АСТРОФИЗИКА

TOM 28

АПРЕЛЬ, 1988

ВЫПУСК 2:

УДК: 524.31.01—36

ЭФФЕКТЫ ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ЛТР В АТМОСФЕРАХ F-CBEPXГИГАНТОВ. III. АНАЛИЗ ЛИНИЙ Na I (РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ)

А. А. БОЯРЧУК, И. ГУБЕНЫ, И. КУБАТ, Л. С. ЛЮБИМКОВ, Н. А. САХИБУЛЛИН Поступила 24 нювя 1987

Для шести F-сверхгигантов и трех карликов (включая Солбце) выполнены расчетынаселенностей урсвней Na I при отказе от условия ATP. Вычислены профили и эквивалентные ширины W_2 ряда линий Na I. Показано, что изменения в W_2 относительно ATP для субординатных линий обычно не превышают 10% и не приводят к значительным поправкам в определяемом содержании натрия ($\Delta \lg \varepsilon < 0.1$). Аншь для ганболее массивных сверхгигантов, имеющих $\lg g \sim 0$, содержание может уменьшиться ка величину $\Delta \lg \varepsilon = 0.2$. Подтвержден избытох Na, найдебный у желтых сверхгигантосв на основе ATP-анализа. Подтверждена также зависимость втого избытка от $\lg g$ возможно, она является следствием аналогичной зависимости от массы сверхгитантов. Отмечено, что современные расчеты подтверждают предположение, что источником повышенного содержания натрия является NeNa-цикл.

1. Введение. В предыдущей статье [1] мы изложили методику вычисления линий Na I при отказе от предположения о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР). Теперь мы рассмотрим результаты не-ЛТР расчетов для шести F-сверхгигантов и трех карликов, перечисленных в [1]. Конечной целью этих расчетов была проверка того, насколько сильно отклонения от ЛТР влияют на определяемое содержание натрия. В частности, необходимо было ответить на два вопроса:

1) Не является ли обнаруженный у желтых сверхгитантов избыток натрия следствием неучтенных отклонений от ЛТР?

2) Сохранится ли при отказе от ЛТР найденная в [2] корреляция между избытком натрия и ускорением силы тяжести g?

2. Населенности уровней и ионизация. В результате решения не-АТР задачи были определены населенности N. всех 20 уровней, включенных в модель атома (см. [1]). Как извеотно, не-АТР эффекты описываются с помощью факторов $b_i = N_i^{\text{ве-ЛТР}} N_i^{\text{ЛТР}}$, характеризующих изменения в населенностях уровней после отказа от условия ЛТР. В качестве примера на рис. 1 приведены величины b_i для первых четырех уровней Na I, рассчитанные в зависимости от оптической глубины τ_{5000} в случае Канопуса. Здесь τ_{5000} есть глубина в непрерывном спектре на длине волны 5000 А. Отдельно представлены результаты, полученные на основе теоретического поля излучения (сплошные линии) и с помощью эмпирических значений $T_{\rm rad}$ (штриховые линии). Подобные зависимости имеют место и для других рассмотренных F-сверхгигантов.



IgT 5000

Рис. 1. Зависимость b-факторов от оптической глубины тако для уровней 1—4 в -случае Канопуса. Сплошные линии получены на основе теоретического поля излучания, штриховые — с использованием T_{rad} .

Из рис. 1 видно, что отклонения от ЛТР в верхних слоях атмосферы приводят к перенаселенности первого уровня; на оптических глубинах $\tau_{b000} \sim 10^{-3}$ фактор b_i достигает значений 2—3. Более высокие уровни при $\tau_{5000} < 10^{-2}$, напротив, недонаселены ($b_i < 1$). Из рас. 1 также следует, что использование эмпирических температур T_{rad} призодит к более низким значениям b_i , чем расчеты на основе теоретических интенсивностей.

В работе [3] при решении не- Λ ТР задачи для Fe было показано, что благодаря большой эффективности процессов фотоионизации, контролируемых идущим снизу ультрафиолетовым излучением, в атмосферат F-сверхгигантов существует сильная сверхионизация атомов Fe I (относительно Λ ТР). Для всех уровней Fe I, включая и основное состояние, было обнаружено быстрое падение b-факторов с уменьшением слтической глубины т. В случае же Na I отказ от Λ ТР не приводит к повышенлю ионизации, а для первого уровня, как уже указывалось, наблюдается деже рост b-фактора с высотой (рис. 1). Остановимся на причинах такого расских интенсивностей.

