

УДК 524.354;524.522

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЙТРАЛЬНОГО ВОДОРОДА В ОБЛАСТИ ОСТАТКА СВЕРХНОВОЙ G78.2+2.1

© 2001 г. И. В. Госачинский*

Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 28.07.2000 г.

Распределение нейтрального водорода в области остатка сверхновой G78.2+2.1 изучено по наблюдениям в радиолинии 21 см с помощью радиотелескопа РАТАН–600 с угловым разрешением $2.4'$ в широком диапазоне лучевых скоростей. В дополнение к оболочке HI на малых лучевых скоростях, непосредственно окружающей радиоостаток, обнаружена протяженная расширяющаяся оболочка HI диаметром $\approx 3^\circ$ на лучевой скорости -25 км/с, хорошо совпадающая по координатам и угловым размерам с внешней рентгеновской оболочкой, обнаруженной в работе Лозинской и др. (2000). Отметим, что излучение линии H α , исследованное в этой работе в области остатка сверхновой, также имеет вторичный максимум на лучевых скоростях от -45 до -20 км/с. Поскольку лучевые скорости этих двух объектов значительно различаются, можно предположить, что различаются и их расстояния, т.е. наблюдается случайная проекция двух разных объектов.

Ключевые слова: сверхновые, остатки сверхновых, взаимодействие со средой.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известный оболочечный остаток сверхновой G78.2+2.1 (см. ссылки в каталоге Грина (1996) и в работах Госачинского и др. (1999), Лозинской и др. (2000)) проецируется на область радиоисточника Лебедь X, где на сравнительно небольшом участке неба диаметром всего лишь 6° – 7° располагается более полусотни различных объектов, главным образом компактных областей HI (Пипенбринк, Вендкер (1988), из которых лишь три, если судить по их лучевым скоростям линии H 110 α , измеренным в этой работе, случайно проецируются на эту область из более далеких спиральных рукавов. В то же время интерпретация результатов наблюдений в этой области затруднена неопределенностью расстояний, осо-

бенно кинематических – из-за малого значения dv/dr , а также тем обстоятельством, что здесь луч зрения проходит вдоль спирального рукава Ориона–Лебедя.

Межзвездная среда в этой области исследовалась в десятках работ, в различных диапазонах волн, в различных спектральных линиях. В работе Госачинского и др. (1999) обнаружены две кольцевые структуры HI, напоминающие по своим морфологическим характеристикам расширяющиеся оболочки. Одна из них, большого углового размера, располагается вокруг радиоисточника Лебедь X, другая, на средней лучевой скорости $+3$ км/с непосредственно окружает остаток сверхновой G78.2+2.1. Количественный анализ показал, что ее происхождение может быть обусловлено как ударной волной остатка, так и действием звездного ветра звезды-предшественницы. В этой работе приведены также

* Электронный адрес для связи: gos fsao.spb.su

ссылки на предыдущие исследования нейтрального водорода в области остатка и критический анализ результатов некоторых из них.

В упоминавшейся выше работе Лозинской и др. (2000) приведены результаты обработки архивных данных рентгеновских обсерваторий ROSAT и ASCA, в результате которой авторы обнаружили две клочковатые, вложенные друг в друга рентгеновские оболочки, которые могут быть связаны с этим остатком сверхновой. Удивительно то, что если одна из них, состоящая из трех облаков, лишь немного больше остатка по размерам, то вторая, более слабая, имеет угловой диаметр в три раза больше, чем у остатка сверхновой. Имея в виду большую насыщенность этой области различными объектами, нельзя исключить также случайной проекции рентгеновских деталей друг на друга и на остаток сверхновой. С другой стороны, известно, что при наблюдениях с высоким угловым разрешением обычно выявляется наличие оболочек или каверн в распределении излучения нейтрального газа там, где располагаются активные объекты с высоким выделением энергии – остатки сверхновых, области НП или оболочки, связанные с звездным ветром, а тем более, области, излучающие в рентгеновском диапазоне. В связи с этим при исследовании связи распределения НП с остатком сверхновой G78.2+2.1 и другими объектами оказалось целесообразным не ограничиваться лучевыми скоростями около нуля, что соответствует расстоянию до остатка сверхновой, а рассмотреть весь диапазон линии НП. Результаты этого исследования приведены в настоящей заметке.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

