

УДК 524.52

## ДИФФУЗНЫЙ ИОНИЗОВАННЫЙ ГАЗ В НАПРАВЛЕНИЯХ НА ОСТАТОК СВЕРХНОВОЙ Kes 79 И ПУЛЬСАР В1849+00

© 2020 г. А. В. Пынзарь<sup>1, \*</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пушкино, Россия

\*e-mail: pynz@prao.ru

Поступила в редакцию 24.03.2020 г.

После доработки 15.04.2020 г.

Принята к публикации 30.04.2020 г.

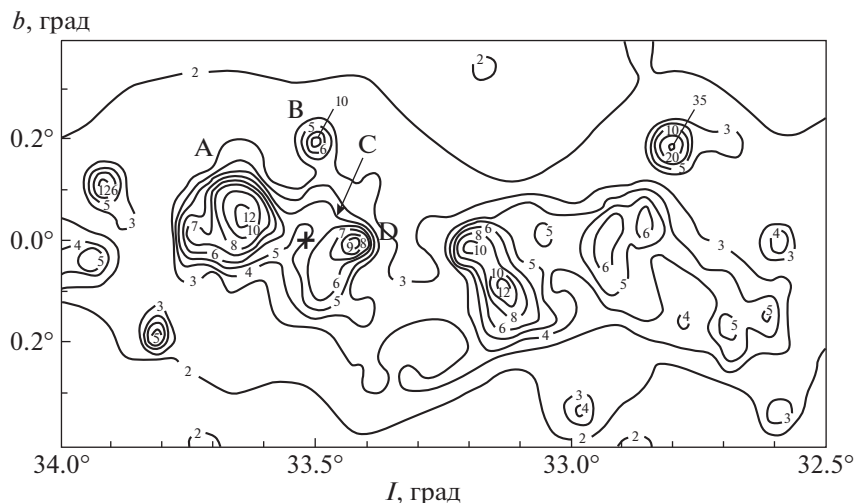
На основе пространственной корреляции между распределениями диффузного ионизованного газа (ДИГ) и областей НП в Галактике и литературных данных наблюдений галактического фона в линии H166 $\alpha$  проводится исследование сильной неоднородности ДИГ в направлении долготы 33.5° вблизи плоскости Галактики, где объекты, расположенные на близких угловых расстояниях друг от друга, имеют сильно различающиеся наблюдаемые параметры, обусловленные ДИГ. Показано, что отсутствие завала спектра на частоте 30.9 МГц у остатка сверхновой Kes 79 (G33.6+0.1) объясняется тем, что между ним и наблюдателем находится незначительное количество ионизованного газа. Большое значение уширения импульсов пульсара В1849+00 ( $\tau_{\text{psr}} = 0.86$  с на частоте 1 ГГц), расположенного на угловом расстоянии 10' от центра Kes 79 объясняется двумя факторами. Во-первых, в направлении на пульсар расположена область НП (G33.46+0.06) с мерой эмиссии около 2900 пк/см<sup>6</sup>, которая дает вклад в меру дисперсии пульсара менее 32% и около 50% в уширение его импульсов, при том, что значение меры эмиссии ионизованного газа, расположенного между наблюдателем и пульсаром,  $\approx 6150$  пк/см<sup>6</sup>. Во-вторых, наибольший вклад в уширение его импульсов дает ионизованный газ, расположенный примерно на середине расстояния между пульсаром и наблюдателем, что согласуется с теорией рассеяния. Остаток сверхновой Kes 79, который расположен ближе к наблюдателю, чем пульсар В1849+00, не оказывает заметного влияния на рассеяние излучения пульсара и компактного внегалактического источника В1849+005. Установлено, что расстояние до пульсара В1849+00 находится в пределах от 9.8 до 11.5 кпк.

DOI: 10.31857/S0004629920090030

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В направлении долготы 33.5° вблизи плоскости Галактики наблюдается сильная неоднородность диффузного ионизованного газа (ДИГ). Объекты, расположенные на близких угловых расстояниях друг от друга, имеют сильно различающиеся наблюдаемые параметры, обусловленные диффузным ионизованным газом. В этом направлении наблюдается остаток сверхновой (ОСН) Kes 79 (G33.6+0.1) [1]. На угловом расстоянии 10' от его центра наблюдается пульсар В1849+00 (G33.5+0.02) с мерой дисперсии 787 пк/см<sup>3</sup> и уширением импульсов 0.86 с [2] на частоте 1 ГГц. Уширение импульсов у этого пульсара является вторым по величине в Галактике после пульсара J1745-2900, расположенного вблизи галактического центра [3]. На угловом расстоянии 16' от центра остатка сверхновой Kes 79 наблюдается компактный внегалактический радиоисточник В1849+005 (G33.5+0.2) [1], у

которого угол рассеяния на частоте 1 ГГц равен 0.50" [4]. Угол рассеяния этого источника является четвертым по величине среди внегалактических радиоисточников [5], исключая источники, наблюдаемые в направлениях, близких к центру Галактики [6]. Сказанное свидетельствует, что в направлениях на пульсар В1849+00 и внегалактический радиоисточник В1849+005 имеются области ДИГ с большой электронной концентрацией. В то же время у остатка сверхновой Kes 79 на самой низкой частоте 30.9 МГц, на которой он наблюдался, не обнаружен завал спектра, обусловленный поглощением его излучения ионизованным газом [7, 8], что свидетельствует о незначительном количестве ионизованного газа между ним и наблюдателем. В данной работе проводятся исследования ионизованного газа в направлениях на эти объекты.



**Рис. 1.** Фрагмент карты из обзора плоскости Галактики в интервале галактических долгот  $32.5^\circ$ – $34^\circ$ , проведенного на Боннском 100-м радиотелескопе на частоте 4875 МГц [9]. Контурная единица равна 0.1 Ян или 0.2 К, разрешение –  $2.6'$ . Буквами обозначены следующие объекты: А – остаток сверхновой Kes 79, В – внегалактический источник B1849+005, С – HII-область G33.46+0.06, D – HII-область G33.418-0.04, крестиком обозначен пульсар B1849+00.

## 2. РАДИОИСТОЧНИКИ ВБЛИЗИ ДОЛГОТЫ $33.5^\circ$ И МЕРА ЭМИССИИ ФОНА В НАПРАВЛЕНИЯХ НА НИХ

На рис. 1 показан фрагмент карты из обзора галактической плоскости, проведенного на Боннском 100-м радиотелескопе на частоте 4875 МГц [9]. Контурная единица равна 0.1 Ян или 0.2 К, разрешение –  $2.6'$ . На рисунке видно, что вблизи долготы  $33.5^\circ$  наблюдается скопление из пяти радиоисточников. Буквами обозначены следующие источники: А – остаток сверхновой Kes 79, В – внегалактический источник B1849+005, С – HII-область G33.46+0.06, D – HII-область G33.418-0.04. Крестиком обозначен пульсар B1849+00.

Используя данные измерений фона Галактики на частотах 1.4, 2.7, 5 и 10 ГГц [9–14] и методику, изложенную в работах [5, 6], при предположении, что электронная температура  $T_e = 7000$  К [15], в направлениях некоторых из этих объектов мы определили меру эмиссии EM. Значения меры эмиссии равны  $4500 \pm 600$  пк/см<sup>6</sup>,  $6900 \pm 500$  пк/см<sup>6</sup> и  $3300 \pm 400$  пк/см<sup>6</sup> в направлениях на остаток сверхновой Kes 79, пульсар B1849+00 и внегалактический источник B1849+005 соответственно. Эти значения меры эмиссии обусловлены ионизованным газом на протяжении всей Галактики в направлениях на источники.

## 3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА В НАПРАВЛЕНИИ НА ОСТАТОК СВЕРХНОВОЙ KES 79

### 3.1. Мера эмиссии и электронная концентрация газа, расположенного между OCH Kes 79 и наблюдателем

Поскольку у остатка сверхновой Kes 79 не обнаружен низкочастотный завал спектра [7.8], представляет интерес определить меру эмиссии и значение электронной концентрации ионизованного газа, расположенного между наблюдателем и этим OCH. Для этого нужно знать оптическую толщину этого газа  $\tau_{\text{snr}}$ , его электронную температуру и расстояние до остатка сверхновой. Оптическая толщина оценивается из наблюдений завала спектра на низких частотах [7].

