

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 16

МАЙ, 1980

ВЫПУСК 2

УДК 523.852

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДВУХ БИПОЛЯРНЫХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ТУМАННОСТЕЙ

Н. В. ВОЩИННИКОВ

Поступила 2 июля 1979

Пересмотрена 26 октября 1979

При помощи модели однородной туманности, в которой происходит однократное рассеяние света пылевыми частицами, проведена интерпретация поляризационных наблюдений пекулярных объектов CRL 2688 и M1-92, полученных Шмитдом и др. [5]. Показано, что модели оптически тонких туманностей, состоящих из графитовых пылинок и пылинок с силикатным ядром и ледяной оболочкой, могут удовлетворительно представить наблюдения CRL 2688 и M1-92 соответственно.

В последнее время значительные усилия направлены на изучение обнаруженных в инфракрасном (ИК) диапазоне пекулярных объектов, которые в оптической области спектра имеют вид биполярных туманностей. К ним относятся CRL 2688 (туманность «Яйцо»), M1-92 («ступня Митковского») и еще более десятка объектов. Все они имеют форму двух круговых или веерообразных туманностей, расположенных симметрично относительно видимой звезды или/и компактного ИК-источника [1]. Оптические спектры этих туманностей показывают ряд эмиссионных и абсорбционных линий, наложенных на очень сильный непрерывный спектр. Весьма интересной особенностью некоторых биполярных туманностей является очень высокая (до 50% и более) положительная* поляризация их излучения. Существует мнение, что эти объекты представляют собой звезды на поздних стадиях эволюции и в дальнейшем превратятся в планетарные туманности [2]. Однако уже сейчас нет никаких сомнений в том, что класс биполярных туманностей является более-менее однородным лишь морфо-

* Направление поляризации перпендикулярно радиусу-вектору, соединяющему звезду и рассматриваемую область туманности.

логически, тогда как эволюция отдельных объектов может быть совершенно различной [1, 3]. Внешний вид биполярных туманностей в видимой и ИК-областях спектра, их спектры и поляризационные характеристики обычно принято объяснять моделью, в которой звезда, окруженная оптически толстым пылевым тором, освещает две отражательные туманности через полюса тора [4, 5]. При этом степень симметричности двух частей туманности зависит от того, насколько сильно тор экранирует одну из ее частей, то есть от угла наклона системы относительно картинной плоскости.

Механизмом, ответственным за наблюдаемую поляризацию, является рассеяние света звезды пылевыми частицами туманности, поэтому представляется интересным путем модельных расчетов получить сведения о свойствах рассеивающих пылинок. Модели двух биполярных туманностей обсуждаются в настоящей статье. Мы будем использовать методику расчетов, примененную в [6, 7] для исследования обычных отражательных туманностей. В этих работах в приближении однократного рассеяния вычислены показатели цвета и степень поляризации однородных туманностей, состоящих из сферических пылинок и сферических пылинок с оболочкой (двуслойных).

CRL 2688. Объект CRL 2688 считается типичной биполярной отражательной туманностью. Он состоит из двух симметричных компонентов (северного и южного), наиболее яркие области которых отстоят друг от друга на 8". Поверхностная яркость северного компонента больше, чем южного. Между ними расположен ИК-источник, излучение которого обнаружено на 10 и 20 мкм [8]. На спектр каждого компонента, соответствующий спектру звезды класса F5 Ia, наложены полосы молекул C_2 и C_3 [9]. О высокой степени поляризации этой туманности впервые сообщил Ней [10]. Затем оценки поляризации в видимой части спектра получили Шол и Таренгхи [4] и Коэн и Кухи [11], а в ИК—Джонс и Дик [12]. Указанные авторы наблюдали излучение всей туманности или, в лучшем случае, отдельно северного и южного компонентов, используя при этом различные диафрагмы. Оказалось, что степень поляризации довольно постоянна в визуальной части спектра ($\sim 50\%$) и уменьшается в фиолетовой ($\sim 40\%$) и ИК (до 30% на 2.2 мкм) частях спектра. Последнее связывают с добавкой неполяризованного излучения нагретых пылинок [12]. Фотоэлектрическая поляризационная карта CRL 2688 была получена Шмидтом и др. [5] при помощи специального поляриметра с фотодиодной матрицей ($i_{\text{эф.}} = 5800$ А, ширина полосы ~ 2500 А), позволявшего определять поляризацию с разрешением 0."6. Авторы [5] нашли распределение степени поляризации отдельно для северного и южного компонентов туманности. Ошибки в определении степени поляризации составляли 0.2% для ярких частей туманности и $\sim 8\%$ для наиболее слабых. Мы будем сравнивать теоретические расчеты с этими наблюдениями.

