

УДК 524.316.4-36

О содержании углерода в атмосфере К-гиганта γ^1 Leo

А. В. Шаврина¹, Л. А. Яковина¹, М. Е. Боярчук²

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
252650, Киев ГСП 22, Голосиив

²Институт астрономии РАН
109107, Москва, Ж-17, ул. Пятницкая 48

Получен небольшой избыток углерода ($[C/Fe] = 0.20 \pm 0.15$ при содержании кислорода $[O/Fe] = 0.1$) в атмосфере γ^1 Leo, К-гиганта с небольшим дефицитом металлов ($[Fe/H] \approx -0.3$). Оценка получена из анализа линий молекулы CH в синей области спектра при потенциале диссоциации $D_0(CH) = 3.465$ эВ. Использована модель 4500/2.0/-0.3 и списки атомных и молекулярных линий из банка данных Куруца, уточнены силы осцилляторов линий ^{12}CH . Избыток углерода в атмосфере γ^1 Leo и полученный нами ранее небольшой ($[N/Fe] = -0.1$) дефицит азота вместе с низким отношением $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ не согласуются с выводами стандартной теории звездной эволюции.

ПРО ВМІСТ ВУГЛЕЦЮ В АТМОСФЕРІ К-ГІГАНТА γ^1 LEO, Шавріна А. В., Яковина Л. Я., Боярчук М. Є. — Отриманий невеликий надлишок вуглецю ($[C/Fe] = 0.20 \pm 0.15$ при вмісті кисню $[O/Fe] = 0.1$) в атмосфері γ^1 Leo, К-гіганта з невеликим дефіцитом металів ($[Fe/H] \approx -0.3$). Оцінка отримана з аналізу ліній молекули CH в синій області спектру при потенціалі дисоціації $D_0(CH) = 3.465$ еВ. Використана модель 4500/2.0/-0.3 і списки атомних та молекулярних ліній з банку даних Куруца, уточнено сили осциляторів ліній ^{12}CH . Надлишок вуглецю в атмосфері γ^1 Leo та отриманий нами раніше невеликий ($[N/Fe] = -0.1$) дефіцит азоту разом з низьким значенням відношення $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ не узгоджуються з висновками стандартної теорії зоряної еволюції.

ON CARBON ABUNDANCE IN THE ATMOSPHERE OF K GIANT γ^1 LEO, by Shavrina A. V., Yakovina L. A., Boyarchuk M. E. — We have derived a small carbon overabundance ($[C/Fe] = 0.20 \pm 0.15$ with an oxygen abundance $[O/Fe] = 0.1$) in the atmosphere of K giant γ^1 Leo with a small deficit of metals ($[Fe/H] \approx -0.3$). This estimate was obtained from the analysis of CH molecule lines in the blue spectral region. Were used the dissociation potential $D_0(CH) = 3.465$ eV, the model atmosphere 4500/2.0/-0.3, and the lists of atomic and molecular lines from Kurucz' Data Bank. We refined the oscillator strengths of ^{12}CH lines. The carbon overabundance in the atmosphere of γ^1 Leo and the small ($[N/Fe] = -0.1$) nitrogen deficit obtained by us earlier, together with the low value of $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio, are in conflict with the standard stellar evolution theory.

Содержание углерода в атмосферах звезд поздних спектральных классов обычно определяют по спектрам углеродсодержащих молекул. Так как химическим равновесием в атмосферах поздних звезд управляет отношение O/C, содержание углерода при этом приходится определять одновременно с содержанием кислорода. Большая часть атомов углерода и кислорода в атмосферах звезд К — М связана в молекулы CO. Однако спектр этой молекулы располагается только в труднодоступных для наблюдений УФ- и ИК-областях. Эти области сложны и для интерпретации, так как максимальная концентрация молекулы CO наблюдается в верхний слоях атмосферы, где велики отклонения от ЛТР, а также плохо изучена и описана моделями физическая структура из-за эффектов сферичности, хромосферы и возможных оболочек. Поэтому для определения содержания углерода реально используются молекулы CH, C₂ и CN, образующиеся в глубоких слоях атмосферы, где указанные эффекты минимальны. Наиболее предпочтительно использование молекулы CH, так как в этом случае мы получаем непосредственно отношение содержания углерода к содержанию водорода, и для этой молекулы достаточно точно определены потенциал диссоциации и силы осцилляторов. Для молекул C₂ и CN эти данные менее надежны. К тому же, при использовании молекулы CN в оценку содержания углерода вносятся ошибки определения содержания азота, а при определении содержания углерода по спектру молекулы C₂ (обычно по полосам системы Свана $\lambda\lambda$ 508.6, 513.5, 563.5 нм) возникают сложности с учетом квазинпрерывного поглощения в полосах с высокими колебательными квантовыми числами и в полосах других молекул.