Для исследования распределения межзвездного газа в области радиоисточника Лебедь X и остатка сверхновой G78.2+2.1 мы использовали 18 сечений по прямому восхождению через 0.6° по склонению, полученных на радиотелескопе РАТАН-600. Аппаратура и методика подробно описаны в работе Госачинского и др. (1999), однако для удобства читателя мы вкратце приведем это описание. Антенна радиотелескопа РАТАН-600 на волне 21 см имеет в этом диапазоне высот угловое разрешение $2' \times 12'$, эффективную площадь 875 м^2 и довольно значительные, до 40%, потери по яркостной температуре. Последнее связано с особенностями конструкции антенны и с тем, что наблюдения проводились около зенита. Шумовая температура системы составляет 60 К, 39-канальный фильтровой спектроанализатор имеет ширину канала 30 кГц (6.3 км/с). Сечение на каждом склонении состоит из двух серий по три наблюдения в каждой, полученных со сдвигом настройки приемника на половину ширины канала, так что в результате каждое сечение имеет 78 каналов,

следующих через 3.15 км/с. Такая методика наблюдений позволяет также провести эффективную чистку помех. Средний квадрат флуктуаций в спектральных каналах на осредненной записи составлял 0.2 К. Параметры антенны и аппаратуры контролировались в каждом цикле наблюдений с помощью измерений серии опорных источников (Венгер и др., 1979).

При дальнейшей обработке из кривых прохождения в каждом спектральном канале вычитался протяженный фон, полученный с помощью сплайн-интерполяции по нижнему уровню распределения яркости, и далее обрабатывались кривые прохождения, содержащие только детали сравнительно малого углового размера. В исключенную фоновую часть кривых прохождения входят: а) крупномасштабные детали распределения излучения межзвездного газа, такие как спиральные рукава или гигантские комплексы; б) излучение межоблачной среды, если оно есть; в) неразрешенные диаграммой направленности радиотелескопа детали малого углового размера; г) паразитный крупномасштабный фон, возникающий из-за наличия далеких боковых лепестков и поля рассеяния антенны радиотелескопа. Следует заметить, что исключение фоновой компоненты указанным выше способом может привести к некоторой недооценке яркости и углового размера оставшихся мелкомасштабных деталей, параметры которых определялись с помощью программы гаусс-анализа.

Ошибки измеренных параметров имеют следующие значения. Лучевая скорость изолированной детали НП средней яркости измеряется с точностью ± 1 км/с. В некоторых оговоренных ниже случаях точность ухудшается за счет трудностей отделения объекта от фона или соседних деталей. Ошибка измерения яркостной температуры линии НП составляет примерно 0.5 К с учетом ошибок калибровки антенны, а ошибка оценки угловых размеров по прямому восхождению – 0.1° . В последнем случае справедливы те же оговорки, что и для лучевых скоростей. По склонению разрешающая способность антенны гораздо ниже, и, соответственно, точность измерения угловых размеров меньше. Точность оценки расстояний зависит от метода их определения и в каждом случае должна рассматриваться отдельно. В результате точность оценки массы НП оказывается не лучше 0.5–1 порядка величины.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение яркости деталей НП после исключения протяженного фона излучения радиолинии в области радиоисточника Лебедь X и остатка сверхновой G78.2+21 на лучевой скорости +10 км/с представлено на рис. 1. Склонения сечений указаны справа, масштабы по вертикали и го-

