

УДК: 524.31.02—366

О СОДЕРЖАНИИ ЛИТИЯ В ХОЛОДНЫХ ГИГАНТАХ

Ю. К. МЕЛИК-АЛАВЕРДЯН, М. С. ШИРБАКЯН

Поступила 19 февраля 1988

Принята к печати 24 июля 1990

На основе имеющихся наблюдательных данных об эквивалентной ширине линии λ 6708 А рассматривается связь содержания лития с некоторыми параметрами холодных гигантов.

Данные о космической распространенности лития имеют существенное значение для исследования происхождения и эволюции звезд. Это объясняется тем, что, во-первых, литий имеет достаточно сильную резонансную линию λ 6708 А в видимом диапазоне спектра, и, во-вторых, он быстро выгорает в реакции ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$ уже при сравнительно небольших для звезд температурах: $\sim 2 \cdot 10^8$ К. Указанные обстоятельства делают литий чувствительным индикатором эволюционного статуса звезд с протяженными конвективными оболочками, таких, в частности, как холодные гиганты.

Содержание лития в атмосферах звезд исследовалось во многих работах. Основные результаты этих работ суммированы в обзорах [5, 6]. Рассматривая данные, представленные в этих обзорах, мы видим некоторые зависимости (конечно, статистические) содержания лития в звездах от их возраста. В частности, оказывается, что в атмосферах молодых звезд содержание лития близко к межзвездному, а в более старых звездах лития определено меньше. Этот важный факт был отмечен еще самыми первыми исследователями вопроса о содержании лития в звездах. В дальнейшем, при исследовании содержания лития в звездах, принадлежащих к рассеянным галактическим скоплениям, удалось получить и количественную зависимость содержания лития в звездах от их возраста. Эта наблюдаемая зависимость имеет следующий вид [1]:

$$N(\text{Li}) = N_0 \exp[-t/\tau(\mathcal{M})], \quad (1)$$

где $\tau(\mathcal{M})$ — некоторая функция звездных масс:

$$\tau(\mathcal{M}) = 1.14 \times 10^9 (1.58 - \mathcal{M})^{-1} - 9.75 \times 10^8 \text{ лет.} \quad (2)$$

Для объяснения зависимости (1) выдвинуто предположение о том, что вещество поверхностных слоев звезд в результате конвекции проходит через высокотемпературные их недра, где и происходит выгорание лития, содержание которого первоначально предполагается близким к межзвездному, то есть сравнительно высоким. Так как конвекция в звездах происходит достаточно медленно, то для выгорания лития в этом процессе требуется время, которое лишь на один порядок меньше возраста самых старых звезд нашей Галактики. Это вполне согласуется с формулой (1), согласно которой уменьшение содержания лития может наблюдаться лишь у звезд, возраст которых не менее $\sim 10^9$ лет. Сравнивая эту величину с временем жизни звезд различных масс, мы приходим к выводу, что уменьшение содержания лития может происходить только у звезд сравнительно небольших масс, скажем, меньше $1.4 M_{\odot}$ (у звезд больших масс для выгорания лития в этом процессе не хватит всей жизни!).

Конечно, приведенные выше численные оценки носят очень грубый характер. Сама природа рассматриваемого явления слишком сложна для того, чтобы исчерпывающим образом соответствовать предложенной схеме. Действительно, есть целый ряд вопросов, которые немедленно возникают при теоретической интерпретации зависимости содержания лития в звездах от их возраста. В частности, неясным остается вопрос об однородности первоначального содержания лития в различных звездах, вопрос о зависимости интенсивности конвекции от целого ряда физических и химических свойств звезды. Более того, известны факты, определенно противоречащие и самой рассматриваемой схеме химической эволюции звезд. А именно, у некоторых звезд содержание лития оказывается на несколько порядков выше, чем в межзвездной среде. На основе этого факта было выдвинуто предположение о том, что на каких-то стадиях звездной эволюции на поверхности звезд могут происходить процессы, в ходе которых содержание лития может увеличиваться.

