

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 11

НОЯБРЬ, 1975

ВЫПУСК 4

О ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ В ТУМАННОСТИ NGC 2359

И. Ф. МАЛОВ, В. С. АРТЮХ, В. М. МАЛОФЕЕВ

Получила 2 июня 1975

В работе сообщается о наблюдениях радионисточника, совпадающего по координатам с туманностью NGC 2359 и имеющего на частоте 107 МГц поток $3 \cdot 10^{-26}$ ат/м² ду. Показано, что результаты оптических и радионаблюдений хорошо согласуются с моделью полой излучающей оболочки. Вычислены параметры оболочки: $N_p = 156 \text{ см}^{-3}$, $M = 340 M_\odot$, $\dot{M} = (6 \cdot 10^4 \pm 10^5) \text{ г/сек}$, $V = (20 \pm 40) \text{ км/сек}$. Получена оценка концентрации среды, окружающей звезду на начальной стадии истечения: $N_H = 50 \text{ см}^{-3}$.

Изучение взаимодействия вытекающего из звезды потока с окружающей средой является одним из возможных методов исследования как звездного ветра, так и самой среды. Теоретические аспекты проблемы рассматривались, например, в [1—2]. Известно, что к наиболее интенсивным источникам звездного ветра принадлежат звезды Вольфа-Райе (WR). В оптическом диапазоне вокруг некоторых звезд WR наблюдаются кольцеобразные туманности [3], которые, по-видимому, являются следствием нагребания межзвездного вещества вытекающим из звезды газом. В [4, 5] сообщается о результатах радионаблюдений ряда таких туманностей в дециметровом диапазоне. Изучение объектов этого типа может дать информацию о среде, окружающей звезды WR, а также об интенсивности и характере истечения из этих звезд.

1. В настоящей работе исследуются физические условия в туманности NGC 2359, связанной со звездой HD 56925 (WN 5), по данным оптических и радионаблюдений. Наиболее существенные для нас сведения об этой туманности приведены в табл. 1.

Мы рассмотрели модель однородной излучающей сферы (рис. 1), внутри которой вещество отсутствует (аргументы в пользу такого предположения приводятся в конце статьи). Использование формул теплового

Таблица 1

Координаты NGC 2359 (1950)	$\alpha = 7^{\text{h}} 15^{\text{m}} 2$ $\delta = -13^{\circ} 07'$			
Расстояние до звезды HD 56925 [7]	$R = 6.92 \text{ кпс}$			
Внешний угловой диаметр оптического кольца*	$2\theta_2 \approx 4'$			
Внутренний угловой диаметр оптического кольца	$2\theta_1 \approx 3.5'$			
Температура туманности [8]	$T = 12000 \text{ К}$			
Потоки на радиочастотах [4] (в ед. потока)	S_1	5.4 (3.7)	5.9 (2.2)	6.7 (4.5)
	ν (10^9 Гц)	4	1.4	0.75

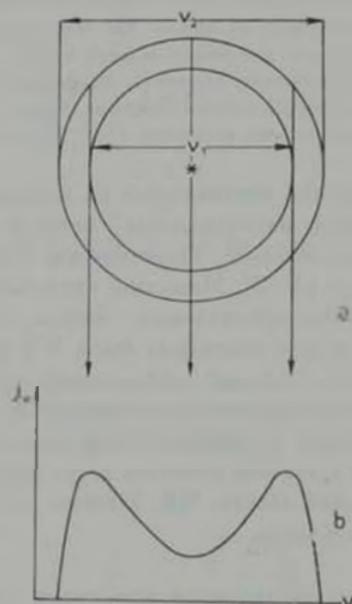


Рис. 1. Модель излучающей области (а) и соответствующее этой модели распределение радиояркостности по туманности на частотах, при которых $\nu = 1$ (б)

* На фотографии туманности [4] видно, что кольцо является аддитивским. Мы, однако, в дальнейших расчетах для простоты принимаем, что туманность имеет форму сферы с указанными выше размерами.

радиоизлучения [6] с учетом геометрии нашей модели при малой оптической толщине приводит к следующему выражению для потока:

$$S = 9.6 \cdot 10^{-11} \frac{N_e^2 R}{V T} \left(17.7 + \ln \frac{T^{0.37}}{v} \right) (\theta_2^2 - \theta_1^2) \quad (1)$$

В (1) R выражено в парсеках, θ_1 и θ_2 — в минутах дуги; при этом S получается в единицах потока (1 ед. п. = 10^{-26} вт/м² иц). С помощью этого выражения по потокам, приведенным в табл. 1, получаем среднее значение электронной плотности в излучающей сфере $N_e = 187 \text{ см}^{-3}$.

