

## АСТРОНОМИЯ

Г. А. Гурзаян, чл.-корр. АН Армянской ССР

## Интерпретация одной ультрафиолетовой вспышки

(Представлено 27/IV 1965)

Недавно появилось интересное сообщение Кюи (1) о том, что во время электрофотометрических наблюдений известной затменной переменной WUMaJ им была зафиксирована вспышка одной из компонент этой системы на  $\lambda = 3300 \text{ \AA}$ . Повышение яркости (амплитуда) при этом составляло около  $10^{-5}$  в области спектра шириною 50  $\text{\AA}$  (на 3300  $\text{\AA}$ ), «без соответствующего повышения яркости в интегральном визуальном свете». Последнее утверждение означает, что амплитуда яркости в фотовизуальных лучах, по-видимому, была достаточно малая и, во всяком случае, порядка  $0^m 1$ . Максимальная яркость была достигнута примерно через две минуты с момента появления вспышки, после чего наступает сравнительно медленный спад. Общая продолжительность вспышки составляет около семи минут.

Особенность этой вспышки заключается в том, что компоненты системы WUMaJ являются звездами типа F8. Между тем обычно принято думать, что явление вспышки присуще звездам позднего типа — K, M, изредка G. Поэтому нахождение тех условий, при которых возможна ультрафиолетовая вспышка у звезд, раннее типа G, должно представлять интерес.

Согласно развитым в (2) представлениям, вспышка, или выделение непрерывной эмиссии у звезд поздних типов вызваны трансформацией инфракрасных квантов собственного фотосферического излучения звезды в кванты коротковолновой области спектра. Сама трансформация происходит в силу обратного комптон-эффекта — рассеяния инфракрасных квантов на так называемых быстрых электронах ( $E \sim 10^6 \text{ эв}$ ), которые в свою очередь появляются над фотосферой в результате выброса внутризвездного вещества наружу. Спектр возникшей при этом непрерывной эмиссии нетепловой природы зависит от энергетического спектра быстрых электронов и теплового спектра излучения фотосферы.

В случае монохроматического потока электронов, когда все электроны имеют одинаковую энергию  $E$ , распределение энергии в непре-

рывном спектре излучения вспышки представляется следующей формулой (2):

$$I_*(\tau, \mu) = B_*(T) e^{-\tau} + \frac{\mu^2}{4\pi} \tau e^{-\tau} B_{\nu'}(T), \quad (1)$$

где  $\mu = \frac{E}{mc^2}$ ;  $\tau$  — эффективная оптическая толщина слоя, состоящего из быстрых электронов, на процессы томсоновского рассеяния, ( $\tau = \tau_e N$ , где  $\tau_e = 0.665 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ ,  $N$  — эффективное количество быстрых электронов, т. е. их количество в столбе с основанием  $1 \text{ см}^2$ );  $B_*(T)$  и  $B_{\nu'}(T)$  — планковские функции при данной эффективной температуре излучения звезды  $T$  и на частотах  $\nu$  и  $\nu'$ , причем во втором случае следует подставить  $\nu' = \frac{\nu}{\mu^2}$ .

Выражение (1) удобно написать в виде

$$I_*(\tau, \mu) = B_*(T) C_*(\tau, \mu), \quad (2)$$

где

$$C_*(\tau, \mu) = e^{-\tau} + \frac{\mu^2}{4\pi} \tau e^{-\tau} \frac{B_{\nu'}}{B_*}, \quad (3)$$

Если же дифференциальный спектр электронов представлен в виде  $N_e = KE^{-\gamma}$ , то в этом случае имеем, взамен (1),

$$I_x(\tau, \gamma) = B_x(T) A_x(\tau, \gamma), \quad (4)$$

где

$$A_x(\tau, \gamma) = e^{-\tau} + \delta \tau e^{-\tau} (e^x - 1) x^{-\frac{\gamma-3}{2}} \int_0^x \frac{u^{\frac{\gamma-1}{2}} du}{e^u - 1}, \quad (5)$$

В этих выражениях введены обозначения

$$x = \frac{h\nu}{kT}, \quad (6)$$

$$\delta = \frac{\gamma-1}{8\pi} \frac{1}{\mu_m^{\gamma-1}}, \quad (7)$$

где  $\mu_m$  — минимальное значение энергии электронов.