Звезда γ^1 Leo = HD 89484 (K0 III) является ярким компонентом визуально-двойной системы с разделением 4.4''. Ее атмосфера характеризуется небольшим дефицитом металлов ($[Fe/H] = -0.3...-0.5$) [3, 4, 11, 13] и низким (6.5) отношением $^{12}\text{CH}/^{13}\text{CH}$ [16]. Полученный нами ранее [3] небольшой дефицит азота ($[N/Fe] = -0.1$) при низком отношении $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ противоречит стандартной теории звездной эволюции.

Мы определили содержание углерода в атмосфере γ^1 Leo методом синтетического спектра по линиям молекулы CH в синей области спектра ($\lambda\lambda$ 423—427 нм). При определении параметров модели атмосферы $T_{\text{эфф}}$, $\lg g$ мы учли работу Мак-Вильяма [13], который определил эти параметры для многих гигантов G — K и для γ^1 Leo получил $T_{\text{эфф}} = 4470$ K, $\lg g = 2.35$. Эффективные температуры в работе [13] определялись по калибровочным зависимостям (цвет — $T_{\text{эфф}}$), а ускорения силы тяжести рассчитывались из отношения между массой, светимостью и температурой. Найденные таким образом $T_{\text{эфф}}$ мы считаем достаточно надежными, а $\lg g$ — допускающими уточнение (в пределах ± 0.5 в соответствии с современной точностью определения этого параметра для гигантов). Тем не менее, мы рассмотрели модели из сетки Куруца [9] (CD ROM N 13) с $T_{\text{эфф}} = 4250$ —4750 K, $\lg g = 1.5$ —3.0, $[M] = [Fe/H] = -0.3...-0.5$. Из расчета ионизационного равновесия для Fe I, Fe II, Ti I, Ti II, Sc I, Sc II по эквивалентным ширинам линий этих элементов из работы [1] была выбрана модель с параметрами $T_{\text{эфф}}/\lg g/[M] = 4500/2.0/-0.3$. С этой моделью найдено значение микротурбулентной скорости $v_t = 2.4$ км/с.

Содержание углерода определено по двум спектrogramмам γ^1 Leo с разрешением около 0.015 нм, полученным М. Е. Боярчук в 1982 г. в фокусе кудэ 2.6-м телескопа Крымской астрофизической обсерватории. Синтетические спектры рассчитывались по программе WITA2 [14]. При этом мы использовали химический состав атмосферы γ^1 Leo, определенный нами в работе [3] по эквивалентным ширинам из [1] для выбранной модели 4500/2.0/-0.3.

Мы рассмотрели несколько областей, содержащих линии молекулы CH ($\lambda\lambda$ 388.4—390.5, 400.7—403.7, 423.0—428.0, 435.7—438.5 нм), и выбрали для анализа область $\lambda\lambda$ 423—428 нм, так как в ней спектр CH наиболее интенсивен и наименее блендирован другими молекулами. Основной вклад в поглощение в этой области дает система $A - X$ ($A^2\Delta - X^2\Pi$), но наблюдаются также линии систем $B - X$, ($B^2\Sigma^- - X^2\Pi$) и $C - X$ ($C^2\Sigma^+ - X^2\Pi_r$).