По имеющимся данным можно рассчитать спектр радиоизлучения туманности во всем диапазоне радиочастот. При произвольной оптической толщине имеем

$$S_\nu = \frac{4\pi k T \nu^2}{c^3} \int_0^{\theta_2} (1 - e^{-\tau_\nu \sin^2 \theta}) \sin^2 \theta d\theta; \quad \Delta l = \begin{cases} 2R \sqrt{\theta_2^2 - \theta^2} - \sqrt{\theta_1^2 - \theta^2} & \text{при } \theta < \theta_1; \\ 2R \sqrt{\theta_2^2 - \theta^2} & \text{при } \theta > \theta_1 \end{cases} \quad (2)$$

Результаты вычисления приведены на рис. 2 (сплошная линия).

По наблюдениям на частоте 750 МГц [4] размеры радиоизлучающей области в NGC 2359 получились равными 10' × 17'. Если считать область ответственную за радиоизлучение, сферической (с радиусом 13.5') и принять для нее значения температуры и расстояния из табл. 1, то по радиопотокам получаем $N_e = 17 \text{ см}^{-3}$. При этом значении N_e и угловых размерах из [4] спектр должен иметь вид, представленный на рис. 2 пунктиром. На рисунке видно, что в области метровых волн две рассмотренные модели дают различное поведение спектральной кривой.

2. Чтобы сделать окончательный выбор модели, мы провели наблюдения на волне 107 МГц с помощью плеча Восток—Запад крестообразного радиотелескопа ДКР-1000 Радиоастрономической станции ФИАН. Размеры диаграммы по половинной мощности составляли 9'.6 × 3°.4. Серия наблюдений позволила выделить радионисточник, координаты которого по α совпадают с координатами NGC 2359* (рис. 3). В качестве калибровочных использовались радионисточники ЗС 178 и ЗС 180, потоки которых из

* Ними была предпринята попытка пронаблюдать туманность NGC 6883 ($\alpha = 20^{\text{h}} 10^{\text{m}} 25^{\text{s}}$, $\delta = 38^{\circ} 14'$), однако близость мощного радионисточника Суг А ($\alpha = 19^{\text{h}} 57^{\text{m}} 45^{\text{s}}$; $\delta = 40^{\circ} 36'$) (координаты приведены на 1950 г.) не позволила сделать сколь-нибудь надежной оценки потока.

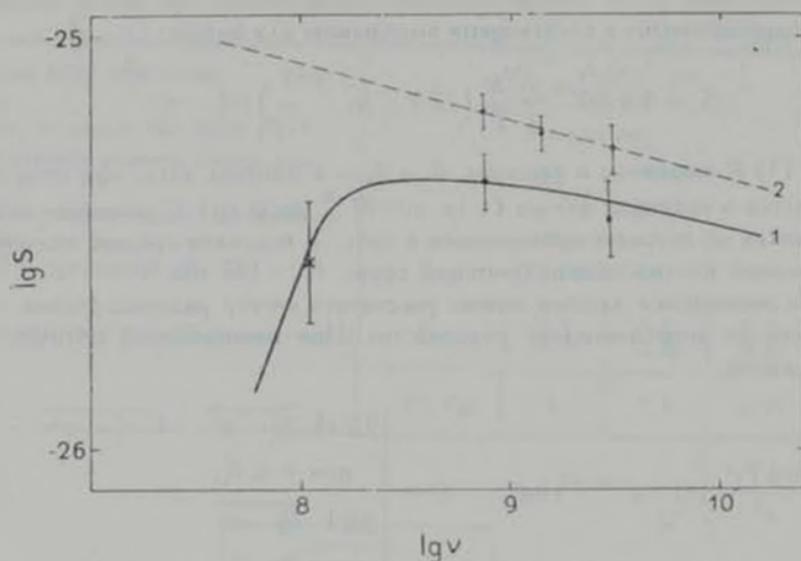


Рис. 2. Радиоспектр NGC 2359. При вычислении спектра на размер туманности принимался диаметр оптического кольца (сплошная кривая). Пунктир соответствует данным работы [4].