Безразмерные величины  $C_*(\tau, \mu)$  и  $A_x(\tau, \gamma)$  показывают во сколько раз интенсивность выходящего из среды быстрых электронов излучения,  $I_*(\tau, \mu)$  или  $I_x(\tau, \gamma)$ , больше или меньше по сравнению с  $B_*(T)$ , т. е. с интенсивностью планковского излучения невозмущенной звезды на внешней границе фотосферы ( $\tau = 0$ ) и на той же частоте.

Рост интенсивности во время максимума вспышки WUMaJ составлял  $\sim 1.5$  на  $\lambda = 3300 \text{ \AA}$ , т. е. около четырех раз. Это значит, что  $C_*(\tau, \mu) = 4$  — в случае монохроматических электронов, или  $A_x(\tau, \gamma) =$

$= 4$  — в случае немонахроматических электронов (в обоих случаях на  $\lambda = 3300 \text{ \AA}$ ).

Как показывают конкретные вычисления, при эффективной температуре звезды типа F8, равной  $T = 6200^\circ \text{K}$ , не существует реальных значений  $\mu$  и  $\tau$ , при которых  $S(\tau, \mu)$  становится равной 4. Отсюда приходится сделать вывод, что в рассматриваемом случае вспышка по крайней мере не вызвана монохроматическими электронами.

Перейдем к случаю немонахроматических электронов. Рассмотрим сперва случай  $\gamma = 3$ . При  $T = 6200^\circ \text{K}$  и  $\lambda = 3300 \text{ \AA}$  имеем из (6):  $x = 7.05$ . Тогда числовое значение интеграла в (5) при  $\gamma = 3$  будет 2.35 (см. (2) стр. 117). Подставляя эти величины в (5), получим следующее уравнение, где неизвестными являются  $\delta$  и  $\tau$ :

$$e^{-\tau} + \delta \tau e^{-\tau} \cdot 2710 = 4. \quad (8)$$

Отсюда следует, что  $\tau \ll 1$ . Поэтому найдем из (8) непосредственно  $\tau \delta = 1.1 \cdot 10^{-3}$ . Далее, формулы (4) и (5) тем точнее, чем  $\mu_m$  ближе к единице (2). Тогда будем иметь из (7):  $\delta = 0.1$  при  $\gamma = 3$ . Отсюда найдем для эффективной оптической толщи слоя, состоящего из быстрых электронов:

$$\tau = 0.01.$$

Таким образом, мы нашли тот спектр ( $\gamma, \delta$ ) и то эффективное количество быстрых электронов ( $N = \frac{\tau}{\sigma_T} = 1.5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ ), при котором можно будет объяснить наблюдаемую амплитуду вспышки WUMaJ на  $\lambda = 3300 \text{ \AA}$ . Возникает вопрос, какова будет расчетная амплитуда этой же вспышки в фотовизуальных лучах?