Учитывая внешний вид туманности и то, что степень поляризации несколько увеличивается с удалением от звезды, форму туманности мы выбрали не в виде биконуса, а в виде фигуры вращения, в сечении напоминающей восьмерку. Параметрами модели были характеристики пылинок, k^* (5540) — коэффициент линейного ослабления излучения в туманности на длине волны 5540 Å, α — угол наклона системы относительно картинной плоскости и q — отношение протяженности туманности к ее толщине вдоль луча зрения при $\alpha = 0^\circ$. Считается, что центральная звезда в CRL 2688 обладает избытком углерода [9], а в атмосферах таких звезд могут конденсироваться пылинки из графита и карбида кремния (SiC) [13]. В работе [4] нормированная зависимость степени поляризации от длины волны для CRL 2688 была объяснена при помощи модели, в которой использовались графитовые пылинки с радиусом $a = 0.07$ мкм. Мы проводили расчеты для частиц из графита и SiC, имеющих экспоненциальное распределение по размерам в виде, предложенном Гринбергом [14]. Параметром функции распределения частиц по размерам являлась величина a_0 , связанная со средним размером частиц соотношением $\bar{a} \approx 0.3 \cdot a_0$. Значения показателей преломления графита и SiC в зависимости от длины волны были взяты из работ [14, 15], а необходимое распределение энергии в спектре звезды F5 Ia — из работы [16]. Наблюдаемое распределение поляризации удалось удовлетворительно представить кривой, полученной для модели туманности, состоящей из графитовых частиц с $a_0 = 0.2$ мкм. Средний размер таких частиц $\bar{a} \approx 0.06$ мкм близок к найденному в работе [4]. Окончательный выбор мы остановили на модели с параметрами $k^*(5540) = 0.08 \text{ пс}^{-1}$, $\alpha = 5^\circ$ (северная часть туманности ближе к наблюдателю) и $q = 8$. Отметим, что небольшие изменения этих величин (в пределах 20%) практически не сказываются на конечном результате. Наблюдательные данные и теоретические кривые приведены на рис. 1. Согласие с наблюдениями южной части туманности можно улучшить, приняв большую величину коэффициента ослабления (пунктирные кривые на рис. 1). Учитывая расстояние до туманности $l \sim 1$ кпс [5] и считая, что протяженность светящихся областей $\sim 25''$, мы можем оценить их оптическую толщину $\tau_{\text{ext}}(5540) \approx 0.1$. Оптическая толщина туманности вдоль луча зрения почти на порядок меньше.

Необходимо заметить, что рассчитанная нами для выбранной модели степень поляризации в фиолетовой части спектра оказалась меньше, чем наблюдаемая. К причинам такого расхождения можно отнести то, что в фиолетовой и видимой частях спектра, по-видимому, эффективно рассеивают излучение разные части туманности (то есть следует изменить геометрические параметры модели). Кроме того, при расчетах нам пришлось использовать лишь эффективные длины волн фильтров, с которыми

ми проводились наблюдения [4], поскольку их кривые реакции нам неизвестны.

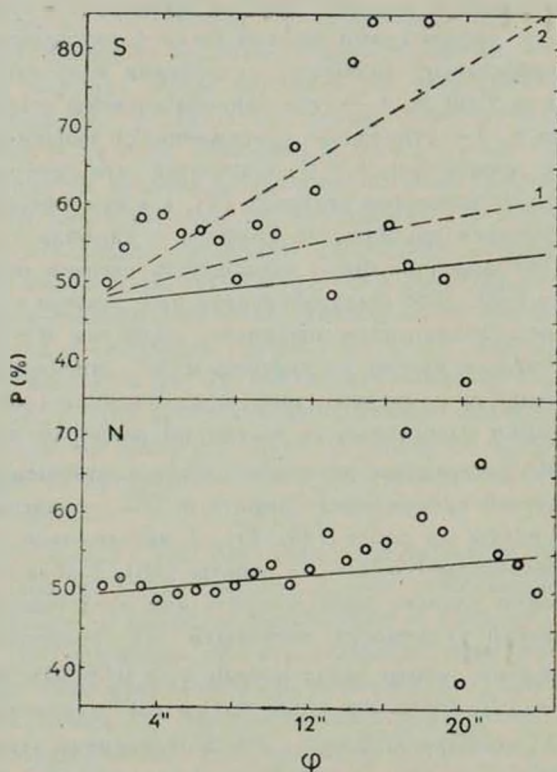


Рис. 1. Степень поляризации излучения объекта CRL 2688. Круги — данные наблюдений. Кривые — теоретическая модель (графитовые частицы, $a_0 = 0.2$ мкм, $q = 8$, $\alpha = 5^\circ$, $k^*(5540) = 0.8 \text{ пс}^{-1}$; пунктир: 1 — $k^*(5540) = 2.0 \text{ пс}^{-1}$, 2 — $k^*(5540) = 5.0 \text{ пс}^{-1}$).

