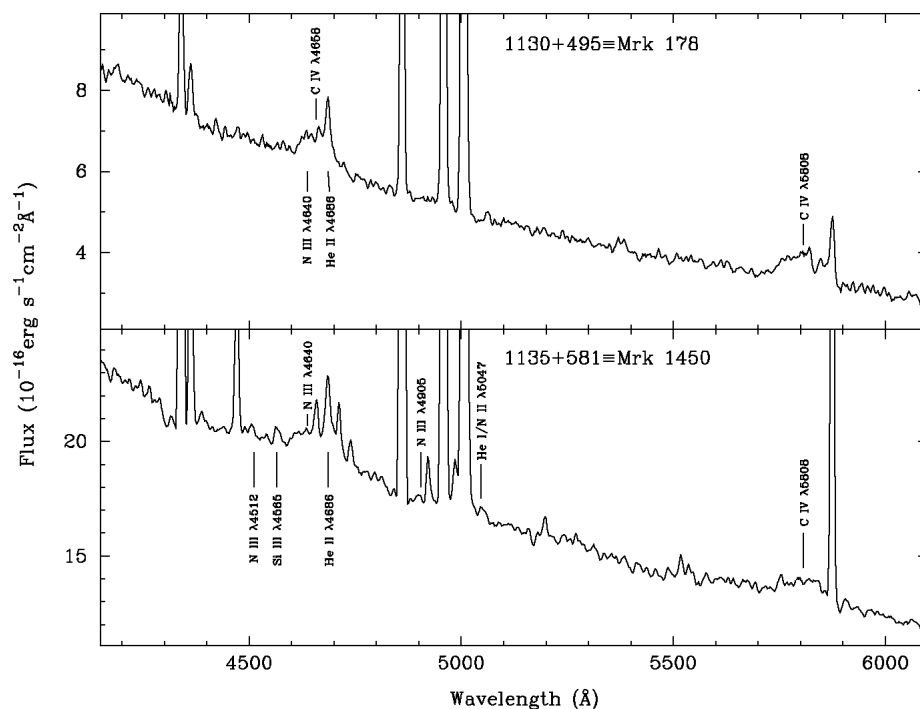


Рис. 1. Спектры галактик Mrk 178 и Mrk 1450 с особенностями звезд Вольфа — Райе, полученные соответственно на 2.1-м и 4-м телескопах обсерватории Китт Пик (США) [65]

пяти галактик, что хорошо совпало с модельными расчетами, дающими 30 % WR-галактик, у которых доминируют WC-звезды. В работе [65] в 33 галактиках (из полной выборки 39 WR-галактик) измерены абсолютные потоки и светимости в линиях как голубой, так и красной WR-особенностях. В большинстве случаев [65] WR-особенность в голубой области спектра отождествляется с отдельными линиями: N V $\lambda\lambda$ 460.5, 462.0, N III $\lambda\lambda$ 463.4, 464.0, C III/C IV $\lambda\lambda$ 465.0, 465.8, He II λ 468.6 нм. В этих линиях излучают в основном поздние WNL- и ранние WCE-звезды, хотя может быть и некоторый вклад ранних WNE-звезд [180] (WNE-звезды излучают в линиях N V $\lambda\lambda$ 460.5, 462.0, C IV λ 465.8, He II λ 468.6 и C IV λ 580.8 нм). На эти широкие линии накладываются более узкие небулярные эмиссионные линии [Fe III] λ 465.8, He II λ 468.6, He I + [Ar IV] λ 471.1 и [Ar IV] λ 474.0 нм. В ряде WR-галактик измерены интенсивности линий C III λ 569.6 нм, принадлежащие WCL-звездам (WC7—WC9), а также интенсивности линий C II λ 426.7 нм, которые раньше наблюдались только у центральных звезд планетарных туманностей. Эти звезды классифицировались как [WC10]—[WC12] [112—114]. Ряд галактик в работе [65] также демонстрирует наличие очень поздних WNL-звезд (WN9—WN11) в эмиссионных линиях N II $\lambda\lambda$ 567.9, 574.7—6.7, N III $\lambda\lambda$ 463.4, 464.0 нм. Впервые очень поздние WNL- и WCL-звезды (по линиям N II $\lambda\lambda$ 567.9, 574.7—6.7 нм и C III λ 569.6 нм) обнаружены в галактике Tol 9 [104]. Во многих галактиках, исследованных в работе [65], обнаружены линии N III λ 451.2 нм и Si III λ 456.5 нм, которые никогда раньше не наблюдались в WR-галактиках.

По данным последнего наиболее полного компилятивного каталога WR-галактик [175] среди всех WR-галактик, содержащих WN-звезды, чуть менее половины содержат также и WC-звезды [174, 175]. В работе [65],

основанной на однородном наблюдательном материале, в более чем 75 % (33 из 39) WR-галактик обнаружены WC-звезды. По-видимому, разногласия обусловлены наблюдательной селекцией из-за более слабой линии C IV λ 580.8 нм и разным качеством наблюдательного материала, так как в последние годы все больше WR-галактик обнаруживают наличие как WN-, так и WC-звезд [65, 80, 86, 108, 173, 174, 175]. Спектры двух галактик, которые показывают особенности WR-звезд в голубой и красной части спектра, изображены на рис. 1.

3.2. КАТАЛОГИ WR-ГАЛАКТИК

Со времени открытия первой WR-галактики [5], первого систематического исследования [102] и первого каталога WR-галактик Конти [17], содержащего 37 объектов, количество известных в настоящее время WR-галактик существенно увеличилось. В ряде работ детальное изучение отдельных галактик приводило к обнаружению WR-особенностей на длине волны $\lambda \approx \approx 465.0$ нм [5, 60, 103, 160, 166]. Первый систематический поиск и анализ WR-галактик по всем имеющимся до 1980 г. данным, сделан в работе [102]. Исследованы 45 внегалактических НII-областей и найдены 15 галактик с широкими эмиссионными избытками в области $\lambda \approx 465.0$ нм. Таким образом, WR-галактики составляют 30 % от полного числа исследуемых галактик. Исследуя спектроскопический каталог НII-галактик [200], содержащий около 400 галактик, авторы работы [121] нашли 37 WR-галактик, т. е. примерно 10 % от полного числа галактик. Основным результатом данной работы заключается в том, что не обнаружено WR-особенностей в НII-галактиках с содержанием тяжелых элементов $Z < 0.1Z_{\odot}$. Вакка и Конти [204] детально исследовали 14 галактик с эмиссионными линиями (10 WR-галактик и 4 SB галактики).

Много галактик с WR-чертами было обнаружено в выборке спектров с большим отношением сигнал/шум, полученных Изотовым и др. [84, 93, 94, 95], созданной с целью определения содержания первичного гелия, т. е. в галактиках с низким содержанием тяжелых элементов $1/40Z_{\odot} < Z < < 1/2Z_{\odot}$. Основываясь на этих наблюдениях, Гусева, Изотов, Туан [65] исследовали выборку из 39 WR-галактик с металличностью, перекрывающей два порядка величины от $Z_{\odot}/50$ до $2Z_{\odot}$. Большая часть этих галактик отобрана из полной выборки около 250 ГКГ [63, 90]. В 1999 г. появился новый большой скомпилированный из литературных данных каталог Шарера, Контини и Пиндао [175], содержащий 139 WR-галактик и включающий практически все галактики, исследованные Гусевой и др. [65]. Наиболее неожиданным было открытие WR-звезд в галактике I Zw 18 с самым низким содержанием тяжелых элементов ($Z \approx 1/50Z_{\odot}$) [86, 108].

3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА O- И WR-ЗВЕЗД

Обычно количество WR-звезд оценивают по абсолютной светимости галактики в какой-либо линии или совокупности линий, принадлежащих WR-звездам, и по абсолютной светимости одной WR-звезды в этой линии (линиях), полученной из наблюдений ближайших WR-звезд, в то время как число O-звезд получают по H_{β} -светимости после вычета вклада в нее WR-звезд.

Впервые в работе [204] проведено детальное количественное исследование массивного звездного населения в WR-галактиках (на основании наблюдений 14 WR-галактик) и разработана методика оценки количества O- и

WR-звезд. Стандартный метод оценки количества O-звезд в области звездообразования заключается в расчете количества ионизирующих фотонов, необходимых для того, чтобы получить наблюдаемый рекомбинационный спектр (чаще всего используется поток в линии H_β , принимая случай В «стандартной» фотоионизационной модели), зная при этом количество ионизирующих фотонов «реперной» звезды (как «реперную» обычно используют звезду O7V). При этом учитывается вклад WR-звезд в общее количество ионизирующих фотонов.

В ранних работах [102, 122] для определения количества WR-звезд использовались интенсивности неразрешенной широкой WR-особенности, простирающейся от $\lambda = 460$ нм до $\lambda = 470$ нм. Это было обусловлено в первую очередь низким спектральным разрешением наблюдательного материала. При этом неявно предполагалось, что во всех WR-галактиках отношение количеств звезд $N(WC)/N(WN)$ одинаково или подобно, а WC- и WN-звезды во всех галактиках — одних и тех же подтипов.

В работе [204] с большим спектральным разрешением измерена светимость WR-галактики в одной эмиссионной линии He II $\lambda 468.6$ нм, в которую дают основной вклад WNL-звезды. Усреднив светимость одной WNL-звезды в линии He II $\lambda 468.6$ нм, авторы [204] получили количество WN-звезд. Общее число ионизирующих фотонов Q_0 в WR-галактике получено как

$$Q_0^{\text{obs}} = N_{\text{WN}}Q_0^{\text{WR}} + N'_{\text{O7V}}Q_0^{\text{O7V}}, \quad (1)$$

где N_{WN} — число WN-звезд, N'_{O7V} — число «реперных» звезд O7V. Q_0^{obs} получают из наблюдаемой светимости эмиссионной линии H_β . Однако для сравнения полученного количества массивных звезд с модельными расчетами, необходимо знать общее количество OV-звезд. В работе [204] рассчитана величина $\eta = N'_{(\text{O7V})}/N_{(\text{OV})}$. Эта методика получила дальнейшее развитие в работе [205], были рассчитаны значения η_0 для зон ионизированного водорода и аналогичная величина η_1 для зон ионизированного гелия в зависимости от металличности для $\lg(Z/Z_\odot)$ от 0 до -1.3 и разных значений M_{up} от $30M_\odot$ до $120M_\odot$ для функции масс Миллера и Скейлоу [147]. Позже Шарер [172] продемонстрировал важность и необходимость учета эволюции звезд, образовавшихся в данной вспышке звездообразования, в определении количества O- и WR-звезд. Методом Вакка и Конти [204] и [205] систематически недооценивалось количество O-звезд, таким образом переоценивалось отношение $N(WR)/N(O)$ в WR-галактиках. Для согласования полученных таким методом данных с теорией требовалась более плоская НФМ ($\alpha \approx 1-2$).

В работе [172] рассчитано изменение η_0 как функции времени, прошедшего с начала мгновенной вспышки звездообразования t , нормированную на η_0 для звезд главной последовательности нулевого возраста (НПП) с металличностями 1/5 и 1/20 от солнечной. В работе [180] сделаны детальные расчеты $\eta_0(t)$ для массовой доли тяжелых элементов $Z = (1/20 \dots 2.0)Z_\odot$.

Таким образом, количество O-звезд в современных расчетах [65, 174, 178] определяется по формуле

$$N(O) = \frac{Q_0^{\text{cor}} - N_{\text{WR}}Q_0^{\text{WR}}}{\eta_0(t)Q_0^{\text{O7V}}}.$$

Здесь Q_0^{cor} — полное число ионизирующих фотонов, скорректированное за эффект апертуры при спектральных наблюдениях областей H II с длиной

щелью. В работе [65] предложена методика учета ненаблюдаемой части потока в H_{β} из-за большой протяженности области H II, намного превышающей размеры скоплений, содержащих O- и WR-звезды.

При этом возраст t вспышки звездообразования определяется по эквивалентной ширине эмиссионной линии H_{β} согласно [180] для соответствующей металличности, определенной по содержанию кислорода, согласно [1—3, 63, 87—89, 91, 92, 94]. Все данные скорректированы за межзвездное поглощение с использованием коэффициента поглощения $C(H_{\beta})$, полученного по бальмеровскому декременту. При этом электронная температура T_e определялась преимущественно с использованием авроральной эмиссионной линии [O III] λ 436.3 нм, а в случае ее отсутствия — по эмпирической калибровке зависимости полного потока в ярких эмиссионных линиях кислорода от T_e [161].