Чтобы ответить на этот вопрос, сперва были вычислены с помощью (4) и (5) интенсивности излучения при вспышке, соответствующей значениям параметров  $\gamma = 3$ ,  $\delta = 0.1$  и  $\tau = 0.01$ , и для ряда значений длин волн. Результаты этих вычислений приведены в табл. 1 (интенсивности  $B_\lambda(T)$  и  $I_\lambda(\tau, \gamma)$  приведены в произвольных единицах). Затем обычными способами определены числовые значения амплитуд и показатели цвета в  $U, B, V$  системе; в последнем случае кривые относительных чувствительностей в  $U, B, V$  лучах взяты из (4) (подробности см. (2)). Таким путем была найдена, в частности, величина амплитуды вспышки в фотовизуальных лучах: она оказалась равной  $\Delta m_v = 0.14$ , т. е. значительно меньше, чем амплитуда на  $\lambda = 3300 \text{ \AA}$ , что находится в хорошем согласии с наблюдениями. При  $\gamma = 5$  фотовизуальная амплитуда получается несколько больше, а при  $\gamma = 2$  — меньше приведенной величины. Следует полагать, поэтому, что значение  $\gamma = 3$  недалеко от истины.

Таким образом, в данном случае мы получили совпадение теоретического спектра вспышки с ее наблюдательным спектром. Очевидно, это обстоятельство может служить убедительным доказательством того, что

Таблица 1

Теоретический спектр  $I_{\lambda}(\tau, \gamma)$  вспышки звезды типа F B ( $T = 1200^{\circ}K$ ) при  $\gamma = 3$ ,  $\delta = 0.1$  и  $\tau = 0.01$  ( $B_{\lambda}$  есть невозмущенный спектр звезды)

$\lambda$ Å	$B_{\lambda}$	$A_{\lambda}(\tau, \gamma)$	$I_{\lambda}(\tau, \gamma)$
3000	2.21	7.12	15.5
3300	2.81	4.00	11.2
4000	3.67	1.82	6.70
5000	3.84	1.25	4.81
6000	3.41	1.098	3.75
7000	2.83	1.046	2.98

концепция трансформации инфракрасных квантов с помощью быстрых электронов верна, и она может объяснить явление вспышки или выделения непрерывной эмиссии у поздних типов звезд.

Проведенный выше анализ вспышки WUMaJ показывает, вместе с тем, что даже при достаточно малых значениях оптической толщи среды ( $\tau \ll 1$ ), состоящей из быстрых электронов, ультрафиолетовая амплитуда достигает значительных величин, в то время как в фотовизуальных лучах вспышка может оказаться почти незаметной. Еще сильнее выступает этот контраст у звезд поздних типов. В качестве примера в табл. 2 приведены результаты аналогичных расчетов для звезды типа M5 ( $T = 2800^{\circ}K$ ), когда трансформация инфракрасных квантов осуществляется монохроматическими электронами, а эффективная оптическая толщина слоя, состоящая из таких электронов, равна  $\tau = 0.01$ . На фиг. 1 приведены кривые распределения интенсивности в спектре вспышки (тонкие линии) для ряда значений  $\mu^2$ .

