

Ю. К. МЕЛИК-АЛАВЕРДЯН

ОЦЕНКА МАССЫ И СВЕТИМОСТИ КРАСНЫХ ГИГАНТОВ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ИНФРАКРАСНОЙ ПОЛОСЫ CO В ИХ СПЕКТРАХ

Рассмотрена зависимость интенсивности полосы CO на 2,4 мкм от ускорения силы тяжести для нормальных гигантов спектральных классов K5—M5. Показано, что эта зависимость может быть использована для оценки болометрической светимости, и, следовательно, абсолютной визуальной величины и массы холодных гигантов.

Красные гиганты, как известно, отличаются от красных звезд главной последовательности большими размерами и светимостями. В настоящее время имеются два объяснения причин этих различий: во-первых, они могут быть связаны с малым содержанием водорода в высокотемпературных ядрах красных гигантов, в которых происходят термоядерные реакции; во-вторых, полагают, что часть красных гигантов могут представлять собой молодые звезды не с термоядерными, а с гравитационными источниками энергии. В этом случае получают объяснение ряд наблюдательных фактов, свидетельствующих, по-видимому, о молодости, по крайней мере, части красных гигантов: например, наличие красных гигантов в ассоциациях. Однако принять гравитационный источник энергии этих звезд — значит предполагать гравитационную конденсацию в качестве механизма их образования. Согласно же [1] образование звезд может быть связано не с гравитационной конденсацией, а с делением сверхплотного дозвездного вещества. Принимая эту точку зрения, для объяснения существования молодых красных гигантов, мы должны допустить, по-видимому, что в процессе деления сверхплотного дозвездного вещества могут образовываться наряду со звездами главной последовательности, и звезды с неоднородной химической структурой, содержащие, в частности, ядра с дефицитом водорода.

Таким образом, существование красных гигантов ставит ряд важных проблем, связанных с происхождением и эволюцией звезд. Основным методом исследования этих проблем на сегодняшний день является сопоставление положения красных гигантов на диаграмме Герцшпрунга-Рессела (Г-Р) с результатами модельных расчетов. Основная трудность при этом заключается в определении положения звезды на диаграмме Г-Р. Дело в том, что для оценки абсолютных светимостей звезд необходимо знать их расстояния. Красные гиганты же находятся в основном на значительных расстояниях от нас, поэтому их тригонометрические параллаксы известны лишь для небольшого числа этих звезд. Для определения абсолютных светимостей красных гигантов приходится привлекать различные косвенные методы. Перечислим некоторые из них:

1. Измеряется отношение интенсивностей в двух участках спектра

($\lambda_{4240}/\lambda_{4170}$). Это отношение зависит от интенсивности полосы циана, значительно изменяющейся с изменением светимости.

2. Измеряется отношение интенсивностей абсорбционных линий, например, $\lambda_{4077}/\lambda_{4151}$, $\lambda_{4215}/\lambda_{4250}$ и др., характеризующее абсолютную светимость звезды.

3. Абсолютная светимость оценивается по интенсивности хромосферной эмиссии Ca II на основе статистической зависимости, установленной в [2].

Применение этих методов оценки абсолютных светимостей красных гигантов приводит к значительным ошибкам. Дело в том, что все перечисленные выше, а также и другие критерии зависят не только от абсолютной светимости, но и от различных физических условий в атмосферах этих звезд, а также от их химического состава. Кроме того, оптический спектр холодных гигантов содержит огромное количество абсорбционных линий, наложение которых на измеряемые линии и полосы может привести к большим ошибкам. В значительной степени свободен от отмеченных недостатков предлагаемый ниже метод оценки абсолютной светимости красных гигантов по полосе поглощения CO в диапазоне 2.4 мкм.

Расчеты интенсивности этой полосы выполнены в [3]. Там рассмотрен CO-индекс m , определяемый соотношением:

$$m = 2.5 \lg \left(\frac{I_0}{I} \right), \quad (1)$$

где I_0 , I — излучение звезды при $\lambda = 2.4$ мкм, соответственно, без учета и с учетом полосы поглощения молекулы CO. В [3] получена зависимость индекса m от $S_0 N$ — числа молекул CO над 1 см^2 фотосферы, умноженного на среднюю силу линии поглощения. Эта зависимость