В работе [180] по последним наиболее надежным наблюдательным данным скомпилированы усредненные абсолютные потоки в основных эмиссионных линиях H, He, C и N в УФ- и видимом диапазоне для звезд Of, WNL, WNE, разных подклассов WC-звезд от WC9 до WC4 и WO-звезд. В более ранних работах для определения количества WR-звезд по неразрешенным широким блендам в голубой области спектра ($\lambda \approx 465.0$ нм) и в красной области спектра ($\lambda \approx 580.8$ нм) использовалась калибровка Смит 1991 г. [180, табл. 3].

Используя усредненные потоки для одной WR-звезды [180], в работах [65, 178] на большом однородном наблюдательном материале, полученном при высоком отношении сигнал/шум, определено количество WNL- и WCE-звезд. Поскольку в работах [65, 178] во многих WR-галактиках обнаружены не наблюдавшиеся ранее в WR-галактиках звездные линии N III λ 451.2 (характеристика звезд WN7—WN8) и Si III λ 456.5 нм (звезды WN9—WN11), получено также количество WNL-звезд по светимостям в этих линиях [65], которое хорошо согласуется с количеством WNL-звезд, полученным традиционным методом. В работе [178] оценено также количество поздних WC-звезд (WCL), представленных звездами WC7 по линиям C III λ 569.6 и C IV λ 580.8 нм, с учетом которых определено более точно количество ранних WCE-звезд по линиям C IV λ 580.8 нм. Предложенный в [65] метод оценки WNL-звезд более перспективный по сравнению с классическим и может давать более надежные результаты, поскольку линии N III λ 451.2 и Si III λ 456.5 нм не подвержены вкладу WCE- и WNE-звезд, а также небулярной газовой эмиссии. Необходимо в будущем получить более надежные калибровки для этих линий по исследованию ближайших одиночных WNL-звезд.

В работах [173] для трех выделенных областей в WR-галактике NGC 5253, а в работе [174] — для пяти WR-галактик: He 2-10, NGC 3049, NGC 3125, NGC 5253, Tol 89 получены исправленные потоки в голубой и красной WR-особенностях, согласующиеся с модельными расчетами [172].

3.4. ЭФФЕКТЫ МЕТАЛЛИЧНОСТИ

Уменьшение светимости в широких WR-особенностях с уменьшением металличности, предсказанное моделями эволюции массивных звезд [115, 118, 142, 180], подтверждено наблюдениями WR-галактик [102, 104, 121, 204]. Однако теория предсказывала образование ничтожно малого количества WR-звезд в среде с низкой металличностью. Поэтому недавнее открытие WR-звезд в наиболее бедных металлами галактиках I Zw 18 ($1/50Z_{\odot}$) [38, 86, 108] и SBS 0335-052 ($1/40Z_{\odot}$) [84, 162] имеет далеко идущие послед-

ствия для тестирования и усовершенствования моделей при металличности, недостижимых в Галактике и Местной Группе Галактик.

В работе [65] исследовано семь WR-галактик с содержанием кислорода $12 + \lg(O/H) < 7.9$ (содержание кислорода на Солнце принято $12 + \lg(O/H) = 8.90$ [61]). WR-галактик с такой низкой металличностью не было в прежних исследованиях. При содержании кислорода $12 + \lg(O/H) < 7.9$ светимость WR-особенностей становится практически постоянной [65], хотя заключение сделано по малой выборке (семь WR-галактик). Чрезвычайная скудость WR-данных в галактиках с низкой металличностью обусловлена редкостью таких галактик, что в свою очередь является результатом очень короткого времени жизни массивных звезд в WR-стадии при низких металличностях.

Модели с постоянным темпом звездообразования предсказывают (для солнечной металличности) значение $N(WR)/N(O) \approx 0.1$ [116]. Однако наблюдения часто дают значения $N(WR)/N(O)$, отличные от приведенного [102, 174, 204].

На рис. 2 приведена зависимость отношения количества WR-звезд к полному количеству массивных звезд от содержания кислорода из работы [65]. Все известные до этого времени достаточно надежные данные других авторов ([102, 174, 204]) также приведены на рис. 2, причем данные [102, 204] пересчитаны по методике [65], насколько это оказалось возможным с использованием литературных данных о потоках и эквивалентных ширинах небулярных и эмиссионных WR-линий. Несмотря на остающиеся неоднозначности (например, невозможно скорректировать за эффект апертуры данные [102, 174, 204]), из рис. 2 следует, что доля WR-звезд по

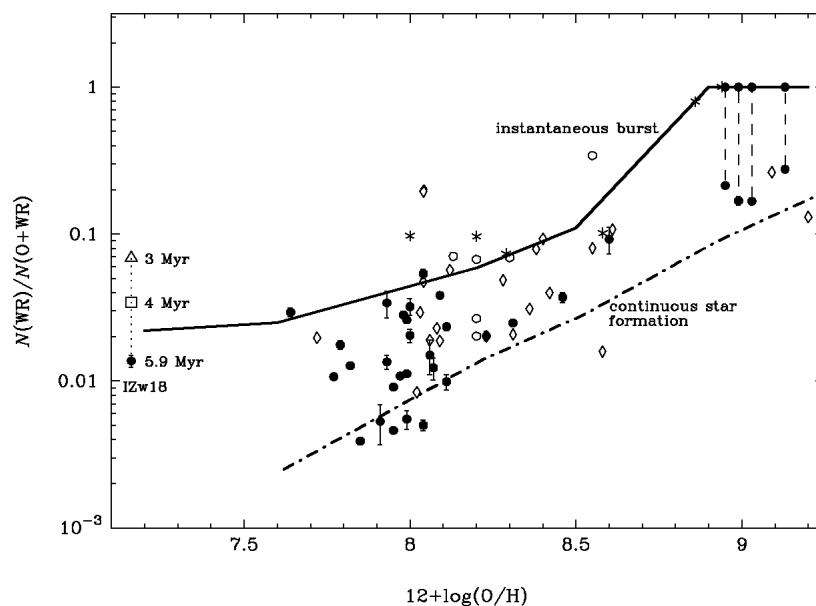


Рис. 2. Зависимость относительного количества WR-звезд $N(WR)/N(O+WR)$ от содержания кислорода $12 + \lg(O/H)$ для галактик из [65] (темные кружки) и из [204] (ромбы), [102] (звездочки) и [174] (светлые кружки). Для I Zw 18 приведены три значения для трех выбранных параметров η_0 : 0.2 (темный кружок), 0.5 (квадратик) и 1 (треугольник), соответствующие возрасту вспышки звездообразования 5.9, 4 и 3 млн лет. Для WR-галактик с большой металличностью приведены по два значения для каждой галактики, соединенные штриховой линией: $N(WR)/N(O+WR) = 1$ и значения, соответствующие $\eta_0 = 1$. Штрих-пунктирной и сплошной линиями показаны модельные расчеты для двух предельных случаев: звездообразование с постоянным темпом и максимально возможные значения $N(WR)/N(O+WR)$ для мгновенной вспышки звездообразования соответственно [180]

отношению ко всем массивным звездам увеличивается с увеличением содержания кислорода, что впервые было отмечено в работе [104]. Штрих-пунктирной и сплошной линиями на рис. 2 показаны модельные расчеты $N(WR)/N(O+WR)$ для звездообразования с постоянным темпом и максимально возможные величины $N(WR)/N(O+WR)$ для кратковременной вспышки звездообразования [180]. Эти два случая являются предельными в истории звездообразования. Все данные хорошо согласуются с расчетами моделей эволюционного популяционного синтеза [14, 100, 122, 142, 180].

3.5. ОТНОШЕНИЕ $N(WC)/N(WN)$

Поскольку WC-звезды — это сильно проэволюционировавшие потомки массивных звезд, и только наиболее массивные звезды после WN-стадии становятся WC-звездами, отношение $N(WC)/N(WN)$ особенно чувствительно к эволюционному сценарию и параметрам вспышки звездообразования (НФМ, протяженность вспышки звездообразования).

Основные статистические результаты по исследованию отдельных WR-звезд получены для нашей Галактики и Магеллановых Облаков, а также для отдельных ближайших галактик МГГ. Так, Хухт и др. [212] для полной выборки WR-звезд в Галактике с $d < 2.5$ кпк (d — расстояние от Солнца) нашли, что $N(WN)/N(WC) \approx 1$ для $R > 7.5$ кпк (R — галактоцентрическое расстояние) и $N(WN)/N(WC) \approx 0.4$ для $R < 7.5$ кпк, т. е. обнаружена концентрация поздних WC-звезд в направлении центра Галактики. Такая же зависимость $N(WC)/N(WN)$ получена для звезд в M33 [130].

Наиболее надежные определения отношений $N(WC)/N(WN)$ по выборке индивидуально наблюдаемых WR-звезд для галактик МГГ M33, M31, NGC 6822, БМО, ММО и нашей Галактики рассмотрены в работе [133] (рис. 3, ромбы). Получена линейная зависимость для $N(WC)/N(WN)$ (штриховая линия на рис. 3), демонстрирующая, что для галактик с содержанием кислорода $12 + \lg(O/H) \leq 8.1$ отношение $N(WC)/N(WN)$ достигает нуля. Усредненные данные [133] получены по большому количеству областей звездообразования в каждой галактике и большому количеству WR-звезд, поэтому усредненную зависимость (штриховая линия) можно считать эмпирической зависимостью отношения $N(WC)/N(WN)$ от металличности для звездообразования с постоянным темпом, которая хорошо согласуется с моделями для постоянного звездообразования.

Однако в работе [174] получено отношение $N(WC)/N(WN) = 0.15...0.65$ с типичным значением $0.2-0.4$ и отсутствием заметной зависимости от металличности для пяти галактик с содержанием кислорода $12 + \lg(O/H)$ от 8.15 до 9.0. Для трех галактик с содержанием кислорода $12 + \lg(O/H) \approx 8.2$ (или $Z \approx 1/5Z_{\odot}$) величина $N(WC)/N(WN) \approx 0.4$, что больше, чем значение, полученное в [133] для такой же металличности при условии постоянного звездообразования. Однако полученные величины не противоречат сценарию звездообразования в короткой шкале времени, если использовать эволюционные модели с большим темпом потери массы [174]. Возраст области звездообразования оценен от 3 до 6 млн лет, длительность вспышки звездообразования не превышает 2—4 млн лет [174].

На рис. 3 представлена зависимость $N(WC)/N(WN)$ от металличности из работы [65]. Галактики с относительно большим количеством WC-звезд расположены в узком интервале содержания кислорода $12 + \lg(O/H)$ от 7.8 до 8.2 и очень сильно отличаются от зависимости [133]. Такое большое отношение $N(WC)/N(WN)$ можно объяснить вспышечной природой звездообразования в этих галактиках. Сплошной линией показаны максимальные величины $N(WC)/N(WN)$ для разных содержаний кислорода, рассчитанные

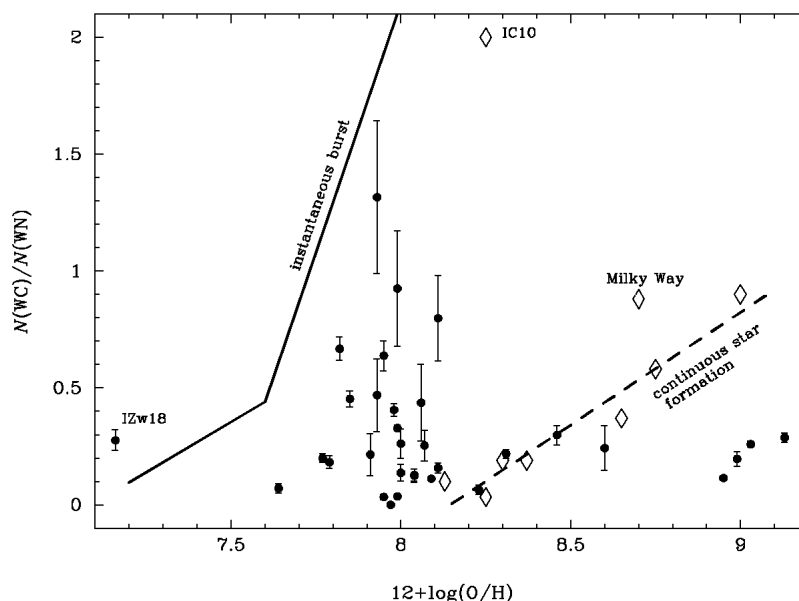


Рис. 3. Отношение количества WC- и WN-звезд в зависимости от $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ для галактик из работы [65] (точки). Сплошной линией обозначены максимальные величины, предсказанные моделями эволюционного популяционного синтеза для мгновенной вспышки звездообразования [180]. Ромбами обозначены данные из [133] для МГТ. Пунктирная линия — эмпирическая зависимость, соответствующая звездообразованию с постоянным темпом

в моделях [180]. Теоретическая кривая вполне удовлетворительно описывает значения $N(\text{WC})/N(\text{WN})$ для WR-галактик с низкой металличностью, за исключением галактики I Zw 18 с экстремально низкой металличностью. Для I Zw 18 отношение $N(\text{WC})/N(\text{WN}) \approx 0.28$, в то время как модели дают 0.09. Эти разногласия значимы, так как и в наблюдательных расчетах, и в моделях взяты одни и те же светимости для одиночных WR-звезд, а отношение $N(\text{WC})/N(\text{WN})$ не зависит от эффекта апертуры. В работе Гусевой и др. [65] сделан вывод, что модели недостаточно корректно предсказывают отношение $N(\text{WC})/N(\text{WN})$ для очень низких металличностей. Пять галактик с содержанием кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \geq 8.6$ лежат на рис. 3 систематически ниже зависимости Мэсси и Джонсон [133]. Такой же результат получен в работе [174] для двух галактик с металличностями, близкими к солнечной. Возможно, для этих галактик основной вклад в количество WC-звезд дают не WCE-, а WCL-звезды с более низкой светимостью в линии C IV $\lambda 580.8$ нм. Однако основная причина в природе вспышки звездообразования в этих галактиках — это «мгновенные» вспышки звездообразования с различной длиной последовательных стадий WNL, WNE и WCE [65]. Поскольку эти галактики имеют низкие эквивалентные ширины H_{β} [65], все они находятся на поздних стадиях эволюции вспышек звездообразования с возрастом $t \geq 5.3$ млн лет, когда в основном существуют WN-звезды, а количество WC-звезд близко к нулю [180].