Детальный анализ скоростей переходов между уровнями притодит к выводу, что для атсмов Na I в отличие от Fe I велика роль связанных связанных переходов. Если для Fe I определяющим процессом является перекачка в состояние Fe II, то для Na I скорость перехода, например, с основного уровня в ионизованное состояние сравнима или даже меньше скоростей переходов на некоторые возбужденные уровни. Вследствие втого влияние отклонений от ЛТР на степень ионизации Na I уже не столь существенно, как для Fe I. Высокая скорость перехода из состояния 3*p* в основное состояние 3*s* приводит к перенаселенности первого уровня Na I.

Имеется и другая причина, объясняющая отсутствие заметной сверхионизации атомов натрия. Она связана с тем, что потенциал ионизации Na I значительно ниже потенциала ионизации Fe I (соответственно 5.139 и 7.870 аВ); подобное несоответствие в энергиях ионизации сохраняется и для другах нижних уровней. Если для Fe I фотоионизация с 1-го уровня вызывается излучением с длиной волны $\lambda \leq 1575$ A, со 2-то уровня—излучением с длиной волны $\lambda \leq 1762$ A, то для Na I соответствующие значения λ существенно сдвинуты в сторону больших длин волн: $\lambda \leq 2413$ A для 1-го уровня, $\lambda \leq 4084$ A для 2-го уровня (см. табл. 1 в [1]). Это приводит к тому, что для атомов Na I превышение температуры излучения T_{rad} над локальной температурой $T(\tau)$ не столь велико, как для атомов Fe I; соответственно снижается и роль процессов фотоионизации относительно процессов рексмбинации (первые контролируются температурой T_{rad} , в то время как вторые протекают при $T = T(\tau)$).

Резюмируя, можно заключить, что качественные отличия в возбуждении и степени ионизации, которые дает решение не-ЛТР задачи для натрия и железа, являются в конечном счете следствием больших различий в свойствах их атомов.

3. Эквивалентные ширины при отказе от ЛТР. После вычисления населенностей уровней Na I были выполнены расчеты профилей и эквива-8—174 лентных ширин линий, перечисленных в нашей предыдущей статье (см.: табл. 2 в [1]). Мы не приводим эквивалентных ширин W_{λ} для отдель-ных свергигантов, т. к. эти значения W_{λ} зависят от $T_{\pm \phi\phi}$, lg g u ; и, следовательно, индивидуальны для каждой звезды. Гораздо болееобщий характер имеет величина $w = (W_{\lambda}^{\text{ne-ATP}} - W_{\lambda}^{\text{ATP}}) W_{\lambda}^{\text{ATP}}$, характеризующая изменения в вычисленных эквивалентных ширинах приотказе от условия λ TP. Ее значения мы привели в табл. 1, где представлены результаты расчетов для двух случаев: 1— при использовании теоретических интенсивностей поля излучения, II— на основеэмпирических значений T_{red} .

Таблица Г'

Линия	F0-сверхгиганты		a UMi		7 Cyg	Y Cyg P Cas	
	I	I II	I	II	11	I	II
6160.75	0.08	_0.10	-0.02	-0.07	-0.04	0.50	0.20
6154.23	0.07	-0.11	-0.03	-0.08	-0.03	0.48	0.19
(D ₁) 5895.92	0.30	0.26	0.20	0.20	0.25	0.71	0.62
(D ₂) 5889.95	0.31	0.27	0.19	0.19	0.23	0.67,	0.60
5688.20	0.09	-0.06	0.05	-0.01	0.02	0.60	0.28
5682.63	0.07	-0.08	0.02	_0.04	-0.01	0.54	0.20
4982.81	0.07	-0.10	-0.01	-0.06	-0.04-	0.39	0.16
4978.54	0.06	0.10	-0.01	-0.06	-0.04	0.36	0.15.
4668.56	0.04	-0.11	-0.02	-0.07	-0.04	0.377	1 0.16
4664.81	0.03	-0.10	0.04	-0.08	0.06	0.36	0.15
4497.66	0.03	-0.11	-0.03	-0.07	-0.05	0.34	0.15
4494.18	0.03	-0.10	-0.03	-0.08	-0.05	0.34	0.15