Список атомных линий составлен из нескольких списков, содержащихся в банке данных Куруца [9]. Основой послужил список рассчитанных атомных линий с CD-ROM N 1, включающий линии нейтральных и однократно ионизированных атомов. Он был сверен с лабораторными списками на CD-ROM N 18 и списками линий ионов на CD-ROM N 20—22. В результате были добавлены некоторые линии, в основном Na I и Ca I (всего для области $\lambda\lambda$ 423—428 нм список содержит около 20 000 линий). Мы отсеяли линии с глубинами $R_\lambda < 0.001$, в результате чего количество линий уменьшилось на порядок.

В список молекулярных линий мы включили линии ^{12}CH и ^{13}CH . Тестирование списка линий ^{12}CH из банка данных Куруца [9] по солнечному спектру показало, что список Куруца недостаточно точно описывает слабые линии CH (полосы (1—1) и (2—2) системы $A - X$ в области $\lambda\lambda$ 423—428 нм). Поэтому мы рассчитали свои значения сил осцилляторов и энергий для систем $A - X$ и $B - X$ ^{12}CH (система $C - X$ очень слаба). Было использовано значение потенциала диссоциации $D_0(\text{CH}) = 3.465 \pm \pm 0.01$ эВ, взятое из работы [5], и силы осцилляторов $f_{vv''}$, рассчитанные при отказе от r -центроидного приближения в [2] на основании данных из [7]. Величины gf для отдельных вращательных линий рассчитывались по стандартной формуле:

$$gf = (\nu/\nu_{vv''})S_{JJ'}f_{vv''}, \quad (1)$$

где факты Хенля — Лондона $S_{JJ''}$ нормированы согласно [17]:

$$\Sigma S_{JJ''} = (2 - \delta_{0, \Lambda' + \Lambda''})(2S + 1)(2J'' + 1). \quad (2)$$

На рис. 1 представлены наблюдаемый [9] (CD-ROM N 18) солнечный спектр в области $\lambda\lambda$ 423.2—425.2 нм и синтетический, рассчитанный с моделью атмосферы Солнца Куруца [9], нашим списком атомных линий и уточненным, как описано выше, списком линий ^{12}CH .

Поглощение ^{13}CH спектре γ^1 Leo мы учли на основании списка линий ^{13}CH Куруца [9] (CD-ROM N 18), используя отношение изотопов $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ для γ^1 Leo [16]. Мы оценили также вклад в поглощение в области $\lambda\lambda$ 423—428 нм ряда других молекул (NH, OH, CN, C₂, SiH, MgH), используя для расчета их спектров списки линий Куруца [9] (CD-ROM N 18). Анализ вклада этих молекул показал, что в исследуемой области спектра достаточно учета только линий молекулы CH.

В синей области спектра, как и в УФ, пока не полностью отождествлены источники непрерывного поглощения и сливающиеся в «квазиконтинум» многочисленные слабые линии. Поэтому для согласования наблюдаемых и синтетических спектров мы вводили в расчет синтетических спектров дополнительное серое поглощение. Это делалось с помощью коэффициента k , увеличивающего поглощение в континууме в заданное число раз. Значение k подбиралось нами одновременно с параметрами, описывающими уровень континуума в наблюдаемом спектре.

Для выбора индикаторов содержания углерода мы проанализировали солнечный спектр CH в области $\lambda\lambda$ 423—428 нм. Было проверено, что спектр для модели атмосферы Солнца Куруца [9] практически не отличается от спектра для модели HOLMU [8]. В результате анализа мы выбрали