3.6. ВОЗРАСТ И ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ВСПЫШКИ (ПРОЦЕССА) ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Модели предсказывают достаточно узкий промежуток времени, в течение которого могут наблюдаться WR-звезды. WR-фаза начинается через 2-3 млн лет после начала единичной мгновенной вспышки звездообразования и

заканчивается приблизительно через 3–4 млн лет (модели для солнечной металличности и без учета двойных звезд) [142, 180]. WR-фаза растягивается до 10 млн лет и больше при учете образования WR-звезд в тесных двойных системах [13, 14, 208, 210].

Для моделей с мгновенной вспышкой звездообразования в WR-галактиках [65], относительные количества WR-звезд являются чувствительной функцией времени t , прошедшего с начала вспышки звездообразования (или $W(H\beta)$). Это отношение также является сильной функцией массовой доли тяжелых элементов Z , поэтому в работе [65] все галактики разделены на четыре группы с различной металличностью. Найдено хорошее общее согласие наблюдательных данных (относительного количества WR-звезд [65], эквивалентных ширин голубой и красной WR-полос: $W(465.0)$, $W(580.8)$ [65, 174]) с эволюционными популяционными моделями [180] с усиленным ветром WR-звезд и НФМ Солпитера для всех галактик, за исключением галактик с наиболее низкой металличностью [65]. Вероятнее всего, полученное различие является следствием различных свойств WCE звезд при низких металличностях по сравнению с их свойствами в нашей Галактике и МГГ. В работе [65] авторы предполагают, что светимости в голубой и красной WR-полосах одиночной WCE-звезды при низкой металличности должны быть примерно в два — четыре раза больше, чем принято в последних моделях [180].

В работе [174] сравниваются наблюдательные параметры пяти WR-галактик: интенсивности и эквивалентные ширины в WR-линиях $\lambda\lambda$ 464.0 + 465.0, 468.6 и 580.8 нм с этими параметрами, полученными из модельных расчетов [180] для нескольких сценариев звездообразования: 1) мгновенная вспышка звездообразования $\Delta t = 0$; 2) протяженность вспышки звездообразования $\Delta t = 1.2$ и 4 млн лет для НФМ Солпитера, а также для НФМ с $\alpha = 1.0$. Авторы работы [174] сделали вывод, что протяженность вспышки звездообразования не превышает 2–4 млн лет.

Обнаруженная антикорреляция между наличием красных сверхгигантов и O-звезд в галактиках с активным звездообразованием M82 и M83 [171], подтвержденная количественным моделированием [167], свидетельствует о почти мгновенной, но распространяющейся волне звездообразования. Верхний предел для такого временного разброса в возрастах скоплений — около 5 млн лет [162].

В работе [110] предполагается, что временной разброс менее 5 млн лет на шкале менее 100 пк можно рассматривать как мгновенную вспышку звездообразования со звездным населением одного возраста. Рассматривая очаги звездообразования на шкале больше 1 кпк Калзетти [12] нашла тесную корреляцию O- и КСГ-населения, что можно объяснить, как и в [133], наложением большого количества индивидуальных вспышек звездообразования с различными возрастами. Такие области можно моделировать звездообразованием с постоянным темпом.

В работе [178] собрана выборка WR-галактик с наибольшим WR-населением (количество WR-звезд в таких галактиках достигает нескольких сотен тысяч [65, 178]) и с металличностями, большими солнечной ($12 + \lg(O/H)$ от 8.95 до 9.3). Для Mrk 309 металличность намного превышает солнечную (в 2.5–3 раза). Для пяти галактик с наиболее надежными наблюдательными данными в работе [178] сделаны сравнения интенсивностей и W основных WR-особенностей с модельными расчетами. Наблюдательные данные для этих галактик хорошо описываются протяженной вспышкой звездообразования с длительностью около 4–10 млн лет и с возрастом 7–15 млн лет (рис. 4) (возраст оценен по $W(H\beta)$). Если бы в

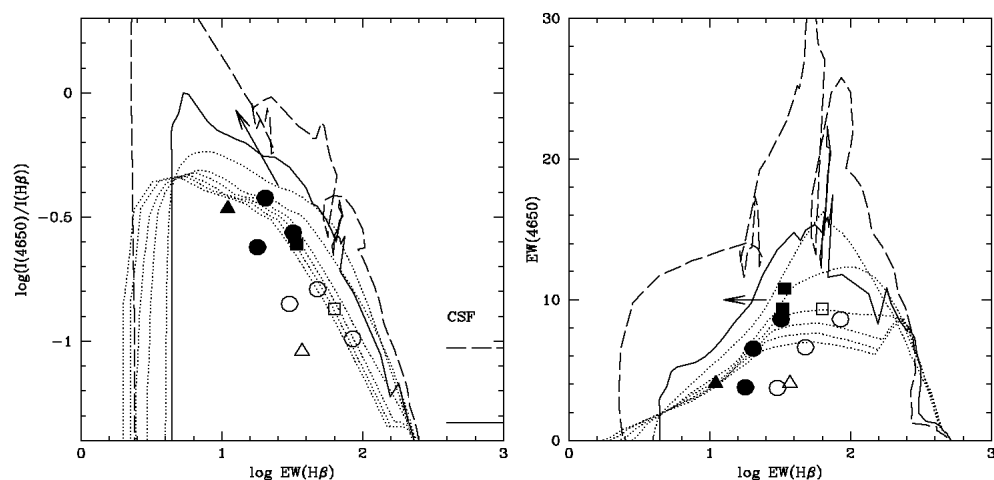


Рис. 4. Данные наблюдений (значки) и результаты модельных расчетов (линии) для интенсивности голубой WR-полосы по отношению к $H\beta$ (слева) и эквивалентной ширине (справа) как функция эквивалентной ширины линии $H\beta$ из работы [178]. Темные символы — данные для случая одинаковых значений коэффициента поглощения для газа и для звезд, светлые — для случая разных значений. Модельные расчеты сделаны для мгновенной вспышки звездообразования с содержанием тяжелых элементов $Z = 0.02$ (сплошная линия) и $Z = 0.04$ (штриховая линия), а также для продолжительной вспышки звездообразования для $Z = 0.02$ (пунктирные линии; длительность звездообразования $\Delta t = 2, 4, 6, 8, 10, 12$ млн лет). Для всех моделей принята НФМ Солпитера с $M_{up} = 120M_{\odot}$. Стрелка иллюстрирует уменьшение $W(H\beta)$ в два раза из-за поглощения ионизирующих фотонов пылью, CSF (continuous star formation — звездообразование с постоянным темпом) обозначены пределы $\lg[I(465.0)/I(H\beta)]$ для звездообразования с постоянным темпом для $Z = 0.02$ и 0.04 (сплошная и штриховая линии соответственно)

каждой WR-галактике было только звездное население одного возраста (мгновенная вспышка звездообразования), необходимым следствием для согласования наблюдений с теорией было бы отсутствие WR-звезд с массами больше $M_{WR} = (21...25)M_{\odot}$ при стандартной НФМ (рис. 4). Сценарий с протяженной вспышкой звездообразования или с распространяющейся волной звездообразования и невозможность пространственного разрешения отдельных скоплений естественным образом объясняют одновременное наличие в WR-галактиках WR-населения (включая WC- и WN-звезды) и красных сверхгигантов. Наличие красных сверхгигантов в WR-галактиках тестируется по наличию абсорбционных полос окиси титана TiO. Однако этот же эффект можно получить, используя большой (по сравнению со стандартным) темп потери массы звездой и/или усиленное перемешивание и увеличение вращения звезды. Такую длительность вспышки звездообразования, несколько большую по сравнению с результатами [174], полученными с одними и теми же моделями, вероятно, можно объяснить различием физических размеров, природы и морфологии. WR-галактики из работы [174] — простые изолированные HII-области, WR-галактики в [178] — морфологически существенно более сложные и протяженные галактики со звездообразованием. В работе [178] кроме трех сценариев звездообразования (мгновенная вспышка звездообразования, продленная вспышка с конечной длительностью и звездообразование с постоянным темпом) рассчитаны также модели с комбинированным звездным населением. В них при одной и той же истории звездообразования (например, мгновенная вспышка) накладываются два эпизода звездообразования с произвольным возрастом и

различающимися вкладами излучения от двух разных вспышек звездообразования. Такой метод хорошо тестируется согласием наблюдаемых и модельных распределений энергий в спектрах WR-галактик [178]. Звездным населением одного возраста не удастся воспроизвести одновременно голубую и красную области спектра для большей части областей звездообразования [154, 178].

3.7. НАЧАЛЬНАЯ ФУНКЦИЯ МАСС

Начальная функция масс определяет пропорцию образовавшихся звезд разных масс и задается наклоном НФМ, верхним (M_{up}) и нижним (M_{low}) пределами масс. Для большинства изученных скоплений и ассоциаций наклон НФМ близок к наклону НФМ Солпитера ($\alpha = 2.35$) и считается нормальным. Некоторые свидетельства об отклонении НФМ для массивных звезд поля приведены в работе [136]. Во взаимодействующих спиральных галактиках наклон НФМ более крутой, и НФМ имеет необычно низкий верхний предел масс [178]. В работе [101] получено $\alpha > 2.35$ для WR-галактик, однако непонятно, как объяснить такие разногласия.

Изменение $N(WC)/N(WN)$ можно объяснить градиентом металличности, но вторым параметром может быть изменение наклона НФМ. Однако в наиболее изученных галактиках МГ подтвержден стандартный наклон НФМ [134, 136].

Сравнение полученных в работе [24] и [204] данных с расчетами эволюционных моделей [142] привело к заключению о необходимости более плоской НФМ ($\alpha \approx 1...2$) по сравнению с НФМ Солпитера [24, 142]. В этих работах использовалась техника расчета отношения количества WR- к O-звездам, разработанная в [204] и более детально развитая позднее [205] с учетом вклада в ионизацию межзвездного газа не только ионизирующих фотонов от O-звезд, но и от WR-звезд, а также с учетом эффекта металличности. Различие эволюционных статусов O- и WR-звезд предлагалось учитывать путем обрезания верхнего предела масс НФМ. Таким способом НФМ приводится к функции масс, наблюдаемой на сегодняшний день.

В работе [172] развита методика определения WR- и O-звезд с учетом эволюции вспышки звездообразования. С использованием этой методики результаты наблюдений согласуются с модельными расчетами при НФМ Солпитера [65, 172, 174].

В работах, основанных на прямых подсчетах звезд в скоплениях получен наклон функции масс $\alpha \approx 2...3.1$ [116].

В работах, использующих метод эволюционного популяционного синтеза [100, 122, 159, 172, 206], полученные НФМ сравнимы с НФМ Солпитера.