ЗНАЧЕНИЯ $w = (W_{\lambda}^{\text{He-ATP}} - W_{\lambda}^{\text{ATP}})/W_{\lambda}^{\text{ATP}}$, ВЫЧИСЛЕННЫЕ ДЛЯ F-СВЕРХГИГАНТОВ ДВУМЯ СПОСОБАМИ: І—НА ОСНОВЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО-ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ, ІІ — ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ T_{red}

Для трех F0-сверхгигантов (а Car, а Lep и Car) относительныеизменения в W_{Λ} оказались практически одинаковыми, поэтому для них в табл. 1 указаны средние значения w. Видно, что вквивалентные ширины субординатных линий зависят от метода расчета: при I подходе они несколько увеличиваются по сравнению с ΛTP , а при II подходе.— уменьшэются. Однако в обоих случаях $|w| \leq 10$ —11.%, что приводит ж очень небольшим поправкам в определяемом содержании натрия, не превышающим 0.06—0.08 в логарифмической шкале. Для резонансных D-линий не- ΛTP вффекты больше ($w \approx 30$ %), однако вти линии, как уже. отмечалось в. [1], при оценке содержания натрия не используются.

346

АТМОСФЕРЫ F-СВЕРХГИГАНТОВ. III

Для поздних F-сверхгигантов α UMi и γ Суд изменения в W_{λ} у субординатных линий также оказались небольшими, здесь $|w| \leq 8^{0}/_{0}$ (в случае D-линий $w \approx 20^{0}/_{0}$). Однако для ρ Cas, сверхгиганта особенно высокой светимости, влияние откловений от Λ TP оказалось более значительным: для субординатных линий I способ расчета дал $w = 34-60^{0}/_{0}$, а II способ — $w = 15-28^{0}/_{0}$, в то время как для резонансных D-линий эквивалентные ширицы увеличились на 60—70 $0/_{0}$.

Отметим, что вычисления W_{λ} были выполнены как при переменной микротурбулентности $\xi_t = \xi_t(\tau)$, так и при $\xi_t = \text{const. Если гово$ $рить об относительном изменении <math>W_{\lambda}$, различие между этими двумя случаями оказалось несущественным (разница в w либо совсем отсутствует, либо составляет несколько процентов). При определении содержания натрия $\lg \varepsilon$ (Na) мы использовали вариант с переменной микротурбулентностью.

Для большинства исследованных сверхгигантов не очень существенно, какой из двух подходов — І или II — избрать при выводе содержания Ige (Na), т. к. поправки за не-АТР вффекты все равно оказываются малыми по сравнению с найденным избытком натрия. Однако в случае р Cas, как выяснилось, использование тото или иного способа вычислений поиводит к более заметной разнице в lg є (Na), составляющей 0.15. В [3] было отмечено, что каждый из указанных подходов имеет свои недостатки: тем не менее второй способ, когда используются эмпирические эначения Trad, по-видимому, лучше соответствует реальным атмосферам. Действительно, в I подходе применяются теоретические потоки излучения, «оторые заведомо завышены из-за неучета многочисленных линий поглощения. и это должно приводить к завышению не-ЛТР эффектов. Во II подходе, основанном на использовании реальных потоков излучения от исследуемых звезд, указанный недостаток устраняется; вероятно, именно поэтому для железа этот метод дал намного лучшее согласне с наблюдениями (см. онс. 1 и 3 в [3]). Учитывая сказанное, мы определяли содержание натрия. с помощью эквивалентных ширин, рассчитанных II способом.

Для сравнения были выполнены расчеты W_{λ} линий Na I для трех карликов с заметно различающимися температурами $T_{9\phi\phi}$: для Солнца, Проциона и о Aql. Оказалось, что при отказе от ЛТР субординатные линии показывают изменения W_{λ} , составляющие не более 5 °/₀. Таким образом, при оценке lg ε (Na) отклонениями от ЛТР вполне можно пренебречь. Для D-линий эффект может оказаться больше, причем он связан с $T_{\phi\phi}$: если для Солнца эти линии усиливаются только на 3 °/₀, то для Проциона увеличение их эквивалентных ширин составляет уже около 15 °/₀, а для δ Aql — 20 °/₀.