Поскольку спектры остатков сверхновых – степенные [7], значения  $\tau_{\text{snr}}$  определяются путем сравнения наблюдаемых значений плотностей потока на низких частотах этих объектов со спектрами, построенными на более высоких частотах и продолженными линейно (в логарифмическом масштабе) до низких частот.

Наблюдаемые  $S_{\text{H}}$  и истинные  $S_0$  значения плотностей потоков остатков сверхновых на частоте  $\nu$  связаны соотношением

$$S_{\text{H}} = S_0 e^{-\tau}, \quad (1)$$

где значение оптической толщины  $\tau = \tau_{\text{snr}}$  на частоте  $\nu$  связано с электронной температурой  $T_e$  и

мерой эмиссии EM ионизованной среды соотношением [16]:

$$\tau_{\text{sn}} = 0.0835 T_e^{-1.35} (\text{K}) v^{-2.1} (\text{ГГц}) \text{EM} (\text{пк/см}^6). \quad (2)$$

По формуле (2) определим значение меры эмиссии ионизованного газа, расположенного между остатком сверхновой Kes 79 и наблюдателем. Предполагая значение  $T_e = 7000 \text{ K}$  [15] и взяв  $\tau_{\text{snr}}$  на самой низкой частоте 30.9 МГц, на которой наблюдался остаток сверхновой [7], равным  $\tau_{\text{snr}} \leq 0.3 \pm 0.2$  [7, 8], получим по формуле (2), что мера эмиссии ионизованного газа, расположенного между ним и наблюдателем,  $\text{EM} \leq 400 \pm 250 \text{ пак/см}^6$ , что значительно меньше указанного выше значения меры эмиссии газа на протяжении всей Галактики в этом направлении ( $4500 \pm 600 \text{ пак/см}^6$ ). Поскольку этот ОСН находится на достаточно большом расстоянии  $\approx 7 \text{ кпк}$  [8, 17] и мера эмиссии газа в пространстве между ним и наблюдателем  $\leq 400 \text{ пак/см}^6$ , приходим к выводу, что ионизованный газ, расположенный между ним и наблюдателем, довольно разреженный.

Оценим значение электронной концентрации этого газа. По мере эмиссии и расстоянию до этого объекта находим среднеквадратичное значение электронной концентрации  $(\langle N_e^2 \rangle)^{0.5} \leq 0.24 \text{ см}^{-3}$ . Взяв фактор заполнения для электронов в этом направлении  $\approx 0.1$  [18], получим, что среднее значение электронной концентрации газа, расположенного между остатком сверхновой Kes 79 и наблюдателем,  $\leq 0.024 \text{ см}^{-3}$ . Как будет показано ниже, эти данные подтверждаются как наблюдениями НП-областей [19], так и наблюдениями теплового излучения фона Галактики в рекомбинационных линиях [20–23].

### 3.2. Распределение диффузного ионизованного газа в направлении на ОСН Kes 79

В работах [20–31] показано, что существует высокая пространственная корреляция между распределениями областей НП и ДИГ. Была выдвинута гипотеза [28–30], что часть  $L_c$ -квантов (квантов с длиной волны  $< 912 \text{ ангстрем}$ ) из-за неоднородного распределения газа в областях НП уходит в межзвездное пространство [28, 29]. Благодаря неоднородному распределению нейтрального водорода и наличию в среде горячих коридоров и сверхоболочек, в которых температура  $T \approx 10^6 \text{ K}$  и электронная концентрация  $N_e \approx 10^{-3} \text{ см}^{-3}$  [32], эти фотоны уходят далеко от их места рождения и способны ионизовать газ на больших расстояниях от источников ионизации [28, 29].

На основе упомянутой корреляции и данных наблюдений теплового фона Галактики определим параметры ДИГ в направлении остатка сверхновой Kes 79. Для этого мы используем ка-

талог областей НП [19] и данные наблюдений фона Галактики в линии H166 $\alpha$  [20].

Из каталога областей НП [19] были выбраны источники, у которых измерены скорости  $V$ , определены расстояния  $D$  и параметры возбуждения  $U$ . Расстояния определены, используя кривую вращения Галактики с  $V_0 = 220 \text{ км/с}$ , и расстоянием до галактического центра  $R_0 = 8.5 \text{ кпк}$  [33]. Сначала были определены значения угловых расстояний  $\phi$  и прицельных расстояний  $p$  для каждой области НП до луча зрения в данном направлении. Затем для каждой области НП с параметром возбуждения  $U$  были определены значения отношения  $a = U^3/p^2$ .

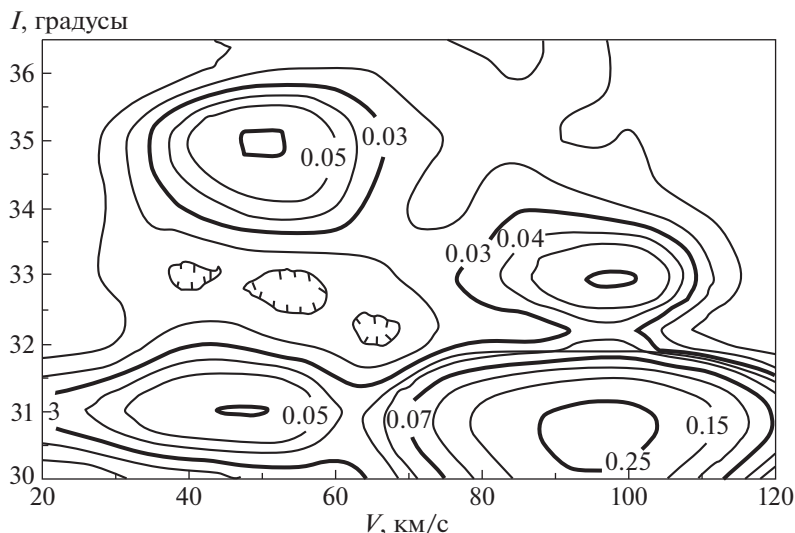
Параметр  $a$  пропорционален плотности потока  $L_c$ -квантов от данной области НП, которые достигли данного луча зрения. Рассматривались только области НП, расположенные в радиусе  $5^\circ$  от направления на остаток сверхновой. Анализ показывает, что вклад областей НП, расположенных на угловых расстояниях больше  $5^\circ$  от указанного направления, составляет меньше 1%–3%. Более подробно методика выбора областей НП из каталога [19] изложена в [31].

Поиск связи между областями НП и ДИГ проводился путем сравнения распределений областей НП и антенной температуры фона  $T_A$  в линии H166 $\alpha$  в координатах скорость – галактическая долгота (рис. 2, 4). Так как  $T_A$  и параметр возбуждения областей НП пропорциональны мере эмиссии фона [22, 23, 32], то такое сравнение оправдано. Данные измерений яркости фона в линии H166 $\alpha$  получены на широте  $b = 0^\circ$  для галактических долгот  $4^\circ$ – $46^\circ$  с интервалом по долготе  $1^\circ$  в работе [20] с разрешением  $21'$ . Данные о НП-областях получены вблизи частот 5 и 8.6 ГГц [19].

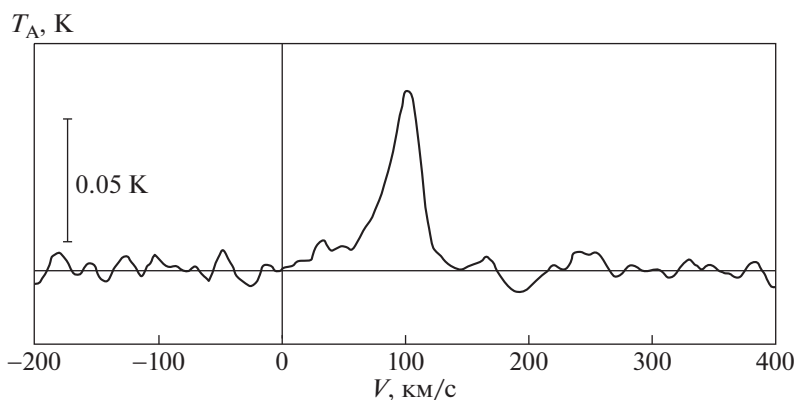
Данные о распределении антенной температуры фона в линии H166 $\alpha$  в координатах скорость – галактическая долгота в интервале долгот  $30^\circ$ – $36^\circ$  взяты из [20] и приведены на рис. 2. Цифры около изофот на рис. 2 обозначают антенную температуру фона в линии H166 $\alpha$  в градусах Кельвина. Как в [19], так и в [20] скорости приведены к локальному стандарту покоя.

