АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 2 ИЮНЬ, 1966 ВЫПУСК 2

СПЕКТР AG ПЕГАСА В 1965 ГОДУ

Л. С. ЛУУД, М. Э. ИЛЬМАС

Поступила 25 апреля 1966

Показано, что AG Пегаса похожа на плотную планетарную туманность. Ее центральная звезда двойная с компонентами WN 6 и M1-3 II—III. Найдено, что электронная плотность в оболочке равна 10^{-7} *см*$^{-3}$, фактор дилюции 10^{-10} и температура Занстра около 65 000°. Радиус оболочки оказался равным 10^5 $R_\odot$ и ее масса 10^{-3} $\mathfrak{M}_\odot$. Указано на необходимость учета электронных столкновений при расчете бальмеровского декремента.

AG Пегаса — один из наиболее заманчивых объектов для астроспектроскописта. Спектр звезды претерпел изменения в таких масштабах, какие нигде кроме новых не наблюдались. Основные его изменения описаны Мерриллом [1].

Настоящая статья содержит количественные данные спектрофотометрии AG Пегаса, а также некоторые соображения в пользу двойственности звезды.

1. *Наблюдения.* В течение осени 1965 г. на 70 *см* рефлекторе Тартуской астрофизической обсерватории им. В. Струве было получено 16 спектрограмм AG Пегаса, из которых мы обработали 11. Дисперсия спектрографа равна 160 Å *мм* при H_γ. Табл. 1 содержит необходимые данные об использованных спектрограммах.

Регистрограммы получены на микрофотометре МФ-4 с записью на ЭППВ-61 и увеличением примерно в 70 раз. В табл. 2 дан список идентифицированных линий, их эквивалентные ширины и относительные интенсивности ($I_{H_\beta} = 100$). Для преобразования эквивалентных ширин в интенсивности использовалось распределение энергии в непрерывном спектре по работе [2], как и при исследовании линейчатого спектра AG Пегаса в 1964 г. [3].

Таблица 1

Дата	Фотоматериал	Выдержка
17/18 августа	ZU-2	1 ч 34 м
18/19 „	ZU-2	2 ч 00 м
20/21 „	OaG	50 м
21/22 „	OaG	1 ч 42 м
22/23 „	OaO	35 м
23/24 „	OaO	56 м
26/27 „	ZU-2	2 ч 20 м
26/27 „	OaF	2 ч 20 м
3/4 сентября	OaF	2 ч 35 м
15/16 „	OaG	2 ч 27 м
2/3 октября	OaF	3 ч 50 м

Таблица 2

λ	Элемент	W_λ	I	Замечания
1	2	3	4	5
6678	He I	16.5	20.5	1
6565	H_α	245	297	
6451—54	N II	5.0	6.5	
5876	He I	8.8	14.3	
5755	[N II]	4.2	6.5	
5412	He II	5.7	8.9	
5007	[O III]	16.2	27.4	2
4959	[O III]	4.6	8.1	
4922	He I	9.7	17.0	
4861	H_β	56.7	100.0	
4788	N II	4.4	7.8	
4713	He I	3.6	6.4	
4686	He II	27.8	50.2	
4650	C III	1.6	2.9	
4640—41	N III	10.6	19.2	3
4634	N III	6.3	4.1	
4541	He I	3.6	6.4	
4471	He I	3.5	6.3	
4447	N II	0.85	1.5	

1	2	3	4	5
4388	He I	2.3	4.2	
4379	N III	1.6	2.9	
4363	[O III]	11.3	20.4	
4340	H_γ	31.7	57.6	
4199	He II	3.9	7.4	
4144	He I	2.1	4.0	
4120	He I	2.4	4.5	
4101	H_δ	31.1	59.8	4
4057	N IV	10.4	20.5	
4026	He I	3.3	6.7	
4009	He I	1.6	3.9	
3970	H_ε	16.8	35.9	5
3889	H_ζ + He I	11.1	26.7	
3869	[Ne III]	9.9	25.5	
3835	H_η	7.2	20.0	
3820	He I	2.7	7.7	
3798	H_{10}	6.1	19.0	

Замечания к табл. 2.