Перечисленные выше проблемы, связанные с исследованием содержания лития в звездах приобретают особую остроту в случае холодных гигантов. Дело в том, что физические процессы, происходящие в недрах звезд, расположенных вне главной последовательности диаграммы Герцшпрунга—Рассела, особенно сложны. Исследование эволюции таких звезд, к числу которых относятся и красные гиганты, вряд ли возможно в рамках упрощенной модели. Для исследования эволюции красных гигантов необходимо учитывать всю сложность и многообразие их наблюдаемых свойств. Исходя из этих соображений, мы решили обратиться к наблюдательным данным о наличии лития в атмосферах холодных гигантов.

К настоящему времени измерения линии поглощения $\text{Li I } 6708 \text{ \AA}$ выполнены всего для нескольких десятков холодных гигантов. Большую часть этих данных мы собрали в табл. 1. К сожалению, приведенные в ней

данные не являются однородными, так как таблица составлена на основании четырех работ [1—4], которые значительно различаются по методам наблюдений и обработки данных. Например, в работе [1] наблюдения велись на 2,7-м телескопе с помощью ретикона. Разрешение при этом составляло 0,1 А. В работе [3] разрешение было значительно хуже — 0,6 А, так как наблюдения проводились с помощью 500-канального телевизионного детектора (дисперсия 12А/мм). Учитывая столь значительные различия в технике и методах данных наблюдений, не приходится особенно удивляться большим различиям значений W , полученных разными авторами для одних и тех же звезд. При этом существенное значение имеет тот факт, что приведенные в табл. 1 значения W относятся к бленде, включающей

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАССМАТРИВАЕМЫХ ЗВЕЗД

№	BS	Сп. класс	M_v	W	Лит.
1	45	M2 III	—	72	2
2	48	M1 III	1.84	92 173	1 2
3	103	M4 III	0.90	110	3
4	681	M1 III	—	182	2
5	843	K7 III	2.34	72	3
6	921	M4 II—III	—2.24	110	3
7	1231	M0.5 III	—2.41	195	1
8	1457	K5 III	—0.88	44	4
9	1556	M3	3.21	144	2
10	1908	M0.5 III	—	73	3
11	2286	M3 III	—0.65	42 104	1 4
12	2574	K4 III	0.56	13	4
13	2795	M0 III	1.61	160	3
14	2105	M0 III	—0.54	29 72	1 3
15	3249	K4 III	—0.98	16	4
16	3283	M1 III	—	69 119	1 2
17	3319	M3 III	2.82	14	1
18	3705	K7 III	—0.27	46 70	1 2
19	3820	M1 III	4.63	4 39	1 2
20	3876	M1.5 III	4.29	79 147	1 2
21	4059	M0 III	0.49	84 97	1 2
22	4092	M0.5 III	—	9 23	1 2

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5	6
23	4094	K4 III	-0.86	16	4
24	4104	K4.5 III	0.10	34	1
25	4433	M0 III	0.64	11 60	1 3
26	4517	M1 III	-0.41	5 46	1 2
27	4902	M3 III	0.53	59	2
28	4910	M3 III	-0.48	197 155	2 3
29	5219	M3 III	1.78	133 190	2 3
30	5226	M3 III	-0.83	3 80	1 3
31	5299	M4.5 III	2.15	11 85	1 3
32	5503	M5.5 III	1.76	25 100	1 2
33	5924	M0 III	2.53	70	3
34	6056	M0.5 III	1.93	8 75	1 2
35	6128	M2 III	-0.86	121	2
36	6337	M3 III	3.47	54	2
37	6705	K5 III	-0.65	70	3
38	6815	M3 III	4.20	199	3
39	7405	M1 III	-0.18	8 71 65	1 2 3
40	7635	K5-M0 III	-0.87	84 65	2 4
41	7635	M2 II	-1.66	152	1
42	7951	M3 III	-2.75	259	2
43	8057	M1 III	—	80 111	1 2
44	8080	M1 III	-0.52	12	1
45	8416	M5 III	—	100	3
45	8698	M2 III	-0.89	70	2
47	8597	M0 III	—	60	3
48	8775	M5.5 III	—	54 80	2 3
49	8801	K5 III	—	80	3
50	8830	M2 III	—	10	3
51	9061	M3 III	2.03	72 80	2 3

Примечание. M_r — абсолютная величина, W — эквивалентная ширина линии
 λ 6708 Å Li.

в себя кроме линии поглощения λ 6708 А и другие линии, число которых тем больше, чем хуже спектральное разрешение. Наиболее значительные помехи измерению интенсивности линии поглощения лития создает линия окиси титана, интенсивность которой зависит от спектрального класса исследуемой звезды [7].