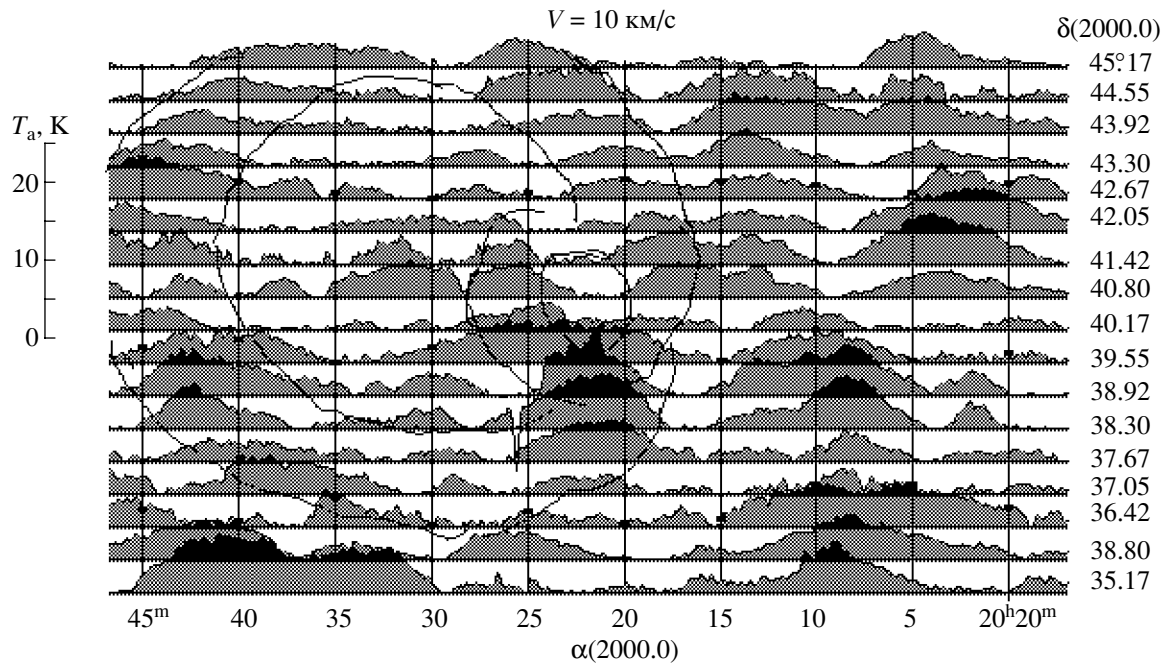


Рис. 1. Распределение яркости деталей НІ после исключения протяженного фона в области радиоисточника Лебедь Х и остатка сверхновой G78.2+2.1 на лучевой скорости +10 км/с. Склонения сечений НІ указаны справа, масштабы по вертикали и горизонтали различаются. Тонкими линиями обозначены кольцевые структуры НІ, имеющие отношение к указанным объектам согласно данным работы Госачинского и др. (1999).

ризонтиали несколько различаются. Тонкими линиями обозначены кольцевые структуры НІ, которые можно сопоставить с указанными выше объектами, что было сделано в работе Госачинского и др. (1999).

Схематическое изображение остатка сверхновой в радиодиапазоне по данным Хиггса и др. (1977) на волне 21 см приведено на рис. 2 (жирный кружок) вместе с изофотами рентгеновского излучения в диапазоне 0.5–2.0 кэВ согласно Лозинской и др. (2000). На этом рисунке масштабы по вертикали и горизонтали примерно одинаковы.

В работе Госачинского и др. (1999) было обнаружено, что меньшая из двух кольцевых структур НІ непосредственно окружает радиоостаток и были определены следующие наблюдаемые параметры оболочки НІ вокруг остатка сверхновой:

координаты центра α (2000.0) = 20^h21.3^m, δ (2000.0) = +40.8°;

угловой размер: наружный 2.8° × 3.5°, внутренний 2.0° × 2.5°;

средняя яркостная температура линии 8 ± 0.5 К;

средняя лучевая скорость +3 км/с;

диапазон лучевых скоростей, в котором наблюдается оболочка ≥ 20 км/с.

При выделении оболочки НІ нами были проведены тщательный учет влияния линии поглощения НІ, поскольку излучение остатка в непрерывном спектре достаточно яркое, а также сопо-

ставление обнаруженной структуры с данными других авторов, исследовавших распределение нейтрального водорода в этой области.