1. Передержано, блендирована с линиями 6583 и 6548 [N II].
2. Может быть слегка блендирована с 5015 He I.
3. W_λ определены из анализа бленды.
4. Блендирована линиями 4101 и 4097 N III.
5. Блендирована с линией 3967 [Ne III].

Отметим, что на регистрограммах при их сравнении с регистрограммами M звезд не обнаружено полос поглощения TiO.

2. *Линии* [O III], H, He I и He II *в спектре* AG *Пегаса*. Мы предположим на основании работы [2], что наблюдаемый непрерывный спектр излучается только оболочкой и для анализа допустим, что оболочка однородная. Последнее допущение связано с тем, что спектрограммы с малой дисперсией не позволяют изучать стратификации.

Запрещенные линии дважды ионизованного кислорода. Для определения электронных плотности и температуры можно использовать лишь линии O III. При этом считаем по [2], что $T_e \approx 30\,000°$. По зависимости, данной в виде диаграммы $\lg \frac{I_{5007} + I_{4957}}{I_{4363}}$ от $\lg n_e$ (рис. 1),

найдем, что если $\lg \frac{I_{5007}+I_{4959}}{I_{4363}} = 0.24$, то при отмеченной выше T_e имеем $n_e = 10^7$ *см*$^{-3}$. Если считать, что $T_e \to \infty$, то получим для n_e нижний предел $n_e = 4 \cdot 10^{-6}$ *см*$^{-3}$.

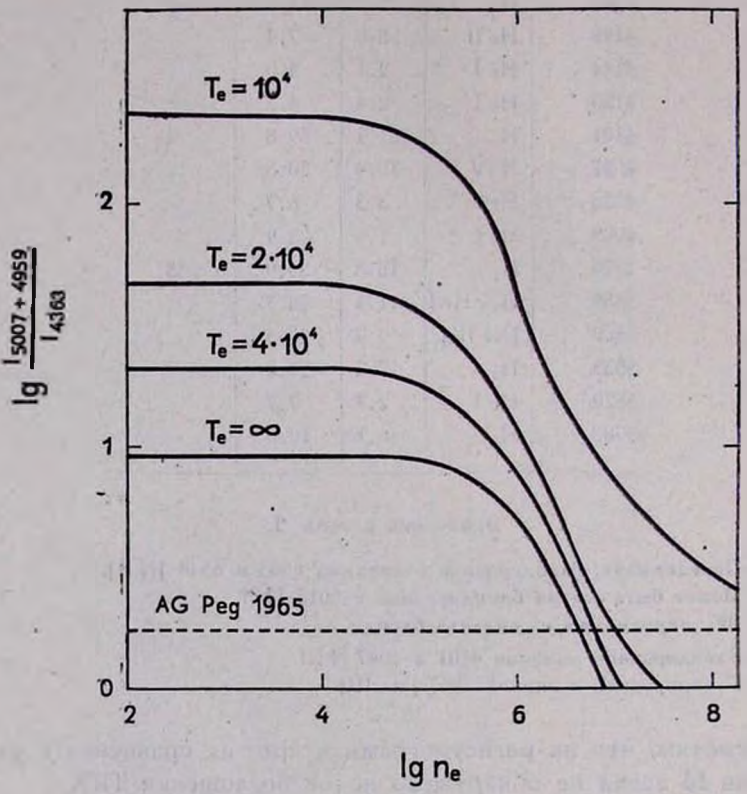

Рис. 1.

Водород. На полученных нами спектрах видны бальмеровские линии от H_α до H_{10}. В работе [3] указано, что линии водорода ослаблены самопоглощением. По методике, изложенной в [3], получим $\tau_{H_\beta} = 10$. Как и в работе [3], самопоглощение определялось также по методике, изложенной А. А. Боярчуком в [4]. Совмещением $\lg I_{H_\alpha}$ и $\lg I_{H_{10}}$ со значениями тех же величин в 1964 г. мы нашли, что излучение в H_β не ослаблено (рис. 2). Так как мы не имеем возможности сравнивать высокие члены бальмеровской серии и континуума, это не противоречит работам [3, 4], где совмещением бальмеровского континуума (или высоких членов бальмеровской серии) показано, что I_{H_β} слабее небу-

лярного, и это интерпретируется как ослабление I_{H_3} самопоглощением. Поэтому в дальнейшем мы будем определять химический состав с точностью множителя y, введенного А. А. Боярчуком в [4] и обсудим его величину в дальнейшем.

