

УДК 524.3.01

АТМОСФЕРЫ ЮЖНЫХ СВЕРХГИГАНТОВ α LEP И ι CAR

А. А. БОЯРЧУК, Л. С. ЛЮБИМКОВ

Поступила 31 января 1983

С помощью моделей атмосфер [6] на основе спектроскопических данных [5], полученных по спектрам с дисперсией 2 Å/мм, исследованы сверхгиганты южного неба α Lep (F0Ib) и ι Car (F0Iab). Найденны следующие значения эффективной температуры и ускорения силы тяжести: $T_{\text{эфф}} = 7300 \pm 150$ К и $\lg g = 1.75 \pm 0.2$ для α Lep; $T_{\text{эфф}} = 7300 \pm 200$ К и $\lg g = 1.4 \pm 0.2$ для ι Car. Изучено распределение скорости микротурбулентности ξ_t . Анализ линий Fe I привел к более низким значениям ξ_t по сравнению с линиями Ti II и Fe II (рис. 2). Чтобы устранить это несоответствие, необходимо учесть отклонения от ЛТР в степени ионизации [14]. В верхних слоях атмосферы α Lep наблюдается сверхзвуковая микротурбулентность; у ι Car сверхзвуковых движений не обнаружено. По относительно слабым линиям определен химический состав α Lep и ι Car (табл. 1). Содержание металлов в атмосфере α Lep в среднем оказалось близким к солнечному, а в атмосфере ι Car — пониженным относительно Солнца примерно в 2 раза (рис. 3). Найден дефицит углерода; кроме того у α Lep обнаружено повышенное содержание кремния и небольшой избыток тяжелых элементов. Путем сравнения с эволюционными расчетами [24, 25] найдены массы, радиусы, светимости и возрасты α Lep и ι Car, а также исследованного ранее [2] яркого сверхгиганта ρ Cas. Приведены основные параметры шести изученных нами F-сверхгигантов (табл. 2). Особо отмечены исключительные свойства ρ Cas — большая масса ($\sim 40 M_{\odot}$), большой радиус ($\sim 800 R_{\odot}$) и малый возраст (~ 5 млн. лет).

1. *Определение эффективной температуры и ускорения силы тяжести.* Наши исследования сверхгигантов класса F методом моделей атмосфер начались с изучения трех сверхгигантов подкласса F8 — γ Cyg, α U Mi [1] и ρ Cas [2]. Было показано, что скорость микротурбулентности ξ_t в атмосферах этих звезд быстро растет с высотой и в верхних слоях заметно превышает скорость звука. В химическом составе были обнаружены общие аномалии — дефицит углерода и избыток натрия, причем содержание Na в среднем тем больше, чем выше светимость сверхгиганта. Позже на основе той же методики была исследована атмосфера Канопуса (α Car), южного сверхгиганта класса F0 Ib-II [3, 4]. И в этом случае были найдены аномалии в содержании C и Na. Однако, в отличие от [1, 2], у α Car уже не было обнаружено столь заметной сверхзвуковой микротурбулентности, как

у поздних F-сверхгигантов γ Cyg, α UMi и ρ Cas. Кроме того, у α Car выявилась неоднозначность в определении микротурбулентности: по линиям ионов Ti II, Fe II и Cr II были найдены более высокие значения ξ , чем по линиям Fe I.

Анализ Канопуса был выполнен на основе данных [5], полученных по спектрограммам с дисперсией 2.1 А/мм. Теперь мы применим те же данные [5] для исследования еще двух южных сверхгигантов того же подкласса — α Lep (F0 Ib) и ι Car (F0 Iab). Расчеты основывались на моделях атмосфер [6], причем при вычислении главных источников непрозрачности использовалась программа ATLAS [7]. Другие детали нашей методики описаны в [8]. Все расчеты были выполнены на ЭВМ ЕС-1033 Крымской астрофизической обсерватории.

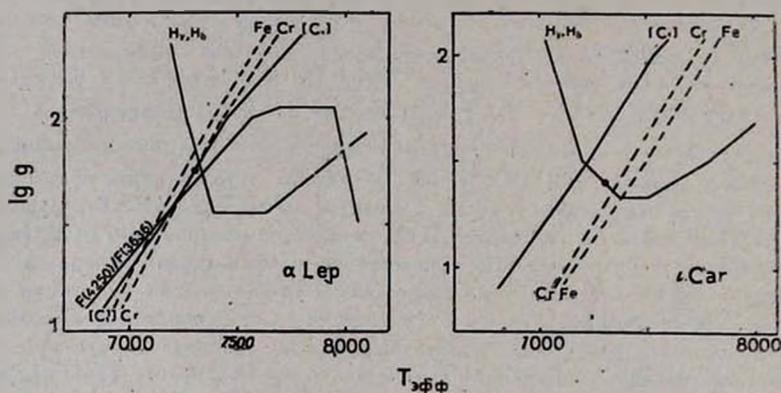


Рис. 1. Диаграммы для определения $T_{\text{эфф}}$ и $\lg g$ у сверхгигантов α Lep и ι Car. Точки соответствуют принятым моделям атмосфер.