Посмотрим теперь, как зависит величина W от физических параметров холодных гигантов. К числу основных параметров, характеризующих рассматриваемые звезды, относятся их спектральный класс и светимость.

Займемся изучением зависимости W от светимости звезды. Прежде чем перейти к рассмотрению этой зависимости, поясним, почему мы интересуемся ею. Дело в том, что в результате теоретических расчетов эволюции красных гигантов удается объяснить положение этих звезд на диаграмме Герцшпрунга—Рассела, то есть связать их наблюдаемые свойства, такие как спектр и светимость, с характером физических процессов, происходящих в их недрах на той или иной стадии эволюции. Эти расчеты эволюционных треков выполнены, например, в работе [10]. Согласно этим расчетам, положение красного гиганта нормального химического состава на диаграмме ГР однозначно определяется величиной его массы. В свою очередь, масса звезды однозначно связана со временем, проведенным ею на главной последовательности, то есть со временем жизни красного гиганта. Следовательно, учитывая соотношение (1), мы приходим к выводу, что если пренебречь другими факторами, то содержание лития в атмосфере красного гиганта должно быть однозначно связано с его положением на диаграмме ГР. Конечно, делая такой вывод, мы упрощаем ситуацию. В частности, мы не учитываем различия в первоначальном содержании лития в разных звездах, не учитываем различий физических и химических свойств звезд. Учет всего этого делает исследование зависимости содержания лития от светимости красных гигантов более сложной, но не менее интересной задачей.

Итак, рассмотрим зависимость содержания лития в красных гигантах от их физических свойств. В первом приближении содержание лития определяется величиной массы звезды (см. (1)). Хотя соотношение (1) установлено для звезд главной последовательности, оно тем более применимо к красным гигантам, которые, как полагают, вследствие выгорания в их ядрах водорода ушли с главной последовательности. Посмотрим, так ли это?

Для того, чтобы ответить на этот вопрос, нам необходимы данные о массах рассматриваемых звезд. Прямыми определениями масс мы не располагаем. Однако можно получить оценку масс красных гигантов на основе сопоставления положения этих звезд на диаграмме ГР с расчетами эволюционных треков красных гигантов. Действительно, рассматривая эволюционные треки, рассчитанные, например, в [10], мы видим, что для

каждого спектрального подкласса класса M существует определенная связь абсолютной величины с массой звезды. Более того, оказывается, что, в некотором приближении имеет место определенная связь с массой звезды величины $M_V - M_V^*$, где M_V^* — абсолютная болометрическая величина красного гиганта, рассчитанная для некоторой определенной массы (для дальнейших расчетов нам удобно взять за эту массу $1.4 M_\odot$), и данного подкласса спектрального класса M . Исходя из этих соображений, мы будем рассматривать зависимость содержания лития именно от этой величины $M_V - M_V^*$, имея в виду однозначную зависимость этой величины от массы соответствующих красных гигантов.

Перейдем к конкретным расчетам. Абсолютные визуальные светимости рассматриваемых звезд приводятся в табл. 1 (эти данные заимствованы, в основном, из каталога ярких звезд). Величину M_V^* рассчитаем следующим образом. Прежде всего, воспользовавшись данными [10], найдем абсолютные болометрические величины красных гигантов, с массой $M = 1.4 M_\odot$ и имеющих эффективные температуры, соответствующие согласно [11] данным спектральным классам. Полученные результаты приводятся в таблице 2. Затем, принимая значения болометрических поправок согласно [11], мы вычислили и значения M_V^* , которые также приводятся в таблице 2. Напомним еще раз, что эти значения M_V^* соответствуют расчетам [10] эволюционного трека красного гиганта с массой $1.4 M_\odot$.