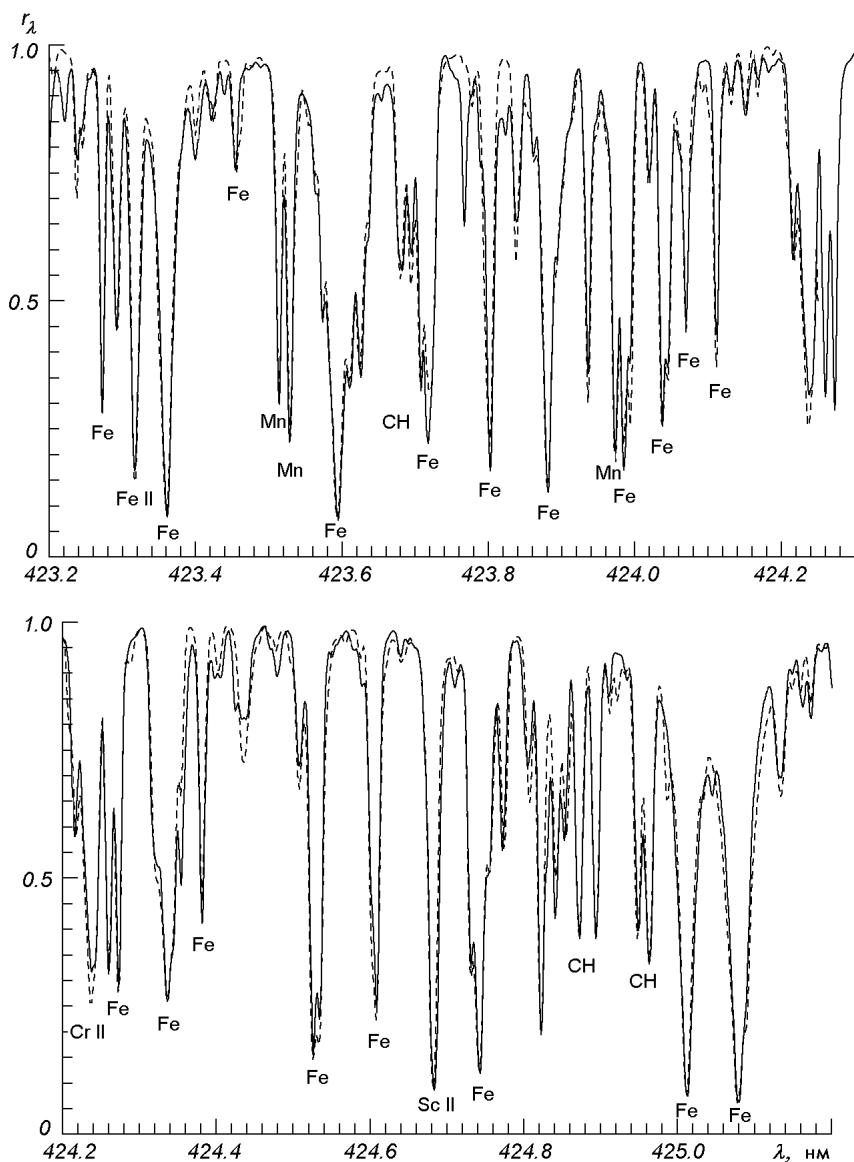


Рис. 1. Наблюдаемый спектр Солнца (сплошная линия) в области $\lambda\lambda$ 423.2–425.2 нм и синтетический спектр (пунктир), рассчитанный с моделью солнечной атмосферы Куруца [9] и включающий атомные линии и линии ^{12}CH

два участка ($\lambda\lambda$ 423.2—425.2 и 425.7—426.7 нм), включающие достаточно сильные линии CH и хорошо описавшиеся в солнечном спектре атомные линии с надежными силами осцилляторов. Свернув теоретические и наблюдаемые профили этих участков с гауссовым профилем с параметром уширения 0.015 нм (что соответствует разрешению наших спектрограмм γ^1 Leo), мы выбрали три достаточно сильные бленды (глубины $R_\lambda = 0.5$ —0.7), основной вклад в интенсивность которых вносят линии CH. Их длины волн в солнечном спектре: $\lambda\lambda$ 424.5, 424.85, 426.16 нм. Эти бленды мы использовали далее для определения содержания углерода в атмосфере γ^1 Leo. Выбор точек привязки наблюдаемого и синтетического спектров γ^1 Leo также проведен с помощью спектра Солнца. Привязка выполнена в основном по линиям железа.