Отметим, что даже лучшего согласия с результатами наблюдений, представленными на рис. 1, можно добиться, если использовать пылинки из SiC с $a_0 = 0.1$ мкм. Однако проведенные нами расчеты показывают, что излучение, рассеянное такими частицами, практически неполяризовано в фиолетовой части спектра.

M1-92. Пекулярная туманность M1-92, первоначально обнаруженная Минковским, по внешнему виду напоминает отпечаток ноги человека и состоит из двух частей: северо-западной (NW, более яркой) размером 4.5×5.7 и юго-восточной (SE, более слабой) размером 4.0×5.0 [17]. На ИК-снимках можно заметить звезду, примыкающую к NW части ту-

манности. Спектр звезды был классифицирован как B0.5 V [17]. M1-92 является одной из немногих биполярных туманностей, у которых обнаружено лазерное излучение OH [3]. Это свидетельствует о том, что в туманности отношение $O/C > 1$ и могут присутствовать силикатные пылинки [13]. Оценки степени поляризации излучения M1-92 были получены в работе [11], а поляризационная карта — в работе [5]. Найдено, что степень поляризации NW части туманности плавно растет с удалением от звезды до некоторого места, а затем остается примерно постоянной. Авторы [5] связывают такое поведение с большой оптической толщиной этой части туманности. Нам кажется более естественным объяснить его, предполагая, что рост поляризации вызван уменьшением диапазона углов рассеяния (как в сферической отражательной туманности [6]), который прекращается с некоторого места. При этом, как и в [5], мы будем считать, что NW часть туманности находится ближе к наблюдателю, тогда как кусок SE части экранирован тором, сквозь который просвечивает звезда. Мы провели расчеты для моделей туманностей, состоящих из однородных сферических силикатных пылинок и двуслойных пылинок с силикатным ядром и оболочкой из загрязненного льда. Рассматривались ансамбли двуслойных частиц, в каждом из которых пылинки имеют один и тот же радиус ядра (a_c), а распределение оболочек по размерам является экспоненциальным (a_0 — параметр функции распределения) [7]. Наблюдаемое распределение поляризации лучше всего представляется кривой, рассчитанной для модели туманности, состоящей из двуслойных пылинок с $a_c = 0.1$ мкм и $a_0 = 0.267$ мкм (показатель преломления ядра $m_1 = 1.65 - 0.05i$, показатель преломления оболочки $m_2 = 1.30 - 0.02i$). В этом случае отношение среднего радиуса оболочки к радиусу ядра равно 1.8 [7]. При расчетах мы предполагали, что светящиеся области туманности по форме напоминают волан, то есть ограничены конической поверхностью, которая при $\varphi \leq 3.''6$ переходит в сферическую (диаметр сферы равен $3.''6$). Такая геометрия представляется нам более естественной из рассмотрения прямых фотографий объекта. Угол наклона системы относительно картинной плоскости был выбран равным 12° . Распределение энергии в спектре звезды B0.5 V было взято из работы [16]. Наблюдения и теоретические кривые представлены на рис. 2. Принимая расстояние до туманности равным 3 кпс, а размер светящихся областей $\sim 8''$ [5], мы оценили оптическую толщину этих областей $\tau_{\text{ext}}(5540) \approx 0.006$. Отметим, что резкий спад степени поляризации в SE части туманности при $\varphi \leq 2.''4$ вызван ее экранированием оптически толстым краем тора. Если увеличить угол наклона этой части туманности (пунктирная кривая), то можно получить лучшее согласие с наблюдениями при $\varphi = 2.''4$ и $3.''0$.

В заключение заметим, что проведенные расчеты позволяют получить сведения как о характеристиках светящихся областей туманностей, так и

о свойствах составляющих их пылевых частиц. В обоих случаях туманности оказались оптически тонкими ($\tau_{\text{ext}} \lesssim 0.1$), о чем свидетельствует и высокая поляризация их излучения. Поляризационные наблюдения CRL 2688 удалось объяснить при помощи модели туманности, состоящей из сферических графитовых пылинок со средним размером $\bar{a} = 0.06$ мкм.