Детальные исследования НФМ экстремального объекта R136 — сверхскопления в центре 30 Dor в БМО [135] — подтвердили абсолютно нормальную, т. е. НФМ Солпитера, неотличимую от полученной для OB-ассоциаций, насчитывающих на 2-3 порядка меньше массивных звезд. Ограничения на НФМ, полученные путем сравнения наблюдений и модельных расчетов при исследовании массивных галактик с центральной областью звездообразования (SB) с экстремально высокой металличностью [178], говорят о малой вероятности отклонения НФМ от стандартной.

Фотометрические и спектральные исследования двух кометарных голубых компактных WR-галактик с содержанием тяжелых элементов 1/8 и 1/14 от солнечного [154] показывают, что вся совокупность наблюдательных данных для самых ярких областей звездообразования в этих галактиках

с возрастaми 3 и 4 млн лет, описывается стандартной НФМ Солпитера с $M_{\text{ур}} \approx 120M_{\odot}$.

В работе [57] по данным УФ-, рентгеновской, оптической и радиоспектроскопии проведено исследование WR-галактики NGC 7714, типичной спиральной галактики с центральной областью звездообразования, содержащей порядка 2000 WR-звезд и подтверждено, что стандартная НФМ Солпитера не противоречит всей совокупности современных наблюдательных данных, полученных на космическом телескопе Хаббла и крупнейших наземных телескопах.

Метод эволюционного популяционного синтеза чувствителен к верхнему пределу масс $M_{\text{ур}}$ начальной функции масс звездного населения и существенно менее чувствителен к нижнему. В идеальном случае (мгновенная вспышка звездообразования и надежно определенная металличность) наличие WR-линий позволяет надежно определять $M_{\text{ур}}$, поскольку существует сильная зависимость эквивалентных ширин эмиссионных WR-линий и WR-особенностей от $M_{\text{ур}}$ [178]. В работе [178] для WR-галактик с металличностью выше солнечной использование такого стандартного метода (мгновенная вспышка звездообразования и НФМ Солпитера) приводит к $M_{\text{ур}} > 30M_{\odot}$. При таких предположениях невозможно найти разграничение между разными значениями $M_{\text{ур}}$ от $40M_{\odot}$ до $120M_{\odot}$. При протяженности вспышки звездообразования 4—10 млн лет для наиболее надежных значениях металличности в работе [178] получены несколько бóльшие значения $M_{\text{ур}} \geq (30...40)M_{\odot}$. Они хорошо согласуются с оценкой $M_{\text{ур}} \approx (35...50)M_{\odot}$, полученной по $W(\text{H}\beta)$ для областей Н II спиральных галактик с большим значением содержания тяжелых элементов [178].

Метод определения числа ионизирующих фотонов от О-звезд по ярким эмиссионным рекомбинационным линиям и получаемые таким образом ограничения на параметры НФМ, требуют намного меньше наблюдательных усилий, чем детектирование слабых широких WR-особенностей. Однако в некоторых ситуациях часть ионизирующих фотонов может покидать область Н II (области Н II, ограниченные плотностью вещества — density-bounded [44, 120]), а часть ионизирующих фотонов может поглощаться пылью. Невозможность точного учета этих эффектов в интерпретации наблюдений галактик, обладающих мягким полем излучения (для ярких ИК-галактик особенно важен учет поглощения пылью), приводила к значениям $M_{\text{ур}} = (20...30)M_{\odot}$ [56]. Например, открытие ИК-галактики NGC 1614 как WR-галактики [17] предполагает наличие существенного количества массивных звезд с $M > 50 M_{\odot}$.

Все методы определения $M_{\text{ур}}$, основанные на измерениях рекомбинационных линий (водорода или гелия), — не прямые и подвержены всем перечисленным неопределенностям. Только прямые методы анализа звездного населения, основанные на наблюдениях эмиссионных линий WR-звезд в WR-галактиках, дают возможность надежно определить параметры НФМ [178].

3.8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ WR-ЗВЕЗД С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ. ХИМИЧЕСКОЕ ОБОГАЩЕНИЕ

Эволюция наиболее массивных звезд с мощным истечением вещества — звездным ветром ($\dot{M} \approx 10^{-5}M_{\odot}/\text{год}$) предсказывает обогащение окружающей межзвездной среды на короткой шкале времени 1—10 млн лет продуктами нуклеосинтеза звезд текущей вспышки звездообразования. Обнаруженный градиент содержания тяжелых элементов в дисках больших

спиральных галактик [55] явился тестом для моделирования химической эволюции.

Однако в карликовых галактиках, где часто существует одна HII-область, особенно в ГКГ с низким содержанием тяжелых элементов, коллективное воздействие звездного ветра от большого количества массивных звезд и взрывы Сверхновых могут существенно изменить химический состав межзвездной среды на короткой временной шкале даже в результате одной вспышки звездообразования. Тогда наблюдаемый химический состав газа может быть не равным химическому составу газа, из которого сформировались звезды. В работе [64] сделана оценка металличности звездного состава ГКГ по измерениям эквивалентных ширин полос поглощения (в основном окиси титана TiO вблизи $\lambda\lambda = 618.0$ и 624.0 нм) в интегральных спектрах галактик. Показано, что по крайней мере для галактик с наименьшим содержанием тяжелых элементов металличность звезд меньше металличности газа, что можно интерпретировать как проявление самообогащения области звездообразования тяжелыми элементами.

В оболочках некоторых WR-звезд Галактики, например NGC 6888 [48] и Bг 13 в БМО [53], найдено локальное увеличение содержания азота и гелия, в то время как в других WR-оболочках такое обогащение не найдено [49].

Найдено локальное обогащение межзвездной среды азотом в неправильной галактике NGC 5253 [216, 217], в то время как другие элементы не показывают никаких вариаций. В работе [168] также не найдено вариаций содержаний тяжелых элементов в 10 областях 30 Dor. В работе [189] проведено детальное исследование трех LBV и WR-звезд в БМО, найдено локальное увеличение содержания азота на шкале 1—2 пк. WR-звезды, обнаруженные вблизи обогащенной азотом области в NGC 5253, могут быть источником азота в межзвездной среде [173]. Для WR-галактики Mrk 996 [202] получено содержание азота N/O, в десятки раз большее, чем для нормальных карликовых галактик. Эстебан и Пеймберт [47] построили модели 11 WR-галактик с целью исследования обогащения межзвездного газа тяжелыми элементами, синтезируемыми и выбрасываемыми в межзвездную среду звездами текущей вспышки звездообразования. Модели удовлетворительно объясняют наблюдаемое содержание азота, однако они дают слишком низкое количество гелия He и намного большее количество кислорода O по сравнению с наблюдениями.

В результате проведенного цикла работ по изучению воздействия звездного ветра и взрывов Сверхновых на межзвездную среду в галактиках с низкой металличностью, на основании большого количества наблюдательного материала, авторами работы [98] сделан вывод об отсутствии доказательств существования локального обогащения тяжелыми элементами, которое можно было бы связать со звездным ветром массивных звезд. Крупномасштабные вариации (на шкале около 200 пк), вероятно, связаны с недавним взрывом Сверхновых. На основании исследования распределения O, N, He в 60 бедных металлами HII-галактик, часть из которых является WR-галактиками, оказалось, что существенных различий между WR- и не-WR-галактиками нет. Это может быть свидетельством того, что WR-звезды не вносят существенного вклада в флуктуации содержания на шкале времени, сравнимом со временем жизни HII-областей [98].

Образование разогретых околозвездных некристаллических углеродных пылинок наблюдается в направлении многих поздних WC-звезд (и никогда в направлении WN-звезд) по эпизодически возникающим ИК-избыткам с частотой от трех до десятка лет [213].

Однако при определении интегрального коэффициента поглощения в

WR-галактиках найдено [178], что $C(\text{H}\beta)_{\text{газа}} > C(\text{H}\beta)_{\text{звезд}}$. Так, при моделировании спектрального распределения энергии в WR-галактиках с максимально большими значениями металличности единственным возможным условием совпадения модельных и наблюдаемых распределений было существенно меньшее значение поглощения для звезд, чем для газа [178].

Морфологически взаимодействие массивных звезд с межзвездной средой обнаруживается по наблюдаемым расширяющимся оболочкам, пузырям [62, 109, 154, 162], со скоростями от сотен до нескольких тысяч км/с на шкале от нескольких сотен до нескольких тысяч парсек [85, 138].

Наблюдения WR-галактик с рентгеновского спутника ROSAT показывают существенно большую светимость WR-галактик в рентгеновском диапазоне по сравнению с выборкой ближайших спиральных галактик со звездообразованием [195, 196]. Все рентгеновские, оптические, ИК- и радионаблюдения [141, 195, 196] свидетельствуют о том, что: 1) большая часть наблюдаемого рентгеновского излучения возникает в горячих сверхпузырях (на характерной шкале около 1 кпк), сформированных коллективным воздействием звездного ветра наиболее массивных звезд и Сверхновых, 2) наблюдаемые биполярные истечения в галактиках также связаны с активными процессами звездообразования и могут быть определены как галактический ветер.

3.9. ПРОИСХОЖДЕНИЕ НЕБУЛЯРНОЙ ЛИНИИ He II λ 468.6 НМ В WR-ГАЛАКТИКАХ

Во многих галактиках с эмиссионными линиями, в том числе в ГКГ с низкой металличностью и WR-галактиках обнаружена сильная небулярная линия ионизированного гелия He II λ 468.6 нм (примерно в 50 % выборки ГКГ и WR-галактик из [85, 86, 94, 95, 201]). Ее интенсивность на несколько порядков больше теоретической величины, полученной в фотоионизационных моделях (например, [193]) и требует наличия жесткого ионизирующего излучения с длиной волны короче 22.8 нм. В работе [8] предложено объяснение сильной эмиссии He II наличием звезд Of, в атмосферах которых она может возникать. Однако модели эволюционного популяционного синтеза [174, 180] с включением Of-звезд не снимают этих противоречий.

Были предложены [54] различные механизмы объяснения наличия более жесткого, чем предполагалось ранее, поля излучения в областях звездообразования: от фотоионизации горячими очень массивными звездами до фотоионизации рентгеновскими двойными звездами, а также ударными волнами. Некоторая часть противоречий снялась в последних моделях [176], использующих не-ЛТР-модели атмосфер, а также учитывающих эффекты бленкетирования и звездного ветра (учет этих эффектов приводит к увеличению $I(\text{He II } \lambda 468.6 \text{ нм})$ на 3—6 порядков). Однако для молодых областей звездообразования, интенсивности He II λ 468.6 нм, полученные в последних моделях, все еще намного ниже наблюдаемых.

В работе [172] смоделированы небулярная и небулярная + звездная эмиссия He II λ 468.6 нм в молодых областях звездообразования ($t < < 3 \dots 3.5$ млн лет). Для $1/5Z_{\odot} \leq Z \leq Z_{\odot}$ предсказана сильная эмиссия He II из-за большого количества WC-звезд в ранних WR-фазах вспышек звездообразования. Показано также, что полученные теоретические значения согласуются с имеющимися наблюдательными данными.

В работе [174] в модели эволюционного популяционного синтеза были включены очень массивные звезды главной последовательности с WR-особенностями (сильными эмиссионными линиями He II λ 468.6 нм), открытые

недавно в R136 в БМО и в III-области NGC 3603 в нашей Галактике [26, 35, 41]. Модели показывают, что независимо от истории звездообразования (мгновенная вспышка звездообразования, $\Delta t = 0$, вспышка звездообразования определенной длительности $\Delta t = 2, 4$ млн лет или звездообразование с постоянным темпом) большие интенсивности линий He II λ 468.6 нм должны быть только для $W(H_{\beta}) \geq 20$ нм, т. е. на самой ранней стадии вспышки звездообразования. В подавляющем большинстве WR-галактик $W(H_{\beta}) \geq 10$ нм.

Для изучения возможных механизмов, ответственных за эмиссионную небулярную линию He II λ 468.6 нм, в работе [65] была создана однородная выборка III-галактик с высоким отношением сигнал/шум ≈ 30 . Из 30 галактик только 18 являются WR-галактиками. Небулярная линия He II λ 468.6 нм не обнаружена ни в одной галактике с металличностью $12 + \lg(O/H) > 8.13$.

Зависимости эквивалентной ширины и интенсивности небулярной линии He II λ 468.6 нм от эквивалентной ширины H_{β} хорошо согласуются с теоретическими расчетами для звездных населений с массовой долей тяжелых элементов $Z = 0.0004, 0.0001$ и 0.004 из [180]. Сдвиг в $W(H_{\beta})$ можно объяснить отсутствием коррекции $W(H_{\beta})$ за эффект апертуры. Для $Z = 1/20Z_{\odot}$ и $1/50Z_{\odot}$ теоретические модели вполне удовлетворительно описывают наблюдения. Однако представленные галактики с WR-звездами и без WR-звезд распределены абсолютно одинаково. Это означает, что невзирая на хорошее согласие наблюдений с моделями, WR-звезды не являются единственным источником небулярной линии He II λ 468.6 нм. Другие механизмы, такие как ударные волны, могут также играть важную роль, особенно на поздних стадиях эволюции вспышки звездообразования, когда увеличивается активность (вероятность) взрывов Сверхновых.