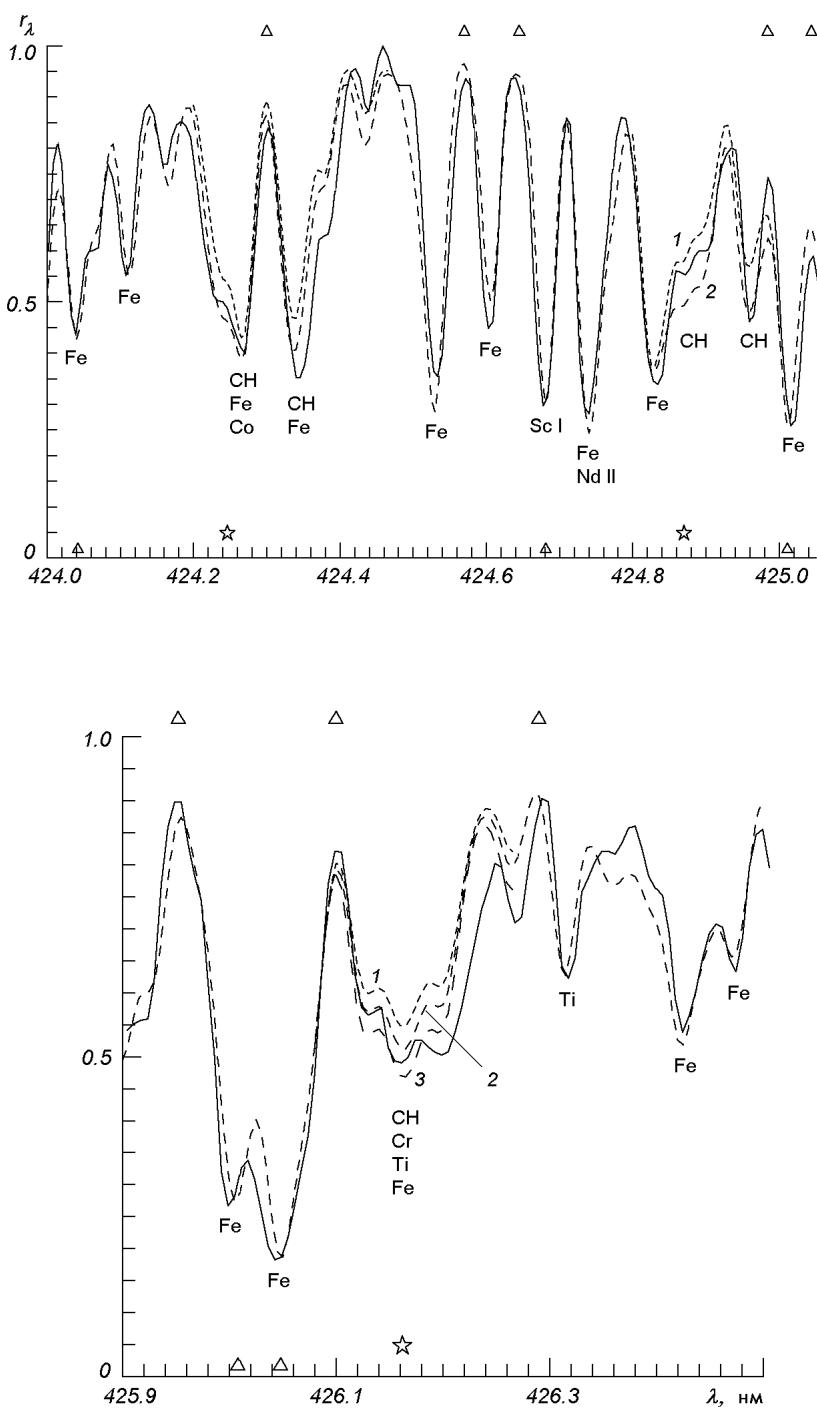
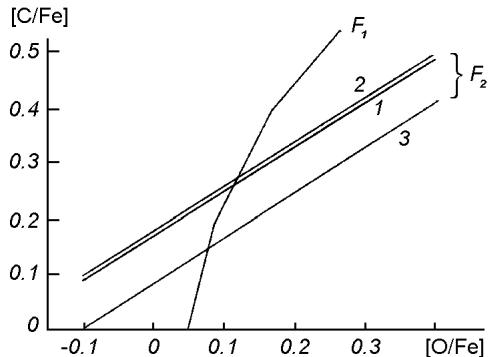