4. Определение содержания натрия. Для четырех из шести исследованных сверхгигантов в нашем распоряжении имелись достаточно полные и точные измерения W, линий Na I. Этот наблюдательный материал приведен в табл. 2. Он включает данные для трех сверхгигантов подкласса F8 – a UMi, т Суд и р Саз, полученные в Крымской астрофизической обсерватории по спектрограммам с дисперсией 4, 6 и 8 А/мм (детали см. в [4]). Кроме того, использованы опубликованные измерения W, для Канопуса (a Car), для которого благодаря его исключительной видимой яркости ($m_{\nu} = -0.73$) в последние годы неоднократно проводились спектральные исследования высокого качества (дисперсия около 2 А/мм). Эквивалентные ширины линий Na I іл 4494.18, 4497.66, 4668.56 и 4982.81 для Канопуса взяты нами из [5], а Ш, остальных четырех линий — из [6, 7]. Подчеркнем, что для анализа нами отбирались только неблендированные линии Nal. Отметим также, что исследуемые звезды обладают медленным вращением, поэтому рассматриваемые линии являются довольно резкими.

Таблица
ИЗМЕРЕННЫЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ
ШИРИНЫ ЛИНИЙ Na I У ЧЕТЫРЕХ
F-CBEPXГИГАНТОВ

2

W), mA						
a Car	a UMi	η Cyg	p Cas			
24	69	120	185			
11	34	60	71			
88	210	218	431			
54	164	171	312			
40	_		· _			
_	_	102	_			
17	- 71	63	129			
	_	44	45			
8	50	49	72			
7	-	-	-			
	a Car 24 11 88 54 40 17 8 7	IF >>, a Car a UMi 24 69 11 34 88 210 54 164 40 17 71 8 50 7	W_{λ}, mA a Car a UMi γ Cyg 24 69 120 11 34 60 88 210 218 54 164 171 40 - - - - 102 17 71 63 - - 44 8 50 49 7 - -			

Уже прямое сопоставление приведенных в табл. 2 данных с теоретическими значениями W_{λ} указывает на избыток натрия в атмосферах F-сверхгигантов. В качестве примера на рис. 2 сравниваются результаты наблюдений и не-ЛТР расчетов для γ Cyg. Видим, что все восемь линий Na I, измеренных в спектре этого сверхгиганта, оказываются значительно сильнее, чем предсказывают вычисления при нормальном содержании натрия.

Наши расчеты W, были выполнены для нескольких значений lg = (Na), чтобы иметь возможность определить содержание, соответствующее наблюдаемым эквивалентным ширинам. Результаты такого определения представлены в табл. 3. Здесь содержание натрия lg 2 (Na) дано в обычной шкале, в которой для водорода принято lg e (H) = 12.00. Приведены средние значения lg є (Na) по всем исследованным линиям, также с этих значений. Тут указаны разности средние ошибки же $\Delta \lg \varepsilon = \lg \varepsilon^{\text{не-АТР}} - \lg \varepsilon^{\text{АТР}}$, свидетельствующие о том, что при отказе от АТР поправки в содержании натрия обычно оказываются сравнимыми с ошибкой э, т. е. не-АТР эффектами здесь можно пренебречь.





Рис. 2. Сравнение изморенных у 7 Суд вквивалентных ширин с не-ЛТР значеияями W₁, вычисленными при нормальном содержании натрия.

Исключением является сверхгигант ρ Cas, для которого величина $\Delta \lg \varepsilon$ более чем в 3 раза превышает σ . Пример ρ Cas показывает, что для сверхгигантов со столь низкими ускорениями силы тяжести ($\lg g \sim 0$) учет отклонений от ЛТР может привести к понижению $\lg \varepsilon$ (Na) на 0.2. В табл. 3 указан также избыток натрия относительно Солнца [Na/H] = $\lg \varepsilon$ (Na) — $\lg \varepsilon_{\Omega}$ (Na), причем солнечное содержание $\lg \varepsilon_{\Omega}$ (Na) = = 6.28 [4] соответствует той же системе сил осцилляторов, которая была принята в расчетах линий Na I из табл. 2. Видим, что в атмосферах рассмотренных сверхгигантов содержание Na повышено в 2—5 раз, причем величина избытка Na во много раз превышает уровень случайных ошибок σ. Наряду с [Na/H] в табл. 3 приведена также величина [Na/Fe] = [Na/H] — [Fe/H], учитывающая различия в металличности исследованных звезд. Значения [Fe/H] = lg ε (Fe) — lg ε_{\odot} (Fe) взяты нами из [2, 8, 9].

