

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 9

МАЙ, 1973

ВЫПУСК 2

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В НЕПРЕРЫВНОМ СПЕКТРЕ ЗВЕЗД ВЕГА И АГЕНА В ОБЛАСТИ 2000—3800 А

Г. А. ГУРЗАДЯН, Д-р. Б. ОГАНЕСЯН

Поступила 2 февраля 1972

Пересмотрена 22 декабря 1972

Приведены результаты обработки коротковолновых спектрограмм Веги (α Lyr A0V) и Агены (β Cen B1 II) в области 2000—3800 А. Спектрограммы были получены с помощью орбитальной астрофизической обсерватории „Орион-1“, установленной на пилотируемой станции „Салют-1“. Было обнаружено некоторое изменение в спектральной чувствительности аппаратуры „Орион“ после ее двухмесячного пребывания в условиях космического пространства. Найденное из наблюдений распределение энергии в непрерывном спектре Веги в области 2000—3800 А находится в хорошем согласии с теорией. В случае же Агены согласие наблюдений с теорией получается при эффективной температуре 30000 °К для области спектра 2000—3600 А, что значительно отличается от обычной температуры звезды класса В1 (24000 °К).

Имеется ряд успешных попыток получения коротковолновых спектрограмм звезд с применением фотографического метода. Мы имеем в виду, в частности, эксперименты Мортон и Дженкинса [1, 2] по получению спектрограмм шести ярких звезд в созвездии Ориона в области длин волн 1200—2800 А; Кондо и др. [3] — спектрограмм Канопуса в области 2000—4000 А; Боггесс и Кондо [4] — спектрограмм нескольких ярких звезд в области 1600—2800 А и т. д. Во всех случаях спектрограммы были получены с использованием бесщелевых спектрографов с различными спектральными разрешениями — от 1 А до 30 А.

В июне 1971 г. с помощью астрофизической обсерватории „Орион-1“, установленной на орбитальной станции „Салют-1“, были получены фотографическим способом бесщелевые спектрограммы звезд Вега (α Lyr, A0V) и Агены (β Cen, B1II) в области длин волн 2000—3800 А. Спектрограммы получены с помощью зеркального телескопа системы Мерсена (диаметр главного зеркала 280 мм, радиус кри-

визны 1500 мм) в комбинации со спектрографом системы Уодстворда (решетка с 1200 штрихами на 1 мм, радиус кривизны 500 мм, угол падения 18.5). Использована фотопленка типа УФШ-4, чувствительная в области вакуумного ультрафиолета. Дисперсия спектрографа 32 А/мм, разрешающая сила полученных спектрограмм — около 5 А на 2600 А.

Исследуемая звезда в процессе получения спектрограммы гидировалась по двум взаимно перпендикулярным плоскостям с помощью фотовольтрической следящей системы и двухосной механической монтировки. Сам фотовольтрический звездный датчик был разработан по принципу вращающегося полудискового модулятора. Работа фотовольтрической системы гидирования продолжалась непрерывно в течение получения серии спектрограмм с разными экспозициями для данной звезды. Угловая точность гидирования оказалась равной $\pm 15''$; эта точность была выведена из анализа спектральных линий на спектрограммах Веги [5]. Специальный кулачковый механизм, вмонтированный в спектрограф, позволил осуществить плавное расширение спектрограмм в размере 0.40 мм. Однако часть спектрограмм была получена с шириною, примерно в три раза превышающей эту величину; это было вызвано эпизодическими переходами системы в режим автоколебания, к счастью, в плоскости, перпендикулярной дисперсии спектрографа. Вдоль дисперсии система работала вполне нормально, что следует из факта отсутствия размытости спектральных линий (в том числе последних линий бальмеровской серии водорода) на сильно расширенных спектрограммах.

Более подробное описание аппаратуры „Орион-1“ и методики получения спектрограмм, а также их репродукции приведены в [6, 7]. В настоящей статье приводятся результаты обработки этих спектрограмм и сравнение с теорией.