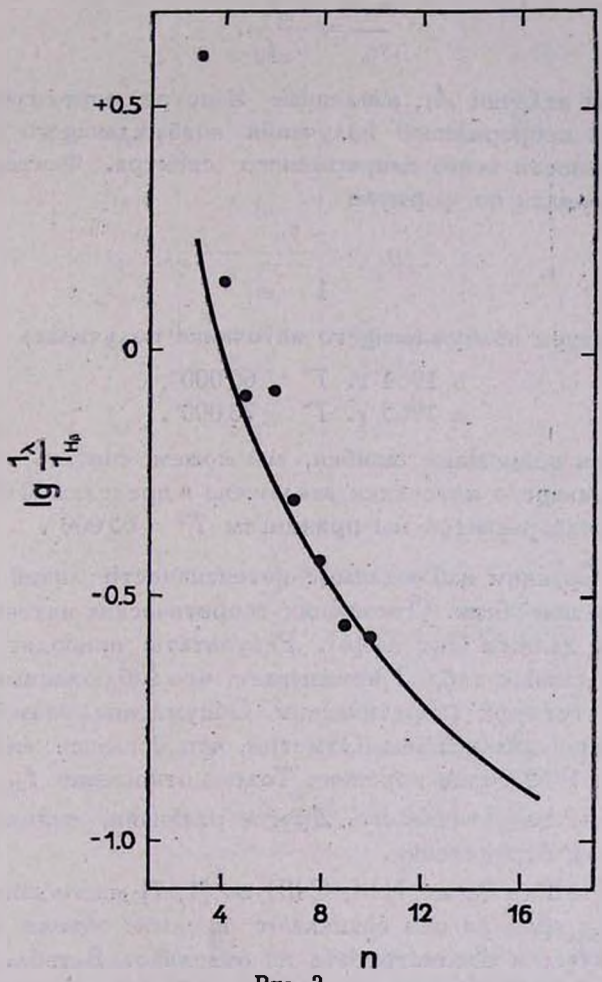

Рис. 2.

Сравнивая наблюденный бальмеровский декремент с вычисленным В. В. Соболевым [5], мы найдем, что наилучшее согласие будет при $T = 20\,000°$ и величине x, заключенной между 0.1 и 0.01. Данные о водородных линиях говорят, что оболочка непрозрачна в бальмеровских линиях и в континууме Лаймана. В континууме Бальмера оболочка прозрачна.

Используя метод Занстра, мы определили по водородным линиям температуру источника, возбуждающего оболочку. При этом учитывалось самопоглощение в бальмеровских линиях, считая, что $\tau_{H_\beta} = 10$ (для 1964 г. $\tau_{H_\beta} = 7.5$) и

$$\frac{\tau_{\lambda_l}}{\tau_{\lambda_k}} = \frac{\lambda_l f_l}{\lambda_k f_k}. \qquad (1)$$

Значения величин A_l, введенные Занстра, определялись, считая интенсивность непрерывного излучения возбуждающего источника за 10% интенсивности всего непрерывного спектра. Фактор самопоглощения определялся по формуле

$$y_l = \frac{\tau_{\lambda_l}}{1 - e^{-\tau_{\lambda_l}}}. \qquad (2)$$

Температура возбуждающего источника получилась

в 1964 г. $T^* = 60\,000°$,
в 1965 г. $T^* = 73\,000°$.

Учитывая возможные ошибки, мы можем считать, что температура возбуждающего источника заключена в пределах $50\,000° \div 80\,000°$. Для дальнейших расчетов мы принимаем $T^* = 65\,000°$.