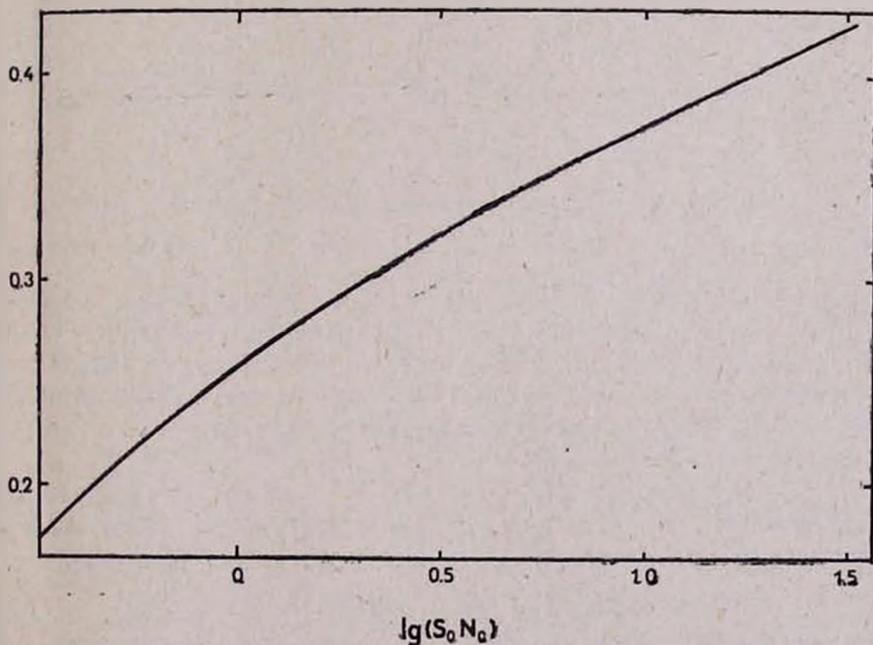


Рис. 1. Зависимость CO-индекса m от $S_0 N$

получена на основе статистической модели [4, 5] и приводится на рис. 1. Разрешая эту зависимость, мы можем найти m , если только известно $S_p V$. Значения $S_p V$ также вычислялись в [3] для различных эффективных температур и ускорений силы тяжести. Используя эти данные, можно найти $S_p V$ для звезд, интересующих нас, спектральных классов, принимая T_e и g , например, согласно [6]. При этом оказывается, что полученные, таким образом, m хорошо согласуются с соответствующими наблюдаемыми значениями.

Как показывают расчеты, величина $S_p V$ довольно сильно зависит от g . Это обстоятельство и дает основание попытаться оценить g , зная спектральный класс звезды и индекс « n ». Необходимые для этих расчетов зависимости $S_p V$ от g для различных эффективных температур, соответствующих спектральным классам K5—M5, приводятся на рис. 2. Эти зависимости построены на основании расчетов, выполненных в [3].

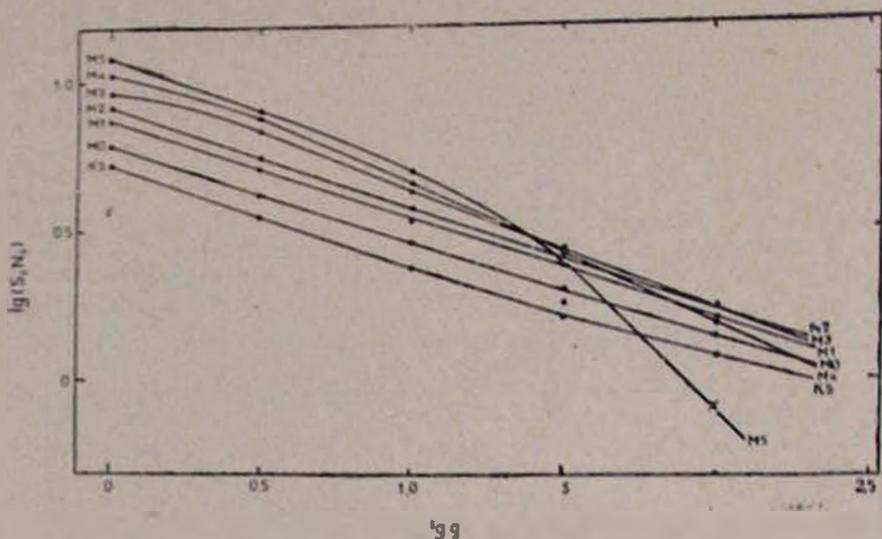


Рис. 2. Зависимость $S_p V$ от g для нормальных гигантов различных спектральных классов

С помощью рис. 1, 2, зная спектральный класс звезды и индекс m , можно найти g . Для этого достаточно найти $NS_p(m)$ (рис. 1), и затем $g(NS_p, S_p)$ (рис. 2). Для удобства вычислений в табл. 2 для спектральных классов K5III—M5III затабулированы зависимости g от $m - m_0$, где m_0 — средние значения индексов m для данного спектрального класса, приведенные в табл. 1.