Перед установкой на „Салют“ телескоп „Орион-1“ со спектрографом и используемой фотопленкой были предварительно откалиброваны энергетически с использованием синхротронного излучения электронного кольцевого ускорителя. В результате был найден коэффициент редукции δ_λ , то есть функция относительной чувствительности нашей аппаратуры [8]. Калибровочные спектрограммы на синхротронной установке были получены с сильным диафрагмированием входного отверстия телескопа „Орион-1“. Спектрограммы же Веги и Агены получены при полностью открытом отверстии. Ясно, что абберационные кривые (обусловленные главным образом астигматизмом спектрографа) в этих случаях будут отличаться друг от друга, в результате чего линейная ширина спектрограммы будет меняться вдоль спек-

трограммы. Введя поэтому величину Δ_λ — ширина спектрограммы на данной волне, можно найти истинную интенсивность J_λ в непрерывном спектре звезды из следующего соотношения:

$$J_\lambda = F_\lambda \delta_\lambda, \quad (1)$$

где F_λ есть исправленная на „эффект ширины“ наблюдаемая интенсивность на волне λ , которая связана с неисправленной интенсивностью I_λ соотношением:

$$F_\lambda = I_\lambda \Delta_\lambda. \quad (2)$$

Аналогичным образом можем написать для спектрограмм, полученных на синхротронном пучке:

$$F_\lambda^0 = I_\lambda^0 \Delta_\lambda^0. \quad (3)$$

Наконец, имеем для коэффициента редукции:

$$\delta_\lambda = \frac{F_\lambda^0(\text{теор.})}{F_\lambda^0}, \quad (4)$$

где $F_\lambda^0(\text{теор.})$ есть теоретическая интенсивность в спектре синхротронного излучения на длине волны λ [8].

Метод энергетической калибровки аппаратуры при сильном диафрагмировании входного отверстия в практике применяется довольно часто, если, конечно, есть уверенность, что эффекты избирательного характера отсутствуют. В нашем случае не было достаточных оснований сомневаться в однородности *относительной спектральной чувствительности* оптической системы „Ориона“. Правда, не совсем ясны последствия синхротронного рентгеновского облучения на задиафрагмированной части главного зеркала „Ориона“. Между тем, в образовании спектрограмм звезды принимают участие практически необлученные части зеркала. Специального эксперимента для учета этого эффекта не было поставлено, хотя его необходимость очевидна. Другими данными, внушающими достаточную надежность, мы не располагаем. Однако, учитывая, что главное зеркало подвергалось облучению недолго (меньше часа), можно ожидать, что влияние указанного эффекта будет незначительным.

Большинство из полученных для Вегы и Агены спектрограмм оказалось передержанным. Поэтому при окончательной обработке были использованы различные участки разных спектрограмм. Сводка обработанных спектрограмм Вегы приведена в табл. 1 с указанием интервала длин волн использованных участков. В случае Агены использованы четыре микрофотометрические записи почернений четырех разрезов одной неравномерно расширенной спектрограммы (12 А).

Микрофотометрические записи всех спектрограмм получены на саморегистрирующем микрофотометре ИФО-451. Переход от плотности почернения к интенсивностям осуществлен с помощью пяти характеристических кривых, соответствующих разным участкам диапазона 3800—2000 Å; эти кривые приведены в [7]. Линейные ширины $\Delta\lambda$ всех спектрограмм (в том числе и синхротронного излучения) были измерены на микрофотометрических разрезах (поперек дисперсии), снятых на разных длинах волн, и для каждой спектрограммы отдельно. При окончательной обработке использованы: в случае синхротронного излучения — усредненные для данной группы спектрограмм кривые зависимости $\Delta\lambda^0$ от λ , а для Веги и Агены — индивидуальные для каждой спектрограммы кривые зависимости $\Delta\lambda$ от λ .

Таблица 1

СВОДКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СПЕКТРОГРАММ ВЕГИ

Спектрограмма	Экспозиция	Использованная часть
1 А	40 сек	2200—3700 Å
2 А	90 "	2300—3700 "
3 А	270 "	2050—2600 "
4 А	70 "	2200—3700 "
5 А	350 "	2100—2500 "
6 А	290 "	2200—2800 "
6 А'	290 "	2100—2800 "
7 А*	90 "	Слабая, сильно расш.
8 А*	10 "	Очень слабая, с де- фектом
9 А	30 "	2200—3700 Å

* Неиспользованные спектрограммы.