Гелий. Сравним наблюдаемые интенсивности линий нейтрального гелия с теоретическими. Отношения теоретических интенсивностей мы вычислили по данным Ситона [6]. Результаты приводятся в табл. 3.

Анализ данных табл. 3 показывает, что наблюдаемые интенсивности не соответствуют теоретическим. Обсуждение возможных причин будет сделано в дальнейшем. Отметим, что согласие между наблюдениями 1964 и 1965 годов хорошее. Только отношение $I_{\text{трипл.}}/I_{\text{синг.}}$ стало еще меньше теоретического. Другие различия, видимо, не превышают точности определения.

Линии He II (и также N III, C III) по [1, 7] много шире линий He I и H. Поэтому вряд ли они возникают в одном объеме с линиями H и He I, и мы будем рассматривать их отдельно. В табл. 4 приведены $I_{\text{набл.}}/I_{\text{теор.}}$ для линий He II.

Мы видим, что линии He II примерно в 2 раза интенсивнее в 1965 г., чем в 1964 г. Теоретический декремент He II более пологий, чем наблюденный.

Отметим, что по репродукции спектрограммы AG Пегаса в [1] скорость расширения по линии He II λ 4686 получается $v = 600$ *км сек*, что дает возможность считать их принадлежащими возбуждающей звезде типа Вольфа-Райе.

Таблица 3

Мультиплетность	Линии	Наблюдения	Теория	Теория наблюдения	
				1965 г.	1964 г.
Триплеты	$\frac{I_{4471}}{I_{5876}}$	0.43	0.41	0.95	0.78
	$\frac{I_{4471}}{I_{4026}}$	0.94	2.00	2.1	2.0
Синглеты	$\frac{I_{4388}}{I_{4144}}$	1.06	2.00	1.88	1.25
	$\frac{I_{4922}}{I_{4144}}$	4.2	4.00	0.94	0.96
Триплеты и синглеты	$\frac{I_{4471}}{I_{4144}}$	1.58	11.4	7.2	4.4
	$\frac{I_{4471}}{I_{4922}}$	0.37	3.2	8.7	5.3

Таблица 4

λ	$I_{\text{набл.}}/I_{\text{теор.}}$ 1964	$I_{\text{набл.}}/I_{\text{теор.}}$ 1965	$I_{\text{набл.}}$ 1965 / $I_{\text{набл.}}$ 1964
5412	0.68	1.32	1.94
4542	1.14	1.60	1.40
4199	1.45	3.30	2.28
4686	0.41	0.70	1.70

3. *Модель звезды.* Целью настоящей статьи не является объяснение изменений спектра AG Пегаса [1]. Мы пытаемся лишь найти модель звезды, которая удовлетворяет нашим наблюдениям.

Определим фактор дилюции, исходя из сходства условий ионизации в оболочке AG Пегаса и в планетарных туманностях. Следуя А. А. Боярчуку [8], мы можем написать приближенное отношение

$$\left(\frac{n_e}{W}\right)_{\text{AG Peg}} \cong \left(\frac{n_e}{W}\right)_{\text{пл. тум.}} \qquad (3)$$

Принимая для планетарных туманностей $W = 10^{-13}$ и $n_e = 10^4$ при электронной плотности AG Пегаса $n_e = 10^7$ получим, что для AG Пегаса $W \cong 10^{-10}$. Факт, что наблюдаются широкие линии He II, N III, C III приводит к мысли, что источник возбуждения является звездой Вольфа-Райе. Поскольку $T^* = 65\,000°$ и $I_{4640}/I_{4686} = 0.38$, то его спектральный класс WN 6 или более ранний.

Трудно получить уверенные данные об абсолютной величине звезд типа Вольфа-Райе. В двойных системах V 444 Cyg [9] и HD 214419 [10] компоненты Вольфа-Райе имеют $M_v = -2.5$. Считая $I/I^{vb} = 0.1$ и применяя данные о межзвездном поглощении по П. П. Паренаго [11], мы получим для AG Пегаса расстояние 1.4 *кпс*. По интенсивности межзвездных линий Na I [12] получается 0.9 *кпс*. Даже это расстояние может быть увеличено, так как часть линий может возникать и в атмосфере M гиганта. Мы можем считать, что M_v заключена между $0^m \div -2^m.5$. Применяя обычную методику [13], мы найдем, что радиус звезды равен $1.2\ R_\odot \div 2.9\ R_\odot$. Отметим, что определение радиуса фотосферы примененным нами методом для звезд типа Вольфа-Райе имеет приближенный характер, главной причиной погрешности будет эффект ярких полос.