Таблица 2

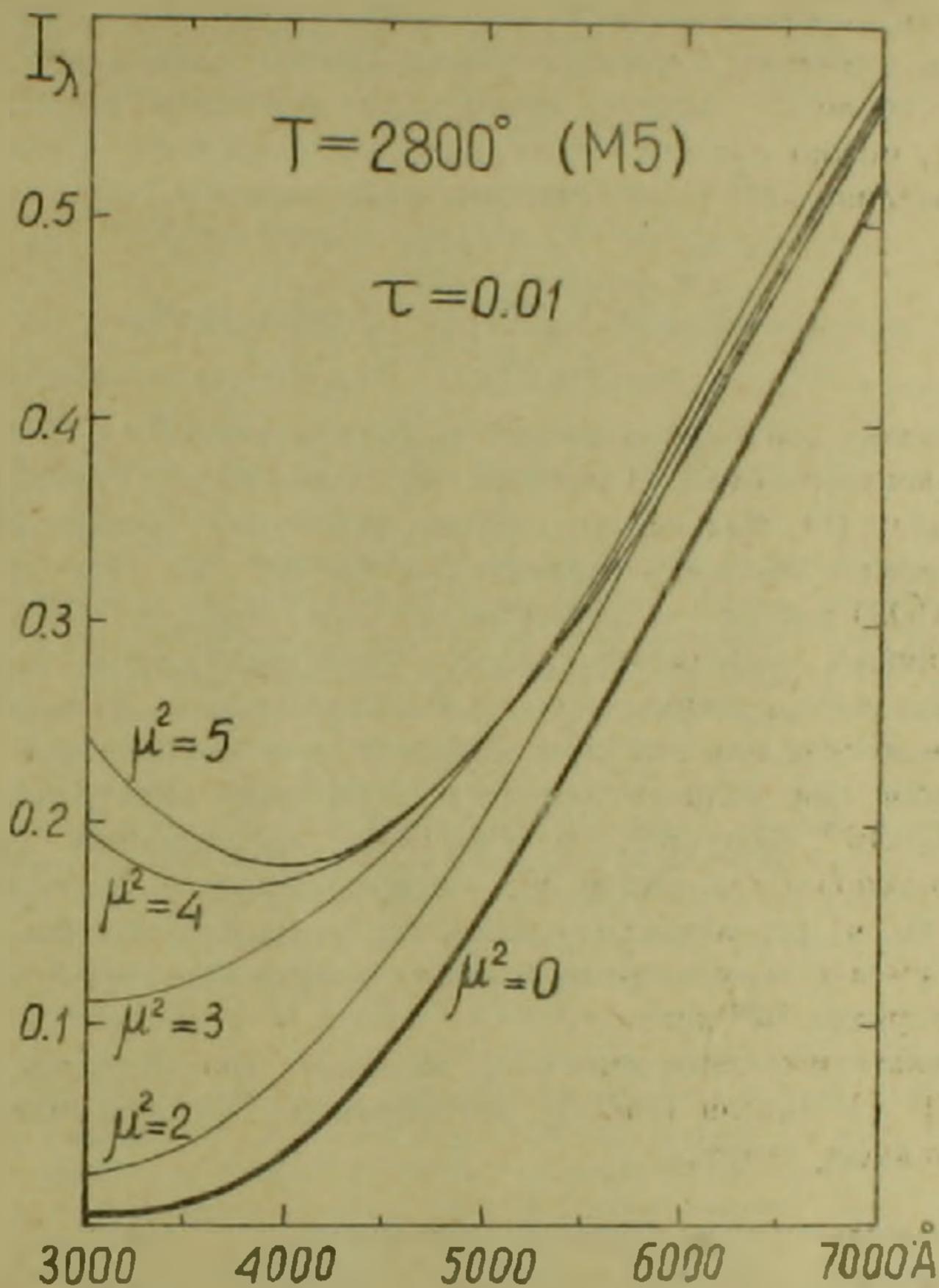
Теоретические показатели цвета и амплитуды при вспышке звезды M5 ( $T = 2800^{\circ}K$ ), когда  $\tau = 0.01$

$\mu^2$	$B - V$	$U - B$	$\Delta m_V$	$\Delta m_B$	$\Delta m_U$
0	+1.80	+1.14	—	—	—
2	+1.48	+0.29	0.27	0.50	1.36
3	+1.20	-0.45	0.28	0.89	2.50
4	+1.09	-0.74	0.28	1.00	2.85
5	+1.06	-0.86	0.25	0.98	3.00
10	+1.50	-0.27	0.07	0.38	1.78
20	+1.44	-0.08	0.05	0.30	1.50

Из данных табл. 2 следует также, что при некоторых сильных вспышках в ультрафиолете они могут оказаться почти незаметными в фотови-

зуальных лучах. Поэтому наблюдения, целью которых является обнаружение вспышек, следует вести прежде всего в ультрафиолетовых лучах; в этом случае резко увеличится вероятность обнаружения вспышек.