Рис. 2. Результат совмещения наблюдаемого и синтетических спектров γ^1 Leo в области бленда, выбранных в качестве индикаторов содержания углерода. Синтетические спектры рассчитаны с моделью Куруца [9] $4500/2.0/-0.3$, $v_t = 2.4$ км/с, $k = 4.0$, $[O/Fe] = 0.1$: а — область бленда $\lambda\lambda$ 424.25 и 424.85 нм (сплошная линия — наблюдаемый спектр, 1 — $[C/Fe] = 0.1$, 2 — $[C/Fe] = 0.3$); б — область бленды λ 426.16 нм (сплошная линия — наблюдаемый спектр, 1 — $[C/Fe] = 0.1$, 2 — $[C/Fe] = 0.2$, 3 — $[C/Fe] = 0.3$). Треугольниками отмечены точки привязки наблюдаемого и синтетических спектров (внизу — минимумы интенсивности, вверху — максимумы). Звездочками отмечены бленды, по которым определялось содержание углерода

Рис. 3. Область согласованных оценок содержаний углерода и кислорода в атмосфере γ^1 Leo. F_1 — усредненная по линиям [O I] $\lambda\lambda$ 630.0 и 636.3 нм зависимость содержания О от содержания С. F_2 — зависимости содержания С от О, полученные по блендам СН ($1 - \lambda 424.25$ нм, $2 - \lambda 424.85$ нм, $3 - \lambda 426.16$ нм)



Как уже отмечалось, содержание углерода нужно определять одновременно с содержанием кислорода. Ввиду отсутствия у нас качественного наблюдательного материала для линий кислорода мы использовали для получения согласованных значений содержаний углерода и кислорода в атмосфере γ^1 Leo, кроме наших спектрограмм, определения эквивалентных ширин линий [O I] $\lambda\lambda$ 630.0 и 636.3 нм из [11] (5.06 и 1.64 пм соответственно), полученные по высококачественному наблюдательному материалу. Были рассчитаны зависимости $[O/Fe] = F_1([C/Fe])$ по двум указанным линиям кислорода и зависимости $[O/Fe] = F_2([C/Fe])$ для трех бленд, выбранных нами в качестве индикаторов содержания углерода. Пересечение зависимостей F_1 с зависимостями F_2 дало согласованные значения $[C/Fe]$ и $[O/Fe]$. Усредненное по двум спектрограммам значение содержания углерода в атмосфере γ^1 Leo составляет $[C/Fe] = 0.2$ при $[O/Fe] = 0.1$. При этом использовано полученное нами ранее [3] содержание железа в атмосфере этой звезды $A(\text{Fe}) = 7.20$, а также содержание железа [10], углерода и кислорода [6] в атмосфере Солнца: $A(\text{Fe}) = 7.54$, $A(\text{C}) = 8.55$, $A(\text{O}) = 8.87$ (в шкале $A(\text{H}) = 12.00$). Как показывают наши расчеты, отношение $O/C = 0.22$ dex в атмосфере γ^1 Leo сохраняется в широком диапазоне содержаний кислорода (до одного порядка). Сравнение спектра γ^1 Leo с синтетическим спектром в области бленд $\lambda 424.25$ нм и $\lambda 424.85$ нм представлено на рис. 2, а, а в области бленд $\lambda 426.16$ нм — на рис. 2, б. На рис. 3 приведены усредненная по двум линиям [O I] зависимость F_1 и усредненные по двум спектрограммам зависимости F_2 для трех бленд СН в области пересечения зависимостей F_1 и F_2 .

Мы рассмотрели влияние на нашу оценку возможных неопределенностей параметров $T_{\text{эфф}}$, $\lg g$ и κ , полагая, что остальные нам известны достаточно точно или же не могут существенно влиять на результат.