Итак, с помощью рис. 1, 2 или табл. 1, 2 можно оценить g , зная спектральный класс и индекс m . Далее, зная g , можно найти и абсолютную светимость звезды. Для этого воспользуемся соотношением:

$$\lg g = \lg(\mathcal{M} \mathcal{M}_0) + 4 \lg T_e + 0.4 M_b - 12.49. \quad (2)$$

Кроме этого, нам необходимо иметь еще одно уравнение, связывающее g , $\mathcal{M} \mathcal{M}_0$, T_e и M_b . В качестве такого уравнения возьмем эволю-

Таблица 1

Sp	lg T _e	lg g	lg S _v N	m ₀	M _b	lg m/m ₀	M _v	a	b	c
K 5	3.602	1.93	0.94	0.270	-0.9	0.37	0.3	2.167	0.167	2.070
M0	3.591	1.63	1.09	0.292	-1.8	0.48	-0.6	1.937	0.168	1.911
M1	3.580	1.41	1.25	0.310	-2.4	0.54	-0.8	1.756	-0.186	1.784
M2	3.574	1.31	1.32	0.318	-2.6	0.54	-0.9	1.656	-0.386	1.716
M3	3.562	1.12	1.43	0.330	-2.9	0.52	-1.0	1.453	-0.768	1.572
M4	3.550	0.98	1.52	0.340	-3.1	0.51	-0.6	1.306	-1.009	1.464
M5	3.531	(0.76)	1.65	0.352	-3.2	(0.41)	-0.1	1.022	-1.519	1.259

ционный трек звезды данной массы, воспользовавшись, например, расчетами [7, 8]. Конечно, особенно полагаться на эти треки нельзя; ведь многие вопросы, связанные с эволюцией холодных гигантов, например, роль перемешивания или потери массы, еще далеко не ясны. Тем не менее, треки [7, 8] учитывают наблюдаемые положения звезд различных масс на диаграмме Г.-Р. и, следовательно, могут быть полезными. Используя результаты расчетов [7, 8], можно показать, что имеет место соотношение:

$$\lg g = a(S_p) - 0.64 \lg (M/M_0) \tag{3}$$

где $a(S_p)$ — величина, зависящая от спектрального класса.

Используя соотношения (2) и (3), можно получить также следующие зависимости:

$$M_b = b(S_p) - 4.10 \lg (M/M_0) \tag{4}$$

и

$$\lg g = c(S_p) + 0.156 M_b \tag{5}$$

где $b(S_p)$, $c(S_p)$ — также представляют собой величины, зависящие от спектрального класса.

Численные значения параметров $a(S_p)$, $b(S_p)$ и $c(S_p)$ получим, подставляя в формулы (3), (4) и (5) соответствующие значения g , M/M_0 и M_b , определенные в [6]. Полученные, таким образом, значения этих параметров приводятся в табл. 1.

Теперь мы можем дополнить табл. 2 значениями M , M_b , рассчитанными по формулам (3), (4) и (5) для значений g , которые уже имеются в этой таблице (вычисленных, как подробно описано выше). Кроме этого, в табл. 2 включены также значения M_v , вычисленные для данных M_b с учетом болометрических поправок [6]. Итак, с помощью табл. 2 можно, располагая данными, относительно интенсивности полосы поглощения молекулы CO на 2.4 мкм, оценить M_b , M и массу соответствующей звезды. Конечно, эти оценки следует рассматривать как приближенные, так как наши расчеты выполнены для звезд, имеющих некоторый усредненный химсостав и удовлетворяющих некоторым усредненным соотношениям между массой, светимостью и эффективной температурой.