На рис. 3 показана линия H166 $\alpha$ , наблюдавшаяся автором [20] в направлении долготы  $33^\circ$  на широте  $b = 0^\circ$ . Из анализа данных, приведенных на рис. 2 и 3, следует, что тепловое излучение фона Галактики в направлении долгот  $32^\circ 5'$  –  $33^\circ 5'$  довольно слабое на скоростях  $< 75 \text{ км/с}$ . При скоростях  $> 75 \text{ км/с}$  излучение фона резко возрастает, достигая максимума при скорости около  $100 \text{ км/с}$  [20, 22].

На рис. 4 показано распределение областей НП в координатах скорость–расстояние в радиусе  $5^\circ$  от направления на ОСН Kes 79. Значения параметра  $a$  на рис. 4 обозначены различными значка-



**Рис. 2.** Распределение антенной температуры фона в линии N166 $\alpha$  в координатах скорость – галактическая долгота для галактических долгот  $l = 30^\circ\text{--}36^\circ$  и  $b = 0^\circ$ . Цифры около изофот обозначают антенную температуру фона в линии N166 $\alpha$  в кельвинах. Данные взяты из работы [20].



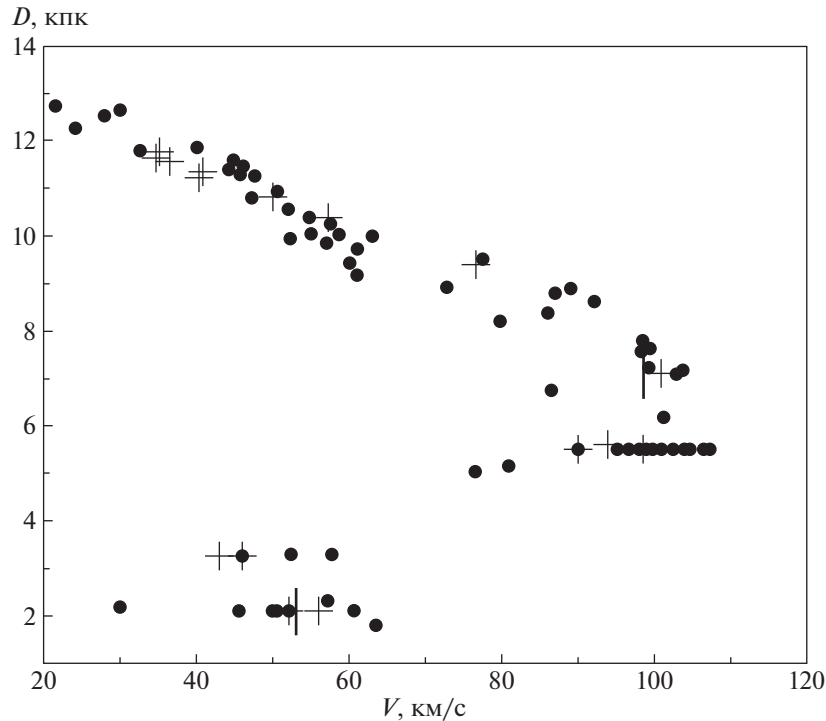
**Рис. 3.** Спектральная линия N166 $\alpha$  в плоскости Галактики ( $b = 0$ ) на долготе  $33^\circ$ . Рисунок взят из работы [20].

ми. Вертикальные черточки соответствуют значениям параметра  $a > 100$  пк/см<sup>6</sup>, крестики –  $a = 10\text{--}100$  пк/см<sup>6</sup>, темные кружочки –  $a = 1\text{--}10$  пк/см<sup>6</sup>. Слабые области НП с параметром  $a < 1$  пк/см<sup>6</sup> были отброшены с целью получения более четкой картины распределения наиболее ярких источников по расстояниям.

В работе [17] показано, что Kes 79 находится на расстоянии 7.1 кпк, а в [8] утверждается, что этот остаток сверхновой расположен либо на расстоянии 6.5 кпк, либо на расстоянии 7.5 кпк. Мы предполагаем, что остаток сверхновой Kes 79 расположен на расстоянии 6.5 кпк. Если бы этот ОСН находился на расстоянии 7.5 кпк, у него был бы значительный завал спектра на низких частотах из-за поглощения ионизованным газом вбли-

зи ярких областей НП, расположенных на расстоянии около 7 кпк (рис. 4) вблизи тангенциальной точки на скоростях  $\approx 100$  км/с, где наблюдается максимум излучения в линии N166 $\alpha$  [20, 22].

Таким образом, отсутствие завала спектра у остатка сверхновой Kes 79 обусловлено тем, что между этим объектом и наблюдателем расположено слишком мало ионизованного газа. Это подтверждается как наблюдениями интенсивности фона в линии N166 $\alpha$  (рис. 2, 3), где на скоростях  $< 75$  км/с излучение в этой линии довольно слабое, так и отсутствием низкочастотного завала спектра у близкого к Kes 79 остатка сверхновой Kes 78 (G32.8-0.1), который находится на расстоянии 4.8 кпк [34] и расположен от Kes 79 на угловом расстоянии  $0.8^\circ$ .



**Рис. 4.** Распределение областей НII в координатах скорость – расстояние в направлении остатка сверхновой Kes 79 (G33.6+0.1). Значения параметра  $a = U^3/p^2$  обозначены различными значками: вертикальные черточки соответствуют значениям параметра  $a > 100$  пк см<sup>-6</sup>, крестики –  $a = 10-100$  пк см<sup>-6</sup>, темные кружочки –  $a = 1-10$  пк см<sup>-6</sup>.

Взяв для остатка сверхновой Kes 78  $\tau_{\text{snr}} \leq 0.2$  на частоте 30.9 МГц [7] и предполагая значение  $T_e = 7000$  К [15], получим по формуле (2), что значения меры эмиссии ионизованного газа, расположенного между остатком сверхновой Kes 78 и наблюдателем,  $EM \leq 250$  пк/см<sup>6</sup>.

Отсутствие низкочастотного завала спектра у Kes 78 свидетельствует также о том, что скопление областей НII, расположенное на расстоянии 2–4 кпк (рис. 4, 5), дает незначительный вклад в ионизацию газа в направлениях долгот 32.8°–33.6°.

В интервале скоростей 28–75 км/с на рис. 4 видны два скопления областей НII, одно из которых находится на расстоянии 2–4 кпк, а другое – на расстоянии 9–12 кпк. В направлении первого скопления наблюдается повышенная концентрация нейтрального водорода, о чем можно судить по наличию самой сильной детали в спектрах поглощения в линии 21 см в направлениях на ОСН Kes 79, пульсар В1849+00, внегалактические источники В1849+005 и В1850+009 [1]. Поскольку распределение газа коррелирует с распределением пыли, нельзя исключить и наличие повышенной концентрации пыли вблизи этих областей НII. Такое предположение объяснило бы и факт отсутствия в этих направлениях оптических областей НII [35, 36]. В связи с этим можно предпола-

гать, что излучение от областей НII этого скопления не доходит до луча зрения в направлении на ОСН Kes 79, поэтому слабое излучение в линии Н166α на скоростях <75 км/с обусловлено скорее всего ионизованным газом, находящимся на расстояниях от 9 до 12 кпк (рис. 4).