Теперь мы можем найти радиус оболочки, который равен $\approx 10^3\ R_\odot$. Эти данные позволяют найти и массу оболочки, которая получается $\approx 10^{-3}\ \mathfrak{M}_\odot$.

Используя данные Меррилла [1], мы можем еще сказать, что центральная звезда является двойной. В. И. Мороз [14] опубликовал распределение энергии в инфракрасном спектре AG Пегаса, которое весьма похоже на распределение в спектре гиганта M2 β Пегаса а, следовательно, спектральный класс холодного компонента примерно M1-3 II — III. Здесь класс светимости оценен так: если класс светимости I, то компонент влиял бы на наблюдаемый спектр; если он V или IV, то вряд ли полосы окиси титана вообще наблюдались. Так как гиганты класса M имеют массу примерно 8 $\mathfrak{M}_\odot$ [15], а массу компонента Вольфа-Райе можно оценить примерно в 10 $\mathfrak{M}_\odot$ [10, 11], то при периоде 800 дней [16] получается расстояние между компонентами порядка $10^3\ R_\odot$.

Итак AG Пегаса, по-видимому, является плотной планетарной туманностью с двойной центральной звездой WN 6 + M 1-3 II — III. В смысле физических условий между обычными планетарными туманностями и AG Пегаса расположена, по-видимому, туманность IC 4997, где $T_e = 20\,000°$ и $n_e = 10^6\ см^{-3}$ [17].

4. *Излучение оболочки* AG *Пегаса.* Уравнение стационарности излучения, с учетом электронных столкновений и теории движущихся оболочек звезд, согласно Горбацкому [18], имеет вид

$$n_l\left(\sum_{k=1}^{l-1} A_{lk}\,\beta_{lk} + B_{lc}\,\rho_{lc}\right) + n_e \sum_{k=1}^{l-1}(n_l\,a_{lk} - n_k\,b_{kl}) + n_e\,n_l\,b_{lc} =$$

$$= \sum_{k=l+1}^{\infty} n_k\,A_{kl}\,\beta_{lk} + n_e \sum_{k=l+1}^{\infty}(n_k\,a_{lk} - n_l\,b_{lk}) + C_l\,n_e\,n^{+} + K_l\,n_e^2\,n^{+}, \quad (4)$$

где обозначения обычные. Из уравнения (4) следует, что в первом приближении, для уровней, близких основному (где $a_{lk} > b_{lk}$), важную роль играют величины

$$\frac{A_{kl}\,\beta_{kl}}{a_{kl}\,n_e} = G_{kl}. \quad (5)$$

При $G_{kl} \gg 1$ основная роль в оболочке принадлежит радиативным переходам, при $G_{kl} \ll 1$ — переходам, связанным с электронными столкновениями.

Для оболочки AG Пегаса принимаем ($x = 0.1 \div 0.01$ и $W = 10^{-10}$) $\beta_{12} \leqslant 10^{-11}$. Очевидно, что величина β_{12}, полученная из чисто радиативной теории, годится только для приблизительной оценки. Имея в виду, что

$$\beta_{\lambda_{lk}} = \frac{n_1}{n_k} \cdot \frac{f_{12}\lambda_{12}}{f_{lk}\lambda_{lk}} \cdot \beta_{12}, \quad (6)$$

находим

$$G_{12} \approx 0.03 \text{ и } G_{23} \approx 0.03.$$

Указанное говорит, что при вычислении бальмеровского декремента пренебречь столкновениями нельзя.

В. Г. Горбацкий [18] показал, что столкновения повышают относительную интенсивность высоких членов серий. Это может объяснить пологий декремент по наблюдениям 1964 г. и такой же декремент Z Андромеды в работе А. А. Боярчука [4].