Таким образом, природа небулярной эмиссии He II λ 468.6 нм до сих пор окончательно не установлена и является предметом постоянных дискуссий [54, 165].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени созданы достаточно надежные модели эволюционного популяционного синтеза, основанные на современных моделях звездных атмосфер, эволюционных звездных треках, корректном учете стадии Вольфа — Райе в эволюции наиболее массивных звезд с высоким темпом потери массы и абсолютных потоках в отдельных эмиссионных линиях одиночных WR-звезд.

В рамках этих моделей при различных предположениях об истории звездообразования (мгновенная вспышка звездообразования, продолжительная вспышка и звездообразование с постоянным темпом), удастся в целом удовлетворительно объяснить наиболее надежные наблюдательные данные для WR-галактик: отношение WR-звезд к полному количеству массивных звезд, отношение $N(WC)/N(WN)$ количеств разных подтипов WR-звезд, зависимость этих величин от металличности, а также изменение со временем интенсивностей и эквивалентных ширин основных WR-линий и WR-особенностей в интегральных спектрах WR-галактик.

Предложенная новая методика определения количества WNL-звезд по линиям, ранее не наблюдавшимся в WR-галактиках (после того как будут получены более точные средние абсолютные потоки в этих линиях для одной WR-звезды), открывает перспективы более надежного тестирования моделей эволюции массивных звезд.

Однако остаются проблемы согласования моделей с наблюдениями для эмиссионных галактик с экстремально низкими металличностями, для которых наблюдаемые значения $N(WC)/N(WN)$, $W(465.0 \text{ нм})$ и $W(580.8 \text{ нм})$ в несколько раз больше модельных. Одна из возможных причин разногласий между моделями и наблюдениями состоит в принципиальной невозможности получить светимости в отдельных линиях для одной WR-звезды в условиях предельно низкой металличности. Остается неопределенность количества двойных WR-звезд при максимально низких металличностях.

Не решены также проблемы с механизмами образования небулярной эмиссионной линии He II $\lambda 468.6 \text{ нм}$. Хотя последние модели [180], объясняющие природу линии He II $\lambda 468.6 \text{ нм}$ жестким УФ-излучением WR-звезд, уже достаточно удовлетворительно описывают наблюдаемые интенсивности и эквивалентные ширины небулярной линии He II $\lambda 468.6 \text{ нм}$ в WR-галактиках, такие же распределения $I(\text{He II } \lambda 468.6 \text{ нм})$ и $W(\text{He II } \lambda 468.6 \text{ нм})$ получены и для областей звездообразования, не содержащих WR-звезд. К тому же модели предсказывают наличие небулярной He II $\lambda 468.6 \text{ нм}$ эмиссии на ранних стадиях вспышек звездообразования с $W(H\beta) = 20...30 \text{ нм}$, в то время как наблюдательные данные систематически сдвинуты к $W(H\beta) \leq 10 \text{ нм}$, что означает больший возраст вспышки звездообразования. Таким образом, необходимо рассматривать дополнительные механизмы (например, ударные волны) для объяснения свечения линии He II $\lambda 468.6 \text{ нм}$, особенно на поздних стадиях вспышки звездообразования.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства науки и образования (грант Державного фонду фундаментальных досліджень № 2.4/497) и INTAS (грант N 97-0033).

1. *Изотов Ю. И., Гусева Н. Г.* Спектральное исследование голубых компактных карликовых галактик в скоплении Девы // *Астрофизика*.—1989.—30, № 3.—P. 564—574.
2. *Изотов Ю. И., Липовецкий В. А., Гусева Н. Г., Князев А. Ю.* SBS 0335-052 — голубая компактная карликовая галактика с рекордным дефицитом тяжелых элементов // *Астрон. журн.*—1990.—67, № 4.—P. 682—689.
3. *Изотов Ю. И., Липовецкий В. А., Гусева Н. Г., Степанян Дж. А.* SBS 0335-052 — наиболее обедненная тяжелыми элементами голубая компактная карликовая галактика // *Письма в астрон. журн.*—1990.—16, № 7.—P. 605—610.
4. *Abbott D. C., Torres A. V., Beiging J. H., Churchwell E.* Radio emission from galactic Wolf-Rayet stars and the structure of Wolf-Rayet wind // *Astrophys. J.*—1986.—303, N 1.—P. 239—261.
5. *Allen D. A., Wright A. E., Goss W. M.* The dwarf emission galaxy He2-10 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1976.—177, N 1.—P. 91—97.
6. *Armus L., Heckman T. M., Miley G. K.* The detection of Wolf-Rayet stars in a very powerful far-infrared galaxy: direct evidence for a starburst // *Astrophys. J.*—1988.—326, N 2.—P. L45—L49.
7. *Arnault P., Kunth D., Schild H.* Observed and synthesizes population of Wolf-Rayet stars — Their evolution and the influence of metallicity // *Astron. and Astrophys.*—1989.—224, N 1/2.—P. 73—85.
8. *Bergeron J.* Characteristics of the blue stars in the dwarf galaxies I Zw 18 and II Zw 40 // *Astrophys. J.*—1977.—211, N 1.—P. 62—67.
9. *Bohannon B., Walborn N. R.* The Ofpe/WN9 class in the Large Magellanic Cloud // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1989.—101,—P. 520—527.
10. *Breysacher J.* Spectral classification of Wolf-Rayet stars in Large Magellanic Cloud // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1981.—43, N 2.—P. 203—229.
11. *Breysacher J., Azzopardi M., Testor G., Muratorio G.* Wolf-Rayet stars detected in five associations of NGC 300 // *Astron. and Astrophys.*—1997.—326, N 3.—P. 976—981.
12. *Calzetti D.* Reddening and star formation in starburst galaxies // *Astron. J.*—1997.—113, N 1.—P. 162—184.
13. *Cerviño M., Mas-Hesse J. M.* Stellar population synthesis for AGNs and starburst galaxies//

- Astron. and Astrophys.—1998.—413.—P. 557—563.—(Ultraviolet Astrophysics Beyond the IUE final archive: Proc. of the Conf held in Sevilla, Spain, 11—14 November 1997 / Eds W. Wamsteker, R. Gonzalez-Riestra: ESA Publications Division, 1998).
14. *Cerviño M., Mas-Hesse J. M.* Metallicity effects in star-forming regions // Astron. and Astrophys.—1994.—284, N. 3—P. 749—763.
 15. *Cid Fernandes R., Terlevich R.* The origin of the blue continuum in type 2 Seyferts: reflection or star-forming tori? // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1995.—272, N 2.—P. 423—441.
 16. *Conti P. S.* On the relationship between Of and WR stars // Mem. Soc. R. Sci.—1976.—6, Ser. 9.—P. 193—214.
 17. *Conti P. S.* Wolf-Rayet galaxies: an introduction and a catalog // Astrophys. J.—1991.—377, N 1.—P. 115—125.
 18. *Conti P. S., Garmany C. D., de Loore C., Vanbeveren D.* The evolution of massive stars — The numbers and distribution of O stars and Wolf-Rayet stars // Astrophys. J.—1983.—274, N 1.—P. 302—312.
 19. *Conti P. S., Massey P.* Wolf-Rayet stars and giant HII regions in M33 — Casual associations or meaningful relationships // Astrophys. J.—1981.—249, N 2.—P. 471—480.
 20. *Conti P. S., Massey P.* Spectroscopic studies of Wolf-Rayet stars. IV. Optical spectrophotometry of the emission lines in Galactic and Large Magellanic Cloud stars // Astrophys. J.—1989.—337, N 1.—P. 251—271.
 21. *Conti P. S., Massey P., Vreux J.-M.* Spectroscopic studies of Wolf-Rayet stars. VI. — Optical spectrophotometry of near-infrared emission lines in some Galactic stars // Astrophys. J.—1990.—354, N 1.—P. 359—371.
 22. *Conti P. S., Vacca W. D.* The distribution of massive stars in the Galaxy. I. The Wolf-Rayet stars // Astron. J.—1990.—100, N 2.—P. 431—444.
 23. *Conti P. S., Vacca W. D.* HST UV imaging of the starburst regions in the Wolf-Rayet galaxy He 2-10: newly formed globular clusters? // Astrophys. J.—1994.—423, N 2.—P. L97—L100.
 24. *Contini T., Davoust E., Considere S.* Starbursts in barred spiral galaxies. I. MKN 712, a new Wolf-Rayet galaxy // Astron. and Astrophys.—1995.—303, N 2.—P. 440—448.
 25. *Crowther P. A., Bohannan B.* The distinction between O Iafpe and WNLha stars. A spectral analysis of HD 151804, HD 152408 and HDE 313846 // Astron. and Astrophys.—1997.—317, N 2.—P. 532—547.
 26. *Crowther P. A., Dessart L.* Quantitative spectroscopy of Wolf-Rayet stars in HD 97950 and R136a — the cores of giant HII regions // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1998.—296, N 2.—P. 622—642.
 27. *Crowther P. A., Hillier D. J., Smith L. J.* Fundamental parameters of Wolf-Rayet stars. I. Ofpe/WN9 stars // Astron. and Astrophys.—1995.—293, N 1.—P. 172—197.
 28. *Crowther P. A., de Marco O., Barlow M. J.* Quantitative classification of WC and WO stars // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1998.—296, N 2.—P. 367—378.
 29. *Crowther P. A., Smith L. J.* Fundamental parameters of Wolf-Rayet stars. VI. Large Magellanic Cloud WNL stars // Astron. and Astrophys.—1997.—320, N 2.—P. 500—524.
 30. *Crowther P. A., Smith L. J., Hillier D. J.* Fundamental parameters of Wolf-Rayet stars. IV. Weak-lined WNE stars // Astron. and Astrophys.—1995.—302, N 2.—P. 457—471.
 31. *Crowther P. A., Smith L. J., Hillier D. J., Schmutz W.* Fundamental parameters of Wolf-Rayet stars. III. The evolutionary status of WNL stars // Astron. and Astrophys.—1995.—293, N 2.—P. 427—445.
 32. *Crowther P. A., Smith L. J., Willis A. J.* Fundamental parameters of Wolf-Rayet stars. V. The nature of the WN/C star WR 8 // Astron. and Astrophys.—1995.—304, N 1.—P. 269—283.
 33. *Crowther P. A., Szeifert T., Stahl O., Zickgraf F.-J.* B 517 — another very late WNL star in M 33 // Astron. and Astrophys.—1997.—318, N 3.—P. 543—547.
 34. *De Jager C., Nieuwenhuzen H., Van der Hucht K. A.* Mass loss rates in the Hertzsprung-Russell diagram // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1988.—72, N 2.—P. 259—289.
 35. *De Koter A., Heap S. R., Hubeny I.* On the evolutionary phase and mass loss of the Wolf-Rayet-like stars in R136a // Astrophys. J.—1997.—477, N 2.—P. 792—816.
 36. *De Koter A., Heap S. R., Hubeny I.* An empirical isochrone of very massive stars in R136a // Astrophys. J.—1998.—509, N 2.—P. 879—896 .
 37. *De Marco O., Crowther P. A.* M4-18: the planetary nebula and its WC10 central star // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1999.—306, N 3.—P. 931—942.
 38. *De Mello D., Schaerer D., Heldmann J., Leitherer C.* Searching for Wolf-Rayet stars in I Zw 18: the origin of He II emission // Astrophys. J.—1998.—507, N 1.—P. 199—209.
 39. *D'Odorico S., Rosa M.* Wolf-Rayet stars in the giant H II region NGC 604 // Astrophys. J.—1981.—248, N 3.—P. 1015—1020.
 40. *Drissen L.* The stellar content of NGC 3603 // Wolf-Rayet phenomena in massive stars and starburst galaxies: Proc. IAU Symp. N 193, Puerto Vallarta, Mexico, 1999 / Eds Van der K. A. Hucht, G. Koenigsberger, P. A. J. Eenens. — 1999.—P. 403—411.
 41. *Drissen L., Moffat A. F. M., Walborn N., Shara M. M.* The dense Galactic starburst NGC 3603.