Мы оцениваем точность значений $T_{\text{эфф}}$ и $\lg g$ величинами ± 150 К и ± 0.5 соответственно. В работе Ламберта и Риса [11] — единственной, с которой мы можем сравнить наши результаты, — для γ^1 Leo принятые значения $T_{\text{эфф}} = 4650$ К, $\lg g = 2.39$. Учитывая сказанное мы получили содержание углерода в атмосфере γ^1 Leo при содержании кислорода $[O/Fe] = 0.1$ еще для трех моделей Куруца [9] с параметрами, охватывающими диапазон неопределенности значений $T_{\text{эфф}}$ и $\lg g$: $4500/2.5/-0.3$, $4750/2.0/-0.3$ и $4750/2.5/-0.3$. Оказалось, что значение содержания углерода, полученное по линиям СН, мало зависит от ускорения силы тяжести ($\Delta[C/\text{Fe}] < 0.05$ при $\Delta\lg g = 0.5$), но обладает высокой температурной чувствительностью ($\Delta[C/\text{Fe}] \approx 0.3$ при $\Delta T_{\text{эфф}} = 250$ К). Однако определенное нами значение $T_{\text{эфф}}$ практически совпадает с достаточно надежной оценкой Мак-Вильяма [13], так что ошибка в содержании углерода 0.3 dex за счет ошибки в выборе эффективной температуры γ^1 Leo представляется нам маловероятной.

Диапазон параметра κ для модели $4500/2.0/-0.3$ составлял 3.5—4.0. Все

приведенные выше определения для этой модели были получены при $k = 4.0$. Уменьшение k на 0.5 привело к уменьшению содержания углерода на 0.05 dex.

Чувствительность выбранных бленд СН к содержанию углерода позволила определять величину [C/Fe] с точностью 0.05. Расхождения значений [C/Fe] по разным спектрограммам для всех бленд не превысили 0.05, по разным блендам — 0.15. Различие содержаний кислорода, полученных по двум линиям [O I], не превышает 0.10 dex. Точность нашего значения отношения O/C в атмосфере γ^1 Leo составляет ± 0.15 dex.

Наши результаты свидетельствуют о небольших избытках содержаний углерода и кислорода в атмосфере γ^1 Leo, при этом $\lg(O/C)$ меньше солнечного на 0.1 (для Солнца $\lg(O/C) = 0.32$ [6]). Ламберт и Рис [11] получили [C/Fe] = -0.26 при [O/Fe] = +0.26. При различии в содержаниях кислорода 0.16 dex содержание углерода, как и содержание азота, в работе [11] отличается от нашего примерно на 0.5 dex. Отношение O/C для γ^1 Leo в работе [11] составляет 0.84 dex, что на 0.5 dex выше солнечного и на 0.6 dex выше, чем в настоящей работе. Возможные источники расхождений — использование в работе [11] устаревших значений потенциалов диссоциации молекул CH, C₂, CN и «солнечных» сил осцилляторов молекулярных линий. Последние могут быть недостаточно точны из-за различия физических условий в атмосферах Солнца и К-гиганта и неполного учета блендирующих молекулярных линий. Расхождение в содержаниях углерода в нашей работе и в работе Ламберта и Риса [11] частично может быть объяснено также выбором моделей атмосфер с разной эффективной температурой ($\Delta T_{\text{eff}} = 150$ K) — как было сказано выше, оценка содержания углерода по CH сильно зависит от температуры.

Содержания C, N, O, полученные Ламбертом и Рисом [11], согласуются с современной теорией звездной эволюции, по которой в результате конвективного перемешивания при первом восхождении звезды по ветви красных гигантов поверхностные слои обогащаются продуктами CNO-цикла. Результаты же настоящей работы и нашей работы [3] показывают, что содержания C, N, O и отношение O/C в атмосфере γ^1 Leo мало отличаются от солнечных, а это свидетельствует об отсутствии конвективного перемешивания вещества в атмосфере этой звезды. С таким выводом не согласуется низкое значение отношения $^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 6.5$ [16], но стандартная теория звездной эволюции тоже не дает столь низкую величину и требует введения дополнительного перемешивания.

Мы попытались оценить массу звезды по эволюционным трекам, рассчитанным в работе [12]. Это оказалось сложным из-за перекрытия первой и второй восходящих ветвей красных гигантов с разными массами и неуверенного значения параллакса γ^1 Leo (или светимости). Более высокую массу дает первая восходящая ветвь гигантов ($2.4\text{--}2.0 M_{\odot}$), звезды с массой $M \leq 1.7 M_{\odot}$ должны претерпевать в ходе эволюции гелиевую вспышку в ядре [12]. В пользу низкой массы γ^1 Leo говорит вывод Скало и Миллера [15] о том, что массы большинства красных гигантов $M \approx M_{\odot}$. В таких звездах возможно обогащение атмосфер изотопом ^{13}C путем турбулентной диффузии. Ламберт и Рис [11] также предполагают, что у гигантов с высоким содержанием ^{13}C массы $M \leq 1.5 M_{\odot}$. Возможно также, что первоначальный химический состав γ^1 Leo отличался от солнечного. Такое предположение высказано для Арктура [11], звезды со сходными характеристиками.