Для гелия мы оценили отношение $G_{2^1S-2^3P}$, которое получилось порядка $10^{-1} - 10^{-2}$. Мы видим, что и для гелиевого спектра нужны вычисления с учетом электронных столкновений. Из сказанного следует необходимость разработки теории водородного и гелиевого спектра движущихся оболочек с учетом и радиативных переходов и электронных столкновений.

5. *Замечания по химическому составу.* Анализ химического состава эмиссионных объектов [6, 19] производится с использованием формулы

$$\frac{N_{\text{ион}}}{N_{\text{H II}}} = \frac{I_{\lambda\,(\text{ион})}}{I_{\text{H}\beta}} \cdot \theta^{-1}_{\lambda\,(\text{ион})}\,(n_e T_e). \qquad (7)$$

Здесь $N_{\text{ион}}/N_{\text{H II}}$ обозначает отношение ионов и протонов, $I_{\lambda\,(\text{ион})}$ и $I_{\text{H}\beta}$ — интенсивности соответствующих линий иона и линии $\text{H}\beta$, $\theta_{\lambda\,(\text{ион})}\,(n_e T_e)$ — функция, зависящая от типа иона и определенная в работе [19]. При $n_e < 10^8$ для рекомбинационных линий θ^{-1}_{λ} мало зависит от n_e и T_e, и её обычно считают константой. Для симбиотических звезд А. А. Боярчук ввел параметр y, который показывает, во сколько раз линия $\text{H}\beta$ ослаблена самопоглощением [4]. Тогда (7) переходит в

$$\frac{N_{\text{ион}}}{N_{\text{H II}}} = \frac{I_{\lambda\,(\text{ион})}}{y I_{\text{H}\beta}} \cdot \theta^{-1}_{\lambda\,(\text{ион})}\,(n_e,\ T_e). \qquad (7\text{а})$$

По описанной методике А. А. Боярчуком определялся химический состав звезды Z And [4] и нами — состав AG Peg [3]. Для обеих звезд оказалось, что водорода по отношению к другим элементам в 5 раз больше нормального космического содержания, но величина параметра y также примерно 5. Если считать $y = 1$, то химический состав Z And и AG Пегаса получается нормальным. Для AG Пегаса мы не можем применять линии He II и N III, которые, видимо, принадлежат звезде Вольфа-Райе, а не оболочке. Поэтому полученное нами в [3] содержание этих ионов надо считать чисто формальным.

Определим относительное содержание некоторых элементов с точностью до множителя y (табл. 5).

Линии He II и N III мы считаем принадлежащими звезде WR и их использование для оценки химического состава оболочки недопустимо. По вопросу химического состава сделаем следующие выводы.

1. Если считать содержание элементов нормальным, ионизация в оболочке AG Пегаса сильно не отличается от ионизации в оболочке Z Андромеды, и, имея в виду сходство последней [4, 8] с планетарными туманностями, от них.
2. Для Z And А. А. Боярчук нашел, что относительное содержание элементов, определенное по запрещенным линиям, получается ниже, чем по разрешенным. То же самое можно сказать и о AG Пегаса.

3. Химические составы Z And и AG Пегаса совпадают в пределах ошибок. Вопрос о содержании водорода требует специального исследования с учетом электронных столкновений.

Таблица 5

	1964 $y=6$	1965 $y=?$	Среднее $y=?$	Z And [4] $y=5$	NGC 7027 $y=1$
$\frac{N_{He\,II}}{N_{H\,II}}\,y$	0.14	0.17	0.155	0.088	0.117
$\frac{N_{N\,II}}{N_{H\,II}}\,y$	9.10^{-7}	$1.3\cdot10^{-6}$	$1.1\cdot10^{-6}$	—	$1.0\cdot10^{-5}$
$\frac{N_{O\,III}}{N_{H\,II}}\,y$	$7.4\ 10^{-6}$	$7.2\cdot10^{-6}$	$7.3\cdot10^{-6}$	$2.5\cdot10^{-6}$	$1.6\cdot10^{-4}$
$\frac{N_{Ne\,III}}{N_{H\,II}}\,y$	$4.2\ 10^{-6}$	$3.3\cdot10^{-6}$	$3.8\cdot10^{-6}$	$4\cdot10^{-6}$	$5.1\cdot10^{-3}$