#### 4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИГ В НАПРАВЛЕНИИ НА ПУЛЬСАР В1849+00

##### 4.1. Расстояние до пульсара В1849+00 по наблюдениям поглощения в линии 21 см

Поскольку угловое расстояние между ОСН Kes 79 и пульсаром В1849+00 составляет только около 10', можно предполагать, что распределения областей НII в направлениях на эти объекты идентичны. На основании вышеизложенного можно утверждать, что в направлении долготы 33.5° основной вклад в излучение ДИГ в линии Н166α [20, 22], уширение импульсов пульсара В1849+00 и угол рассеяния внегалактического источника В1849+005 дает ионизованный газ, расположенный в интервале расстояний 5.5–9.5 кпк от наблюдателя. Как указано выше, мера эмиссии в направлении на пульсар В1849+00, обусловленная газом на протяжении всей Галактики в этом направлении, равна  $6900 \pm 500$  см<sup>-3</sup>. Для исследования распределения ДИГ в направ-

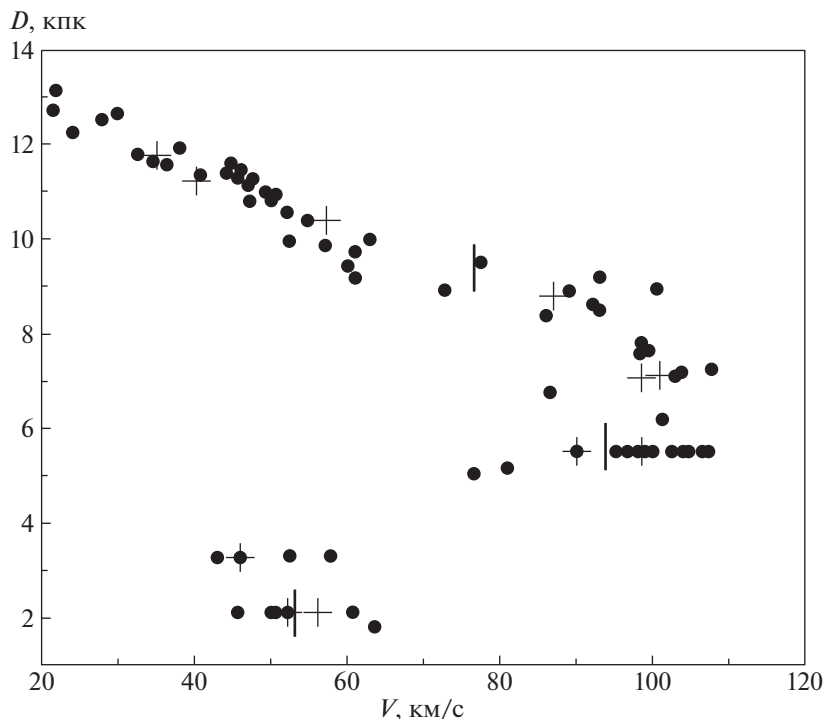


Рис. 5. Распределение областей НII в координатах скорость – расстояние в направлении пульсара В1849+00 (G33.52+0.017). Обозначения параметра  $a$  такие же, как на рис. 4.

лении на пульсар важно знать расстояние до него. Это нужно, чтобы понять, какое количество ярких областей НII (рис. 5) расположены между наблюдателем и пульсаром и какова интенсивность излучения газа, ионизованного ими (рис. 2, 3).

Впервые расстояние до пульсара В1849+00 было оценено в работе [37] по наблюдениям поглощения в линии 21 см. Авторы этой работы дают оценку расстояния до пульсара 8–22 кпк при предположении, что расстояние до центра Галактики равно 10 кпк. Однако существуют другие интерпретации этих наблюдений [38, 39].

В работе [38] приводят оценку расстояния до этого пульсара от  $7.1 \pm 1.2$  кпк до  $16.6 \pm 0.9$  кпк, тогда как авторы [39] считают, что расстояние до него равно  $8 \pm 2$  кпк. В этих двух работах принималось, что расстояние до центра Галактики  $R_0 = 8.5$  кпк. Как показано в [37], пульсар расположен дальше тангенциального расстояния, которое при  $R_0 = 8.5$  кпк  $\approx 7$  кпк (рис. 4, 5).

Оценим расстояние до пульсара В1849+00 другим методом. Для этого мы используем данные наблюдений поглощения нейтральным водородом на волне 21 см излучения этого пульсара, внегалактического источника В1849+005 и остатка сверхновой Kes 79, используя методику, предложенную авторами работы [1]. В этой работе предложено оценивать расстояния до галактических источников, используя отношение интегралов от

оптической толщины  $\tau_{\text{НII}}$  по скорости ( $\Delta V = \int \tau_{\text{НII}} dV$ ) источников, близко расположенных по угловому расстоянию, если до некоторых из них известны расстояния. Поскольку пульсар находится на угловом расстоянии  $10.3'$  от остатка сверхновой Kes 79 и  $10.7'$  от внегалактического источника В1849+005, можно предполагать, что параметры нейтрального водорода в направлениях этих объектов не сильно различаются. Значения этих интегралов для остатка сверхновой Kes 79, пульсара В1849+00 и внегалактического источника В1849+005 равны 48 км/с, 72 км/с и 139 км/с соответственно [1]. Можно предполагать, что величины этих интегралов пропорциональны толщинам поглощающей среды НII в направлениях на источники [1]. Взяв толщину поглощающего слоя нейтрального водорода в направлении внегалактического источника В1849+005 равной 19 кпк [1] по отношению интегралов  $\Delta V$  в направлениях на источник В1849+005 и на пульсар В1849+00, получим оценку для расстояния до пульсара  $\approx 9.8$  кпк. Как указывалось выше, расстояние до остатка сверхновой Kes 79  $\approx 6.5$  кпк [8]. По отношению значений этих интегралов в направлениях на остаток сверхновой Kes 79 и на пульсар В1849+00 получим оценку для расстояния до пульсара  $\approx 10.5$  кпк. Таким образом, оценка расстояния до пульсара, полученная этим методом, заключена в пределах 9.8–10.5 кпк.

#### 4.2. Оценка расстояния до пульсара B1849+00 по наблюдениям межзвездного рассеяния

Для исследования распределения ДИГ в направлении на пульсар B1849+00 важно уточнить расстояние до него, поскольку оценки расстояния до него у авторов [37–39] и полученными выше в данной работе сильно расходятся. Оценим расстояние до пульсара еще одним методом, который основан на использовании данных об уширении его импульсов  $\tau_{\text{psr}}$  из-за межзвездного рассеяния. Для этого используем следующую формулу [40]:

$$\tau_{\text{psr}} = (\theta^2 L / (8c D \ln 2)) (D(k + 0.5) - L(k^2 + k + 1/3)), \quad (3)$$

где  $L$  – толщина слоя рассеивающей среды в направлении на пульсар,  $k$  – отношение расстояния от пульсара до ближнего к пульсару края рассеивающего слоя толщины  $L$  к толщине слоя (если пульсар находится внутри слоя, то  $k = 0$ ),  $c$  – скорость света,  $D$  – расстояние от наблюдателя до пульсара, а  $\theta$  – угол рассеяния (ширина по уровню 0.5) компактного источника плоских волн, например, внегалактического источника, излучение от которого просвечивает тот же слой рассеивающей среды, что и источник сферических волн (в данном случае пульсар). Эта формула связывает уширение импульсов пульсаров с углом рассеяния внегалактического источника, излучение от которых проходит через одни и те же слои рассеивающей среды. Если толщина эффективного слоя рассеивающей среды много меньше расстояния от наблюдателя до пульсара и от рассеивающего слоя до пульсара, то в выражении (3)  $k^2 \gg (k + 1/3)$  и  $L \ll D$ , откуда следует (см., например, [41]), что выражение для  $\tau_{\text{psr}}$  имеет вид:

$$\tau_{\text{psr}} = (\theta^2 / 8c \ln 2) d(D - d) / D, \quad (4)$$

где  $d$  – расстояние от наблюдателя до слоя рассеивающей среды. Из формулы (4) видно, что уширение импульсов пульсаров зависит от величины множителя  $d(D - d) / D$ . Этот множитель близок к нулю как для слоя вблизи пульсара ( $D - d \approx 0$ ), так и для слоя вблизи наблюдателя ( $d \approx 0$ ) и достигает максимума, когда рассеивающая среда расположена на середине расстояния между наблюдателем и пульсаром ( $d = D/2$ ).