	Число	ME HAIFE			[Na/Fe]	M¦M⊙
Звезда	НССАЄДОВВН- НМХ АННИЙ	lg = (Na)	Δlgε	[Na/H]		
α Car	8	6.58±0.03	0.06	0.30	0.41	8 <u>+</u> 1.5
α UMi	6	6.69+0.06	0.04	0.41	0.36	6±1
ү Суд	8	6.81±0.05	0.02	0.53	0.53	11±2
p Cas	7	7.00±0.05	-0.17	0.72	0.67	40 <u>±</u> 15

Таблица 3

5. Обсуждение результатов. Как уже отмечалось, в [2] была обнаружена корреляция между избытком натрия у желтых сверхгигантов и ускорением lg g. На рис. 3 (левая часть) мы сопоставили представленные в табл. 3 эначения [Na/Fe] для четырех F-сверхгигантов с величиной lg g.



Рыс. 3. Избыток натряя в атмосферах четырех F-сверхгигантов как функция ускорения силы тяжести g и массы M.

Эдесь же указаны ошибки определения $\lg \varepsilon$ (Na) и $\lg g$. Видим, что связь между [Na/Fe] и $\lg g$ сохраняется и при отказе от ЛТР. Если сверхгиганты «UMi, γ Cyg и ρ Cas показывали четкую зависимость содержания Na от $\lg g$ при условии ЛТР (см. рис. 6 в [2]), то столь :же четкую зависимость они демонстрируют и после отказа от этого условия (рис. 3). Конечно, установить по 4 звездам точную зависимость [Na/Fe] от lg g вряд ли возможно, однако при построении рис. 3 мы и не ставили такой задачи, а лишь хотели подтвердить ту корреляцию, которая была найдена в [2] по результатам ЛТР анализа 32 сверхгигантов. Новым моментом является то, что для наиболее ярких сверхгигантов (lg $g \sim 0$) избытки натрия, по-видимому, уже не столь велики, как в [2], т. е. ход [Na/Fe] с уменьшением lg g становится не таким крутым, как при ЛТР.

Недавно Сасселов [10] предположил, что обнаруженная в [2] корреляция между [Na/H] и lg g фактически отражает овязь между [Na/H] и массами M. Чтобы проверить это предположение, мы сопоставили избытки [Na/Fe] для тех же четырех сверхгигантов с их массами M (значения M/M_{\odot} , приведенные в табл.3, взяты из [11] и определены по соотвегствующим величинам $T_{34\phi}$ и lg g с помощью современных эволюционных расчетов). Из рис. 3 (правая часть) видно, что избыток натрия, действительно, как будто тем больше, чем массивнее сверхгигант.

Итак, в результате решения не-ЛТР задачи для Na I установлено, что отклонения от ЛТР в субординатных линиях Na I достаточно малы и не приводят к существенным изменениям в $\lg \varepsilon$ (Na). Лишь для самых ярких сверхгигантов с малыми значениями $\lg g$ (т. е. с большими массами M) учет этих отклонений приводит к понижению $\lg \varepsilon$ (Na) на величину $\Delta \lg \varepsilon \sim 0.2$. Таким образом, отказ от условия ЛТР не устраняет найденного ранее у желтых сверхгигантов избытка Na. Подтверждается, что этот избыток реален, и тогда возникает вопрос о его происхождении.