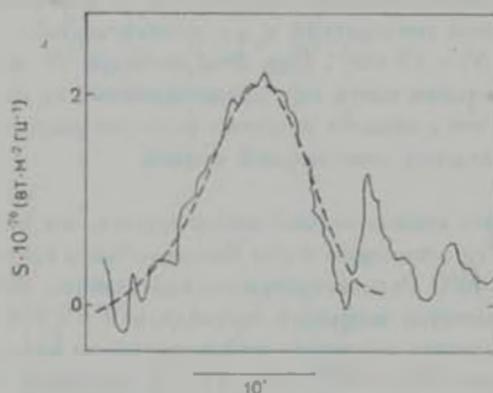


Рис. 3. Пример записи исследуемого источника на высоте 20° . Пульсиром нанесена диаграмма антенны на этой же высоте.

107 МГц были вычислены по потокам на 86 МГц и спектральным индексам этих источников [9]:

$$S_{107} (3C 179) = 22.6 \text{ ед. п.}; \quad S_{107} (3C 180) = 24.1 \text{ ед. п.}$$

Сканирование по δ показало, что наша запись шире диаграммы и представляет собой гумму откликов, по крайней мере, двух источничков. Попытка представить наблюдаемую запись как результат прохождения одного источничка привела к размерам последнего по $\delta \sim 3''$ (рис. 4). Суще-

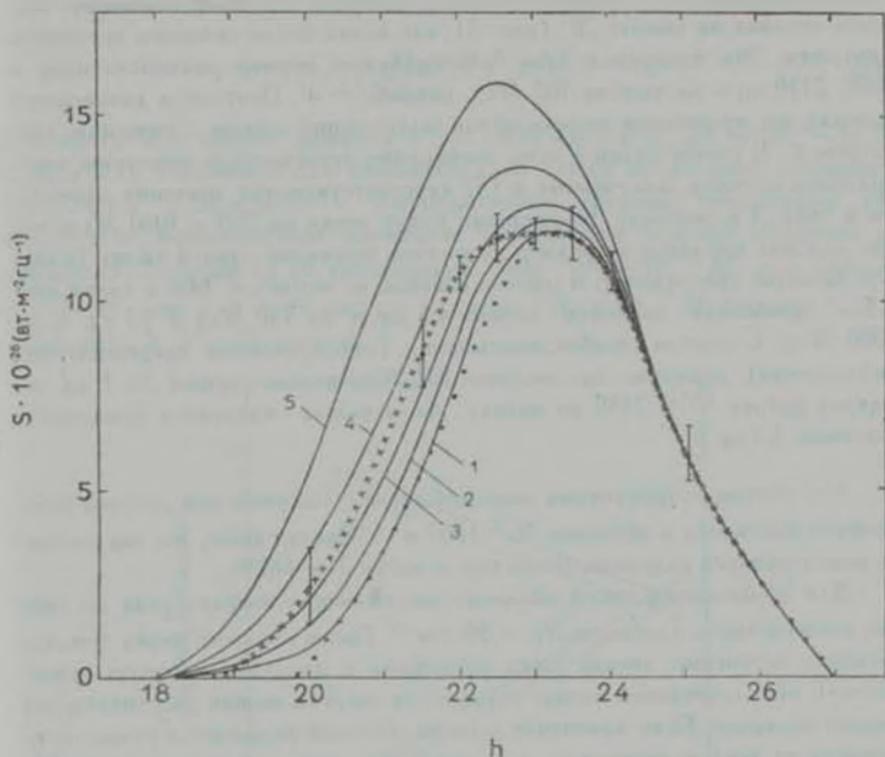


Рис. 4. Сравнение наблюдаемого отклика (крестики) с вычисленным (кривые 1—5). Точками показана диаграмма антенны.

ствование такого источничка мы считаем невероятным, так как его размер по α меньше $10'$ (отклик на каждой из высот получается не шире, чем диаграмма по α). Численное моделирование приводит к наилучшему согласию с наблюдениями, если координаты одного из источничков равны $\alpha = 7^{\text{h}}15^{\text{m}}15^{\text{s}}$ и $\delta = -11^{\circ}11'$, а другого совпадают с координатами NGC 2359. При этом значения потоков получаются равными $S_1 = 11.8$ е.д. п., $S_{\text{NGC 2359}} = 3$ е.д. п. По нашим наблюдениям на 86 МГц поток первого источничка составляет 14.0 е.д. п. Спектральный индекс его в исследованном интервале равен -0.82 . Следовательно, этот объект является не вошедшим в известные нам каталоги нетепловым источничком.