Так как угол рассеяния плоских волн пропорционален мере эмиссии фона в направлении на него [5, 6], то при оценке расстояния до пульсара B1849+00 по формуле (3) было решено вычислять угол рассеяния плоских волн в направлении на пульсар, используя значение меры эмиссии в направлении на него и зависимость угла рассеяния внегалактических источников от меры эмиссии. Поскольку в формулу (3) входит квадрат угла рассеяния плоских волн, то мы построили зависи-

мость квадрата угла рассеяния внегалактических источников от меры эмиссии галактического фона в направлениях на них. С помощью этой зависимости можно по мере эмиссии фона в направлении на пульсар B1849+00 оценивать значение квадрата угла рассеяния.

В табл. 1 приведены данные об углах рассеяния на частоте 1 ГГц 33 внегалактических источников и значения меры эмиссии в направлениях на них. Углы рассеяния приведены к частоте 1 ГГц либо по зависимости угла рассеяния от частоты, если имеются измерения угла рассеяния на нескольких частотах, либо по квадрату длины волны, если измерения проведены только на одной частоте.

В столбцах приведены: 1 – название источника; 2 и 3 – его галактические координаты; 4 и 5 – угол рассеяния на частоте 1 ГГц в секундах дуги и его ошибка; 6 – значение меры эмиссии в направлении на источник; 7 – ошибка меры эмиссии; 8 – ссылка на работу, откуда взяты значения углов рассеяния.

Зависимость квадрата угла рассеяния этих источников от меры эмиссии в направлениях на них приведена на рис. 6. Она аппроксимируется степенной функцией:

$$\theta^2(\text{EM}) = 2.38(\text{EM}/10^4)^\alpha, \quad (5)$$

где показатель степени  $\alpha = 2.000 \pm 0.055$ , EM – в единицах пк/см<sup>6</sup>,  $\theta^2$  – в единицах (")<sup>2</sup>.

Значения меры эмиссии в направлениях на источники определены, как указано выше, используя данные измерений фона Галактики на частотах 1.4, 2.7, 5 и 10 ГГц [9–14] и методику, изложенную в работах [5, 6], при предположении, что электронная температура  $T_e = 7000$  К [15]. В направлениях источников B2005+372, B2020+351, B2013+370 и B2012+383 значения меры эмиссии взяты из работы [52].

На рис. 5 видно, что большинство областей НII в направлении на пульсар B1849+00 расположено в пределах расстояний 2–13 кпк. Так как распределение ДИГ коррелирует с распределением областей НII [20–31], можно предполагать, что в пределах этих расстояний распределение ДИГ близко к такому же, как и у областей НII. Наблюдения излучения ДИГ в линии H166 $\alpha$  [20] (рис. 2, 3) показывают, что в направлении на пульсар B1849+00 излучение в этой линии на скоростях 28–75 км/с, что соответствует расстояниям <5.5 кпк и >9.5 кпк, в несколько раз слабее, чем в направлениях скоростей >75 км/с, что соответствует расстояниям 5.5–9.5 кпк [32]. Однако, как указывалось выше, наблюдения излучения фона Галактики в линии H166 $\alpha$  [20] показывают, что эта линия довольно слабая на скоростях 28–75 км/с (рис. 2, 3). По-видимому, как указывалось выше, основной вклад в излучение линии



Таблица 1. Параметры источников и мера эмиссии в направлениях на них

Источник	$l$ (°)	$b$ (°)	$\theta$ (")	$\Delta\theta$ (")	ЕМ (пк/см <sup>6</sup> )	$\Delta$ ЕМ (пк/см <sup>6</sup> )	Ссылки на $\theta$	
1	2	3	4	5	6	7	8	
NGC6334B	351.28	0.68	7.5	0.20	51000	4000	[42]	
	358.59	0.04	0.46	0.04	3200	390	[6, 43, 44]	
	358.849	0.159	0.49	0.06	3600	550	[6, 43]	
	358.874	0.275	0.48	0.06	3600	500	[6, 43, 44]	
B1739-298	358.92	0.07	0.69	0.04	4200	300	[6, 43, 45]	
	358.983	0.578	0.38	0.03	2000	300	[6, 43, 44, 46]	
	359.71	-0.586	0.50	0.07	4300	350	[6, 43, 44]	
	359.873	0.177	1.8	0.10	11500	500	[6, 43, 44, 47]	
	0.193	-0.688	0.52	0.04	3500	450	[6, 43, 46]	
	0.538	0.261	0.83	0.07	4900	550	[6, 43, 46]	
	0.562	-0.819	0.36	0.03	2200	300	[6, 43, 44]	
	0.874	0.283	0.77	0.08	3900	450	[6, 43, 44]	
	J1801-231	6.83	-0.09	0.95	0.05	5800	900	[48]
	B1835-065	25.605	-0.038	<1.8		8100	800	[49]
B1849+005	33.498	0.195	0.50	0.05	3300	400	[4]	
B1855+031	36.55	0.00	0.191	0.013	1100	200	[49, 50]	
B1910+52	40.168	-2.236	0.039		200	50	[50, 51]	
B1902+067	40.629	0.054	0.105		600	100	[49]	
B1954+282	65.31	-0.21	0.0087	0.0023	86	30	[47, 49, 50]	
B2008+33D	71.16	-0.09	0.134	0.013	700	200	[49, 50]	
B2005+372	71.18	2.61	0.15	0.03	635	50	[53]	
B2021+317	71.4	-3.1	0.0257	0.0026	140	45	[50, 53]	
B2023+336	73.1	-2.4	0.068	0.014	240	60	[50, 53]	
B2020+351	74.14	-1.01	0.19	0.04	925	100	[54]	
B2013+370	74.934	1.224	0.035	0.01	525	375	[52–54]	
B2012+383	75.58	2.19	0.057		650	200	[52]	
B2005+403	76.8	4.3	0.08	0.01	570	160	[50, 53]	
B0128+6306	127.177	0.538	0.0132	0.026	70	25	[55]	
B0241+622	135.7	2.4	0.04	0.007	266	68	[50, 56]	
J0251+55616	139.197	-2.764	0.0074	0.002	26	8	[50]	
B0611+131	197.074	-2.158	0.0066	0.002	64	15	[50, 51]	
B0622+147	197.051	1.103	0.031	0.01	54	13	[50, 51]	
B0700-007	215.113	2.254	0.0039	0.001	26	9	[50, 51]	

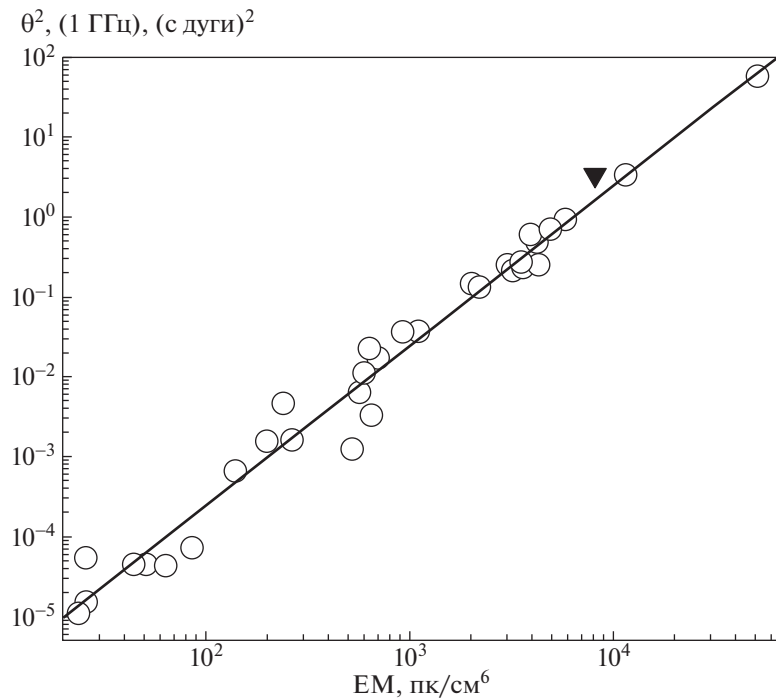
H166 $\alpha$  на скоростях 28–75 км/с дает область ДИГ, расположенная на расстояниях >9.5 кпк, а области, расположенные на расстояниях 2–4 кпк, дают ничтожный вклад в излучении линии, что подтверждается отсутствием низкочастотных завалов спектров (вплоть до частоты 30.9 МГц [7, 8]) у остатков сверхновых Kes 78 и Kes 79.