Во втором столбце табл. 2 приведены числовые величины коэффициента редукиции δ_λ , найденные описанным выше способом для аппаратуры „Орион-1“. Далее, в табл. 3 приведены числовые значения исправленных на „эффект ширины“ интенсивности F_λ для Веги, найденные по результатам измерений восьми спектрограмм. Эти данные нанесены на рис. 1, а найденные из этого рисунка усредненные величины F_λ (сплошная кривая) были использованы для нахождения истинного распределения интенсивности J_λ в спектре с помощью соотношения (1). Окончательные результаты представлены, после перехода от J_λ к J_* , в шкале звездных величин на рис. 2 (черные

точки). Там же нанесены теоретические кривые зависимости Δm от $1/\lambda$, соответствующие следующим моделям:

Кривая 1. Модель, рассчитанная Шильдом и др. [9] для

$$T_{\text{эф}} = 9650^{\circ}\text{K} \text{ и } \lg g = 4.05.$$

Кривая 2. Модель, рассчитанная Михаласом [10] для

$$T_{\text{эф}} = 10080^{\circ}\text{K}, \lg g = 4.0 \text{ и } \text{He}/\text{H} = 0.15.$$

Кривая 3. Модель, рассчитанная Штромом и Эвреттом [11] для

$$T_{\text{эф}} = 10000^{\circ}\text{K}, \lg g = 4.0 \text{ и } X = 0.83.$$

В интересующем нас диапазоне длин волн (2000—3800 А) эти модели дают результаты, очень немногим отличающиеся друг от друга.

Таблица 2

ЧИСЛОВЫЕ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТА
РЕДУКЦИИ δ_{λ}

λ , А	δ_{λ}		
	„Орион-1“	„Орион-1А“	Теорет.
3700	—	2.04	1.50
3600	2.75	1.72	1.23
3500	1.85	1.49	1.04
3400	1.43	1.35	0.92
3300	1.20	1.20	0.86
3200	1.09	1.11	0.83
3100	1.00	1.05	0.83
3000	0.98	1.02	0.85
2900	0.98	1.01	0.90
2800	1	1	1
2700	1.05	1.03	1.15
2600	1.14	1.09	1.33
2500	1.32	1.22	1.62
2400	1.72	1.59	2.20
2300	2.54	2.50	3.20
2200	4.75	4.70	5.30
2100	13.20	12.50	13.20
2050	24.4	29.0	26.6

Как следует из рис. 2, наши измерения дают результаты, заметно расходящиеся с теоретическими кривыми; при этом наблюдения

дают избыток энергии около бальмеровского скачка и дефицит энергии в области 2300—2600 Å. Расхождение в обоих случаях порядка 0.2—0.3. Оно может быть истолковано двояко.

Таблица 3

НАБЛЮДАЕМЫЕ, НЕ РЕДУЦИРОВАННЫЕ, НО ИСПРАВЛЕННЫЕ ЗА „ЭФФЕКТ ШИРИНЫ“ ИНТЕНСИВНОСТИ F_{λ} ($=I_{\lambda} \Delta_{\lambda}$) ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ВОСЬМИ СПЕКТРОГРАММ ВЕГИ

λ , Å	1 A	2 A	3 A	4 A	5 A	6 A	6 A'	9 A
3700	0.52	0.71	—	0.47	—	—	—	0.44
3600	0.62	0.82	—	0.56	—	—	—	0.56
3500	0.73	0.90	—	0.66	—	—	—	0.71
3400	0.90	1.00	—	0.84	—	—	—	0.80
3300	1.05	1.06	—	0.98	—	—	—	0.88
3200	1.14	1.08	—	1.04	—	—	—	0.94
3100	1.17	1.10	—	1.09	—	—	—	1.11
3000	1.17	1.06	—	1.12	—	—	—	1.09
2900	1.10	1.03	—	1.10	—	—	—	1.06
2800	1	1	—	1	—	1	1	1
2700	0.92	0.92	—	0.91	—	0.86	0.89	0.92
2600	0.81	0.84	0.84	0.84	—	0.76	0.79	0.81
2500	0.67	0.66	0.75	0.67	0.68	0.65	0.64	0.68
2400	0.52	0.48	0.59	0.53	0.54	0.52	0.50	0.53
2300	0.35	0.31	0.42	0.37	0.36	0.36	0.34	0.42
2200	0.20	—	0.28	0.27	0.22	0.18	0.16	0.29
2100	—	—	0.167	—	0.11	—	0.06	—
2050	—	—	0.124	—	—	—	—	—

Первое—допустить, что оно вызвано просто ошибками измерения порядка 0.2—0.3. Тогда можно сделать заключение о согласии — в пределах ошибок измерений — теории с наблюдениями.