Посмотрим теперь, как согласуется табл. 2 с наблюдательными данными. Данные об интенсивности полосы поглощения CO в спектрах холодных гигантов приводятся, например, в [9]. Из приведенного в [9] списка мы отобрали те звезды, для которых в [10] выполнена МК-классификация и известны абсолютные визуальные величины

		K5 III								
R R ₂ M ₂ M _{3M₄ M₅}	1	-0.04	-0.03	-0.02	-0.01	0.10	0.01	0.02	0.03	0.0
	2	—	—	—	2.18	1.93	1.65	1.41	1.16	0.9
	3	—	—	—	0.88	0.94	1.01	1.08	1.17	1.2
	4	—	—	—	0.7	-0.9	-2.6	-4.0	-5.8	-7.2
	5	—	—	—	1.8	0.3	-1.4	-2.8	-4.6	-6.0
12(2.3)	—	—	—	-0.02	0.37	0.82	1.16	1.58	1.9	5

		M0 III								
1 2 3 4 5	1	—	2.32	2.13	1.90	1.63	1.35	1.12	0.98	0.61
	2	—	0.69	0.95	1.12	1.10	1.19	1.27	1.35	1.44
	3	—	2.7	1.4	0.0	-1.8	-3.5	-5.0	-5.9	-8.3
	4	—	3.9	2.6	1.2	-0.6	-2.3	-3.8	-4.7	-7.1
	5	—	-0.60	-0.30	0.03	0.45	0.90	1.26	1.48	2.06

		M1 III								
1 2 3 4 5	1	2.30	2.14	1.92	1.65	1.41	1.45	0.87	0.60	0.60
	2	0.95	1.01	1.08	1.1	1.25	1.34	1.43	1.52	1.6
	3	3.4	2.3	0.9	-0.8	-2.4	-2.1	-5.8	-7.5	-7.5
	4	4.8	3.8	2.4	0.6	-0.8	-0.6	-4.4	-6.0	-7.0
	5	-0.83	-0.5	-0.24	0.18	0.54	0.49	1.39	0.82	2.28

		M2 III								
1 2 3 4 5	1	2.25	2.02	1.80	1.59	1.31	0.83	0.65	0.52	0.17
	2	0.99	1.07	1.15	1.22	1.32	1.41	1.50	1.61	1.71
	3	3.5	2.0	0.6	-0.8	-2.6	-5.0	-6.4	-7.6	-9.9
	4	5.2	3.7	2.3	0.9	-0.9	-1.3	-1.8	-6.0	-8.3
	5	-0.92	-0.55	-0.23	0.10	0.54	1.14	1.54	1.78	2.33

		M3 III								
1 2 3 4 5	1	2.00	1.77	1.55	1.36	1.12	0.90	0.67	0.39	—
	2	1.08	1.17	1.25	1.31	1.43	1.52	1.63	1.73	—
	3	2.7	1.3	0.0	-1.3	-2.9	-4.3	-5.7	-7.5	—
	4	4.7	3.3	2.0	0.7	-1.0	-2.3	-3.7	-5.5	—
	5	-0.85	-0.50	-0.16	0.11	0.52	0.86	1.05	1.65	—

		M4 III								
1 2 3 4 5	1	1.72	1.55	1.38	1.17	0.98	0.76	0.49	0.11	9
	2	1.17	1.25	1.34	1.43	1.52	1.63	1.73	1.85	—
	3	1.7	0.6	0.5	-1.8	-3.1	-4.5	-6.3	-8.6	—
	4	4.1	3.0	1.9	0.6	-0.6	-2.1	-3.9	-6.2	—
	5	-0.65	-0.34	-0.12	0.21	0.51	0.85	1.28	1.87	—

		M5 III								
1 2 3 4 5	1	1.86	1.36	1.21	1.01	0.76	0.48	0.18	—	9
	2	1.27	1.35	1.44	1.54	1.65	1.76	1.87	—	—
	3	1.3	0.7	0.3	-1.6	-3.2	-5.0	-6.9	—	—
	4	4.4	3.8	2.8	1.5	-0.4	-1.9	-3.8	—	—
	5	-0.08	-0.53	-0.30	-0.29	0.41	0.85	1.33	—	—

(см. табл. 3). В качестве интенсивности полосы CO в [9] рассматривается CO-индекс, представляющий собой разность монохроматических величин на 2.10 и 2.17 мкм, нормированных к спектру α Lyg. Можно полагать, что этот CO-индекс, обозначаемый [CO], связан с нашим индексом m соотношением:

$$[CO] = m + \Delta m, \quad (6)$$

Таблица 3

HR	[CO]	M_v	$\Delta[CO]$	ΔM_v	HR	[CO]	M_v	$\Delta[CO]$	ΔM_v
2011	0.10	-0.74	-0.009	0.05	5215	0.21	1.07	-0.024	1.97
2216	0.10	-1.19	-0.051	-0.19	5226	0.24	-0.83	-0.009	0.17
2886	0.27	-0.65	0.021	0.35	5301	0.23	-1.17	-0.019	-0.17
2459	0.14	1.31	-0.052	1.01	5334	0.22	1.07	-0.014	1.97
2480	0.16	-0.02	-0.032	-0.32	5352	0.21	-0.64	-0.035	0.36
2717	0.27	-0.47	0.017	0.13	5452	0.18	-0.39	-0.029	0.41
2725	0.21	0.04	0.001	0.84	5584	0.24	-1.07	-0.009	-0.07
2742	0.26	-1.45	0.007	-0.85	5589	0.29	-0.22	0.000	-0.12
2905	0.17	-0.55	-0.036	0.05	5654	0.22	-1.84	-0.033	-1.24
3013	0.20	-0.64	-0.006	-0.04	5739	0.26	0.93	0.051	0.37
3169	0.24	-0.75	0.006	0.15	5745	0.21	-0.43	0.001	0.37
3236	0.18	0.09	-0.026	0.69	5879	0.17	0.49	-0.039	1.29
3304	0.19	0.60	-0.002	0.57	5899	0.14	0.00	0.052	-0.30
3576	0.23	-0.47	-0.019	0.53	6039	0.23	-0.51	-0.023	0.06
3866	0.23	-0.88	-0.004	0.02	6056	0.19	0.04	-0.019	0.84
3870	0.25	-1.14	0.001	-0.14	6086	0.29	-0.99	0.037	-0.39
3950	0.21	0.72	-0.024	1.62	6090	0.18	-0.09	-0.012	-0.39
4035	0.22	-0.04	0.011	0.76	6107	0.22	-2.30	-0.014	-1.40
4069	0.18	0.49	-0.026	1.09	6108	0.20	-0.81	0.008	-1.11
4299	0.19	1.34	-0.002	1.04	6200	0.25	1.05	0.016	1.95
4336	0.23	-1.10	-0.004	-0.20	6461	0.22	-0.52	0.014	0.08
4362	0.24	-0.78	-0.009	0.22	6705	0.20	-0.65	0.008	-0.95
4371	0.20	-1.33	-0.006	-0.73	6765	0.27	1.00	0.031	1.90
4517	0.20	-0.41	-0.009	0.39	6815	0.24	-0.80	-0.005	0.20
4532	0.25	0.51	-0.003	1.11	6868	0.22	0.90	0.014	1.15
4586	0.32	-1.45	0.086	-0.55	6882	0.26	0.01	0.068	-0.29
4726	0.22	-0.69	-0.029	0.31	6966	0.19	-0.33	-0.002	-0.63
4745	0.21	-0.50	-0.024	0.40	7009	0.32	-1.96	0.071	-0.96
4902	0.23	0.53	-0.019	1.53	7157	0.30	-2.11	0.010	-2.0
4909	0.31	-1.79	0.010	-1.65	7238	0.23	-0.29	-0.004	0.61
4910	0.15	-0.48	0.001	1.52	7302	0.26	-0.64	0.054	-0.01
4949	0.27	-1.26	-0.020	-1.16	7568	0.27	-1.83	0.021	-0.84
4954	0.18	0.01	-0.012	-0.29	7584	0.18	0.00	-0.012	-0.33
4998	0.20	0.11	-0.006	0.71	7635	0.20	-1.55	0.008	-1.80
5064	0.22	-0.25	0.014	0.35	7645	0.25	0.16	-0.003	0.75
5073	0.23	-0.62	0.011	0.18	7676	0.22	-0.88	0.011	-0.06
5095	0.22	0.14	-0.014	1.04	7800	0.22	-0.56	0.014	0.08
5150	0.24	0.20	0.006	1.10	7804	0.28	-0.12	-0.010	-0.04
5154	0.22	0.30	-0.014	1.20	7851	0.23	-0.36	-0.004	0.52
5181	0.22	-1.06	0.011	-0.26	8005	0.26	-0.30	0.068	-0.64
5200	0.17	-1.10	-0.022	-0.80	6228	0.23	-0.81	0.038	-1.10

где Δm —величина, слабо зависящая от спектрального класса звезды. При этом для каждого спектрального класса, очевидно, имеет место равенство:

$$[CO] - [CO]_0 = m - m_0, \quad (7)$$

где индексом 0 обозначены, как и выше, средние для данного спектрального класса значения.