Как видно из зависимости антенной температуры в линии H166 $\alpha$  от скорости для долготы 33° (рис. 3), излучение отсутствует для скоростей

<28 км/с, что соответствует расстояниям <1.5 кпк и >12 кпк (см. рис. 4–5).

На рис. 2 и 3 видно, что основной вклад в антенную температуру дают области со скоростями >75 км/с. Поскольку мера эмиссии в данном направлении пропорциональна интегралу от антенной температуры по скорости [22], то можно оценить вклад в меру эмиссии от областей в определенном интервале скоростей. Оценки показывают, что на долготе 33°, в направлении которой мера эмиссии фона равна около 5200 пак/см<sup>6</sup>, области ионизо-





**Рис. 6.** Значения квадрата угла рассеяния компактных внегалактических источников на частоте 1 ГГц в зависимости от меры эмиссии фона Галактики  $EM$  в направлениях на них. Данные об углах рассеяния и ссылки, откуда они взяты, приведены в табл. 1. Зависимость аппроксимирована степенной функцией вида  $EM^\alpha$ . Показатель степени  $\alpha = 2.000 \pm 0.055$ .

ванного газа, наблюдаемые на скоростях  $<75$  км/с, дают вклад в излучение линии  $H166\alpha$  около 14% (рис. 3). На долготе пульсара  $33.5^\circ$ , где мера эмиссии фона равна  $6900$  пк/см<sup>6</sup>, интенсивность излучения на скоростях  $>75$  км/с больше, чем на долготе  $33^\circ$ , что подтверждается наблюдениями авторов работы [22] (см. их рис. 13). Вклад областей со скоростями  $<75$  км/с на долготе  $33.5^\circ$  составляет около 11%. Вычитая из полной эмиссии фона на этой долготе эти 11%, которые обусловлены областями ДИГ со скоростями  $<75$  км/с, получим, что мера эмиссии областей газа со скоростями  $>75$  км/с (рис. 3) равна  $6150$  пк/см<sup>6</sup>.

Как сказано выше, области рассеивающей среды, расположенные вблизи наблюдателя, дают мало вклада в уширение импульсов пульсаров, поэтому ионизованный газ, находящийся ближе  $3.5$  кпк, мало влияет на уширение импульсов пульсаров. Учитывая это и то, что этот газ, как указано выше, довольно разреженный, мы его не учитываем при оценке расстояния до пульсара  $V1849+00$ . Таким образом, мы предполагаем, что основной вклад в уширение импульсов пульсара  $V1849+00$  дают области ионизованного газа, наблюдаемые на скоростях  $>75$  км/с, расположенные в диапазоне расстояний  $5.5$ – $9.5$  кпк (рис. 2–5), т.е. толщина эффективного слоя рассеивающей среды  $L = 4$  кпк.

Расстояние до пульсара  $V1849+00$  определим с использованием формулы (3). Квадрат угла рассеяния плоских волн  $\theta^2$  в этой формуле, вычисленный с помощью зависимости (5) при значении  $EM = 6150$  пк/см<sup>6</sup>, равен  $\theta^2 = 0.9$  (")<sup>2</sup>.

Сначала возьмем заведомо большое расстояние до пульсара  $V1849+00$ , равное  $D = 16.5$  кпк [38]. Так как эффективный слой рассеивающей среды простирается до расстояния  $9.5$  кпк, то при расстоянии до пульсара  $16.5$  кпк расстояние от него до ближайшего к нему края слоя равно  $7$  кпк, откуда получаем для параметра  $k$  в формуле (3) значение  $k = 7/4 = 1.75$ . Подставив значения  $\theta^2$ ,  $L$ ,  $D$  и  $k$  в формулу (2), получим для вычисленного значения уширения импульсов пульсара величину  $\tau_{psr} = 1.58$  с, что почти в 2 раза больше наблюдаемого значения  $0.86$  с. Задавая значения расстояния до пульсара меньше  $16.5$  кпк и при каждом выбранном значении  $D$  повторяя вышеуказанную процедуру вычисления  $\tau_{psr}$ , было найдено, что для данной модели распределения рассеивающей среды вычисленное и наблюдаемое значения  $\tau_{psr}$  совпадают при расстоянии до пульсара, равном  $10.7$  кпк. С учетом ошибок значения уширений импульсов пульсара  $V1849+00$  ( $\tau_{psr} = 0.86 \pm 0.05$  с), меры эмиссии фона в направлении на пульсар ( $EM = 6900 \pm 500$  пк/см<sup>6</sup>) и наклона зависимости

квадрата угла рассеяния от меры эмиссии ( $\alpha = 2.000 \pm 0.055$ ), получим, что интервал расстояний, в пределах которого может быть расположен пульсар, равен 10.2–11.5 кпк.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из вышесказанного ясно, что малое значение оптической толщины ионизованного газа  $\tau_{\text{снг}}$  в направлениях на остатки сверхновых Kes 78 и Kes 79 указывает на то, что между ними и наблюдателем находится незначительное количество ионизованного газа, что подтверждается наблюдениями излучения этого газа в линии H166 $\alpha$  [20, 22] (см. рис. 2 и 3 при скоростях  $V < 75$  км/с.).

Что касается пульсара V1849+00, то большое значение уширений его импульсов ( $\tau_{\text{psr}} = 0.86$  с на частоте 1 ГГц) можно объяснить большой мерой эмиссии ионизованного газа, расположенного между наблюдателем и пульсаром ( $EM \approx 6150$  пк/см<sup>6</sup>). Большое значение меры эмиссии обусловлено тем, что в направлении на пульсар расположена область НII G33.46+0.06, обнаруженная недавно в работе [23]. Эта область НII хорошо видна и на картах обзоров плоскости Галактики на частотах 5 и 10 ГГц, полученных с разрешением 2.6' и 3' на частотах 5 и 10 ГГц [9, 13] соответственно. Ее можно видеть на рис. 1, который заимствован из работы [9]. Угловые размеры этой области НII  $\approx (8' \times 12')$  на частоте 5 ГГц [9] и  $(12' \times <10')$ , измеренные на частоте 1.4 ГГц с разрешением 14.4' [23]. Ее центр расположен на угловом расстоянии  $\approx 4'$  от направления на пульсар (рис. 1). Она наблюдается на скорости 99.8 км/с [23], что соответствует расстоянию до нее либо 5.5, либо 7.5 кпк (рис. 5). Как указано выше, мера эмиссии в направлении на пульсар равна 6900 пк/см<sup>6</sup>. Это значение меры эмиссии является суммой меры эмиссии фона и меры эмиссии области НII G33.46+0.06. На угловом расстоянии 2' к югу от ее южного края (рис. 1) мера эмиссии фона  $\approx 4000$  пк/см<sup>6</sup>, откуда следует, что мера эмиссии этой области НII  $\approx 2900$  пк/см<sup>6</sup>. Поскольку остаток сверхновой Kes 79, как указано выше, расположен на расстоянии 6.5 кпк и не имеет завала спектра на низких частотах, то область НII (G33.46+0.06) с такой большой мерой эмиссии как 2900 пк/см<sup>6</sup> не может быть на расстоянии 5.5 кпк, иначе у остатка сверхновой Kes 79 наблюдался бы завал спектра на низких частотах из-за поглощения его излучения в ионизованном газе этой области НII. Следовательно, она может быть расположена на расстоянии не ближе 6.5 кпк и не дальше 7.5 кпк. Это хорошо согласуется с тем, что максимум излучения в линии H166 $\alpha$  находится на скорости около 100 км/с [20, 22], что соответствует расстоянию  $\approx 7$  кпк (рис. 2, 3).