На рис. 4 кривые 1—5 представляют вычисленные отклики при $S_1 = 11.2$ ед. п. и $S_2 = 1; 2; 3; 5$ и 8.4 ед. п. (точками нанесена диаграмма антенны). Кривая 5, соответствующая спектру 2 (рис. 2), противоречит нашим наблюдениям. Следовательно, указанные в [4] угловые размеры являются завышенными. К этому же выводу придут и прямые измерения ширины отклика на высоте $20''$ (рис. 3), где вклад более сильного источника ничтожен. Эти измерения дают максимальный размер радиисточника в NGC 2359 по α на частоте 107 МГц , равный $\sim 4''$. Поэтому в дальнейших оценках мы принимаем модель полой излучающей сферы с внешним диаметром $4''$. В соответствии с этим необходимо пересмотреть величины интегральных потоков, полученные в [4] (соответствующие значения приведены в табл. 1 в скобках). Надежными будут точки на 750 и 3000 МГц , так как для них поправка за размер источника примерно одна и та же (близкие размеры диаграммы), и наклон спектра не меняется. Мы в своих расчетах принимали значения потока 4.5 ед. п. на 750 МГц и 3.7 ед. п. на 3000 МГц . С учетом ошибок вписывания (обусловленных погрешностями наблюдений), получим на частоте 107 МГц поток, равный 3 ± 1 ед. п. Оценка потока NGC 2359 по методу наименьших квадратов приводит к значению 3.3 ед. п.

3. С учетом исправленных значений потока, получим для средней электронной плотности в оболочке $N_e = 156 \text{ см}^{-3}$. Считая далее, что она состоит из ионизованного водорода, вычислим ее массу $M = 340 M_\odot$.

Для образования такой оболочки окружающая звезду среда до сжатия должна иметь плотность $N_H = 50 \text{ см}^{-3}$. Таким образом, перед тем, как началось истечение, звезда была погружена в довольно плотную туманность. С использованием закона сохранения энергии можно рассчитать эволюцию оболочки. Если изменение энергии оболочки вызывается только истекающим из звезды веществом, а ее масса полностью определяется «нагретой» средой, уравнение сохранения энергии имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \left| r^2 \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right| = \frac{3 \dot{M} V^2}{4 \pi r} \quad (3)$$

Здесь \dot{M} — скорость потери массы звездой, V — скорость вещества на уровне, где оно уже практически не связано со звездой, ρ_e — плотность

* Следует заметить, что на этой частоте значительную ошибку может давать эффект путаницы (confusion), который по оценкам работы [10] составляет 2 ед. п. Однако соответствующие расчеты выполнены для внегалактических источников. Для плоскости Галактики (в которой лежит NGC 2359) этот эффект не исследован. Кроме того, может оказаться, что полученный отклик связан с наличием более двух источников. В этом случае приведенная нами оценка является верхним пределом радиопотока от NGC 2359 на частоте 107 МГц .

околозвездной среды. Учитывая, что радиус звезды значительно меньше радиуса оболочки ($r_* \ll r$), положим $r=0$ при $t=0$. Тогда из (3) получим

$$r = \left(\frac{25}{12\pi} \frac{|M| V_-^2}{\rho_-} t^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

и

$$V = \left(\frac{81}{500\pi} \frac{|M| V_-^2}{\rho_- t^2} \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Для звезд WR можно принять $V_- = 1000$ км/сек и $|M| = 10^{-5} - 10^{-3} M_{\odot}$ [11]. Принимая для околозвездной среды полученное значение $N_H = 50$ см $^{-3}$, приходим к эволюционным кривым, показанным на рис. 5. По наблюдаемым размерам определяем возраст оболочки и современную скорость ее расширения. При $|M| = 10^{-5} M_{\odot}$ имеем $t_{об} = 6 \cdot 10^4$ лет и $V = 42$ км/сек; если же $|M| = 10^{-6} M_{\odot}$, то $t_{об} = 10^5$ лет, а $V = 21$ км/сек.