На рис. 1 представлена диаграмма для определения эффективной температуры $T_{\text{эфф}}$ и ускорения силы тяжести g . При ее построении мы, во-первых, сравнили наблюдаемые [5] и теоретические [6] профили и эквивалентные ширины бальмеровских линий H_γ и H_β . Во-вторых, для α Lep мы сопоставили наблюдаемое [9] и теоретическое [6] отношение потоков излучения в двух участках непрерывного спектра (до и после бальмеровского предела), предварительно исправив эти потоки за поглощение в линиях согласно [5] и за межзвездное покраснение, соответствующее расстоянию $d = 300$ пс [10]. Для ι Car нам не удалось найти данных о распределении энергии в непрерывном спектре; возможно, эту звезду не изучали с такой точки зрения, так как она была заподозрена в переменности [11], хотя мы не нашли о ней никаких сведений в каталогах переменных или двойных звезд. Тогда мы привлекли еще одну характеристику непрерывного спектра — индекс $[c_7]$ в четырехцветной системе $uvby$, опреде-

ляемый формулой $[c_I] = c_1 - 0.20(b-y)$. Этот индекс свободен от влияния межзвездного поглощения. Теоретические значения $[c_I]$, основанные на моделях атмосфер [6], мы вычислили с помощью данных [12], а наблюдаемые значения $[c_I]$ определили с помощью каталога [13]. Проверка показала, что в случае α Car и α Lep линия, соответствующая на диаграмме $T_{\text{эфф}} - \lg g$ индексу $[c_I]$, хорошо согласуется с принятыми для этих звезд значениями $T_{\text{эфф}}$ и g (см., например, левую часть рис. 1). Отсюда следует, что рассмотренный критерий является достаточно надежным и его вполне можно использовать при определении $T_{\text{эфф}}$ и g как характеристику распределения энергии в непрерывном спектре.

Как и в предыдущих статьях [1—4], в качестве третьего критерия применялось ионизационное равновесие. Для этой цели лучше всего подходят линии Fe I—Fe II и Cг I—Cг II. Мы отобрали достаточно слабые линии этих элементов, чтобы снизить влияние погрешностей в микротурбулентности и в затухании. Тем не менее мы придавали этому критерию меньший вес, так как на расчеты даже слабых линий Fe I и Cг I у сверхгигантов класса F0 могут влиять отклонения от локального термодинамического равновесия (см. ниже).

На основании рис. 1 были приняты следующие значения эффективной температуры и ускорения силы тяжести:

$T_{\text{эфф}} = 7300 \pm 150$ К и $\lg g = 1.75 \pm 0.2$ для α Lep; $T_{\text{эфф}} = 7300 \pm 200$ К и $\lg g = 1.4 \pm 0.2$ для α Car.

2. *Анализ микротурбулентности.* Как уже отмечалось, для Канопуса [3] при анализе микротурбулентности были получены разные результаты по линиям Fe I и по линиям ионов Ti II, Fe II и Cг II. К аналогичному выводу мы приходим и в случае сверхгигантов α Lep и α Car. На рис. 2 представлены распределения микротурбулентности, найденные для этих звезд по линиям Fe I (кривые I) и по линиям Fe II и Ti II (кривые II). Здесь τ_{5000} — оптическая глубина в длине волны 5000 Å. Видим, что скорость микротурбулентности ξ , по Fe I получается систематически ниже, чем по Fe II и Ti II. Обнаруженное несоответствие столь велико, что его нельзя объяснить случайными ошибками. Мы подробно рассмотрели эту проблему в работе [14] и показали, что наиболее вероятное объяснение связано с отклонениями от локального термодинамического равновесия (ЛТР) в степени ионизации. Подобные отклонения от ЛТР ранее были найдены, например, для карликов класса F [15]. Важно, что изменения в степени ионизации влияют практически только на концентрацию нейтральных атомов, поэтому распределение микротурбулентности, определенное по линиям ионизованных атомов, следует признать более правильным.

Окончательные модели атмосфер α Lep и α Car были пересчитаны с учетом турбулентного давления, соответствующего кривым II на рис. 2.

Такой пересчет мало повлиял на определяемое содержание элементов ϵ , но поскольку изменения в величине ϵ имеют разный знак для нейтральных атомов и для ионов, это заметно сказалось на расчетах ионизационного равновесия (положение штриховых линий на рис. 1 стало лучше соответствовать другим критериям).

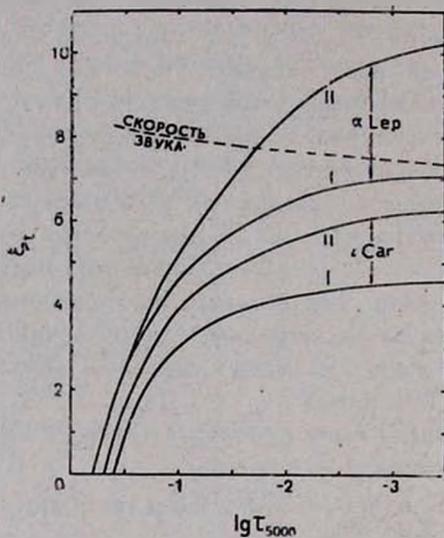


Рис. 2. Зависимость скорости микротурбулентности v_t (км/с) от оптической глубины τ_{5000} . Кривые I найдены по линиям Fe I, кривые II — по линиям Fe II и Ti II.