### 5.1. Электронная концентрация ионизованного газа, расположенного между наблюдателем и пульсаром V1849+00

Предположим, что между пульсаром V1849+00 и наблюдателем нет области НII (G33.46+0.06), а значение меры эмиссии 6150 пк/см<sup>6</sup>, полученное выше, обусловлено областью ДИГ, расположенной на расстояниях от 5.5 до 9.5 кпк (рис. 5).

Оценим для этого случая среднее значение электронной концентрации  $\langle N_e \rangle$  этого газа. При полученном выше расстоянии до пульсара 10.7 кпк и мере дисперсии 787 пк/см<sup>3</sup> [2] среднее значение электронной концентрации  $\langle N_e \rangle = 0.074$  см<sup>-3</sup>. Учитывая, что мера эмиссии EM этого газа равна 6150 пк/см<sup>6</sup>, получим среднеквадратичное значение электронной концентрации  $(\langle N_e^2 \rangle)^{0.5} = 0.758$  см<sup>-3</sup>. Фактор заполнения для электронов этого газа равен  $F_e = \langle N_e \rangle / (\langle N_e^2 \rangle)^{0.5} = 0.098$ , что согласуется с полученными в [18] данными для внутренней области Галактики.

### 5.2. Электронная концентрация ионизованного газа в области НII G 33.46+0.06

Теперь оценим значение  $(\langle N_e^2 \rangle)^{0.5}$  для газа в области НII G 33.46+0.06, у которой, как показано выше, мера эмиссии  $\approx 2900$  пк/см<sup>6</sup>. При расстоянии до нее  $\approx 7$  кпк и угловом размере 10' ее линейный диаметр при предположении сферической симметрии  $\approx 21$  пк, откуда среднеквадратичное значение электронной концентрации  $(\langle N_e^2 \rangle)^{0.5} \approx 11.8$  см<sup>-3</sup>. Видно, что значение  $(\langle N_e^2 \rangle)^{0.5}$  в этой области НII в 15.5 раза больше, чем аналогичное значение, усредненное по всей области ДИГ, простирающееся от 5.5 до 9.5 кпк. Предполагая, что значения флуктуаций электронной концентрации  $\Delta N_e \sim (\langle N_e^2 \rangle)^{0.5}$  [5], и учитывая, что наибольший вклад в уширение импульсов пульсаров  $\tau_{\text{psr}}$  дают области с большими значениями флуктуаций электронной концентрации  $\Delta N_e$ , поскольку  $\tau_{\text{psr}} \sim (\Delta N_e)^2$  [57], приходим к выводу, что большое значение уширения импульсов пульсара V1849+00 обусловлено наличием на луче зрения к нему области НII (G 33.46+0.06).

### 5.3. Оценка вклада области НII G33.46+0.6 в меру дисперсии и уширение импульсов пульсара V1849+00

Так как ионизованный газ в области НII (G33.46+0.06) имеет  $(\langle N_e^2 \rangle)^{0.5} \approx 11.8$  см<sup>-3</sup>, то предполагая, что фактор заполнения для электронов  $<1$ , находим, что среднее значение электронной концентрации этого газа  $<11.8$  см<sup>-3</sup>. При диаметре

НП-области  $\approx 21$  пк, получим, что значение меры дисперсии этого газа  $< 250$  пк/см<sup>3</sup>, что составляет менее 32% от меры дисперсии пульсара V1849+00, равной 787 пк/см<sup>3</sup> [2]. Если же в этой области НП фактор заполнения для электронов  $\approx 0.1$ , т.е. такой же, как и в области ДИГ, простирающейся от 5.5 до 9.5 кпк в направлении на пульсар, то вклад НП-области G33.46+0.06 в меру дисперсии пульсара  $< 3.2\%$ .

Вклад этой области НП в уширение импульсов пульсара V1849+00 оценить довольно сложно, однако из сравнения меры эмиссии области НП  $\approx 2900$  пк/см<sup>6</sup>, и полной меры эмиссии газа, расположенного между наблюдателем и пульсаром  $\approx 6150$  пк/см<sup>6</sup> можно предполагать, что она дает вклад в уширение импульсов пульсара чуть меньше 50%. Второй причиной большого значения уширения импульсов пульсара V1849+00 является геометрический фактор. Выше отмечалось, что наибольший вклад в уширение импульсов пульсаров дают области рассеивающей среды, расположенные примерно на середине расстояния между наблюдателем и пульсаром. Так как пульсар находится на расстоянии от 9.8 до 11.5 кпк, то области ионизованного газа, расположенные около тангенциальной точки ( $V \approx 100$  км/с и  $D \approx 7$  кпк), вблизи которой расположена область НП G33.46+0.06 и наблюдается максимум излучения в линии H166 $\alpha$ , находятся близко от середины расстояния между наблюдателем и пульсаром, поэтому эти области могут дать более значительный вклад в уширение импульсов пульсара, чем области ДИГ, расположенные вблизи пульсара или вблизи наблюдателя.

Действительно, среда ближе 5.5 кпк от наблюдателя не дает вклада в рассеяние, так как она очень разрежена, что подтверждается слабым поглощением излучения остатков сверхновых Kes 78 и Kes 79 [7, 8] и наблюдениями излучения фона в линии H166 $\alpha$  [20, 22]. Рассеивающая среда вблизи пульсара (10–11 кпк от наблюдателя) дает мало вклада в рассеяние из-за того, что вблизи него расположено мало ярких областей НП (рис. 4), а самое главное, эта среда расположена вблизи пульсара, где значение весовой функции  $d(D - d)/D$  мало (см. формулу (4)).

#### 5.4. Область НП G33.418-00.004

На рис. 1 видно, что к западу от пульсара V1849+00 на угловом расстоянии 6.4' от него расположена область НП, которая наблюдается на скорости 76.5 км/с и расположена на расстоянии 9.38 кпк [19]. На картах яркостной температуры фона на частотах 5 и 10 ГГц [9, 13] видно, что область НП (G33.46+0.06) является как бы продолжением области НП G33.418-00.004 в направлении на юго-восток. Однако, если бы область НП

G33.46+0.06 была бы расположена на том же расстоянии, что и область НП G33.418-0.004, то при мере эмиссии области НП G33.46+0.06  $\approx 2900$  пк/см<sup>6</sup> можно было бы наблюдать увеличение антенной температуры в линии H166 $\alpha$  на скорости 76.5 км/с, чего не наблюдается [22]. Таким образом, маловероятно, что область НП G33.418-0.004 дает ощутимый вклад в меру дисперсии и уширение импульсов пульсара V1849+00. К аналогичному результату ранее пришел автор [4]. К тому же, так как область НП G33.418-0.004 расположена довольно близко от пульсара (расстояние до нее  $\approx 9.4$  кпк [19]), то ее влияние на уширение его импульсов сильно ослаблено из-за геометрического фактора (см. формулу (4)).

#### 5.5. Влияние ОСН Kes 79 на параметры рассеяния пульсара V1849+00 и внегалактического источника V1849+005

В литературе иногда обсуждается вопрос о влиянии остатка сверхновой Kes 79 на рассеяние излучения пульсара V1849+00 и внегалактического источника V1849+005 [4, 58], так как этот остаток сверхновой расположен ближе к наблюдателю, чем эти два объекта [1]. Автор [4] не исключает возможности влияния ОСН V1849+00 на уширение импульсов пульсара V1849+00 и угол рассеяния внегалактического источника V1849+005. Мы полагаем, что этого влияния нет, поскольку, как показано выше, в окрестностях этого остатка сверхновой электронная концентрация мала, следовательно, и флуктуации электронной концентрации, ответственные за рассеяние, также малы [5]. Кроме того, выше было показано, что большое уширение импульсов пульсара можно объяснить влиянием области НП G33.46+0.06 без привлечения дополнительных данных. Точно также рассеяние внегалактического источника V1849+005, который расположен на угловом расстоянии от остатка сверхновой в 1.6 раза дальше, чем пульсар, можно объяснить только рассеивающей средой в направлении на него. Угол рассеяния этого источника на частоте 1 ГГц равен 0.5" [4], а мера эмиссии в направлении на него  $EM = 3300$  пк/см<sup>6</sup>, что хорошо согласуется с соотношением (5). Ранее авторы [58] также выразили сомнение по поводу влияния ОСН Kes 79 на рассеяние этого источника.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что отсутствие низкочастотного завала спектра остатка сверхновой Kes 79 (G33.6+0.1, оптическая толщина  $\tau_{\text{opt}} \leq 0.3 \pm 0.2$  [7, 8] на частоте 30.9 МГц, расстояние до него  $\approx 6.5$  кпк) объясняется тем, что между ним и наблюдателем находится мало ионизованного газа.