Второе, что ошибки измерения небольшие и, во всяком случае, не больше 0.2, а наблюдаемое расхождение вызвано другими причинами, в частности, избирательными изменениями спектральной чувствительности аппаратуры „Орион-1“ или ее отдельных элементов.

Второе объяснение кажется нам более вероятным, если иметь в виду, что спектрограммы Вегги и Агены получены после двухмесячного пребывания аппаратуры „Орион-1“ в космическом пространстве, а фотопленка оказалась сильно завуалированной, очевидно, в результате облучения жесткой радиацией [7].

Чтобы убедиться в разумности второго предположения, мы решили воспользоваться имеющимся в нашем распоряжении вторым штатным комплектом аппаратуры из серии „Орион“, а именно, „Орион-1А“, по всем своим параметрам идентичным с „Орион-1“. В

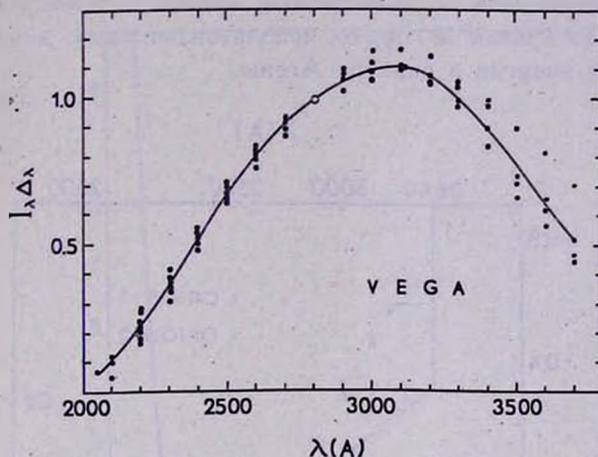


Рис. 1. Наблюдаемые, не редуцированные, но исправленные за „эффект щели“ интенсивности $F_{\lambda} = I_{\lambda} \Delta\lambda$ в спектре Веге, по результатам измерений восьми спектрограмм (табл. 2).

частности, аппаратура „Орион-1А“ была установлена в камере синхротронной установки и был найден для нее коэффициент редукиции δ_{λ} ; результаты представлены в табл. 2 (столбец 3). Вопреки ожиданию, обе кривые δ_{λ} , построенные для „Орион-1“ и „Орион-1А“, оказались почти совпадающими (рис. 3, кривая 1, где точки соответствуют „Ориону-1“, а кружки — „Ориону-2“), по крайней мере в интервале 3500—2050 А. Дальше мы поступили следующим образом: было найдено описанным выше способом, то есть с использованием соотношения (1) и кривой на рис. 1, наблюдаемое распределение энергии в спектре Веге, J_{ν} , однако на этот раз используя числовые значения δ_{λ} , найденные для „Орион-1А“. Результаты представлены на том же рис. 2 (кружки).

Тот факт, что использование калибровочных кривых обоих комплектов аппаратуры — „Орион-1“ и „Орион-1А“ — приводит к почти одинаковому распределению энергии в спектре Веге (разброс при этом оказался не больше 0.1), может служить свидетельством того, что спектральная чувствительность аппаратуры „Орион-1“ в реальных условиях работы на орбите действительно претерпела изменения.

Приняв сделанное замечание за основу, далее мы нашли истинную (или расчетную) кривую коэффициента редукции из условия совмещения наблюдаемого нами распределения энергии в спектре Веги с теоретическим распределением (вернее, с кривой 2 на рис. 2); полученные результаты представлены в четвертом столбце табл. 2, а построенная по этим данным кривая δ_λ приведена на рис. 3 (кривая 2). Эта кривая и будет использована ниже для нахождения распределения энергии в спектре Агены.