На рис. 2 приведено распределение скорости звука в атмосферах исследуемых звезд. Видим, что значения $v_t(\tau_{5000})$ у ϵ Car сравнительно невелики, и микротурбулентность не становится сверхзвуковой даже в самых верхних слоях. У α Lep, напротив, значения $v_t(\tau_{5000})$ при $\tau_{5000} \leq 0.01$ превышают скорость звука. Таким образом, из трех исследованных нами сверхгигантов класса F0 — α Car, α Lep и ϵ Car — только у α Lep обнаружена эта особенность. В [3] мы уже отмечали, что сверхзвуковые движения могут приводить к появлению ударных волн и к дополнительному нагреву атмосферы и таким путем способствовать возникновению хромосферы. Если это так, тогда следовало бы поискать признаки хромосферы в ультрафиолетовых спектрах сверхгиганта α Lep.

3. *Химический состав.* На основе вычисленных моделей атмосфер и при распределении микротурбулентности, определенном по линиям ионизованных атомов, мы нашли содержание химических элементов в атмосферах α Lep и ϵ Car. Полученные результаты приведены в табл. 1, где химический состав представлен в обычной логарифмической шкале, когда $\lg \epsilon(\text{El}) = \lg [N(\text{El})/N(\text{H})] + 12$, так что для водорода $\lg \epsilon(\text{H}) = 12.00$.

Здесь же приведены данные $\lg \varepsilon_{\odot}$ относительно химического состава атмосферы Солнца; они соответствуют использованной нами системе сил осцилляторов. Как значения $\lg \varepsilon_{\odot}$, так и силы осцилляторов совпадают с теми, которые использовались при исследовании Канопуса [4].

Таблица 1
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ АТМОСФЕР α Lep, ι Car и Солнца

| Элемент | α Lep | | ι Car | | $\lg \varepsilon_{\odot}$ |
|---------|--------------|-------------------|-------------|-------------------|---------------------------|
| | число линий | $\lg \varepsilon$ | число линий | $\lg \varepsilon$ | |
| Cl | 3 | 8.13 | 3 | 8.04 | 8.61 |
| Mg I | 2 | 7.65 | 3 | 7.13 | 7.35 |
| Si II | 3 | 8.12 | 4 | 7.42 | 7.55 |
| Ca I | 6 | 6.22 | 7 | 5.93 | 6.35 |
| Sc II | 3 | 3.03 | 3 | 2.65 | 3.00 |
| Ti I | 5 | 4.82 | 5 | 4.55 | 4.85 |
| Ti II | 12 | 4.97 | 5 | 4.50 | 4.82 |
| V I | 2 | 4.23 | 2 | 3.65 | 4.04 |
| V II | 3 | 4.07 | 9 | 3.61 | 4.21 |
| Cr I | 5 | 5.58 | 6 | 5.23 | 5.61 |
| Cr II | 8 | 5.59 | 4 | 5.25 | 5.50 |
| Mn I | 4 | 5.44 | 7 | 4.92 | 5.35 |
| Fe I | 13 | 7.52 | 14 | 7.15 | 7.55 |
| Fe II | 6 | 7.49 | 4 | 7.20 | 7.56 |
| Co I | 2 | 4.51 | 2 | 4.23 | 4.55 |
| Ni I | 4 | 6.32 | 6 | 5.88 | 6.08 |
| Ni II | 3 | 6.58 | 3 | 6.00 | 6.21 |
| Zn I | 2 | 4.54 | 2 | 4.08 | 4.42 |
| Y II | 3 | 2.09 | 2 | 1.87 | 2.18 |
| Zr II | 6 | 3.12 | 5 | 2.64 | 2.96 |
| Ba II | — | — | 2 | 2.33 | 2.40 |
| La II | 1 | 1.34 | 3 | 0.83 | 1.13 |
| Ce II | 9 | 1.90 | 8 | 1.11 | 1.59 |
| Eu II | 2 | 0.67* | 2 | -0.02* | 0.35* |

* Содержание Eu определено по двум резонансным линиям.

Как и в [4], при определении химического состава мы основывались преимущественно на относительно слабых линиях, чтобы снизить влияние ошибок в микротурбулентности и в затухании. Поэтому, в частности, при оценке содержания железа и титана мы использовали гораздо меньше линий Fe I, Fe II и Ti II, чем при анализе распределения ξ_i (τ_{3000}).

Далее, не рассматривались резонансные линии, так как они имеют тенденцию занижать содержание элементов (см. [4]). Исключение было сделано лишь для двух резонансных линий Eu II (в данных [5] нет других линий европия), для которых, как и в [4], вычисления функции источников проводились с учетом рассеяния. Отметим, что недавно в [16] были опубликованы сведения о радиационных постоянных затухания γ_{rad} для некоторых резонансных линий Fe I и Cr I . Оказалось, что значения γ_{rad} для этих линий существенно отличаются от приближенных „классических“ значений γ_{cl} ; например, отношение $\gamma_{\text{rad}}/\gamma_{\text{cl}} = 0.26$ для Cr I и $\gamma_{\text{rad}}/\gamma_{\text{cl}} \leq 0.001$ для Fe I (в отличие от субординатных линий, для которых $\gamma_{\text{rad}} \approx \gamma_{\text{cl}}$). Однако, как показали расчеты, введение соответствующих поправок мало изменило заниженное содержание Fe и Cr , найденное по резонансным линиям для Канопуса [4]. Во-первых, эти линии достаточно слабы и поэтому мало чувствительны к изменениям в затухании γ . Во-вторых, у F0 — сверхгигантов достаточно большой вклад в полную величину γ вносит не только радиационное, но и штарковское затухание γ_{st} , поэтому даже при больших вариациях в γ_{rad} изменения полного затухания γ оказываются не очень существенными. По-видимому, расхождение в значениях ϵ между резонансными и субординатными линиями, обнаруженное в [4], скорее всего связано с отклонениями от ЛТР.