При вычислении следующих физических параметров оболочки НІ вокруг G78.2+2.1 было при-

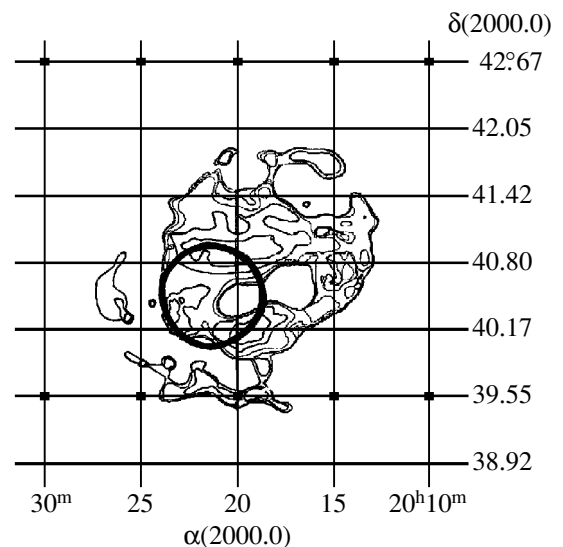


Рис. 2. Схематическое изображение остатка сверхновой G78.2+2.1 по данным Хиггса и др. (1977) на волне 21 см (жирный кружок) и изофоты рентгеновского излучения в диапазоне 0.5–2.0 кэВ согласно Лозинской и др. (2000). Масштабы по горизонтали и вертикали примерно одинаковы.

нято расстояние до остатка 1.5 кпк, найденное в работе Ландекера и др. (1980):

крупномасштабная скорость радиальных движений ≥ 10 км/с,

наружный диаметр 75 пк,

внутренний диаметр 55 пк,

концентрация газа 2.5 см^{-3} ,

масса оболочки $8.1 \times 10^3 M_{\odot}$.

Если оболочка НІ вокруг остатка сверхновой G72.2+2.1 является результатом воздействия на межзвездный газ ударной волны, инициированной взрывом сверхновой, то по наблюдаемым параметрам оболочки НІ можно оценить начальную энергию взрыва и возраст остатка. Необходимая для этого плотность невозмущенной межзвездной среды $n_0 \approx 1.6 \text{ см}^{-3}$ была найдена в работе Госачинского и др. (1999) в предположении, что газ оболочки НІ первоначально был “размазан” по всему ее объему. Было также принято, что наличие расширяющейся оболочки НІ вокруг остатка свидетельствует о том, что он находится в радиативной фазе. В этом случае, используя соотношения из работы Уилера и др. (1980), мы получили начальную энергию взрыва и возраст остатка сверхновой:

$$E_0 = 3 \times 10^{50} \text{ эрг}, \quad t = 1.1 \times 10^6 \text{ лет}.$$

Хотя найденная начальная энергия взрыва хорошо согласуется с общепринятым значением, возраст оказывается слишком большим для остатка, излучающего в рентгеновском диапазоне. В качестве альтернативного объяснения в работе Госачинского и др. (1999) сделано предположение, что протяженная медленная оболочка НІ может быть образована ветром звезды-предшественника сверхновой. Тогда, используя расчеты Уилера и др. (1977), по наблюдаемым параметрам оболочки НІ были оценены требуемые для ее образования мощность и продолжительность звездного ветра:

$$L_w = 10^{36} \text{ эрг} \quad \text{и} \quad t = 2.3 \times 10^6 \text{ лет}.$$

Такая мощность характерна для ветра ОВ-звезд с $M_{\text{нач}} \geq 8 M_{\odot}$, дающих вспышку сверхновой, а продолжительность действия ветра на порядок меньше времени жизни этих звезд на главной последовательности. Это подтверждает возможность образования внешней оболочки НІ вокруг остатка G78.2+2.1 под действием ветра звезды-предшественника сверхновой.