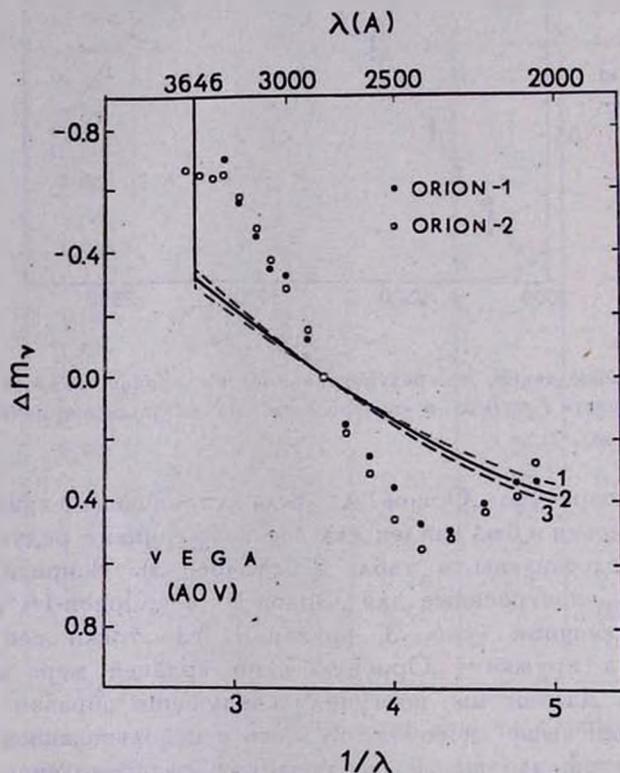


Рис. 2. Найденное по наблюдениям „Орион-1“ распределение энергии в спектре Веги при использовании редукционной кривой „Орион-1“ (точки) и „Орион-1А“ (кружки). Кривые 1, 2 и 3 соответствуют теоретическим моделям [9, 10 и 11] (см. в тексте).

Результаты непосредственных измерений спектрограмм Агены, то есть величины неисправленной за „эффект ширины“ спектрограммы интенсивности I_λ нанесены на рис. 4, а усредненные по этим данным значения I_λ приведены в табл. 4 наряду с измеренными значениями Δ_λ для Агены. С помощью этих данных и вышеприведенных соотно-

шений были найдены величины J_{λ} , а затем Δm , в интервале 2050—3700 А. Результаты, которые оказались довольно интересными, представлены на рис. 5 (точки) наряду с теоретической кривой (сплошная линия), рассчитанной Михаласом [10] для звезды класса В1 с $T_{\text{эф}} = 24000^{\circ}\text{K}$ и $\lg g = 4.0$. Заметим, что эта кривая полностью сов-

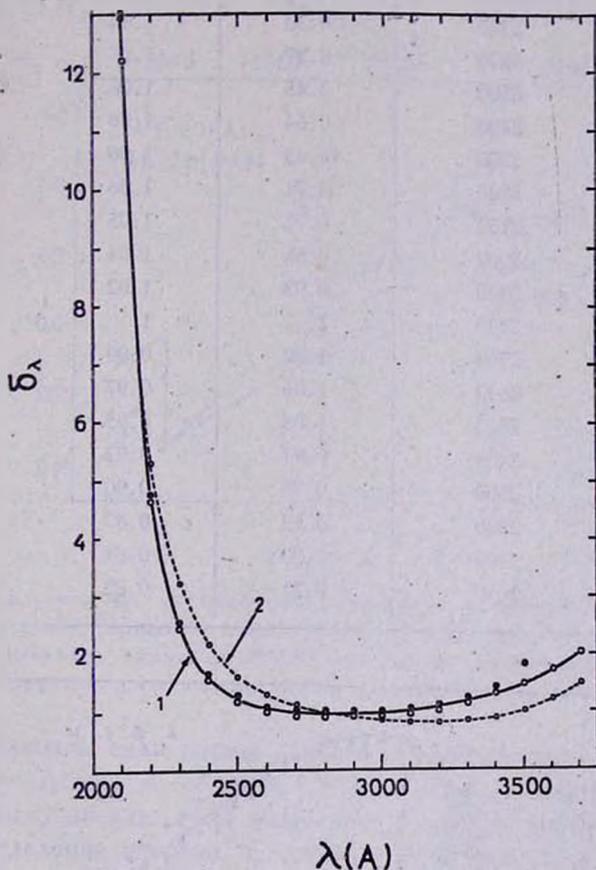


Рис. 3. Зависимость коэффициента редукции δ_{λ} от длины волны. Кривая 1 — по результатам калибровки „Ориона-1“ (точки) и „Ориона-1А“ (кружки). Кривая 2 — расчетная, найденная по совмещению наблюдаемого и теоретического спектров Вегы.

