

## О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ РАЗЛЕТА РАЗРЕЖЕННОЙ КОМПОНЕНТЫ КАССИОПЕИ А ПУТЕМ НАБЛЮДЕНИЙ ШИРОКИХ КРЫЛЬЕВ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ

К. В. Бычков

Компактные пятна нетеплового радиоизлучения Кассиопеи А интерпретируются как локальные усиления магнитного поля, связанные с распространением магнитозвуковых волн в разреженной среде Кассиопеи А. Скорость разлета разреженного газа не связана непосредственно с движениями пятен. Она может быть определена путем наблюдений широкой компоненты водородных линий.

Compact features of the Cas A non-thermal radio emission are explained as crests of magnetic waves generated by dense knots which are interacting with the rarefied gas. Feature motions do not give exact information about the expansion velocity of the rarefied component. It can be measured by observations of the hydrogen line bright wings originated in a thin region behind the main shock.

Разлетающиеся остатки атмосфер сверхновых состоят из двух компонент: разреженной и плотной. Плотная компонента представляет собой систему быстрых компактных волокон, а разреженная — окружающий их газ низкой плотности. Непосредственно остатки атмосфер сверхновых наблюдаются в Крабовидной туманности и в Кассиопее А.

Кинематические характеристики волокон — скорость разлета и дисперсию скоростей — исследуют по их лучевым скоростям и собственным движениям. Согласно измерениям Бааде и Минковского [1], скорость быстрых волокон Кассиопеи А лежит в диапазоне 5000—7000 км/с. Исследования разреженной компоненты атмосферы сверхновой в Кассиопее А затруднены тем, что до сих пор неясно, наблюдения каких именно структурных элементов туманности могут дать непосредственную информацию о движении разреженной компоненты.

В последнее время были обнаружены и подробно исследованы собственные движения компактных локальных усилений яркости нетеплового радиоизлучения Кассиопеи А — так называемых радиопятен. Большая часть пятен образует структуру кольца или оболочки во внешней части остатка сверхновой. По крайней мере часть из них может быть связана с разреженной компонентой сверхновой.

На радиокартах с высоким угловым разрешением, полученных за последние 10 лет, подробно изучена статистика смещений пятен со временем. Согласно Беллу [2] и Дикелу и Грайзену [3], смещения пятен за 7—9 лет отвечают движениям со скоростями  $(0.5 \div 3) \cdot 10^3$  км/с, если расстояние до источника принять равным 2.8 кпс. Статистика векторов смещений значительно отличается от ожидаемой при радиальном расширении: радиальная компонента не растет с увеличением расстояния пятен от центра. Наоборот, направления сдвигов распределены хаотически, причем разброс скоростей в радиальном направлении (2600 км/с) даже несколько меньше, чем в тангенциальном (3000 км/с). По мнению Дикела и Грайзена, это говорит об отсутствии тенденции к радиальному расширению, хотя они не исключают возможности общего расширения системы пятен при условии, что его скорость не превышает 1700 км/с, т. е. значительно меньше скорости разлета системы быстрых волокон.

Белл [2] считает, что собственное движение пятен непосредственно отражает низкую скорость разлета разреженного газа. Следовательно, скорости

разреженной компоненты и быстрых волокон значительно различаются, а их пространственное совпадение — случайность. Такие представления не противоречат известным фактам. Например, после взрыва разреженная компонента атмосферы могла приобрести высокую, до 15—20 тыс. км/с, скорость и к настоящему моменту затормозиться до 2000 км/с, а быстрые волокна, двигаясь равномерно со скоростью 5—7 тыс. км/с, вначале отставали от разреженного газа, а теперь догнали его и начинают обгонять. Однако значительное, в несколько раз, различие между первоначальными скоростями плотной и разреженной компонент требует своего объяснения. К тому же в Крабовидной туманности скорости разлета разреженного и плотного газа примерно одинаковы.