Как видно из табл. 1, для пяти элементов — Ti , V , Cr , Fe и Ni — содержание ϵ было найдено по линиям как нейтральных, так и ионизованных атомов. Мы уже указывали, что, согласно [14], возможные отклонения от ЛТР в степени ионизации у F -сверхгигантов должны влиять только на линии нейтральных атомов. Казалось бы, что поэтому при определении ϵ нужно опираться прежде всего на линии ионов. Однако силы осцилляторов для таких линий обычно известны гораздо хуже, чем для нейтральных атомов, поэтому разброс в значениях ϵ по отдельным линиям у ионов получается больше. С другой стороны, можно надеяться, что для самых слабых линий нейтральных атомов, которые и были использованы при определении химического состава, влияние отклонений от ЛТР невелико. Исходя из сказанного, при выводе окончательного содержания ϵ для пяти перечисленных элементов были учтены обе стадии ионизации.

На рис. 3 представлена разница в химическом составе между исследованными сверхгигантами и Солнцем. Видно, что у α Lep содержание элементов группы железа близко к солнечному (штриховая линия). Три относительно легких элемента — C , Mg и Si — показали аномальное содержание. Дефицит углерода был обнаружен и для других F -сверхгигантов; по-видимому, он объясняется эволюционными причинами, точнее, полным перемешиванием вещества звезды на стадии гиганта или сверх-

гиганте, в результате которого в атмосферу выносятся продукты CNO-цикла. Кремний у α Lep оказался в избытке, для него $\Delta \lg \epsilon = 0.6$. Ранее столь большой избыток Si был найден нами у ρ Cas [2]. К сожалению, мы ничего не можем сказать о содержании натрия, так как в [5] для α Lep и ρ Cas нет данных о линиях Na I.

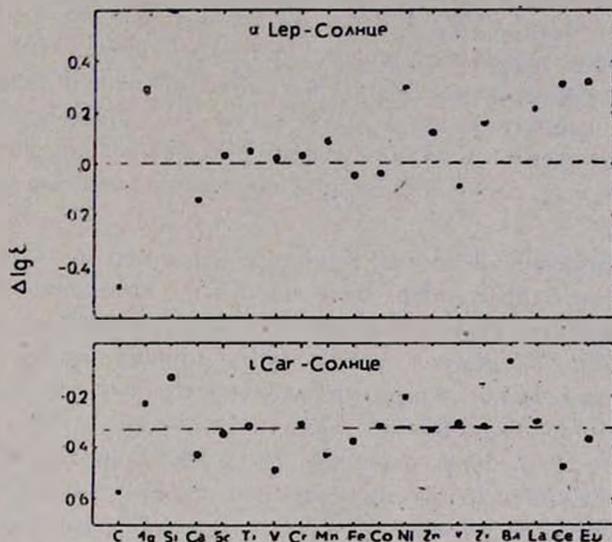


Рис. 3. Отличие химического состава атмосфер α Lep и ρ Cas от состава атмосферы Солнца. Штриховая линия на верхней части рисунка соответствует солнечному содержанию элементов, а на нижней части — среднему значению $\Delta \lg \epsilon$.

Содержание относительно тяжелых элементов у α Lep также оказалось повышенным по сравнению с Солнцем. Чтобы оценить, какое влияние в этом случае могла оказать сверхтонкая структура атомных уровней, мы учли ее, введя в расчеты линий Zr II, La II, Ce II и Eu II дополнительную скорость $\xi_{\text{лfs}} = 2$ км/с, как делается при исследовании красных гигантов [17, 18]. Оказалось, что изменения в $\lg \epsilon$ малы, они не превышают 0.01—0.02 как для α Lep, так и для ρ Cas. Объясняется это, с одной стороны, слабостью рассматриваемых линий и, с другой стороны, достаточно большой скоростью микротурбулентности в области их образования.

Как видно из рис. 3 (нижняя часть), содержание элементов в атмосфере ρ Cas оказалось пониженным относительно Солнца примерно в 2 раза. Трудно предположить, что такое различие вызвано ошибками определения $T_{\text{эфф}}$ и g ; пришлось бы допустить, например, что значение $T_{\text{эфф}}$ для ρ Cas было занижено на 300 К. Отметим, что дефицит углерода у ρ Cas оказался столь же большим, как у α Lep.