6. *Заключение.* Подытоживая, можно сказать:

1. AG Пегаса является двойной системой, которую можно рассматривать, как планетарную туманность с ядром WN6 и компонентом M1-3 II—III. При этом

$$n_e = 10^7\ см^{-1},$$
$$W = 10^{-10},$$
$$R^{об} = 10^3\ R_\odot,$$
$$\mathfrak{M}^{об} = 10^{-3}\ \mathfrak{M}_\odot,$$
$$T^* = 65\,000^\circ$$
$$R^* = 1.2 \div 2.9\ R_\odot.$$

2. Расстояние до AG Пегаса ≈ 1 *кпс*, при таком расстоянии ее угловой диаметр равен 1″. При хороших условиях наблюдения может быть возможен прямой контроль полученного результата.

3. Для изучения симбиотических звезд нужны расчеты водородного и гелиевого спектра с учетом радиативных переходов и электронных столкновений.

4. Химический состав AG Пегаса близок к химическому составу Z And.
5. Для детального исследования AG Пегаса нужны длительные высокодисперсионные наблюдения.

Авторы искренне благодарны А. А. Боярчуку и А. А. Сапару за замечания и советы при просмотре рукописи.

Институт физики и астрономии
АН Эстонской ССР

SPECTRUM OF AG PEGASI IN 1965

L. S. LUUD, M. E. ILMAS

AG Pegasi is found to be similar to a dense planetary nebula but it has a double central star, the components of which turn out to have spectral classes WN 6 and M1-3 II—III. It is found that the electron density in the envelope is $10^{-7}\ cm^{-3}$, the dilution factor 10^{-10} and the Zanstra temperature of the hot star is approximately 65 000°. The radius of the envelope is found to be $10^{5}\ R_{\odot}$ and its mass $10^{-3}\ \mathfrak{M}_{\odot}$. Finally it is suggested that electron impacts cannot be ignored in the calculations of Balmer decrement for AG Pegasi.

ЛИТЕРАТУРА

1. *P. W. Merrill*, Sky and Telescope, 18, 490, 1959.
2. *Т. С. Белякина, А. А. Боярчук, Р. Е. Гершберг*, Изв. Кр. АО, 30, 25, 1963.
3. *Л. Лууд, М. Ильмас*, Публ. ТАО, 35 (в печати).
4. *А. А. Боярчук*, Изв. Кр. АО, 33, 186, 1965.
5. *В. В. Соболев*, Движущиеся оболочки звезд, Л., 1948.
6. *M. J. Seaton*, MN, 120, 326, 1960.
7. *А. А. Боярчук*, Личное сообщение.
8. *А. А. Боярчук*, Переменные звезды, 15, 48, 1964.
9. *G. E. Kron, K. C. Gordon*, Ap. J., 111, 454, 1950.
10. *S. Gaposchkin*, Ap. J., 100, 242, 1944.
11. *П. П. Паренаго*, Астрон. ж., 22, 129, 1945.
12. *C. S. Beals*, Publ. Dominion Astrophys. obs., 9, 95, 1951.
13. *Д. Я. Мартынов*, Курс практической астрофизики, М., 1960.
14. *В. И. Мороз*, Астрон. ж., 43, 63, 1966.
15. *К. У. Аллен*, Астрофизические величины, ИЛ, М., 1960.
16. *P. W. Merrill*, в сб. „Etoiles á raies d'emission", Cointe-Sclessin, 1958, 442.
17. *Г. А. Гурзадян*, Астрофизика, 1, 225, 1965.
18. *В. Г. Горбацкий*, Астрофизика, 1, 129, 1965.
19. *А. А. Боярчук, Р. Е. Гершберг, В. И. Проник*, Изв. Кр.АО, 29, 291, 1963.