- I. HST/FOS spectroscopy of individual stars in the core and the source of ionization and kinetic energy // *Astron. J.*—1995.—**110**, N 5.—P. 2235—2241.
42. *Drissen L., Robert C., Moffat A. F. G.* Polarization variability among Wolf-Rayet stars. VII — Single stars WR 14, WR 25 and WR 69 // *Astrophys. J.*—1992.—**386**, N 1.—P. 288—292.
43. *Drissen L., Roy J.-R., Moffat A. F. J., Shara M. M.* The ionizing star clusters of giant H II regions in NGC 2403 // *Astron. J.*—1999.—**117**, N 3.—P. 1249—1274.
44. *Dufour R. J., Hester J. J.* Extended emission and star formation in I Zw 18 // *Astrophys. J.*—1990.—**350**, N 1.—P. 149—154.
45. *Eckart A., Cameron M., Boller Th., Krabbe A., Blietz M., Nakai N., Wagner S. J., Sternberg A.* The starburst in the Wolf-Rayet nucleus of the liner NGC 6764 // *Astrophys. J.*—1996.—**472**, N 2.—P. 588—599.
46. *Esteban D., Peimbert M.* Abundance gradients in the Galaxy (invited paper) // *Rev. mex. astron. y astrofis.*, Ser. Conf.—1995.—**3**.—P. 133—140.—(The first Mexico—Texas conference on astrophysics: gaseous nebulae and star formation, April 3-5, 1995).
47. *Esteban D., Peimbert M.* The chemical enrichment by massive stars in Wolf-Rayet galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**300**, N 1.—P. 78—90.
48. *Esteban C., Vilchez J. M.* On the chemodynamics of Wolf-Rayet ring nebulae — NGC 6888 // *Astrophys. J.*—1992.—**390**, N 2.—P. 536—540.
49. *Esteban C., Vilchez J. M., Manchado A., Edmunds M.* Spatially resolved spectroscopy of WR ring nebulae. I — NGC 2359 and RCW 78 // *Astron. and Astrophys.*—1990.—**227**, N 2.—P. 515—525.
50. *Gabler R., Gabler A., Kudritzki R. P., Puls J., Pauldrach A.* Unified NLTE model atmospheres including spherical extension and stellar winds — Method and first results // *Astron. and Astrophys.*—1989.—**226**, N 1.—P. 162—182.
51. *Garcia-Vargas M., Bressan A., Diaz A. I.* Evolutionary models for giant extragalactic H II regions at different metallicities // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—**112**, N 1.—P. 13—34.
52. *Garmany C. D., Conti P. S.* Mass loss in O-type stars — parameters which affect it // *Astrophys. J.*—1984.—**284**, N 2.—P. 705—711.
53. *Garnett D. R., Chu Y. H.* A new ejecta shell surrounding a Wolf-Rayet star in the LMC // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1994.—**106**, N 700.—P. 626—631.
54. *Garnett D. R., Kennicutt R. C. J., Chu Y.-H., Skillman E. D.* He II emission in extragalactic H II regions // *Astrophys. J.*—1991.—**373**, N 2.—P. 458—464.
55. *Garnett D. R., Shields G. A.* The composition gradient across M81 // *Astrophys. J.*—1987.—**317**, N 1.—P. 82—101.
56. *Goldader J. D., Joseph R. D., Doyon R., Sanders D. B.* Spectroscopy of luminous infrared galaxies at 2 microns. III. Analysis for galaxies with $\log(L_{\text{IR}}/L_{\odot}) \geq 11.2$ // *Astrophys. J.*—1997.—**474**, N 1.—P. 104—120.
57. *Gonzalez-Delgado R. M., Garcia-Vargas M. L., Goldader J., et al.* Multiwavelength study of the starburst galaxy NGC 7714. I. Ultraviolet-optical spectroscopy // *Astrophys. J.*—1999.—**513**, N 2.—P. 707—719.
58. *Gonzalez-Delgado R. M., Leitherer C., Heckman T., Cerviño M.* Are the super-star clusters of NGC 1569 in poststarburst phase? // *Astrophys. J.*—1997.—**483**, N 2.—P. 705—716.
59. *Gonzalez-Delgado R. M., Perez E., Tenorio-Tagle G., et al.* Violent star formation in NGC 2363 // *Astrophys. J.*—1994.—**437**, N 1.—P. 239—261.
60. *González-Riestra R., Rego M., Zamorano J.* Star-forming knots in Mrk 178 // *Astron. and Astrophys.*—1988.—**202**, N 1.—P. 27—34.
61. *Greese N., Noels A.* Standard abundances // *Cosmic Abundances: ASP Conf. Ser.* / Eds S. S. Holt, G. Sonneborn.—1996.—**99**.—P. 117—126.
62. *Guseva N. G., Izotov Y. I., Kniazev A. Y., Lipovetsky V. A.* Evidences of supernovae in the spectra of blue compact galaxies with low heavy-element abundances // *Kinematics and Phys. of Celestial Bodies.*—1995.—**11**, N 2.—P. 74—79.
63. *Guseva N. G., Izotov Y. I., Kniazev A. Y., Lipovetsky V. A.* Spectrophotometry with low and moderate spectral resolution for the blue compact galaxies // *Bull. Spec. Astrophys. Obs.*—1996.—**41**.—P. 41—51.
64. *Guseva N. G., Izotov Y. I., Thuan T. X.* Comparison between metallicities of stars and gas in blue compact galaxies // *Kinematics and Phys. of Celestial Bodies.*—1998.—**14**, N 1.—P. 41—51.
65. *Guseva N. G., Izotov Y. I., Thuan T. X.* A spectroscopic study of a large sample of Wolf-Rayet galaxies // *Astrophys. J.*—2000.—**531**, N 2.—P. 776—803.
66. *Hamann F.* Metal abundances and ionization in quasar intrinsic absorbers // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1997.—**109**, N 1.—P. 279—305.
67. *Hamann W.-R., Koesterke L.* Spectrum formation in clumped stellar winds: consequences for the analyses of Wolf-Rayet spectra // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**335**, N 3.—P. 1003—1008.
68. *Hamann W.-R., Koesterke L., Wessolowski U.* Spectral atlas of the Galactic Wolf-Rayet stars

- (WN sequence) // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—113, N 3.—P. 459—471.
69. *Hamann W.-R., Koesterke L., Wessolowski U.* Spectral analyses of the Galactic Wolf-Rayet stars: hydrogen-helium abundances and improved stellar parameters for the WN class // *Astron. and Astrophys.*—1995.—299, N 1.—P. 151—162.
 70. *Heap S. R.* R 136a and its implications for understanding Wolf-Rayet stars and Wolf-Rayet galaxies // Wolf-Rayet phenomena in massive stars and starburst galaxies: Proc. IAU Symp. N 193, Puerto Vallarta, Mexico, 1999 / Eds Van der K. A. Hucht, G. Koenigsberger, P. A. J. Eenens. —1999.—P. 412—417.
 71. *Heckman T. M., Gonzalez-Delgado R., Leitherer C., et al.* A powerful nuclear starburst in the Seyfert galaxy Markarian 477: implications for the starburst-active galactic nuclear connection // *Astrophys. J.*—1997.—482, N 1.—P. 114—132.
 72. *Henry R. B. C., Worthey G.* The distribution of heavy elements in spiral and elliptical galaxies // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1999.—111, N 762.—P. 919—945.
 73. *Heydari-Malayeri M., Courbin F., Rauw G., et al.* The LMC transition star R 84 and the core of the LH 39 OB association // *Astron. and Astrophys.*—1997.—326, N 1.—P. 143—154.
 74. *Hidayat B., Supelli K., Van der Hucht K. A.* The galactic distribution of WR stars // Wolf-Rayet stars: observations, physics, evolution: Proc. IAU Symp. N 99, 1982 / Eds C. De Loore, A. J. Willis. — Dordrecht: Reidel, 1982.—P. 767—773.
 75. *Hillier D. J.* The effects of electron scattering and wind clumping for early emission line stars // *Astron. and Astrophys.*—1991.—247, N 2.—P. 455—468.
 76. *Hillier D. J.* The calculation of line polarization due to scattering by electrons in multi-scattering axisymmetric envelopes // *Astron. and Astrophys.*—1996.—308, N 2.—P. 521—534.
 77. *Hillier D. J., Miller D. L.* Constraints on the evolution of massive stars through spectral analysis. I. The WC5 star HD 165763 // *Astrophys. J.*—1999.—519, N 1.—P. 354—371.
 78. *Hillier D. J., Crowther P. A., Najarro F., Fullerton A. W.* An optical and near-IR spectroscopic study of the extreme P Cygni-type supergiant HDE 316285 // *Astron. and Astrophys.*—1998.—340, N 2.—P. 483—496.
 79. *Hiltner W. A., Schild R. E.* Spectral classification of Wolf-Rayet stars // *Astrophys. J.*—1966.—143, N 3.—P. 770—773.
 80. *Huang J. H., Gu Q. S., Ji L., et al.* New Wolf-Rayet galaxies with detection of WC stars // *Astrophys. J.*—1999.—513, N 1.—P. 215—223.
 81. *Hunter D. A.* Properties of nearby giant star-forming regions // Wolf-Rayet phenomena in massive stars and starburst galaxies: Proc. IAU Symp. N 193, Puerto Vallarta, Mexico, 1999 / Eds Van der K. A. Hucht, G. Koenigsberger, P. A. J. Eenens. —1999.—P. 418—428.
 82. *Hunter D. A., Gallagher J. S. III* An emission-line study of supergiant ionized filaments in irregular galaxies // *Astrophys. J.*—1997.—475, N 1.—P. 65—75.
 83. *Hyung S., Aller L. H., Feibelman W. A.* Spectroscopic observations of the planetary nebula NGC 6818 // *Astrophys. J.*—1999.—514, N 2.—P. 878—894.
 84. *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 SBS 0335-052 // *Astrophys. J.*—1999.—527, N 2.—P. 757—777.
 85. *Izotov Y. I., Dyak A. B., Chaffee F. H., et al.* Spectrophotometry of blue compact galaxies with broad emission lines: evidence for high-velocity gas motion // *Astrophys. J.*—1996.—458, N 2.—P. 524—532.
 86. *Izotov Y. I., Foltz C. F., Green R. F., et al.* I Zw 18: a new Wolf-Rayet galaxy // *Astrophys. J.*—1997.—487, N 1.—P. L37—L40.
 87. *Izotov Y. I., Guseva N. G.* Spectral investigation of the blue compact dwarf galaxies in the Virgo cluster // *Astrofizika.*—1990.—30, N 2.—P. 341—351.
 88. *Izotov Y. I., Guseva N. G., Karachentsev I. D., Karachentseva V. E.* Spectrophotometry of giant extragalactic regions of ionized hydrogen in dwarf galaxies of M81 galaxy group // *Astron. and Astrophys. Transactions.*—1992.—1, N 4.—P. 283—293.
 89. *Izotov Y. I., Lipovetsky V. A., Chaffee F. H., et al.* SBS 0335-052, a probable nearby young dwarf galaxy: evidence pro and con // *Astrophys. J.*—1997.—476, N 2.—P. 698—711.
 90. *Izotov Y. I., Lipovetsky V. A., Guseva N. G., et al.* Spectrophotometry of 83 possible blue compact dwarf galaxies from the Second Byurakan Survey // *Astron. and Astrophys. Transactions.*—1993.—3, N 3.—P. 197—236.
 91. *Izotov Y. I., Lipovetsky V. A., Guseva N. G., et al.* New blue compact dwarf galaxies with low heavy element abundances // *Astron. and Astrophys.*—1991.—247, N 2.—P. 303—306.
 92. *Izotov Y. I., Papaderos P., Thuan T. X., et al.* Is I Zw 18 a young galaxy? // *Astron. and Astrophys.*—2000.
 93. *Izotov Y. I., Thuan T. X.* The primordial abundance of 4He revisited // *Astrophys. J.*—1998.—500, N 1.—P. 188—216.
 94. *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 2.—P. 647—667.
 95. *Izotov Y. I., Thuan T. X., Lipovetsky V. A.* The primordial helium abundance: systematic