Таблица 2

Sp III	K5	M0	M1	M2	M3	M4	M5
T_e	3.602	3.591	3.580	3.574	3.562	3.550	3.531
BC	-1.15	-1.25	-1.45	-1.65	-1.95	-2.4	-3.1
M_V	-0.75	-1.25	-1.50	-1.75	-2.25	-2.5	-3.25
M_V^*	0.4	0	-0.05	-0.1	-0.3	-0.1	-0.15

Рассмотрим теперь распределение исследуемых красных гигантов по величинам двух параметров, а именно, по величине бленды W , и по величине $M_V - M_V^*$. Это распределение показано в таблице 3. Как мы отмечали выше, имеющиеся в нашем распоряжении данные о величине W являются весьма неоднородными. Поэтому в таблице 3 каждая звезда обозначена цифрой, представляющей собой номер ссылки в списке литературы, то есть указана работа, из которой заимствованы данные о величине W .

Какие же выводы можно сделать на основании таблицы 3? Прежде всего, можно отметить, что среди звезд с $M_V - M_V^* < -2$, то есть имеющих самые большие массы, наблюдаются лишь звезды с $W > 100 A$.

Правда, таких звезд всего три. Если это не является случайным совпадением, то мы должны признать, что, как и следует ожидать с учетом соотношения (1), среди звезд с большой массой большая эквивалентная ширина бленды λ 6708 А указывает, вероятно, на большое содержание лития в этих звездах. С другой стороны, среди звезд сравнительно малой массы, то есть $M_1 - M_0 \geq 2$, следует ожидать более низкого содержания лития, и, следовательно, W у таких звезд должно быть, как правило, меньше. Так ли это на самом деле? Как нам представляется, таблица 3 не дает возмож-

Таблица 3

$M_1 - M_0$						
W	-2	-2 ÷ -1	-1 ÷ 0	0 ÷ 1	1 ÷ 2	> 2
0 ÷ 50		4, 4, 1	1, 1, 1, 1, 4, 1, 1, 1, 2,	4, 1	1, 1	1, 1, 1, 2
50 ÷ 100		3, 2, 4	2, 3, 2, 3 2, 2	1, 2, 6, 2	1, 2, 3, 2	3, 1, 3, 3
100 ÷ 150	3		2		6, 2	2
> 150	1.2	1	2, 3	3	2, 3	2, 2, 3, 3

ности уверенно ответить на этот вопрос. Действительно, среди звезд с $M_1 - M_0 \geq 2$ имеются как звезды с малыми значениями W , так и с большими. Но как можно объяснить большое содержание лития (если, как и в предыдущем случае считать, что большое значение W указывает именно на большое содержание лития), у звезд малых масс? Можно предложить несколько объяснений. Например, можно предположить, что на стадии красных гигантов происходят процессы образования лития. Основанием для такого предположения, на наш взгляд, может служить тот факт, что в некоторых холодных гигантах содержание лития во много раз превышает межзвездное. Есть и другие объяснения. В частности, можно предположить, что наблюдаемые в настоящее время малые массы рассматриваемых звезд с большими значениями W — это остатки первоначально больших, но уменьшившихся вследствие истечения вещества масс. Наконец, можно предположить, что красные гиганты с большим содержанием лития и с малыми массами могут представлять собой ранние, а не поздние стадии звездной эволюции. Подробнее останавливаться на всех этих предположениях было бы преждевременно. Причина этого становится ясной при внимательном рассмотрении таблицы 3. Действительно, большие значения W для звезд с малыми массами получены лишь в работах [2, 3]. К сожалению, результаты работы [1], выполненной с более высоким спектральным разрешением, не содержат наблюдений звезд с малыми массами и с боль-

шим содержанием лития. Согласно результатам работы [1], звезды малых масс имеют и малые значения W , то есть, вероятно, содержат немного лития. Можно ли уверенно утверждать, что звезды малых масс не могут содержать много лития? Но как в таком случае объяснить столь большие значения W , полученные в [2, 3] для таких звезд? Нам представляется, что для окончательного решения данного вопроса необходимы наблюдения в этих звездах линии $\lambda 6708 \text{ \AA}$ с высоким спектральным разрешением.