Расчеты эволюции звезд не могут объяснить наблюдаемой аномалии в содержании углерода у желтых сверхгигантов, так же как и аномалий в содержании азота и кислорода. Недавно эту проблему рассмотрели Бекер и Кэкс [19]. Согласно их данным, в стандартной эволюционной модели с массой $9 M_{\odot}$ содержание С на поверхности после перемешивания может уменьшиться лишь на величину $\Delta \lg \varepsilon = 0.12$. С другой стороны, на примере α Lep, ι Car, γ Cyg [1] и ρ Cas [2] мы видим, что в действительности дефицит углерода может составлять $\Delta \lg \varepsilon = 0.5 - 0.6$. Чтобы объяснить наблюдаемые большие аномалии в содержании С, N и O у желтых сверхгигантов и цефеид, в [19] предложено ввести в эволюционную схему дополнительное перемешивание между конвективным ядром, где горит водород, и внутренней частью радиативной оболочки.

Так как химический состав Канопуса [4], α Lep и ι Car был определен на основе однородного материала [5], интересно сопоставить полученные для этих звезд результаты. Предварительно мы пересчитали содержание элементов у Канопуса, приняв, как и для σ Lep и ι Car, то распределение микротурбулентности, которое было найдено по линиям Ti II и Fe II (а не по линиям Fe I, как в [4]). Однако это практически не изменило значений $\lg \varepsilon$, приведенных в [4], так как для анализа отбирались преимущественно слабые линии, которые мало чувствительны к изменениям ξ . По поводу химического состава Канопуса (α Car) необходимо сделать еще одно замечание. В [4] мы указали на большие систематические различия в значениях $\lg \varepsilon$ между нашими результатами для α Car и оценками Лука [20]. Недавно были опубликованы новые спектроскопические данные для α Car [21] и на основе этих данных определено содержание элементов в атмосфере Канопуса [22]. Эквивалентные ширины W_{λ} , приведенные в [21], хорошо согласуются с измерениями [5], использованными нами. С другой стороны, как отмечено в [21], у Лука [20] значения W_{λ} для слабых линий оказались завышенными. На систематическое завышение ширины W_{λ} , использованных в [20], недавно указал сам Лук [23]. Слишком высокие значения W_{λ} для слабых линий и, как следствие, занижение скорости микротурбулентности ξ , при рассмотрении более сильных линий и привели в [20] к завышенным оценкам $\lg \varepsilon$. Отметим, что результаты [22] согласуются с нашим выводом о том, что химический состав Канопуса близок к солнечному.

На рис. 4 приведена разница в химическом составе между тремя F0-сверхгигантами. Видим, что имеются заметные систематические различия; особенно они велики в случае α Lep и ι Car, где в среднем $\Delta \lg \varepsilon = 0.4$. Расхождения в содержании металлов у α Lep, ι Car и α Car

могут быть связаны с первоначальными различиями в химическом составе вещества, из которого сформировались эти звезды. Кроме систематической разницы в $\lg \epsilon$, между α Lep, с одной стороны, и ι Car и α Car, с другой, наблюдается заметный разброс около средней, штриховой линии в содержании некоторых элементов (C, Si, Ce, Eu). Для ι Car и α Car такого разброса не найдено (рис. 4, нижняя часть). Напомним, что сверхгигант α Lep оказался примечательным и в другом отношении: из трех исследованных F0-сверхгигантов только у него мы обнаружили заметную сверхзвуковую микротурбулентность в верхних слоях атмосферы.

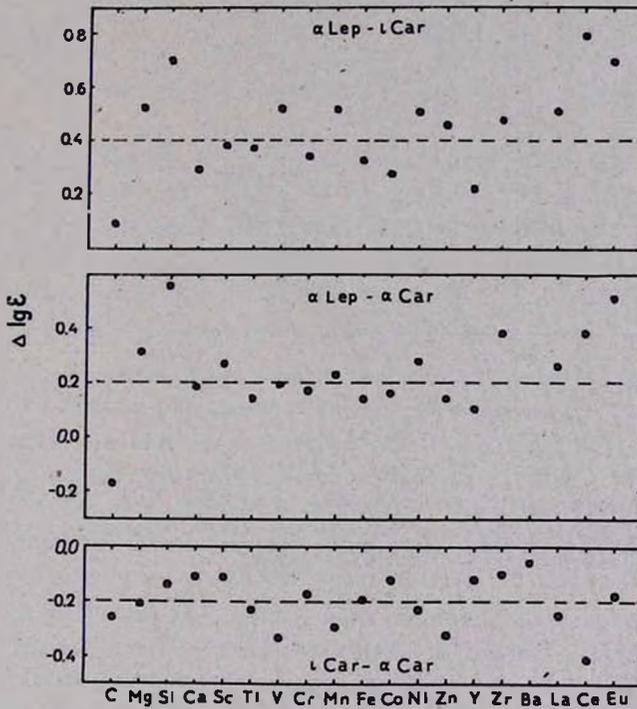


Рис. 4. Различия в содержании элементов у F0-сверхгигантов α Lep, ι Car и α Car. Штриховые линии соответствуют средним значениям разностей $\Delta \lg \epsilon$.

4. *Эволюционные параметры.* Выполненные недавно расчеты [24, 25] эволюции звезд с массами от $3 M_{\odot}$ до $40 M_{\odot}$ позволяют по найденным значениям $T_{\text{эфф}}$ и $\lg g$ оценить массу M , радиус R , светимость L и возраст t исследованных сверхгигантов. Отметим, что при определении M , R , L и t принято начальное содержание гелия $Y = 0.28$ и начальное содержание металлов $Z = 0.02$, что в среднем соответствует звездам первого типа населения.