Данные по мягкому рентгеновскому излучению, полученные в работе Лозинской и др. (2000) в области остатка сверхновой G78.2+2.1 и приведенные на рис. 2, еще более запутывают картину. Наличие так называемой “внутренней” рентгеновской оболочки, состоящей из трех протяженных облаков и почти точно совпадающей с радиоостатком по координатам и угловым размерам,

еще можно как-то объяснить в случае, если остаток находится еще в адиабатической фазе (см. подробное обсуждение в работе Лозинской и др. (2000)). Слабая внешняя клочковатая рентгеновская оболочка (если, конечно, она реально существует) почти на 1° сдвинута от центра радиоостатка к северо-западу и, кроме того, почти в три раза больше его по угловым размерам, что также совершенно не соответствует размерам и положению оболочки НІ, обнаруженной в работе Госачинского и др. (1999). Следует, однако, заметить, что в последней работе связь оболочки НІ с остатком сверхновой согласно принятому расстоянию до остатка исследовалась только на близких к нулю лучевых скоростях. Очевидно, что необходимо исследовать характер распределения излучения НІ в гораздо более широком диапазоне лучевых скоростей.

Исследование возможной связи деталей распределения нейтрального водорода с упомянутыми выше объектами в радио, оптике и рентгене было проведено в диапазоне лучевых скоростей от -125 до $+35$ км/с. Оказалось, что, кроме отмеченных в работе Госачинского и др. (1999) деталей на положительных лучевых скоростях, есть еще интересная структура газа в диапазоне от -15 до -35 км/с. На рис. 3 приведено распределение деталей НІ в диапазоне лучевых скоростей от -20 до -30 км/с. Сравнение этой карты данных с рис. 2 показывает, что наблюдается отчетливая каверна или даже оболочка НІ, прекрасно совпадающая по координатам и угловым размерам с внешней рентгеновской оболочкой из работы Лозинской и др. (2000). Наблюдаемые параметры этой оболочки следующие:

координаты центра $\alpha(2000.0) = 20^{\text{h}}20.0^{\text{m}}$,
 $\delta(2000.0) = +40.8^\circ$;

угловой размер: наружный $3.7^\circ \times 4.7^\circ$, внутренний $2.5^\circ \times 3.5^\circ$;

средняя яркостная температура линии $12.0 \pm 0.5 \text{ К}$;

средняя лучевая скорость -25 км/с;

Диапазон лучевых скоростей, в котором наблюдается оболочка ± 10 км/с.

Следует также заметить, что максимальные угловые размеры оболочки наблюдаются на лучевой скорости -25 км/с, что позволяет считать именно эту скорость средней для объекта. На меньших и на больших лучевых скоростях угловые размеры кольцевой структуры уменьшаются, а центр несколько смещается по прямому восхождению. Такая структура изофот характерна для оболочки, имеющей крупномасштабную радиальную компоненту скорости (расширение) и вращательное движение. Тем не менее следует заметить, что каверна не вполне круглая и имеет вытянутость с севера на юг, что не позволяет уверенно интерпретировать ее, как расширяющуюся