Насколько обоснована гипотеза о разных скоростях разлета двух компонент атмосферы Кассиопеи А? Исходной посылкой в ней является предположение о равенстве скоростей видимых смещений радиопятен и скорости разлета разреженной компоненты  $v_r$ . Это предположение далеко не самоочевидно. Более того, в следующем разделе этой статьи приведен пример, показывающий, что скорость перемещения пятен может в несколько раз отличаться от  $v_r$ . Следовательно, сейчас мы пока не располагаем наблюдениями, позволяющими непосредственно определить скорость разлета разреженной компоненты Кассиопеи А. Во втором разделе предложен способ измерения  $v_r$  путем наблюдения широких крыльев диффузной компоненты линии  $H_\alpha$  водорода.

**Возможная природа пятен нетеплового радиоизлучения.** Слабая связь радиопятен с оптическими деталями Кассиопеи А (из 83 только два проектируются на оптические волокна) указывает на то, что радиопятна связаны, скорее всего, именно с разреженной компонентой сверхновой, а не с плотными волокнами. На это же указывает и отсутствие корреляции радиопятен с деталями рентгеновского излучения [4].

Сформулируем предлагаемый механизм появления ярких пятен нетеплового радиоизлучения. А именно, будем считать, что пятна представляют собой локальные усиления магнитного поля, вызванные движением в туманности магнитозвуковых волн. Эти волны могут генерироваться в разреженном газе в результате как его взаимодействия с плотными волокнами, так и испытываемого им резкого торможения, связанного с окончанием стадии свободного разлета. В этой модели совпадение областей, занимаемых разреженной плазмой и системой волокон, не случайно, а есть следствие общепринятых представлений [5], что Кассиопея А находится в самом начале стадии торможения.

Яркость синхротронного излучения пропорциональна примерно третьей степени сжатия магнитного поля [5], и волны с достаточно сильным, в 1.5—2 раза, сжатием могут вызвать появление компактных пятен радиоизлучения. Малые размеры пятен также можно объяснить сильной зависимостью яркости от сжатия.

Величина и направление скорости волны относительно наблюдателя определяется не только общим разлетом газа, но также начальными условиями возбуждения, градиентами плотности, давления и напряженности магнитного поля и рассеянием на неоднородностях. Совокупность многих факторов, естественно, приводит к хаотическому движению волн и проявляется в хаотическом характере движения радиопятен, в согласии с наблюдениями [2]. Понятно также расположение пиков вблизи лимба туманности — в местах, где генерация волн наиболее вероятна.

Наблюдаемые движения пятен в предлагаемой модели отражают не величину  $v_r$ , а величину скорости магнитного звука в Кассиопее А, не связанную непосредственно с  $v_r$ . Покажем, что скорость перемещения пятен может оказаться в несколько раз меньше, чем  $v_r$ . Действительно, известно [6], что скорость разлета в пустоту передней границы свободно расширяющегося газа примерно в  $2/(\Gamma-1)$  раз больше скорости звука в покоящемся газе. Величина показателя  $\Gamma$  зависит от конкретного механизма упругости среды. Если давление определяется космическими лучами и хаотической компонентой магнитного поля, то  $\Gamma=4/3$ , а регулярное магнитное поле, направленное поперек движения, дает  $\Gamma=2$ . Остальные случаи приводят к промежуточным значениям  $\Gamma$ . Во всяком случае, если Кассиопея А находится в состоянии начального торможения,

то скорость звука 2000—2500 км/с внутри основной массы остатка сверхновой не противоречит скорости разлета внешней границы 5000—7000 км/с. Следовательно, низкая скорость собственного движения радиопятен может быть совместима с высокой скоростью разлета туманности. К сожалению, отсутствие сведений о величине  $\Gamma$  в Кассиопее А делает процедуру пересчета собственных движений пятен к величине  $v_r$  весьма неточной.