Вычисляя на основании приведенных в табл. 3 данных для каждой звезды разности $[CO] - [CO]_0$ и $M_v - \bar{M}_v$ (где \bar{M}_v среднее M_v для данного спектрального класса), находим, что между этими величинами имеется корреляция, выражаемая формулой:

$$[CO] - [CO]_0 = -0.0032(M_v - \bar{M}_v) + 0.0011. \quad (8)$$

Сопоставляя формулу (8) с табл. 2, учитывая (7), находим, что

рассчитанная выше зависимость $\pi - \pi_0$ от M , хорошо согласуется с наблюдаемыми данными. В частности, как следует из табл. 2, при изменении $\pi - \pi_0$ от -0.01 до 0.01 , величина M изменяется на 3^{+2} для спектрального класса K5, на 3^{+5} (M0), на 1^{+2} (M1), на 4^{+2} (M2), на 3^{+0} (M3), на 2^{+7} (M4) и на 3^{+4} (M5). Средневзвешенное этих значений (за веса принято число звезд соответствующего спектрального класса) составляет $3^{+0.6}$. Соответствующее значение $\Delta m/m$ получается равным -0.0065 , что вполне согласуется со значением -0.0062 , следующим из формулы (8), особенно, если учесть большой разброс данных, и, соответственно, слабость корреляции (8) (коэффициент корреляции составляет всего 0,2).

Таким образом, как теоретические расчеты, так и наблюдательные данные указывают на то, что полоса поглощения CO на 2,4 мкм может служить весьма чувствительным индикатором абсолютной светимости красных гигантов. Причем эта полоса настолько мощная, что она практически нечувствительна к бледнению, в отличие от других индикаторов светимости, используемых в оптическом диапазоне. Другое преимущество этого метода оценки абсолютной светимости связано с тем обстоятельством, что, как показывают расчеты, интенсивность полосы CO сравнительно слабо зависит от химического состава звезды.

Биранская астрофизическая
обсерватория

30 марта 1988 г.

ՅՈՒ. Կ. ՄԵԼԻԿ-ԱԼԱՎԵՐԴՅԱՆ

ԿԱՐԳԻՐ ԶԻՅԱՆԵՐԻ ԶԱՅԳՎԱԾՆԵՐ ԵՎ ԼՈՒՄԻՆՍԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԿՆԵԼՆՈՒՄԸ CO-ԻՌՈՎԵՆՈՒԹԻ ԲՆՔՐԱԿԱՐԿՐԻ ՆԵՐՏԻ ԻՆՏԵՆՍԻՎՈՒԹՅԱՆ ՄԵԶՈՍՈՎ

K5—M5 սպեկտրայ դասի երեմայ հսկա աստղերի համար հաշվարկված է CO մոլեկուլի 2.4 մկմ շերտի ինտենսիվության կախումը ժանրության սին առաջացումից: Յույն է տրված, որ այդ կախումը կորելի է զգուս- գործի բոլոմետրիկ լուսատվության, հետևաբար, և բացարձակ աստղային լuminության ու զանգվածների զեմհասման համար:

YU. K. MELIK-ALAVERDIAN

MASS AND LUMINOSITIES ESTIMATION OF RED GIANT STARS FROM THE INTENSITY OF CO INFRARED BANDS

The correlation between CO band intensity and gravity for the normal K5—M5 spectral type giants is consllected. It is shown that this

correlation can be used for the estimations of bolometric luminosity, absolute magnitude and mass of cool giant stars.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Амбарцумян, Сообщ. Бюраканской обс., 13, 3, 1952.
2. O. C. Wilson, *Astrophys. J.*, 205, 823, 1976.
3. Ю. К. Мелик-Алавердян, *Астрофизика* (в печати).
4. J. N. Plass *Journ. Opt. Soc. Am.*, 48, 690, 1958.
5. W. L. Godson *Journ. Meteorol.*, 12, 3, 1955.
6. V. Stralitz, J. Kurllene, *Astrophys. J. Space Sci.*, 80, 353, 1981.
7. J. B. Mengel, A. V. Svelgart, P. Demarque, P. G. Gross, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 40, 733, 1973.
8. A. W. Svelgart, P. G. Gross, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 38, 405, 1978.
9. A. Mc. William, D. L. Lambert, *Publ. Astron. Soc. Pa-II.*, 98, 882, 1984.
10. D. Hoffelt, *Yale Catalogue of Bright Stars*, Yale University Observatory, 3-е издание 1964.