В (2) было констатировано два типа вспышек у звезд. В первом случае все быстрые электроны задерживаются над фотосферой, а процесс



Фиг. 1. Теоретические спектры вспышки (тонкие линии) звезды типа M5 ( $T = 2800^\circ K$ ) при  $\tau = 0.01$ . Сплошной линией приведено планковское распределение энергии в спектре невозмущенной звезды M5 (т. е. при  $\mu = 0$  и  $\tau = 0$ ).

выделения непрерывной эмиссии продолжается очень долго—несколько месяцев. Такие вспышки наблюдаются у звезд типа Т Тельца.

Второй тип вспышек связан с немедленным уходом быстрых электронов из атмосферы звезды; в этом случае имеет место быстрое расширение или разлет оболочки, состоящей из быстрых электронов. Этот тип вспышек, по-видимому, имеет место у звезд типа UV Кита—продолжительность вспышки в этом случае измеряется минутами.

Описанная выше вспышка WUMa), которая имела место 26 апреля 1964 г., безусловно принадлежит ко второму типу. Воспользуясь приведенной в (1) кривой изменения яркости вспышки по времени, можно попытаться оценить скорость расширения электронной оболочки. В самом деле, имеем из (4) и (5)  $I_1(t) \sim (1 - e^{-\tau}) \sim \tau(t) \sim v(t) \cdot t \cdot n(t)$ , где  $v(t)$  и  $n(t)$  — средняя скорость расширения и средняя концентрация электронов в момент  $t$  соответственно. Имея в виду, что на  $t_0 \approx \approx 120$  сек оболочка достигла наибольшей оптической толщи, равной  $\tau_{\max} = 0.01$ , можно вывести следующее приблизительное соотношение для определения  $\tau(t)$  в послемаксимумный период  $t > t_0$ :

$$\tau(t) = \frac{\tau_{\max}}{\frac{1}{3} \left( \frac{vt}{R} \right)^2 + \frac{vt}{R} + 1} \quad (9)$$

где  $R$  — радиус оболочки в момент  $t_0$  (для моментов  $t < t_0$  это соотношение неприменимо). Пользуясь наблюдательной кривой  $I_1(t)$  и соотношением (9), был оценен порядок величины скорости расширения электронной оболочки (приняв  $R \approx 8.5 \cdot 10^{10}$  см): она оказалась порядка 15000 км/сек — в начале вспышки и порядка 6000 км/сек — в конце, причем уменьшение скорости происходит неравномерно.

Оценим массу, выброшенную звездой во время этой вспышки. В предположении, что вспышка охватила всю поверхность звезды, будем иметь для полного количества быстрых электронов  $N_0 = 4\pi R^2 \cdot N \approx 10^{46}$ . Допустив, что вспышка сопровождается также выбросом протонов в количестве  $N_0$ , найдем для полной массы, потерянной звездой в результате вспышки, около  $10^{-14} \odot$ . Полная энергия вспышки, имея в виду энергию быстрых электронов ( $\sim 10^8$  эв), оценивается порядка  $10^{39}$  эрг.

В заключение приводим сводку основных характеристик вспышки WUMa) (26 апреля 1964 г.), интерпретации которой была посвящена настоящая заметка.

Показатель спектра быстрых электронов	$\gamma = 3$
Параметр	$\delta = 0.1$
Эффективная оптическая толщина слоя из быстрых электронов	$\tau = 0.01$
Эффективное количество быстрых электронов	$N = 1.5 \cdot 10^{22}$ см $^{-3}$
Амплитуда вспышки:	
в фотовизуальных лучах	$\Delta m_V = 0.14$
в фотографических лучах	$\Delta m_B = 0.45$
в ультрафиолетовых лучах	$\Delta m_U = 1.27$
на $\lambda$ 3300 Å	$\Delta m_{3300} = 1.5$
Показатель цвета в $U, B, V$ системе:	
	$B - V = + 0^m 18$
	$U - B = - 1^m 40$