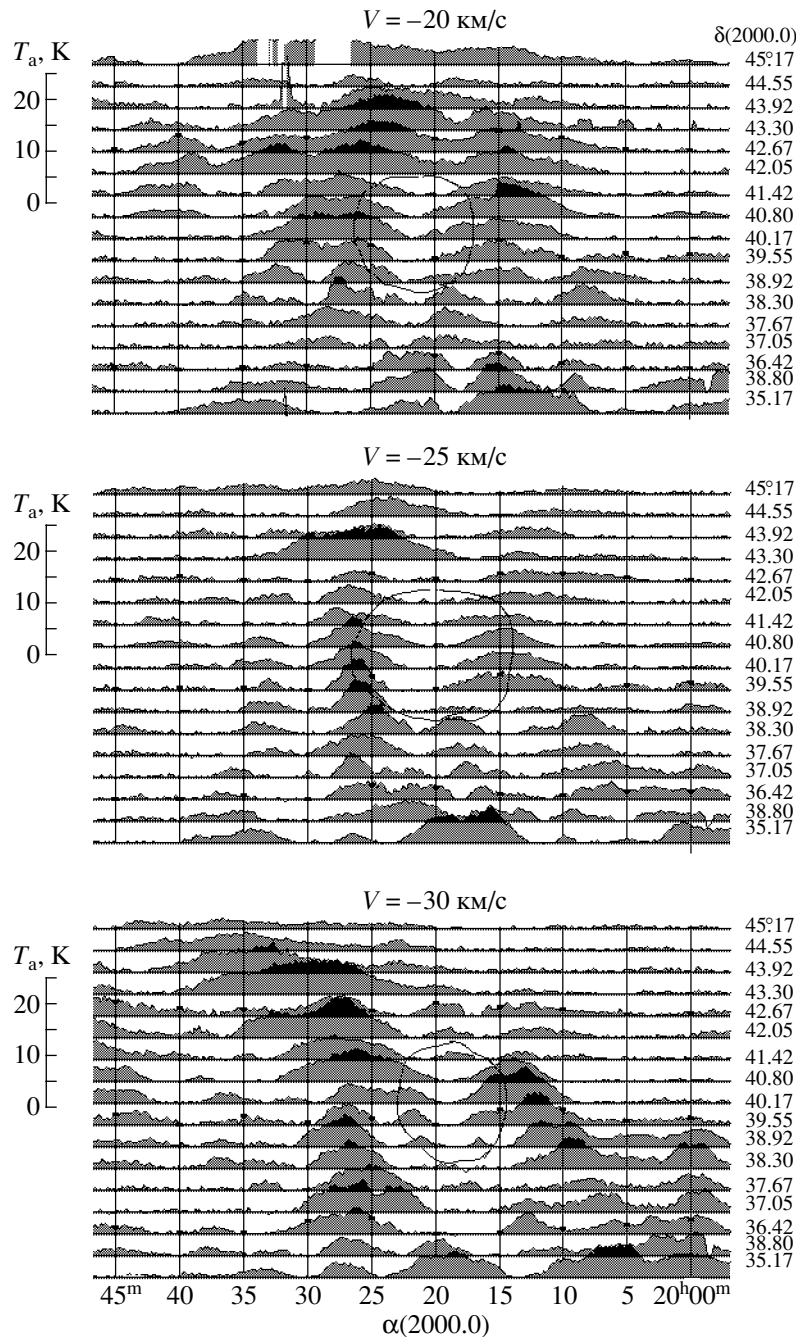


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но на лучевых скоростях -20 , -25 и -30 км/с. Тонкими линиями отмечена каверна, совпадающая по координатам с внешней рентгеновской оболочкой, обнаруженной Лозинской и др. (2000) и изображенной на рис. 2.

оболочку. Однако в обследованном диапазоне лучевых скоростей мы не смогли обнаружить других деталей HI, морфология которых так хорошо соответствовала бы внешней рентгеновской оболочке, обнаруженной Лозинской и др. (2000).

Реальность обнаруженной нами кольцевой структуры в распределении излучения HI можно проверить, например, по данным обзора Вестер-

хаута и Вендландта (1982), сделанного на 90-м радиотелескопе НРАО США с угловым разрешением $12'$ и разрешением по лучевым скоростям 2 км/с. Данные этого обзора теперь доступны в сети Интернет в архиве астрономических данных ADS в Страсбурге. На рис. 4 приведены сечения по галактической долготе яркостной температуры линии HI, взятые из этого обзора на широте источника $b = +2.1^\circ$ в диапазоне лучевых скоростей от