- effectes and a new determination // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1997.—**108**, N 1.—P. 1—39.
96. *Kingsburgh R. L., Barlow M. J., Storey P. J.* Properties of the WO Wolf-Rayet stars // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**295**, N 1.—P. 75—100.
 97. *Klein U., Weiland H., Brinks E.* A radio-optical study of blue compact dwarf galaxies. I. — Radio continuum observations // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**246**, N 2.—P. 323—340.
 98. *Kobulnicky H. A., Skillman E. D.* Elemental abundance variations and chemical enrichment from massive stars in starbursts. I. NGC 4214 // *Astrophys. J.*—1996.— **471**, N 1.—P. 211—236.
 99. *Koesterke L., Hamann W.-R.* Spectral analyses of 25 Galactic Wolf-Rayet stars of the carbon sequence // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**299**, N 2.—P. 503—519.
 100. *Kru"ger H., Fritze-von Alvensleben U., Fricke K. J., Loose H.-H.* Spectroscopic evolutionary synthesis of the emission lines He II 4686 Å and C III 4650 Å in Wolf-Rayet galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1992.—**259**, N 2.—P. L73—L76.
 101. *Kunth D., Contini T.* Wolf-Rayet stars as tracing the AGN-starburst connection // Wolf-Rayet phenomena in massive stars and starburst galaxies: Proc. IAU Symp. N 193, Puerto Vallarta, Mexico, 1999 / Eds Van der K. A. Hucht, G. Koenigsberger, P. A. J. Eenens.—1999.—P. 725—728.
 102. *Kunth D., Joubert M.* Wolf-Rayet stars in “lazy” galaxies: a statistical approach // *Astron. and Astrophys.*—1985.—**142**, N 2.—P. 411—420.
 103. *Kunth D., Sargent W. L. W.* Observations of Wolf-Rayet stars in the emission-line galaxy Tololo 3 // *Astron. and Astrophys.*—1981.—**101**, N 1.—P. L5—L8.
 104. *Kunth D., Schild H.* Further galaxies with Wolf-Rayet emission features // *Astron. and Astrophys.*—1986.—**169**, N 1/2.—P. 71—77.
 105. *Kurucz R. L.* New opacity calculations // Stellar atmospheres: Beyond classical models. NATO ASI Ser. C.—1991 / Eds L. Crivellari, I. Hubeny, D. G. Hummer.—**341**.—P. 441—472.
 106. *Lacey C., Silk J.* Tidally triggered galaxy formation. I — Evolution of the galaxy luminosity function // *Astrophys. J.*—1991.—**381**, N 1.—P. 14—32.
 107. *Langer N., Heger A.* Evolution and explosion of Wolf-Rayet stars // Wolf-Rayet phenomena in massive stars and starburst galaxies: Proc. IAU Symp. N 193, Puerto Vallarta, Mexico, 1999 / Eds Van der K. A. Hucht, G. Koenigsberger, P. A. J. Eenens.—1999.—P. 187—195.
 108. *Legrand F., Kunth D., Roy J.-R., et al.* Detection of WR stars in the metal-poor starburst galaxy I Zw 18 // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**326**, N 1.—P. L17—L20.
 109. *Legrand F., Kunth D., Mas-Hesse J. M., Lequeux J.* Evidences for an expanding shell in the blue compact dwarf galaxy Haro 2 // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**326**, N 3.—P. 929—935.
 110. *Leitherer C.* Synthesis models for starburst populations with Wolf-Rayet stars // Wolf-Rayet phenomena in massive stars and starburst galaxies: Proc. IAU Symp. N 193, Puerto Vallarta, Mexico, 1999 / Eds Van der K. A. Hucht, G. Koenigsberger, P. A. J. Eenens.—1999.—P. 527—538.
 111. *Leitherer C., Heckman T. M.* Synthetic properties of starburst galaxies // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1995.—**96**, N. 1—P. 9—38.
 112. *Leuenhagen U., Hamann W.-R.* V 348 Sagittarii: analysis of the [WC 12] stellar spectrum // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**283**, N 2.—P. 567—581.
 113. *Leuenhagen U., Hamann W.-R.* Spectral analyses of late-type [WC] central stars of planetary nebulae: more empirical constraints for their evolutionary status // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**330**, N 1.—P. 265—276.
 114. *Leuenhagen U., Hamann W.-R., Jeffery C. S.* Spectral analyses of late-type WC central stars of planetary nebulae // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**312**, N 1.—P. 167—185.
 115. *Maeder A.* The relative numbers of Wolf-Rayet stars in galaxies with active star formation: the metallicity effect // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**242**, N 1.—P. 93—111.
 116. *Maeder A., Conti P. S.* Massive star populations in nearby galaxies // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—1994.—**32**.—P. 227—275.
 117. *Maeder A., Lequeux J., Azzopardi M.* The numbers of red supergiants and WR stars in galaxies — an extremely sensitive indicator of chemical composition // *Astron. and Astrophys.*—1980.—**90**, N. 1/2—P. L17—L20.
 118. *Maeder A., Meynet G.* New models of Wolf-Rayet stars and comparison with data in galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**287**, N 3.—P. 803—816.
 119. *Marchenko S. V., Moffat A. F. J., Eversberg T., et al.* A comprehensive variability study of the enigmatic WN8 stars — final results // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—**294**, N 2.—P. 642—656.
 120. *Martin C. L.* Kinematic evidence for superbubbles in I Zw 18: constraints on the star formation history and chemical evolution // *Astrophys. J.*—1996.—**465**, N 2.—P. 680—690.
 121. *Masegosa J., Moles M., del Olmo A.* Massive star formation in HII galaxies: the presence of Wolf-Rayet stars // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**244**, N 1.—P. 274—279.
 122. *Mas-Hesse J. M., Kunth D.* Evolutionary population synthesis in starburst regions // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1991.—**88**, N 3.—P. 399—450.
 123. *Mas-Hesse J. M., Kunth D.* A comprehensive study of intense star formation bursts in irregular

- and compact galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**349**, N 2.—P. 765—795.
124. *Massey P.* The masses of Wolf-Rayet stars // *Astrophys. J.*—1981.—**246**, N 1.—P. 153—160.
125. *Massey P.* What the galaxies of the Local Group tell us about massive star evolution? // Wolf-Rayet phenomena in massive stars and starburst galaxies: Proc. IAU Symp. N 193, Puerto Vallarta, Mexico, 1999 / Eds Van der K. A. Hucht, G. Koenigsberger, P. A. J. Eenens.—1999.—P. 187—195.
126. *Massey P., Armandroff T. E.* The massive star content, reddening and distance of the nearby irregular galaxy IC 10 // *Astron. J.*—1995.—**109**, N 6.—P. 2470—2479.
127. *Massey P., Armandroff T. E., Conti P.* IC 10: a “poor cousin” rich in Wolf-Rayet stars // *Astron. J.*—1992.—**103**, N 4.—P. 1159—1165.
128. *Massey P., Conti P.* Spectroscopic studies of Wolf-Rayet stars with absorption lines. II. The WN8 standard star HD 177230 // *Astrophys. J.*—1980.—**242**, N 2.—P. 638—645.
129. *Massey P., Conti P.* Spectroscopy of six Wolf-Rayet stars: the latest and faintest // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1983.—**95**, N 569.—P. 440—446.
130. *Massey P., Conti P.* Wolf-Rayet stars in M33 // *Astrophys. J.*—1983.—**273**, N 2.—P. 576—589.
131. *Massey P., Conti P., Armandroff T. E.* The spectra of extragalactic Wolf-Rayet stars // *Astron. J.*—1987.—**94**, N 6.—P. 1538—1555.
132. *Massey P., Grove K.* The ‘WN + WC’ Wolf-Rayet stars MR 111 and GP CEP — spectrum binaries or missing links? // *Astrophys. J.*—1989.—**344**, N 2.—P. 870—875.
133. *Massey P., Johnson O.* Evolved massive stars in the Local Group. II. A new survey for Wolf-Rayet stars in M33 and its implications for massive star evolution: evidence of the “Conti scenario” in action // *Astrophys. J.*—1998.—**505**, N 2.—P. 793—827.
134. *Massey P., Johnson O., Degioia-Eastwood K.* The initial mass function and massive star evolution in the OB associations of the Northern Milky Way // *Astrophys. J.*—1995.—**454**, N 2.—P. 151—171.
135. *Massey P., Hunter D. A.* Star formation in R136: a cluster of O3 stars revealed by Hubble Space Telescope spectroscopy // *Astrophys. J.*—1998.—**493**, N 1.—P. 180—194.
136. *Massey P., Lang C. C., Degioia-Eastwood K., Garmany C. D.* Massive stars in the field and associations of the Magellanic Clouds: The upper mass limit, the initial mass function and a critical test of main-sequence stellar evolutionary theory // *Astrophys. J.*—1995.—**438**, N 1.—P. 188—217.
137. *Méndez D. I., Cairós L. M., Esteban C., Vilchez J. M.* Imaging and spectrophotometry of Markarian 1094: implications for the recent star formation // *Astron. J.*—1999.—**117**, N 4.—P. 1688—1699.
138. *Méndez D. I., Esteban C.* Broad low-intensity wings in the emission-line profiles of four Wolf-Rayet galaxies // *Astrophys. J.*—1997.—**488**, N 2.—P. 652—668.
139. *Méndez D. I., Esteban C.* Pox 4 and Tol 35: two peculiar Wolf-Rayet galaxies // *Astron. J.*—1999.—**118**, N 6.—P. 2723—2733.
140. *Méndez D. I., Esteban C., Balcells M.* Zw 0855 + 06: a Wolf-Rayet dwarf galaxy triggered by a dwarf-dwarf interaction // *Astron. J.*—1999.—**117**, N 3.—P. 1229—1236.
141. *Méndez D. I., Esteban C., Filipović M. D., et al.* A complex bipolar outflow in the Wolf-Rayet BCDG He 2-10 // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**349**, N 2.—P. 801—811.
142. *Meynet G.* Wolf-Rayet population syntheses for starburst galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**298**, N 3.—P. 767—783.
143. *Meynet G., Maeder A., Schaller G., et al.* Grids of massive stars with high mass loss rates. V. From 12 to $120M_{\text{sun}}$ at $Z = 0.001, 0.004, 0.008, 0.020$ and 0.040 // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1994.—**103**, N 1.—P. 97—105.
144. *Meylan G., Maeder A.* The populations of massive stars in the Galaxy — Their frequency gradients in relation to metallicity and initial mass function // *Astron. and Astrophys.*—1983.—**124**, N 1.—P. 84—88.
145. *Meurer G. R., Heckman T. M., Leitherer C., et al.* Starbursts and star clusters in the ultraviolet // *Astron. J.*—1995.—**110**, N 6.—P. 2665—2691.
146. *Mihos J. C., Richstone D. O., Bothun G. D.* Models of star formation in interacting and merging disk galaxies // *Astrophys. J.*—1992.—**400**, N 1.—P. 153—162.
147. *Miller G. E., Scalo J. M.* The initial mass function and stellar birthrate in the solar neighborhood // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1979.—**41**, N 3.—P. 513—547.
148. *Moffat A. F. G.* A WC9 subclass Wolf-Rayet star in the Large Magellanic Cloud? // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**244**, N 1.—P. L9—L10.
149. *Moffat A. F. G.* Search for second-phase Wolf-Rayet binaries among WRE stars // *Astron. and Astrophys.*—1992.—**253**, N 2.—P. 425—430.
150. *Moffat A. F. G., Niemella V. S., Marraco H. G.* Wolf-Rayet stars in the Magellanic Clouds. VI — Spectroscopic orbits of WC binaries and implications for W-R evolution // *Astrophys. J.*—1990.—**348**, N 1.—P. 232—241.
151. *Moffat A. F. G., Niemela V. S., Phillips M. M., et al.* The Wolf-Rayet population in 30 Doradus