падает с кривой, рассчитанной Ван Циттерсом и Мортонем [12] для модели: $T_{\text{эф}} = 22000^{\circ}\text{K}$ и $\lg g = 4.0$. На рис. 5 кружками нанесены также результаты электрофотометрических измерений Аллера и др. [13] для области, длиннее 3400 А.

Таблица 4

УСРЕДНЕННЫЕ И НЕИСПРАВЛЕННЫЕ ИН-
ТЕНСИВНОСТИ I_λ И ШИРИНЫ СПЕКТРО-
ГРАММЫ $\Delta\lambda$ ДЛЯ АГЕНЫ

λ, A	I_λ	$\Delta\lambda$
3700	0.30	1.04
3600	0.37	1.06
3500	0.45	1.06
3400	0.54	1.06
3300	0.63	1.06
3200	0.71	1.06
3100	0.78	1.05
3000	0.86	1.04
2900	0.93	1.02
2800	1	1
2700	1.02	0.99
2600	1.05	0.97
2500	1.03	0.95
2400	0.94	0.92
2300	0.74	0.90
2200	0.52	0.87
2100	0.30	0.84
2050	0.21	0.82

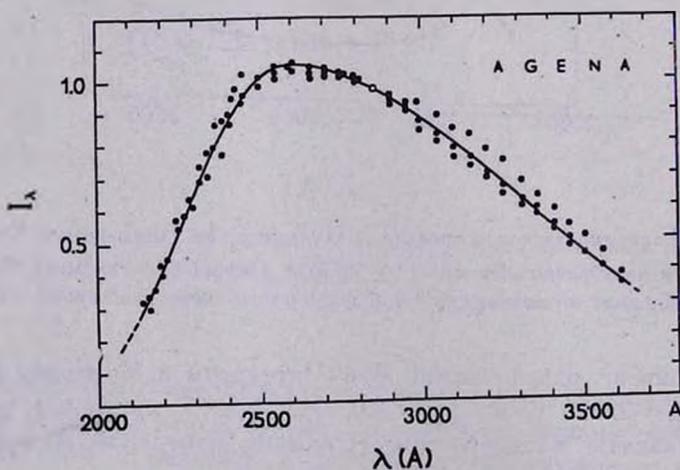


Рис. 4. Наблюдаемое, не редуцированное и не исправленное за „эффект ширины“ распределение энергии в спектре Агены.

Как следует из рис. 5, наблюдаемое нами распределение энергии в непрерывном спектре Агены значительно отличается от теоретической модели, соответствующей $T_{\text{эф}} = 22000^{\circ} - 24000^{\circ}$. Вместе с тем наблюдаемые точки хорошо согласуются с теоретической кривой, рассчитанной для эффективной температуры 30000° .

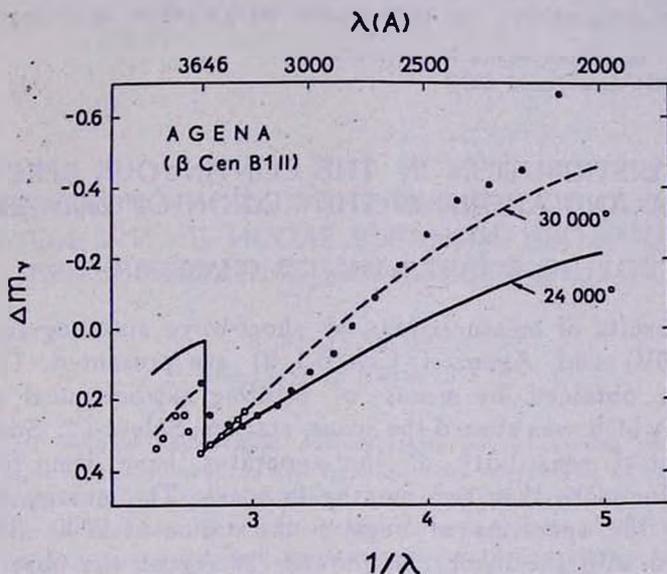


Рис. 5. Найденное по наблюдениям „Ориона-1“ распределение энергии в спектре Агены (точки). Кривые — теоретические модели при эффективной температуре 24000° (сплошная линия) и 30000° (пунктирная линия) [10, 12]. Кружки — результаты электрофотометрических измерений [13] для области, длиннее 3400 \AA .