Рассмотрим теперь вопрос о зависимости содержания лития в холодных гигантах от их спектрального класса. Этот вопрос имеет уже довольно длинную историю (см., например, обзоры [5, 6]). Отмечалось, в частности, что содержание лития в холодных гигантах уменьшается с уменьшением эффективной температуры до класса M0. Согласно [2, 4] в гигантах спектрального класса M содержание лития с уменьшением эффективной температуры, напротив, возрастает. Однако в других работах этот вывод опровергается. В [1, 3, 8] утверждается, в частности, что содержание лития в холодных гигантах уменьшается с уменьшением эффективной температуры. Можно ли на основании данных, приведенных в табл. 1, судить о существовании зависимости содержания лития от эффективной температуры звезды? На первый взгляд этот вопрос представляется отрицательным. Действительно, рассматривая эти данные в отдельности для каждого из четырех использованных источников [1—4], мы видим, что выводы о характере зависимости W от эффективной температуры оказываются различными и противоречащими друг другу (как это уже отмечалось ранее). Если же рассматривать зависимость W от эффективной температуры, усредненную по всем четырем использованным источникам, то мы получаем следующее выражение:

$$W = 532 - 0.12 T_{\text{eff}}, \quad r = 0.3, \quad n = 77. \quad (3)$$

Можно ли на основании зависимости (3) сделать вывод о том, что в холодных гигантах содержание лития увеличивается с уменьшением эффективной температуры? Два обстоятельства ставят под сомнение такой вывод. Во первых, как уже отмечалось выше, значительная часть (если не все) значений W представляют собой бленды, содержащие кроме линии лития и ряд других линий. Наиболее мощной из них является линия окиси титана. Эквивалентная ширина этой линии увеличивается при переходе к более холодным звездам, вследствие чего с уменьшением эффективной температуры звезд значение W будет в какой-то степени возрастать, даже при постоянном содержании лития. Этот вопрос количественно рассматривался в [7].

Еще более существенное значение для обсуждаемого вопроса имеет температурная зависимость эквивалентной ширины линии лития от температуры. Остановимся на этом более подробно.

Для этого нам понадобится кривая роста линии λ 6708 А Li. Эту кривую мы рассчитали, воспользовавшись моделями атмосфер холодных гигантов [8, 9]. Учитывая то обстоятельство, что в атмосферах холодных гигантов существенную роль играет рассеяние излучения, расчеты кривой роста выполнены в рамках модели Шварцшильда—Шустера, которая, несмотря на свою простоту, дает достаточно надежные результаты в случае преобладания процессов рассеяния [12]. Эквивалентная ширина линии с профилем r_ν определяется при этом следующим образом [12]:

$$W = \int (1 - r_\nu) d\nu, \quad (4)$$

где:

$$r_\nu = \frac{1}{1 + \int k_\nu dn},$$

причем k_ν — коэффициент поглощения одной молекулы лития в линии λ 6708 А, профиль которой можно считать фойгтовским, а интегрирование производится по обращающему слою.

Для расчета эквивалентной ширины W рассматриваемой линии по приведенным выше формулам нам необходимо знать распределение температуры, а также полного и электронного давлений в обращающем слое. Все эти величины приводятся в работах [8, 9]. Воспользовавшись этими данными, мы рассчитали кривые роста линии λ 6708 А для ряда значений эффективных температур и ускорений силы тяжести — то есть тех значений параметров, которые характеризуют обращающий слой рассматриваемых звезд. Далее, путем интерполяции мы получили кривые роста рассматриваемой линии для тех значений T_e и $\lg g$, которые, согласно [11], соответствуют обращающему слою нормальных красных гигантов в принятой дискретной системе спектральной классификации. Эти кривые роста приводятся на рис. 1.

Полученные кривые роста линии λ 6708 А Li и должны помочь нам в интерпретации данных. Как отмечено выше, вся совокупность наблюдательных данных, имеющихся в нашем распоряжении, указывает на существование определенной тенденции к увеличению W с уменьшением эффективной температуры звезды (см. (1)). Естественно, возникает вопрос о том, является ли эта тенденция выражением изменения содержания лития, или же она связана с изменением условий образования рассматриваемой линии, в частности, с теми эффектами, которые определяют вид кривой роста? Располагая кривыми роста, приведенными на рис. 1, мы можем достаточно четко отделить друг от друга эти две причины, влияющие на величину эквивалентной ширины линии поглощения λ 6708 А. Действи-

тельно, рассматривая на рис. 1 кривые роста, мы видим, что при постоянном содержании лития эквивалентная ширина линии λ 6708 А увеличивается при переходе от ранних к поздним подклассам спектрального класса М. Величина этого изменения зависит от содержания лития. Нетрудно видеть, что при нормальном содержании лития ($[\text{Li}] \approx 1$), эквивалентная