Скорость расширения электронной оболочки:	
в начале вспышки	~ 15000 км/сек
в конце вспышки	~ 6000 км/сек
Масса, выброшенная при вспышке	~ $10^{-14} M_{\odot}$
Полная энергия вспышки (энергия выброшенных электронов)	~ $10^{21}$ эрг

Филиал Бюраканской астрофизической обсерватории  
Академии наук Армянской ССР

Գ. Ա. ԳՈՒՐԶԱԴՅԱՆ, Հայկական ՍՍԻՒ ԳԱ քղրակիր-տեղում

**Կարճալի՜ բոնկման մի զեպի մեկնաբանությունը**

Վերջերս երևաց մի հետաքրքիր հաղորդում՝ WUMaj հայանի ստազայությունի բռնկման մասին՝ մոտ  $1^{m}5$  ամպլիտուդայով, որն արձանագրվել է 3300  $\lambda$  ալիքի մի նեղ համաժամում (<sup>1</sup>): Սպեկտրի տեսանելի մասում բռնկման մեծությունը եղել է աննշան, համաձայնորեն  $0^m$  1:

Նիշյալ զեպի արտաոցությունը կայանում է նրանում, որ WUMaj գույզի անգամները իրենցից ներկայացնում են FX տիպի ստազեր, մինչդեռ ընդունված է կարծել, որ բռնկման երևույթը հատուկ է միայն հետին տիպի ստազերին (K-M, երբեմն G):

Ներկա աշխատանքը նվիրված է այս բռնկման մեկնաբանությունը ծլակետ է ընդունված հեղինակի կողմից մշակված տեսությունը (<sup>2</sup>), որի համաձայն ստազերի բռնկումները կամ նրանցում անընդհատ էներգիայի առաքման երևույթը հարուցվում է այդ ստազերի յուսույորդային երկարալիք հոսազայթման անզայարժով զեպի սպեկտրի կարճալիք մասը: Տեղաշարժումը կատարվում է հակասակ-Պոմանյան էֆեկտի շնորհիվ, այսինքն երբ ինֆրակարմիր թվանունները ցվրվում են այսպես կոչված արագ էլեկտրոնների միջոցով ( $E \sim 10^6$  էվ), ապա էլեկտրոնի էներգիան, հաղորդվելով երկարալիք թվանուն, մեծացնում է վերջինիս էներգիան, գարձնելով նրան կարճալիք: Իրենք՝ էլեկտրոնները հայանվում են վերլուսույորդային շերտերում ներաստզային նյութի արտավիժման հետևանքով:

Հաղումների էությունը կայանում է հետևյալում: Ծլնելով զիտված բռնկման ամպլիտուդայի մեծությունից՝  $m(3300) \approx 1^{m}5$  և ստազի ստազայթման ջերմաստիճանից՝  $T = 6200^\circ$ , խնդիր է դրվում որոշել էլեկտրոնների սպեկտրը և նրանց էֆեկտիվ թանկությունը: Ստացվել է  $\gamma = 3$ ,  $\delta = 0,1$  և  $\epsilon = 0,01$  (տես բանաձև (4) և (5)):

Այս սվյալներով որոշվում է բռնկման հաղումային ամպլիտուդան՝ սպեկտրի տեսանելի մասի համար, այն ստացվել է  $\Delta m_V = 0,16$ ՝ մոտ այնքան, որքան եղել է իրականում:

Վերջում բերվում են WUMaj բռնկման հիմնական ֆիզիկական մեծությունները, որոնք որոշվել են տեսականորեն:

**ЛИТЕРАТУРА — ԻՐԱՎԱՆՈՒԹՅՈՒՆ**

<sup>1</sup> Л. В. Кюи, PASP, 76, 430, 1964. <sup>2</sup> Г. А. Гурзоян, Астрофизика, 3, 1965.  
<sup>3</sup> Г. А. Гурзоян, Планетарные туманности, М., 1962. <sup>4</sup> Х. Л. Джонсон, В. В. Морган, Ap. J., 117, 313, 1953.