Таким образом, если верны наши измерения, распределение энергии в спектре Агены в области $2000 - 3700 \text{ \AA}$ соответствует спектральному классу звезды даже ранее $B0$. В действительности наблюдаемое распределение энергии в спектре Агены должно соответствовать более высокой эффективной температуре, чем 30000°K , поскольку в наших окончательных результатах не была учтена поправка на межзвездное селективное поглощение. Вероятно, будущим внеатмосферным экспериментам предстоит решение вопроса о том, в какой мере расхождение в спектральном классе одной и той же звезды, найденное по данным наблюдений в видимых лучах — с одной стороны и коротковолновой области — с другой, реально, и не вызвано какими-то пока еще не учтенными факторами.

Приведенные в настоящей статье графики распределения энергии в непрерывных спектрах Вегы и Агены (рис. 2 и 5) несколько

отличаются от тех предварительных результатов, которые приведены в [14]. Однако сделанные в [14] основные выводы о характере найденных из наблюдений распределений энергии в спектрах этих звезд остаются неизменными.

Выражаем глубокую благодарность Р. Х. Оганесяну, оказавшему большую помощь при обработке спектрограмм, а также незнакомому нам рецензенту за интересное обсуждение настоящей работы.

Финанс БАО по Космическим Исследованиям
АН Армянской ССР

ENERGY DISTRIBUTION IN THE CONTINUOUS SPECTRUM OF VEGA AND AGENA IN THE REGION OF 2000–3800 Å

G. A. GURZADIAN, J. B. OHANESIAN

The results of measurements of short-wave spectrograms of Vega (α Lyra A0V) and Agena (β Cen B 1 II) are presented. The spectrograms were obtained by means of orbiting astrophysical observatory „Orion-1“, which was aboard the space station „Salyut-1“. Some changes in the spectral sensitivity of the apparatus have been found after it orbited for more than two months in space. The energy distribution obtained in the spectrum of Vega in the region of 2000–3800 Å is in good accord with the theory. In the case of Agena the observed energy distribution is in agreement with the theory only at the effective temperature $T = 30000$ °K, but not of $T = 24000$ °K, which results from the spectral type of this star.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. D. C. Morton, Ap. J., 147, 1017, 1967.
2. E. Jenkins, D. C. Morton, Nature, 215, 1257, 1967; Ap. J., 154, 661, 1968.
3. A. Boggess, III, Y. Kondo, Ap. J., 151, L5, 1968.
4. Y. Kondo, K. G. Henize, C. L. Kotlla, Ap. J., 159, 927, 1970.
5. Г. А. Гурзядян, Дж. Б. Оганесян, Astr. Astrophys., 20, 321, 1972.
6. Г. А. Гурзядян, Дж. Б. Оганесян, Space Sci. Rev., 11, 145, 1972.
7. В. И. Пацаев, Дж. Б. Оганесян, Г. А. Гурзядян, Сообщ. Бюраканской обс., 45, 20, 1972.
8. Г. А. Гурзядян, Дж. Б. Оганесян, Р. А. Епремян, Сообщ. Бюраканской обс., 45, 36, 1972.
9. R. Schild, D. M. Peterson, J. B. Oke, Ap. J., 166, 95, 1971.
10. D. Mihalas, Ap. J., Suppl., 9, 321, 1965.
11. S. E. Strom, E. H. Avrett, Ap. J., Suppl., 12, 1, 1965.
12. G. W. Van Citters, D. C. Morton, Ap. J., 161, 695, 1970.
13. L. H. Aller, D. J. Faulkner, R. H. Norton, Ap. J., 144, 1073, 1966.
14. Г. А. Гурзядян, Дж. Б. Оганесян, Nature, 239, 90, 1972.