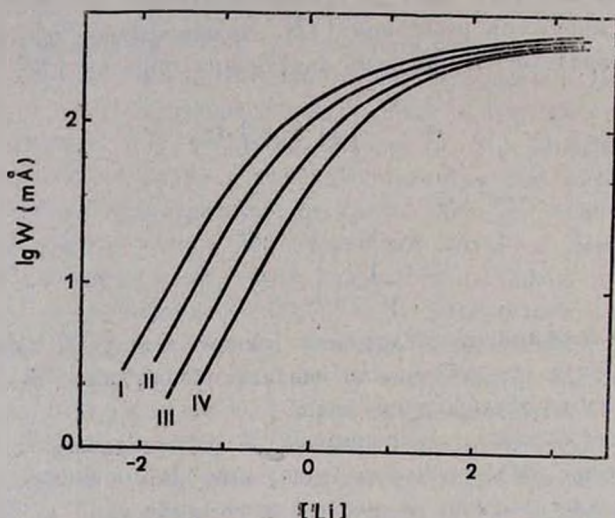


Рис. 1. Кривые роста линии λ 6708 А Li: 1 — $T_e = 3400^\circ \text{ K}$, II — $T_e = 3600^\circ \text{ K}$, III — $T_e = 3800^\circ \text{ K}$, IV — $T_e = 4000^\circ \text{ K}$; $[\text{Li}]$ — содержание лития в шкале, где содержание водорода $\lg N_H = 12.00$.

ширина линии λ 6708 А увеличивается от $\sim 150 \text{ mÅ}$ до $\sim 250 \text{ mÅ}$ при переходе от спектрального подкласса М0 к М5. Сопоставляя это значение с формулой (3), мы приходим к выводу, что наблюдаемое увеличение W в холодных гигантах при переходе от ранних к поздним подклассам класса М объясняется изменениями условий образования рассматриваемой линии поглощения. Следовательно, количество лития в различных подклассах холодных гигантов спектрального класса М в среднем остается постоянным.

Выполненный нами расчет кривых роста линии λ 6708 А объясняет и наблюдаемый большой разброс значений W в холодных гигантах. Действительно, как видно из рис. 1, в холодных гигантах с небольшим содержанием лития сравнительно незначительные изменения эффективной температуры, даже в пределах одного спектрального подкласса могут привести к заметному изменению W при постоянном содержании лития. В ходе расчетов кривых роста мы выяснили также, что особенно большую роль в формировании линии поглощения λ 6708 А в атмосферах холодных ги-

гантов играет турбулентность. Оказывается, в частности, что неопределенность в оценке скорости турбулентного движения может привести к неопределенности в W , достигающей чуть ли не порядка величины. Все эти обстоятельства и являются, по-видимому, причиной того, что в различных работах, основанных на небольшом статистическом материале, получались иногда противоположные выводы о характере зависимости содержания лития в холодных гигантах от их спектрального класса.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория

LITHIUM ABUNDANCES IN COOL GIANTS

Yu. K. MELIK—ALAVERDIAN, M. S. SHIRBAKIAN

On the basis of the observational data on λ 6708 Å Li line equivalent width the dependence of Li abundances from some parameters of cool giants are discussed.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. E. Luck, D. L. Lambert, *Astrophys. J.*, 256, 189, 1982.
2. A. E. Merchant, *Astrophys. J.*, 147, 587, 1967.
3. А. Хяни, Публ. Тартуск. астрофиз. обс., 49, 62, 1982.
4. W. K. Benzack, *Astrophys. J.*, 130, 843, 1959.
5. G. W. Wallerstein, P. S. Conti, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, 7, 99, 1969.
6. М. Е. Боярчук, Изв. Крымск. астрофиз. обсерв., 55, 127, 1976.
7. J. M. Scalo, E. M. Glenn, *Astrophys. J.*, 239, 953, 1980.
8. T. Kipper, J. Sitcha, L. Hanni, Публ. Тартуск. астрофиз. обс., 44, 271, 1976.
9. Ю. К. Мелик-Алавердян, М. С. Ширбакян, подготовлено к печати.
10. A. V. Swigart, P. G. Gross, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 36, 405, 1978.
11. V. Strazls, G. Kurtens, *Astrophys. and Space Sci.*, 80, 353, 1981.