- and its surroundings // *Astrophys. J.*—1987.—312, N 2.—P. 612—625.
152. *Moffat A. F. J., Robert C.* Clumping and mass loss in hot star winds // *Astrophys. J.*—1994.—421, N 1.—P. 310—313.
 153. *Morris P. W., Van der Hucht K. A., Crowther P. A., et al.* A 0.4–20 μm spectroscopic study of the clumped wind of WR 147 // *Astron. and Astrophys.*—2000.—353, N 2.—P. 624—640.
 154. *Noeske K., Guseva N. G., Fricke K. J., et al.* The cometary blue compact dwarf galaxies Mrk 59 and Mrk 71: a clue to dwarf galaxy evolution? // *Astron. and Astrophys.*—2000.
 155. *Nota A., Pasquali A., Drissen L., et al.* O stars in transition. I. Optical spectroscopy of Ofpe/WN9 and related stars // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1996.—102, N 1.—P. 383—410.
 156. *Nugis T., Crowther P. A., Willis A. J.* Clumping-corrected mass-loss rates of Wolf-Rayet stars // *Astron. and Astrophys.*—1998.—333, N 3.—P. 956—969.
 157. *Oey M. S., Dopita M. A., Shields J. C., Smith R. C.* Calibration of nebular emission-line diagnostics: I. Stellar effective temperatures // *Space telescope Sci. institute.*—2000.—N 1409.—P. 1—48.
 158. *Ohyama Y., Taniguchi Y., Terlevich R.* A new superwind Wolf-Rayet galaxy Markarian 1259 // *Astrophys. J.*—1997.—480, N 1.—P. L9—L12.
 159. *Olofsson K.* Spectral evolutionary synthesis models of metal-poor star forming regions // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1989.—80, N 3.—P. 317—372.
 160. *Osterbrock D. E., Cohen R. D.* Two galaxies with Wolf-Rayet features in their spectra // *Astrophys. J.*—1982.—261, N 1.—P. 64—69.
 161. *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.
 162. *Papaderos P., Izotov Y. I., Fricke K. J., et al.* On the age of the nearby blue compact dwarf galaxy SBS 0335-052 // *Astron. and Astrophys.*—1998.—338, N 1.—P. 43—55.
 163. *Pereira C. B., Machado M. A. D., Landebery S. J. C., Da Conceição F.* The identification of the star SPH 2 as a new WN4 star with strong CIV // *Astron. and Astrophys.*—1998.—338, N 3.—P. L91—L94.
 164. *Perry J. J., Dyson J. E.* Shock formation of the broad emission-line regions in QSOs and active galactic nuclei // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1985.—213, N 3.—P. 665—710.
 165. *Pettini M., Smith L., King D. L., Hunstead R. W.* The metallicity of high-redshift galaxies: the abundance of zinc in 34 damped LY alpha systems from $Z = 0.7$ to 3.4 // *Astrophys. J.*—1997.—486, N 2.—P. 665—680.
 166. *Phillips A. C., Conti P. S.* Detection of WC9 stars in NGC 1365 // *Astrophys. J.*—1992.—395, N 2.—P. L91—L93.
 167. *Puxley P. J., Doyon R., Ward M. J.* The spatial distribution of stellar CO absorption in M83 // *Astrophys. J.*—1997.—476, N 1.—P. 120—126.
 168. *Rosa M., Mathis J. S.* On the chemical homogeneity of the 30 Doradus HII region and a local enrichment by Wolf-Rayet stars // *Astrophys. J.*—1987.—317, N 1.—P. 163—172.
 169. *Russell S. C., Dopita M. A.* Abundances of the heavy elements in the Magellanic Clouds. II. H II regions and supernova remnants // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1990.—74, N 1.—P. 93—128.
 170. *Sargent W. L. W., Filippenko A. V.* Luminous clusters of Wolf-Rayet stars in the SBmIII galaxy NGC 4214 // *Astron. J.*—1991.—102, N 2.—P. 107—112.
 171. *Satyapal S., Watson D. M., Pipher J. L., et al.* The intrinsic properties of the stellar clusters in the M82 starburst complex: propagating star formation? // *Astrophys. J.*—1997.—483, N 1.—P. 148—160.
 172. *Schaerer D.* About the initial mass function and He II emission in young starbursts // *Astrophys. J.*—1996.—467, N 1.—P. L17—L20.
 173. *Schaerer D., Contini T., Kunth D., Meynet G.* Detection of Wolf-Rayet stars of WN and WC subtypes in super-star clusters of NGC 5253 // *Astrophys. J.*—1997.—481, N 2.—P. L75—L79.
 174. *Schaerer D., Contini T., Kunth D.* Populations of WC and WN stars in Wolf-Rayet galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1999.—341, N 3.—P. 399—417.
 175. *Schaerer D., Contini T., Pindao M.* New catalogue of Wolf-Rayet galaxies and high-excitation extra-galactic HII regions // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1999.—136, N 1.—P. 35—52.
 176. *Schaerer D., De Koter A.* Combined stellar structure and atmosphere models for massive stars. III. Spectral evolution and revised ionizing fluxes of O3-B0 stars // *Astron. and Astrophys.*—1997.—322, N 3.—P. 598—614.
 177. *Schaerer D., De Koter A., Schmutz W., Maeder A.* Combined stellar structure and atmosphere models for massive stars. I. Interior evolution and wind properties on the main sequence // *Astron. and Astrophys.*—1996.—310, N 3.—P. 837—848.
 178. *Schaerer D., Guseva N. G., Izotov Y. I., Thuan T. X.* Massive star populations and IMF in metal-rich starbursts // *Astron. and Astrophys.*—2000.
 179. *Schaerer D., Guseva N. G., Izotov Y. I.* Super star clusters as probes of massive star evolution and the IMF at extreme metallicities // *Massive stellar clusters: ASP Conf. Ser.*, 2000 / Eds

- Lancon A., Boily C. M.—2000.
180. *Schaerer D., Vacca W. D.* New models for Wolf-Rayet and O star populations in young starbursts // *Astrophys. J.*—1998.—**497**, N 2.—P. 618—644.
 181. *Schaller G., Schaerer D., Meynet G., Maeder A.* New grids of stellar models from 0.8 to 120 solar masses at $Z = 0.020$ and $Z = 0.001$ // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1992.—**96**, N 2.—P. 269—331.
 182. *Schild H., Smith L. J., Willis A. J.* Optical spectroscopy of WR stars in M 33 and M 31 // *Astron. and Astrophys.*—1990.—**237**, N 1.—P. 169—177.
 183. *Schmutz W., Leitherer C., Gruenwald R.* Theoretical continuum energy distributions for Wolf-Rayet stars // *Publ. Astron. Soc. Pac.*—1992.—**104**, N 682.—P. 1164—1172.
 184. *Smith L. F.* A revised spectral classification system and a new catalogue for galactic Wolf-Rayet stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1968.—**138**, N 1.—P. 109—121.
 185. *Smith L. F.* Wolf-Rayet populations in dwarf galaxies // Wolf-Rayet stars and interrelations with other massive stars in galaxies: IAU Symp., 1991 / Eds Van der K. A. Hucht, B. Hidayat.—1991.—P. 601—612.
 186. *Smith L. J., Crowther P. A., Prinja R. K.* A study of the luminous blue variable candidate He 3-519 and its surrounding nebula // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**281**, N 3.—P. 833—854.
 187. *Smith L. J., Crowther P. A., Willis A. J.* A detailed study of a very late WN star in M33 // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**302**, N 3.—P. 830—838.
 188. *Smith L. F., Maeder A.* Comparison of predicted and observed properties of WC stars. Explanation of the subtype gradient in galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1991.—**241**, N 1.—P. 77—86.
 189. *Smith L. J., Nota A., Pasquali A., et al.* Ejected nebulae as probes of the evolution of massive stars in the Large Magellanic Cloud // *Astrophys. J.*—1998.—**503**, N 1.—P. 278—296.
 190. *Smith L. F., Shara M. M., Moffat A. F. J.* Uniformity of the WC stars in the Large Magellanic Cloud // *Astrophys. J.*—1990.—**348**, N 2.—P. 471—484.
 191. *Smith L. F., Shara M. M., Moffat A. F. J.* Distances of galactic WC stars from emission-line fluxes and a quantification of the WC classification // *Astrophys. J.*—1990.—**358**, N 1.—P. 229—239.
 192. *Smith L. F., Shara M. M., Moffat A. F. J.* A three-dimensional classification for WN stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1996.—**281**, N 1.—P. 163—191.
 193. *Stasińska G.* A grid of model H II regions for extragalactic studies // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1990.—**83**, N 3.—P. 501—538.
 194. *Stasińska G., Schaerer D.* Combined stellar structure and atmosphere models for massive stars IV. The impact on the ionization structure of single star HII regions // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**322**, N 2.—P. 615—623.
 195. *Stevens I. R., Strickland D. K.* A ROSAT survey of Wolf-Rayet galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—**294**, N 2.—P. 523—547.
 196. *Stevens I. R., Strickland D. K.* A ROSAT survey of Wolf-Rayet galaxies — II. The extended sample // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—**301**, N 1.—P. 215—230.
 197. *Stothers R. B., Chin Chao-wen.* The brightest supergiants predicted by theory // *Astrophys. J.*—1999.—**522**, N 2.—P. 960—964.
 198. *Taylor C., Thomas D., Brinks E., Skillman E. D.* A survey of low surface brightness dwarf galaxies to detect H I-rich companions // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1996.—**107**, N 1.—P. 143—174.
 199. *Telles E., Terlevich R.* The environment of HII galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1995.—**275**, N 1.—P. 1—8.
 200. *Terlevich R., Melnick J., Masegosa J., et al.* A spectrophotometric catalog of H II galaxies // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1991.—**91**, N 2.—P. 285—324.
 201. *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**, N 1.—P. 108—123.
 202. *Thuan T. X., Izotov Y. I., Lipovetsky V. A.* Hubble Space Telescope observations of the unusual blue compact dwarf galaxy Markarian 996 // *Astrophys. J.*—1996.—**463**, N 1.—P. 120—133.
 203. *Torres A. V., Conti P.* The spectra of Wolf-Rayet stars. II. The WC 9 subclass // *Astrophys. J.*—1984.—**280**, N 1.—P. 181—188.
 204. *Vacca W. D., Conti P. S.* Optical spectrophotometry of Wolf-Rayet galaxies // *Astrophys. J.*—1992.—**401**, N 2.—P. 543—558.
 205. *Vacca W. D.* On the determination of the number of O stars in H II regions and starburst galaxies // *Astrophys. J.*—1994.—**421**, N 1.—P. 140—152.
 206. *Vacca W. D., Robert C., Leitherer C., Conti P.* The stellar content of 30 Doradus derived from spatially integrated ultraviolet spectra: A test of spectral synthesis models // *Astrophys. J.*—1995.—**444**, N 2.—P. 647—662.
 207. *Vanbeveren D.* A comparison between the observed and theoretically predicted distribution of WR stars in the Galaxy and in the Magellanic Clouds // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**294**, N 1.—P. 107—113.

208. *Vanbeveren D., De Loore C., Van Rensbergen W.* Massive stars // *Astron. and Astrophys. Rev.*—1998.—9—P. 63—152.
209. *Vanbeveren D., De Loore C., Van Rensbergen W.* Massive stars // Wolf-Rayet phenomena in massive stars and starburst galaxies: Proc. IAU Symp. N 193, Puerto Vallarta, Mexico, 1999 / Eds Van der K. A. Hucht, G. Koenigsberger, P. A. J. Eenens. — 1999.—P. 187—195.
210. *Vanbeveren D., Van Bever J., De Donder E.* The effect of binary evolution on the theoretically predicted distribution of WR and O-type stars in starburst regions and in abruptly-terminated star formation regions // *Astron. and Astrophys.*—1997.—317, N 2.—P. 487—502.
211. *Van der Hucht K. A., Conti P. S., Lundstrom I., Stenholm B.* A bibliography on galactic Wolf-Rayet literature 1967—1980 — Appendix to the Sixth Catalogue of Galactic Wolf-Rayet stars, their past and present // *Space Sci. Rev.*—1981.—28, N 3.—P. 307—382.
212. *Van der Hucht K. A., Hidayat B., Admiranto A. G., Supelli K. R., Doom C.* The Galactic distribution and subtype evolution of Wolf-Rayet stars. III // *Astron. and Astrophys.*—1988.—199, N 1/2.—P. 217—234.
213. *Van der Hucht K. A., Williams P. M., Spoetra T. A. Th., Bruyn de A. G.* Non isotropic and variable outflows from stars // *ASP Conf. Ser.* / Eds L. Drissen, C. Leitherer, A. Nota.—1992.—22.—P. 253.
214. *Vilchez J. M., Pagel B. E. J., Diaz A. I., Terlevich E., Edmunds M. G.* The chemical composition gradient across M 33 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1988.—235, N 3.—P. 633—653.
215. *Walborn N. R., Drissen L., Parker J. W., et al.* HST/FOS spatially resolved spectral classification of compact OB groups in the Large Magellanic Cloud // *Astron. J.*—1999.—118, N 4.—P. 1684—1699.
216. *Walsh J. R., Roy J.-R.* Nitrogen abundances in the amorphous galaxy NGC 5253 // *Astrophys. J.*—1987.—319, N 2.—P. L57—L62.
217. *Walsh J. R., Roy J.-R.* Optical spectroscopic and abundance mapping of the amorphous galaxy NGC 5253 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1989.—239, N 2.—P. 297—324.
218. *Walter F., Brinks E., Duric N., Klein U.* A dynamical analysis of the HII galaxy II Zwicky 33 and its low surface brightness companion // *Astron. J.*—1997.—113, N 4.—P. 2031—2045.
219. *Willis A. J., Schild H., Smith L. J.* Optical spectroscopy of WR stars in M 33 and M 31. II The WO population and discovery of an Ofp/WN 9 star in M 33 // *Astron. and Astrophys.*—1992.—261, N 2.—P. 419—432.

Поступила в редакцию 13.07.00