На рис. 5 в плоскости $\lg T_{\text{эфф}} - \lg g$ по данным [24, 25] построено несколько эволюционных треков для звезд с массами от 5 до 40 M_{\odot} . Чтобы не загромождать рисунок, для 7 M_{\odot} мы не привели верхнюю часть трека („петлю“), соответствующую стадии сверхгиганта. Здесь же кружками указаны положения шести исследованных нами F-сверхгигантов вместе с ошибками определения $\lg g$. Размер кружков примерно соответствует ошибке определения $T_{\text{эфф}}$. Видно, что основной источник погрешностей в M , R , L и t — это ошибки в $\lg g$.

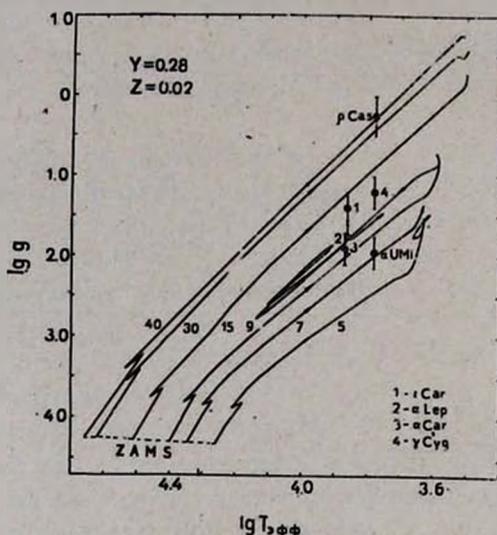


Рис. 5. Эволюционные треки для звезд с массами 5, 7, 9, 15, 30 и 40 M_{\odot} (по данным [24, 25]). ZAMS — главная последовательность нулевого возраста. Стрелки указывают направление движения звезды по треку.

Эволюционные параметры трех звезд — α Car, γ Cyg и α U Mi — мы уже нашли в [4]. Теперь мы оценили M , R , L и t для α Lep, α Car, а также для исследованного в [2] яркого сверхгиганта ρ Cas. Результаты, полученные для всех шести сверхгигантов, вместе с ошибками определения представлены в табл. 2. Видим, что массы M пяти F-сверхгигантов (кроме ρ Cas) заключены в интервале от 6 до 12 M_{\odot} , радиусы R — в интервале от 43 до 138 R_{\odot} , а их возрасты t — от 14 до 58 миллионов лет. Исключительное положение в табл. 2 занимает звезда ρ Cas. Она очень массивна ($M \sim 40 M_{\odot}$) и очень молода ($t \sim 5$ млн. лет), а ее радиус составляет около 800 R_{\odot} . Отметим, что оценки Сарджента [26], полученные для ρ Cas более 20 лет назад, дали массу $M \sim 25 M_{\odot}$ и радиус $R \sim 700 R_{\odot}$.

Значения M , R , L и t , приведенные для ρ Cas в табл. 2, найдены без учета потери массы. Однако расчеты эволюции массивных звезд [25], примененные в данном случае, были выполнены как с потерей массы, так и без нее. С другой стороны, согласно [26] сверхгигант ρ Cas действительно теряет массу со скоростью $\sim 10^{-5} - 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$.

Таблица 2

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ШЕСТИ СВЕРХГИГАНТОВ КЛАССА F

| Звезда | α Cas | α Lep | ι Cas | α UMi | γ Cyg | ρ Cas |
|----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| Sp | F0 Ib-II | F0 Ib | F0 Iab | F8 Ib-II | F8 Ib | F8 Iap |
| $T_{\text{эфф}}, \text{K}$ | 7400 ± 150 | 7300 ± 150 | 7300 ± 200 | 6050 ± 150 | 6050 ± 150 | 6000 ± 200 |
| $\lg g$ | 1.9 ± 0.2 | 1.75 ± 0.2 | 1.4 ± 0.2 | 1.95 ± 0.2 | 1.2 ± 0.2 | 0.25 ± 0.25 |
| M/M_{\odot} | 8 ± 1.5 | 9 ± 2 | 12 ± 3 | 6 ± 1 | 11 ± 2 | 40 ± 15 |
| $\lg(R/R_{\odot})$ | 1.72 ± 0.14 | 1.82 ± 0.15 | 2.06 ± 0.16 | 1.63 ± 0.14 | 2.14 ± 0.14 | 2.90 ± 0.23 |
| R/R_{\odot} | 53 | 66 | 115 | 43 | 138 | 800 |
| $\lg(L/L_{\odot})$ | 3.87 ± 0.32 | 4.05 ± 0.34 | 4.53 ± 0.37 | 3.35 ± 0.32 | 4.36 ± 0.32 | 5.87 ± 0.51 |
| L/L_{\odot} | $7.5 \cdot 10^3$ | $1.1 \cdot 10^4$ | $3.4 \cdot 10^4$ | $2.2 \cdot 10^3$ | $2.3 \cdot 10^4$ | $7 \cdot 10^5$ |
| $\lg t$ | 7.51 ± 0.15 | 7.35 ± 0.20 | 7.15 ± 0.15 | 7.76 ± 0.18 | 7.23 ± 0.15 | 6.70 ± 0.20 |
| $t(10^6 \text{ лет})$ | 32 | 22 | 14 | 58 | 17 | 5 |
| $\Delta H/R$ | 0.007 | 0.014 | 0.012 | 0.011 | 0.020 | 0.12 |