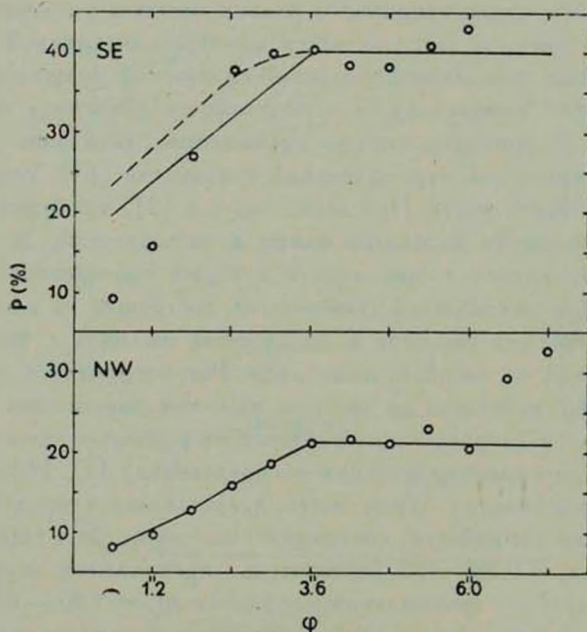


Рис. 2. Степень поляризации излучения объекта М1-92. Круги — данные наблюдений. Кривые — теоретическая модель (двуслойные частицы, $m_1 = 1.65 - 0.05i$, $m_2 = 1.30 - 0.02i$, $a_c = 0.1$ мкм, $a_0 = 0.267$ мкм; $k^*(5540) = 0.08$ мкс $^{-1}$, $\alpha = 12^\circ$; пунктир — $\alpha = 18^\circ$).

Этот объект, по-видимому, является углеродной звездой, находящейся на стадии эволюции после главной последовательности [2, 11], и пылинки из графита могут конденсироваться в атмосфере звезды. Поляризационные наблюдения М1-92 удалось представить при помощи модели туманности, состоящей из сферических пылинок с силикатным ядром и ледяной оболочкой. Средний размер таких частиц $\bar{a}_m \approx a_c + 0.3 a_0 = 0.180$ мкм [7]. В работе [11] отмечено, что М1-92 скорее всего является молодым объектом и находится на стадии эволюции до главной последовательности. Тогда наблюдаемую туманность следует считать остатком межзвездного молекулярного облака, связанного с образованием центральной звезды.

В работе [18] отмечено, что пылинки, находящиеся в таких облаках, могут довольно быстро обрастать оболочками из легких элементов.

Ленинградский государственный
университет

AN INTERPRETATION OF THE POLARIMETRIC OBSERVATIONS OF THE TWO BIPOLAR REFLECTION NEBULAE

N. V. VOSHCHINNIKOV

The polarization maps of the peculiar objects CRL 2688 and M1-92 obtained by Schmidt et al. [1] are interpreted with the use the first-order theory of scattering by dust grains in the homogeneous nebula. It is shown that graphite grains and silicate core-ice mantle grains in an optically thin nebula model fairly represent the observations of the CRL 2688 and M1-92 respectively.

ЛИТЕРАТУРА

1. *N. Calvet, M. Cohen, M. N.*, 182, 687, 1978.
2. *B. Zuckerman, D. P. Grla, B. E. Turner, M. Morris, P. Palmer, Ap. J.*, 205, L 15, 1976.
3. *J. D. Fix, R. L. Mutel, Astrophys. Lett.*, 19, 37, 1977.
4. *S. J. Shawl, M. Tarenght, Ap. J.*, 204, L 25, 1976.
5. *G. D. Schmidt, J. P. R. Angel, E. A. Beaver, Ap. J.*, 219, 477, 1978.
6. *Н. В. Вошинников, Астрон. ж.*, 54, 1221, 1977.
7. *Н. В. Вошинников, Астрон. ж.*, 55, 983, 1978.
8. *E. P. Ney, K. M. Merrill, E. E. Becklin, G. Neugebauer, C. G. Wynn-Williams, Ap. J.*, 198, L 129, 1975.
9. *D. Crampton, A. P. Cowley, R. M. Humphreys, Ap. J.*, 198, L 135, 1975.
10. *E. P. Ney, Sky and Telescope*, 49, 21, 1975.
11. *M. Cohen, L. V. Kuhl, Ap. J.*, 213, 79, 1977.
12. *T. J. Jones, H. M. Dyck, Ap. J.*, 220, 159, 1978.
13. *N. J. Woolf, The Dusty Universe*, eds. G. B. Field, A. G. W. Cameron, Neale Watson, New York, 1975, p. 59.
14. *Дж. М. Гринберг, Межзвездная пыль, Мир, М.*, 1970.
15. *J. M. Greenberg, S. S. Hong, The Dusty Universe*, eds. G. B. Field, A. G. W. Cameron, Neale Watson, New York, 1975, p. 131.
16. *В. Страйжис, Э. Свидерскене, Бюлл. Вильнюсской обс.*, № 35, 3, 1972.
17. *G. H. Herbig, Ap. J.*, 200, 1, 1975.
18. *E. E. Salpeter, Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 15, 267, 1977.