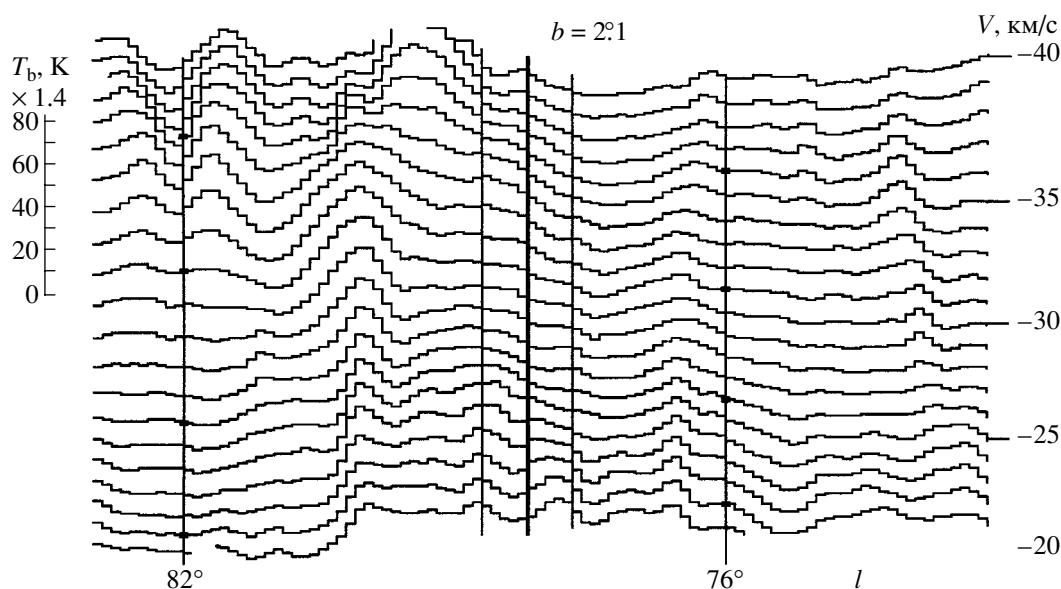


Рис. 4. Распределение яркостной температуры линии НІ в окрестности остатка G78.2+2.1 по данным обзора Вестерхаута и Вендландта (1982) с угловым разрешением $12'$ и разрешением по лучевым скоростям 2 км/с . Указан центр источника (жирная линия) и размеры по “нулевому” уровню яркостной температуры по данным Райха и др. (1990) на волне 11 см .

–20.0 до –40.0 км/с. Жирной вертикальной линией отмечено положение центра остатка сверхновой, а тонкими линиями – его размеры по “нулевому” уровню радиояркости в непрерывном спектре по данным Райха и др. (1990). Наличие уменьшения яркости линии НІ к юго-западу от остатка на долготах $76\text{--}77^\circ$ очевидно. Максимум этого явления приходится примерно на лучевые скорости около –30 км/с. Конечно, в деталях распределение яркости НІ по данным Вестерхаута и Вендландта (1982) отличается от нашего, особенно средняя лучевая скорость каверны на сечениях, приведенных на рис. 4. Это можно объяснить, во-первых, существенным различием формы диаграмм направленности антенн, а также различным разрешением по лучевым скоростям и, во-вторых, тем, что в обзоре Вестерхаута и Вендландта (1982) приведены данные только по юго-восточной части каверны до $b = +2.4^\circ$.

В работе Лозинской и др. (2000) приведены результаты измерений лучевых скоростей линии НІ в области остатка сверхновой G78.2+2.1. Оказалось, что за пределами яркого остатка, но внутри внешней слабой рентгеновской оболочки наблюдается вторичный максимум профиля линии в диапазоне лучевых скоростей от –20 до –45 км/с, что хорошо соответствует диапазону скоростей обнаруженной нами оболочки НІ и подтверждает ее реальность. Лозинская и др. (2000), однако, отмечают, что указанный диапазон скоростей наблюдается в профилях линии НІ и в более широкой области источника Лебедь X.

Возникает вопрос о взаимосвязи двух объектов, которые можно характеризовать как остаток сверхновой, с одной стороны, и как внешнюю рентгеновскую оболочку большого диаметра – с другой. Объекты, расположенные в рукаве Ориона–Лебедя, имеют в исследуемой области галактических долгот лучевые скорости галактического вращения в пределах $\pm 5 \text{ км/с}$ при любых моделях галактического вращения (см. Бартон, Гордон 1978; Керр, Линден Белл; 1986). При учете пекулярных скоростей и систематических некруговых движений этот диапазон увеличивается до $\pm 15 \text{ км/с}$. Лучевая скорость –25 км/с выходит за пределы этого диапазона весьма существенно и формально соответствует расстоянию от Солнца 6 кпк в самой компактной модели галактического вращения Глушковой и др. (1998).