Из [25] следует, что при таком темпе истечения для ρ Cas лучше подойдет трек с начальной массой $\sim 50 M_{\odot}$, тогда масса звезды в момент наблюдений должна составлять $M \approx 30 - 35 M_{\odot}$. Мы видим, что расхождение с первоначальной оценкой $M = 40 \pm 15 M_{\odot}$ лежит в пределах ошибки определения M . Отметим, что этот эффект сказывается лишь при достаточно [больших M ; например, при $M = 15 M_{\odot}$ влияние потери массы становится пренебрежимо малым по сравнению с влиянием ошибок в $\lg g$ (см. [25]).

Другой эффект, который необходимо учитывать, это выбор начального содержания металлов Z . Напомним, что наши оценки M , R , L и t основаны на величине $Z = 0.02$. Из [24] видно, что если вместо $Z = 0.02$ принять несколько повышенное содержание $Z = 0.03$, тогда значение M , например, для α Lep придется увеличить с $9 M_{\odot}$ до $11 M_{\odot}$, то есть приблизительно на 20%. Для более массивных звезд изменения в M будут еще больше. В этом можно убедиться, сравнив два трека, вычисленные для массы $30 M_{\odot}$ при $Z = 0.02$ [25] и $Z = 0.03$ [27]. Такое небольшое повышение Z приводит в этом случае к увеличению определяемого значения M примерно на 30%.

При исследовании химического состава ι Cas мы показали, что содержание металлов в атмосфере этого сверхгиганта понижено отно-

нительно Солнца приблизительно в 2 раза. Если считать, что таким же был химический состав того вещества, из которого сформировалась звезда ι Cas, тогда для нее при нахождении M , R , L и t вместо $Z = 0.02$ лучше принять $Z = 0.01$. На основании [24] можно оценить, что в этом случае вместо значения $M = 12 M_{\odot}$, приведенного в табл. 2, для ι Cas больше подходит $M = 10 M_{\odot}$.

Нужно ли учитывать сферичность атмосферы при изучении сверхгигантов класса F или достаточно ограничиться предположением о плоскопараллельном строении атмосферных слоев? Чтобы ответить на этот вопрос, мы оценили для всех шести сверхгигантов относительную протяженность атмосферы $\Delta H/R$, где R — радиус звезды, а ΔH — геометрическая толщина атмосферы, известная из модели атмосферы. Мы определяли ΔH как расстояние между глубинами $\tau_{5000} = 10$ и $\tau_{5000} = 0.001$. Найденные значения $\Delta H/R$ представлены в нижней строке табл. 2. Видим, что для пяти F-сверхгигантов (кроме ρ Cas) протяженность атмосферы составляет всего лишь $1-2\%$ радиуса звезды, то есть эффектом сферичности здесь вполне можно пренебречь. Для ρ Cas величина $\Delta H/R$ оказалась существенно больше — 12% , поэтому в расчетах достаточно сильных линий здесь, вероятно, нужно учитывать сферичность атмосферы.

5. Основные результаты. 1) Для двух исследованных F0-сверхгигантов найдены следующие значения эффективной температуры и ускорения силы тяжести: $T_{\text{эфф}} = 7300 \pm 150$ К и $\lg g = 1.75 \pm 0.2$ для α Lep; $T_{\text{эфф}} = 7300 \pm 200$ К и $\lg g = 1.4 \pm 0.2$ для ι Cas.

2) Анализ микротурбулентности, как и в случае Канопуса [3], привел к расхождению в значениях ξ_t между нейтральными и ионизованными атомами. По линиям Fe I получилась более низкая скорость микротурбулентности ξ_t , чем по линиям Fe II и Ti II. Наиболее вероятное объяснение такого расхождения связано с учетом отклонений от ЛТР в степени ионизации (см. [14]).

3) В атмосфере ι Cas не развивается заметной сверхзвуковой турбулентности, в то время как в атмосфере α Lep при $\tau_{5000} \leq 0.01$ значения ξ_t превышают скорость звука. Возможно, что у ι Lep имеется хромосфера.

4) По относительно слабым линиям, чтобы снизить влияние ошибок в ξ_t и γ , найден химический состав атмосфер α Lep и ι Cas. Содержание металлов у α Lep в среднем оказалась близким к солнечному, а у ι Cas — пониженным относительно Солнца в 2 раза. В среднем химический состав двух сверхгигантов различается на величину

$\Delta \lg \varepsilon = 0.4$; возможно, это есть следствие первоначального различия в составе того вещества, из которого сформировались исследованные звезды.

5) Как и у ранее изученных четырех F-сверхгигантов [1—4], у α Lep и ι Car обнаружен дефицит углерода. Кроме того, у α Lep найден большой избыток кремния (почти в 4 раза относительно Солнца), а также не столь заметный избыток тяжелых элементов.