Авторы благодарят Р. Куруца за предоставление банка данных и Л. А. Кузнецова за помощь в уточнении молекулярных констант и списков молекулярных линий.

1. Боярчук М. Е., Саванов И. С. Химический состав атмосфер гигантов класса K0 β Gem и γ^1 Leo // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1987.—76.—С. 21—36.
2. Шаврина А. В., Кузнецова Л. А. О величинах gf спектральных линий некоторых двухатомных молекул // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 6.
3. Шаврина А. В., Яковина Л. А., Бикмаев И. Ф. Содержание азота в атмосфере К-гиганта γ^1 Leo // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 1.—С. 44—53.
4. Cayrel de Strobel G., Hauck B., Francois P., et al. A catalogue of [Fe/H] determinations: 1991 edition // Astron. and Astrophis. Suppl. Ser.—1992.—95, N 2.—P. 273—336.
5. Grevesse N., Lambert D. L., Sauval A. J., et al. Vibration-rotation bands of CH in the solar infrared spectrum and the solar carbon abundance // Astron. and Astrophys.—1991.—242, N 2.—P. 438—495.
6. Grevesse N., Sauval A. J. Molecules in the Sun and molecular data // Molecules in the stellar environment: Proc. IAU Coll. N 146, Copenhagen, Denmark, May 24—29, 1993 / Ed. U. G. Jorgensen. — Berlin etc.: Springer-Verlag, 1994.—P. 196—208.
7. Hettema H., Yarkony D. R. On the radiative lifetime of the ($a^4\Sigma^-$, ν , N , f_i) levels of the CH radical: an ab initio treatment // J. Chem. Phys.—1994.—100, N 12.—P. 8991—8998.
8. Holweger H., Müller E. A. The photospheric barium spectrum: solar abundance and collision of Ba II lines by hydrogen // Solar Phys.—1974.—39, N 1.—P. 19—30.
9. Kurucz R. L. Data Bank. — CD-ROM NN 1—22, 1993—1994.
10. Lambert D. L., McWilliam A., Smith V. V. The chemical composition of blue horizontal branch stars in M4 and NGC 6397 // Astrophys. J.—1992.—386, N 2.—P. 685—694.
11. Lambert D. L., Ries L. M. Carbon, nitrogen, and oxygen abundances in G and K giants // Astrophys. J.—1981.—248, N 1.—P. 228—248.
12. Maeder A., Meynet G. Grids of evolutionary models from 0.85 to 120 M_\odot . Observational tests and the mass limits // Astron. and Astrophys.—1989.—210, N 1/1.—P. 155—173.
13. McWilliam A. High-resolution spectroscopic survey of 671 GK giants. I. Stellar atmosphere parameters and abundances // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1990.—74, N 4.—P. 1075—1128.
14. Pavlenko Ya. V., Rebolo R., Martin E. L., Garcia Lopez R. J. Formation of lithium lines in very cool dwarfs // Astron. and Astrophys.—1995.—303, N 3.—P. 807—818.
15. Scalo J. M., Miller G. E. A constraint on proposed explanations for low $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratios in G—K giants // Astrophys. J.—1978.—225, N 2.—P. 523—526.
16. Tomkin J., Lambert D. L., Luck R. E. The $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ratio in stellar atmospheres. IV. Eleven G and K type giants // Astrophys. J.—1975.—199, N 2.—P. 436—442.
17. Whiting E. E., Schadée A., Tatum J. B., et al. Recommended conventions for defining transition moments and intensity factors in diatomic molecular spectra // J. Mol. Spectrosc.—1980.—80.—P. 249—256.

Поступила в редакцию 28.12.95