В [2] была выдвинута гипотеза, что ансмальное содержание Na может быть результатом NeNa-цикла, предложенного 30 лет назад Марионом и Фаулером [12]. Суть этой гипотезы заключалась в том, что NeNaцикл, протекая в недрах массивных звезд на главной последовательности параллельно с CNO-циклом, может заметно повыюнть содержание ядер ²³Na в результате последовательного захвата протонов нуклидами ²⁰Ne, .²¹Ne и ²²Ne. Недавно реальность такого процесса была подтверждена в расчетах Денисенкова и Иванова [13], которые показали, что внутри звезд с массами $M \gtrsim 1.5~M_{\odot}$ на стадии главной последовательности за счет выгорания ²²Ne в NeNa-цикле содержание ²³Na должно возрастать в 5-6 раз. Аналогичный вывод получен в работе [14] для звезд с массами М≥ 50 М_☉. Таким образом, на начальном этапе эволюции звезды с $M \gtrsim 1.5 M_{\odot}$ в ее недрах происходит образование ядер натрия, которые впоследствии, когда звезда переходит в фазу сверхгиганта и испытывает глубокое перемешивание, выносятся на поверхность вместе с продуктами ONO-цикла. Этим и объясняется избыток натрия, наблюдаемый у сверхгигантов классов F-K. Дополнительным доводсм в пользу такого объяснения аномального содержания Na может служить обнаруженная в [13] корреляция между [Na / H] и отношением изотопов углерода ¹²C/¹³C у желтых сверхгигантов.

Интересно, что полученные нами оценки [Na / Fe] не достигают вытекающего из [13] предельного значения 0.7—0.8, но постепенно приближаются к нему по мере уменьшения $\lg g$ или увеличения массы M (см. рис. 3). Это может свидетельствовать о том, что перемешивание тем әффективнее, чем массивнее эвезда.

Крымская астрофизическая обсерватория Астрономический институт АН ЧССР Казакский государственный университет

NON-LTE EFFECTS IN THE ATMOSPHERES OF F-TYPE SUPERGIANTS. III. ANALYSIS OF Na I LINES (RESULTS OF COMPUTATIONS)

A. A. BOYARCHUK, I. HUBENY, J. KUBAT, L. S. LYUBIMKOV, N. A. SAKHIBULLIN

Non-LTE populations of the NaI atomic levels are calculated for six F-supergiants and three dwarfs. The profiles and equivalent widths W_{λ} of some Na I lines of interest are computed. It is shown that ordinary changes in widths W_{λ} of subordinate lines relative to LTE are not more than $10^{0}/_{0}$ and they do not lead to appreciable correction in the sodium abundance (corrections are less than 0.1 dex). Only for most massive supergiants with $\log g \sim 0$ the derived abundance might be reduced by about 0.2 dex. The Na overabundance found for yellow supergiants from LTE analysis is confirmed. The correlation between the Na excess and $\log g$ obtained earlier is confirmed, too; probably it is a result of the analogous correlation between the Na excess and masses of supergiants (fig. 3). It is noticed that the modern calculations confirm the supposition that the source of enhanced sodium abundance is the NeNa-cycle.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Боярчук, И. Губены, И. Кубат, Л. С. Любимков, Н. А. Сахибуллин, Астрофизика, 28, 335, 1988. 2. А. А. Болрчук, Л. С. Любимков, Изв. Крым. астрофиз. сбсерв., 66, 130, 1983.

3. А. А. Боярчук, Л. С. Любимков, Н. А. Сахибуллин, Астрофизика, 22. 339, 1985.

4. А. А. Боярчук, М. Е. Боярчук, Изв. Крым. астрофиз. обсерв., 63, 66, 1981.

5. J. C. Castley, R. D. Watson, Astron. and Astrophys. Suppl. Ser., 41, 397, 1980 ...

6. J. B. Hearnshaw, K. Desikachary, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 198, 311, 1982.

7. R. E. Luck, D. L. Lambert, Astrophys. J., 298, 782, 1985.

8. А. А. Боярчук, Л. С. Любимков, Изв. Крым. встрофиз. обсерв., 64, 3, 1981.

9. Л. С. Любимков, А. А. Боярчук, Астрофизика, 18, 596, 1982.

10. D. D. Sasselov, Publ. Astron. Soc. Pacif., 98, 561, 1986.

11. А. А. Боярчук, Л. С. Любимков, Астрофизика, 20, 85, 1984.

12. J. B. Marton, W. A. Fowler, Astrophys. J., 125, 221, 1957.

13. П. А. Денисенков, В. В. Иванов, Письма в Астрон. ж., 13, 520, 1987.

14. N. Prantzos, C. Doom, M. Arnould, C de Loor, Astrophys. J., 304, 695, 1986.