6) Путем сопоставления $T_{\text{эфф}}$ и $\lg g$ с результатами эволюционных вычислений найдены масса, радиус, светимость и возраст α Lep, ι Car, а также исследованного в [2] яркого сверхгиганта ρ Cas. Показано, что ρ Cas по своим эволюционным параметрам резко отличается от других рассмотренных нами F-сверхгигантов. Это массивная и очень молодая звезда ($M \sim 40 M_{\odot}$, $t \sim 5$ млн. лет), имеющая большой радиус ($R \sim 800 R_{\odot}$) и довольно протяженную атмосферу ($\sim 0.12 R$).

Крымская астрофизическая
обсерватория

THE ATMOSPHERES OF SOUTHERN SUPERGIANTS α LEP AND ι CAR

A. A. BOYARCHUK, L. S. LYUBIMKOV

On the basis of model atmospheres of Kurucz [6] using high dispersion spectroscopic data of Castley and Watson [5] we have analysed the southern supergiants α Lep (F0 Ib) and ι Car (F0 Iab). The following values of effective temperature and surface gravity were obtained: $T_{\text{eff}} = 7300 \pm 150$ K, $\log g = 1.75 \pm 0.2$ for α Lep; $T_{\text{eff}} = 7300 \pm 200$ K, $\log g = 1.4 \pm 0.2$ for ι Car. The distribution of microturbulent velocity ξ_t was studied. The analysis of Fe I lines showed lower ξ_t values in comparison with Ti II and Fe II lines (fig. 2). In order to eliminate this discrepancy, it is necessary to take into account the non-LTE effect in ionization [14]. In upper layers of the atmosphere of α Lep the supersonic microturbulence is observed; for ι Car such supersonic motions have not been found. We have investigated the chemical composition of α Lep and ι Car using relatively weak lines (table 1). Metal abundance in the atmosphere of α Lep on the average is close to that of the Sun, and in the atmosphere of ι Car is about twice lower with respect to the Sun (fig. 3). Carbon underabundance was found in both cases; moreover, for α Lep the overabundance of silicon and heavy elements was obtained. By comparing with evolutionary calculations [24, 25] we have found masses, ra-

dii, luminosities and the age of α Lep, ι Car and also of bright supergiant ρ Cas investigated earlier [2]. The basic parameters of six F-supergiants studied by us were considered (table 1). Exceptional properties of ι Cas were noted — big mass ($\sim 40 M_{\odot}$), great radius ($\sim 800 R_{\odot}$) and small age ($\sim 5 \cdot 10^6$ years).

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Боярчук, Л. С. Любимков, Изв. Крымской обс., 64, 3, 1981.
2. А. А. Боярчук, Л. С. Любимков, Изв. Крымской обс., 66, 130, 1982.
3. А. А. Боярчук, Л. С. Любимков, Астрофизика, 18, 375, 1982.
4. Л. С. Любимков, А. А. Боярчук, Астрофизика, 18, 596, 1982.
5. J. C. Castley, R. D. Watson, Astron. Astrophys. Suppl. ser., 41, 397, 1980.
6. R. L. Kurucz, Ap. J. Suppl. ser., 40, 1, 1979.
7. R. L. Kurucz, Smithsonian Astrophys. Obs. Spec. Report, No. 309, 1, 1970.
8. Л. С. Любимков, Изв. Крымской обс., 62, 44, 1980.
9. Н. Л. Алексеев, Г. А. Алексеева, А. А. Архаров, Ю. А. Беляев, А. А. Боярчук, М. Е. Боярчук, В. И. Бурнашев и др., Труды ГАО в Пулкове, 83, 4, 1978.
10. К. У. Аллен, Астрофизические величины, Мир, М., 1977.
11. D. Hoffleit, Catalogue of Bright Stars (3 ed.), Yale Univ. Obs., 1964.
12. L. J. Relyea, R. L. Kurucz, Ap. J. Suppl. ser., 37, 45, 1978.
13. В. Хаук, М. Мермиллод, Astron. Astrophys. Suppl. ser., 40, 1, 1980.
14. Л. С. Любимков, А. А. Боярчук, Астрофизика, 19, 683, 1983.
15. P. E. Nissen, B. Gustafsson, in "Astronomical Papers Dedicated to Bengt Ström-gren", ed. A. Reiz, T. Anderson, 1978, p. 43.
16. D. F. Carbon, G. E. Langer, D. Butler, R. P. Kraft, N. B. Suntzeff, E. Kem-per, C. F. Trefzger, W. Romanishin, Ap. J. Suppl. ser., 49, 207, 1982.
17. J. G. Cohen, Ap. J., 223, 487, 1978.
18. R. G. Gratton, Ap. J., 257, 640, 1982.
19. S. A. Becker, A. N. Cox, Ap. J., 260, 707, 1982.
20. R. E. Luck, Ap. J., 232, 797, 1979.
21. J. B. Hearnshaw, K. Desikachary, M. N., 198, 311, 1982.
22. K. Desikachary, J. B. Hearnshaw, M. N., 201, 707, 1982.
23. R. E. Luck, Ap. J., 256, 177, 1982.
24. S. A. Becker, Ap. J. Suppl. ser., 45, 475, 1981.
25. W. M. Brunish, J. W. Truran, Ap. J., 256, 247, 1982.
26. W. L. W. Sargent, Ap. J., 134, 142, 1951.
27. A. Maeder, Astron. Astrophys., 101, 335, 1981.