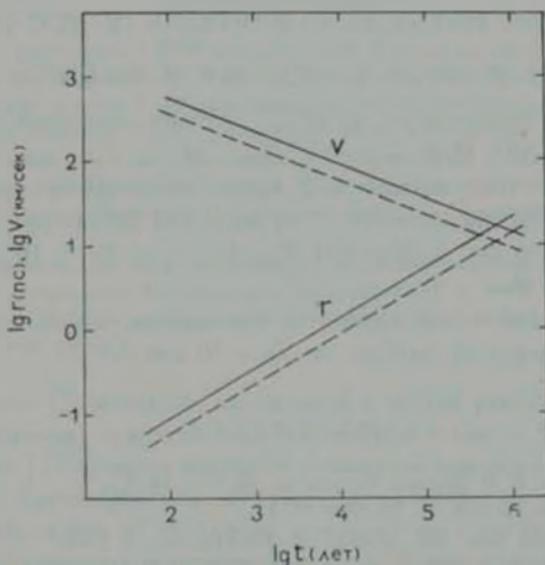


Рис. 5. Зависимость радиуса и скорости расширения туманности от времени для $|M| = 10^{-5} M_{\odot}$ (сплошные линии) и для $|M| = 10^{-6} M_{\odot}$ (пунктир).

Нам не известны измерения скорости расширения этой туманности. Однако для NGC 6888 получено $V \approx 80$ км/сек [12]. Мы видим, что эта величина по порядку совпадает с полученной нами.

В итоге, к данным табл. 1 можно добавить следующие характеристики оболочки:

$$N_e = 156 \text{ см}^{-3}, \quad M = 340 M_\odot, \quad t_{\text{об}} = (6 \cdot 10^1 + 10^2) \text{ лет}, \\ V = (20 \div 40) \text{ км сек}$$

Оценим плотность вещества в пространстве между звездой и оболочкой. За время $6 \cdot 10^1$ лет при $|M| = 10^{-5} M_\odot/\text{год}$ из звезды будет выброшено $0.6 M_\odot$. Эта масса распределится во внутреннем объеме оболочки и даст среднюю концентрацию $N_e \approx 0.35 \text{ см}^{-3}$. При $|M| = 10^{-6} M_\odot/\text{год}$ и возрасте 10^2 лет получим $N_e \approx 0.06 \text{ см}^{-3}$. Вклад этого вещества в меру эмиссии туманности будет ничтожным, и, следовательно, использованное выше предположение об отсутствии газа внутри оболочки вполне допустимо.

В заключение авторы выражают благодарность А. Д. Кузьмину за полезные дискуссии и В. В. Ивановой за помощь в проведении наблюдений.

Физический институт
им. П. Н. Лебедева

ON THE PHYSICAL CONDITIONS IN NGC 2359

I. F. MALOV, V. S. ARTJUKH, V. M. MALOFEEV

The radio observations of NGC 2359 are described. Flux density of this source at 107 MHz is $3 \cdot 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$.

It is shown that optical and radio observations agree with the model of the radiating envelope. The estimated parameters of the envelope are: $N_e = 156 \text{ cm}^{-3}$, $M = 340 M_\odot$, $t_{\text{об}} = (6 \cdot 10^1 - 10^2) \text{ years}$, $V = (20 - 40) \text{ km sec}$.

The estimated concentration of the medium which surrounded the star at initial stages of outflow is $N_H = 50 \text{ cm}^{-3}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Б. Пикельнер, П. В. Щеллов, *Астрон. ж.*, 45, 953, 1968.
2. В. С. Аведисова, *Астрон. ж.*, 48, 894, 1971.
3. A. B. Underhill, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, No. 6, 1968.
4. H. M. Johnson, D. E. Hogg, *Ap. J.* 142, 1033, 1965.
5. L. F. Smith, R. A. Batchelor, *Austral. J. Phys.*, 23, 203, 1970.
6. С. А. Каплин, С. Б. Пикельнер, *Межзвездная среда*, Физматгиз, М., 1963.
7. L. F. Smith, *M. N.*, 141, 317, 1968.
8. Т. А. Лозинская, В. Ф. Есипов, *Астрон. ж.*, 48, 449, 1971.
9. В. С. Артюх, В. В. Виткевич, Р. Д. Даткессаманский, В. Н. Кожухов, *Астрон. ж.*, 45, 712, 1968.
10. В. С. Артюх, В. В. Виткевич, П. М. Даткессаманская, *Астрон. ж.*, 50, 924, 1973.
11. A. B. Underhill, *Astrophys. Space Sci.*, 3, 109, 1969.
12. Т. А. Лозинская, *Астрон. ж.*, 47, 122, 1970.