**Излучение разреженного газа в крыльях водородных линий.** Как измерить скорость разреженной компоненты атмосферы, не прибегая к тем или иным гипотезам о природе компактных деталей радиоизлучения Кассиопеи А? На этот вопрос можно будет ответить, если удастся измерить широкие компоненты водородных линий, излучаемых за фронтом ударной волны, вызванной в межзвездной среде разлетом разреженной компоненты. Скорость газа за фронтом практически совпадает со скоростью разреженной компоненты атмосферы. Поэтому ширина водородных линий, проинтегрированных по всему диску туманности, прямо отражает величину скорости разлета разреженной компоненты. При  $v_{r_0} = 6000$  и 1700 км/с ширина линии  $H_\alpha$  составляет 260 и 75 Å соответственно. Обнаружение крыльев шириной более 200 Å будет говорить в пользу модели быстрого разреженного газа, т. е. о равенстве скоростей плотной и разреженной компонент атмосферы в начальный период после взрыва сверхновой.

Интенсивность излучения нейтрального водорода за фронтом быстрой ударной волны была рассчитана в [7, 8]:

$$I_\alpha = 0.84 \cdot 10^{-13} n_1 v_r \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}),$$

где  $n_1$  — плотность числа частиц нейтрального водорода за фронтом. Физический смысл этой формулы в том, что каждый атом водорода, проходя через фронт быстрой ( $v_r > 300$  км/с) ударной волны, с вероятностью примерно 0.3 излучает  $H_\alpha$ -квант.

Оценим возможную величину интенсивности, считая  $v_r$  равной 6000 км/с. Нижняя граница для  $n_1$  получается из тех соображений, что если вспышка сверхновой ионизовала окружающий газ полностью, то за время жизни туманности  $10^{10}$  с успела рекомбинировать доля  $2.5 \cdot 10^{-3}$  всех протонов. Кассиопея А окружена III-областью с электронной плотностью  $n_e \approx 8 \text{ см}^{-3}$  [9], откуда нижняя граница  $n_1$  получается равной  $0.02 \text{ см}^{-3}$ . Учитывая межзвездное ослабление  $H_\alpha$  в  $\sim 40$  раз при  $A_V = 4.3$  [9], получим нижнюю границу интенсивности  $0.4 \cdot 10^{-7} \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср})$ . Если же доля нейтральных частиц после вспышки сверхновой оставалась порядка  $n_e$ , то можно ожидать величину  $I_\alpha$ , сравнимую с наблюдаемой от Петли в Лебеде —  $10^{-6} \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср})$  [10].

Таким образом, существует принципиальная возможность определения скорости разлета разреженной компоненты Кассиопеи А путем наблюдения широких крыльев линии  $H_\alpha$  водорода.

#### Литература

1. Baade W., Minkovsky R. Identification of the radio sources in Cassiopeia, Cygnus A and Puppis A. — *Astrophys. J.*, 1954, 119, p. 206—214.
2. Bell A. R. Proper motions and temporal flux changes of compact features in Cas A at 5 GHz. — *Mon., Not. Roy. Astron. Soc.*, 1977, 179, p. 573—586.
3. Dickel J. R., Greisen E. W. The evolution of the radio emission from Cas A. — *Astron. and Astrophys.*, 1979, 75, p. 44—53.
4. High-resolution X-ray observations of the Cassiopeia A supernova remnant with the Einstein observatory / S. S. Murray, G. Fabiano, A. C. Fabian et al. — *Astrophys. J.*, 1979, 234, p. 69—72.
5. Шкловский И. С. Сверхновые звезды. М.: Наука, 1976.
6. Каплан С. А., Пикельнер С. Б. Межзвездная среда. М.: Физматгиз, 1963.
7. Burchkov K. V., Lebedev V. S. On the origin of high-velocity gas  $H_\alpha$ -emission from the Cygnus Loop and IC 443. — *Astron. and Astrophys.*, 1979, 80, p. 167—169.
8. Chevalier R. A., Kirshner R. P., Raymond J. C. The optical emission from a fast shock wave with application to supernova remnants. — *Astrophys. J.*, 1980, 235, p. 186—195.
9. Peimbert M. On the mass and chemical composition of Cassiopeia A. — *Astrophys. J.*, 1971, 170, p. 261—263.
10. Kirshner R. P., Taylor K. High-velocity gas in the Cygnus Loop. — *Astrophys. J.*, 1976, 208, p. 83—86.

Поступила в редакцию 25 апреля 1983 г.