Можно, конечно, предполагать, что пространственно эти объекты совмещены, а разность лучевых скоростей объясняется их внутренней кинематикой, например радиальными движениями. Однако никаких следов взаимодействия этих объектов в распределении нейтрального водорода на лучевых скоростях между +3 и –25 км/с незаметно. Поэтому с нашей точки зрения, наиболее вероятно случайная проекция этих объектов, что не слишком удивительно в области, столь богатой объектами разной природы: сам остаток G78.2+2.1 проецируется на тепловой комплекс Лебедь X, а известная газовая туманность вокруг звезды γ Лебедя – на оболочку остатка сверхновой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, тщательное исследование распределения нейтрального водорода в области остатка сверхновой G78.2+2.1 в широком диапазоне лучевых скоростей показало, что имеется протяженная расширяющаяся эллиптическая оболочка HI диаметром $\approx 3^\circ$ на лучевых скоростях от -10 до -25 км/с, хорошо совпадающая по координатам и угловым размерам с внешней рентгеновской оболочкой из работы Лозинской и др. (2000). Излучение линии H α , исследованное в этой работе в области остатка сверхновой, также имеет вторичный максимум внутри внешней оболочки на лучевых скоростях от -45 до -20 км/с. Поскольку лучевые скорости остатка сверхновой вместе с внутренней рентгеновской оболочкой и внешней рентгеновской оболочкой вместе с оболочкой HI и областями, излучающими линию H α , значительно различаются, можно предполагать, что различаются и их расстояния, т.е. наблюдается случайная проекция двух разных объектов, что для исследуемой области в созвездии Лебедь не является удивительным. Конечно, если в результате дальнейших наблюдений во всех диапазонах обнаружатся несомненные свидетельства физической связи этих замечательных объектов, эту самую простейшую интерпретацию придется отвергнуть.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 96-02-16565 и 97-02-16032) и программы “Астрономия” (проект 1.3.1.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бартон, Гордон (Burton W.B., Gordon M.A.) // *Astron. Astrophys.*, 1978, v. 63, p.7.
- Венгер А.П., Госачинский И.В., Грачев В.Г., Рыжков Н.Ф. // *Изв. САО*, 1979, т. 14, с. 118.
- Вестерхаут, Вендландт (Westerhout G., Wendlandt H.U.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1982, v. 49, p. 137.
- Глушкова и др. (Glushkova E.V., Dambis A.K., Mel'nik A.M., Rastorguev A.S.) // *Astron. Astrophys.*, 1998, v. 329, p. 514.
- Госачинский И.В., Лозинская Т.А., Правдикова В.В. // *Астрон. журн.*, 1999, т. 76, с. 453.
- Грин (Green D.A.) // *Supernovae and Supernova Remnants*, Proc. IAU Col. N 145, eds McCray R., Wang Z., (Cambridge University Press), 1996, p. 419.
- Керр, Линден Белл (Kerr F.G., Linden Bell D.) // *MNRAS*, 1986, v. 221, p. 1023.
- Ландекер и др. (Landecker T.L., Roger R.S., Higgs L.A.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1980, v. 39, p. 133.
- Лозинская Т.А., Правдикова В.В., Финогенов А.В. // Письма в Астрон. журн., 2000, т. 26, с. 102.
- Пипенбринк, Вендкер (Piepenbrink A., Wendker H.J.) // *Astron. Astrophys.*, 1988, v. 191, p. 313.
- Райх и др. (Reich W., Fuerst E., Reich P., Reif K.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1990, v. 85, p. 633.
- Уивер и др. (Weaver R., McCray R., Castor J., Shapiro P., Moore R.) // *Astrophys. J.*, 1977, v. 218, p.377.
- Уилер и др. (Wheeler J.C., Masurek T.J., Sivaramakrishnan A.) // *Astrophys. J.*, 1980, v. 237, p. 781.
- Хиггс и др. (Higgs L.A., Landecker T.L., Roger R.S.) // *Astron. J.*, 1977, v. 82, p. 718.