2. Большое значение уширения импульсов пульсара В1849+00 ( $\tau_{\text{psr}} = 0.86$  с на частоте 1 ГГц), расположенного на угловом расстоянии  $10'$  от центра Kes 79 объясняется двумя факторами. Во-первых, в направлении на пульсар расположена область НII (G33.46+0.06) с мерой эмиссии около  $2900$  пк/см<sup>6</sup> при том, что значение меры эмиссии всего ионизованного газа между наблюдателем и пульсаром  $\approx 6150$  пк/см<sup>6</sup>. Вклад этой НII-области в меру дисперсии пульсара меньше 32%, а в уширение его импульсов около 50%. Во-вторых, согласно теории рассеяния наибольший вклад в уширение его импульсов дает ионизованный газ, расположенный примерно посередине между пульсаром и наблюдателем, что в данном случае и наблюдается.

3. Установлено, что расстояние до пульсара В1849+00 находится в пределах от 9.8 до 11.5 кпк.

4. Остаток сверхновой Kes 79, который расположен ближе к наблюдателю, чем пульсар В1849+00, не оказывает влияния на рассеяние излучения пульсара и компактного внегалактического источника В1849+005.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит Р.Д. Дагкесаманского за ценные советы и замечания и В.А. Извековой за полезные дискуссии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *D. A. Frail and T. R. Clifton*, *Astrophys. J.* **336**, 854 (1989).
2. *R. N. Manchester, G. J. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs*, *Astron. J.* **129**, 1993 (2005).
3. *L. G. Spitler, K. J. Lee, R. P. Eatough, M. Kramer, et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **780**, L3 (2014).
4. *T. J. W. Lazio*, *Astrophys. J.* **613**, 1023 (2004).
5. *A. В. Пынзарь*, *Астрон. журн.* **87**, 430 (2010).
6. *A. В. Пынзарь, В. И. Шишов*, *Астрон. журн.* **91**, 503 (2014).
7. *N. E. Kassim*, *Astroph. J.* **347**, 915 (1989).
8. *E. Giacani, M. J. S. Smith, G. Dubner, N. Loiseau, G. Castelletti, and S. Paron*, *Astron. and Astrophys.* **507**, 841 (2009).
9. *W. J. Altenhoff, D. Downes, T. Pauls, and J. Schraml*, *Astron. and Astrophys. Supp. Ser.* **35**, 23 (1978).
10. *W. Reich, P. Reich, and E. Furst*, *Astron. and Astrophys. Supp. Ser.* **83**, 539 (1990).
11. *W. Reich, E. Furst, P. Reich, and K. Reif*, *Astron. and Astrophys. Supp. Ser.* **85**, 633 (1990).
12. *W. J. Altenhoff, D. Downes, L. Goad, A. Maxwell, and R. Rinehart*, *Astron. and Astrophys. Supp. Ser.* **1**, 319 (1970).
13. *T. Handa, Y. Sofue, N. Nakai, H. Hirabayashi, and M. Inoue*, *Publ. Astron. Soc. Japan* **39**, 709 (1987).
14. *R. F. Haynes, J. L. Caswell, and L. W. J. Simons*, *Austral. J. Phys. Astrophys. Supp.* **45**, 1 (1978).
15. *D. Downes, T. I. Wilson, J. Bieging, and J. Wink*, *Astron. and Astrophys. Supp. Ser.* **40**, 379 (1980).
16. *P. G. Mezger and A. P. Henderson*, *Astrophys. J.* **147**, 471 (1967).
17. *G. L. Case and D. Bhattacharya*, *Astrophys. J.* **504**, 761 (1998).
18. *A. В. Пынзарь*, *Астрон. журн.* **93**, 295 (2016).
19. *L. G. Hou and J. L. Han*, *Astron. and Astrophys.* **569**, 125 (2014).
20. *F. J. Lockman*, *Astrophys. J.* **209**, 429 (1976).
21. *M. I. R. Alves, R. D. Davies, C. Dickinson, R. J. Davis, R. R. Auld, M. Calabretta, and L. Staveley-Smith*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **405**, 1654 (2010).
22. *M. I. R. Alves, R. D. Davies, C. Dickinson, M. Calabretta, R. Davis, and L. Staveley-Smith*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **422**, 2429 (2012).
23. *M. I. R. Alves, M. Calabretta, R. D. Davies, C. Dickinson, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **450**, 2025 (2015).
24. *A. M. Ferguson, R. F. G. Wyse, J. S. Gallagher, and D. A. Hunter*, *Astron. J.* **111**, 2265 (1996).
25. *C. G. Hoopes, R. A. M. Walterbos, and B. E. Greenawalt*, *Astron. J.* **112**, 1429 (1996).
26. *C. G. Hoopes, R. A. M. Walterbos, and R. J. Rand*, *Astrophys. J.* **522**, 669 (1999).
27. *A. E. Zurita, M. Rozas, and J. E. Beckman*, *Astron. and Astrophys.* **363**, 9 (2000).
28. *A. E. Zurita, J. E. Beckman, M. Rozas, and S. Ryder*, *Astron. and Astrophys.* **386**, 801 (2002).
29. *R. J. Reynolds, N. C. Sterling, and L. M. Haffner*, *Astrophys. J.* **558**, L101 (2001).
30. *L. M. Haffner, R. -J. Detmar, J. E. Beckman, K. Wood, et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 969 (2009).
31. *A. В. Пынзарь*, *Астрон. журн.* **96**, 898 (2019).
32. *С. А. Каплан, С. Б. Пикельнер* *Физика межзвездной среды* (М.: Наука, 1979).
33. *M. Fich, L. Blitz, and A. A. Stark*, *Astrophys. J.* **342**, 272 (1989).
34. *P. Zhou and Y. Chen*, *Astrophys. J.* **743**, 4 (2011).
35. *S. Sharpless*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **4**, 257 (1959).
36. *B. T. Lynds*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **12**, 163 (1965).
37. *T. R. Clifton, D. A. Frail, S. R. Kulkarni, and J. M. Weisberg*, *Astrophys. J.* **333**, 332 (1988).
38. *D. A. Frail and J. M. Weisberg*, *Astron. J.* **100**, 743 (1990).
39. *J. P. W. Verbiest, J. M. Weisberg, A. A. Chael, K. J. Lee, and D. R. Lorimer*, *Astrophys. J.* **755**, 39 (2012).
40. *A. В. Пынзарь*, *Астрон. журн.* **94**, 411 (2017).
41. *K. M. Desai, C. R. Gwinn, J. Reynolds, E. A. King, et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **393**, L75 (1992).
42. *A. S. Trotter, J. M. Moran, and L. F. Rodriguez*, *Astrophys. J.* **493**, 666 (1998).
43. *M. E. Nord, T. J. W. Lazio, N. E. Kassim, S. D. Hyman, C. L. Brogan, and N. Duric*, *Astron. J.* **128**, 1646 (2004).
44. *S. Roy*, *Astrophys. J.* **773**, 67 (2013).
45. *T. J. W. Lazio and J. M. Cordes*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **118**, 201 (1998).

46. *G. C. Bower, D. C. Backer, and R. A. Sramek*, *Astrophys. J.* **558**, 127 (2001).
47. *J. M. Cordes and T. J. W. Lazio*, arXiv:astro-ph/0301598 v1 (2003).
48. *M. J. Claussen, W. M. Goss, K. M. Desai, and C. L. Brogan*, *Astrophys. J.* **580**, 909, (2002).
49. *A. L. Fey, S. R. Spangler, and J. M. Cordes*, *Astrophys. J.* **372**, 132 (1991).
50. *A. B. Pushkarev and Y. Y. Kovalev*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **452**, 4274 (2015).
51. *B. Dennison, M. Thomas, R. S. Booth, R. L. Brown, J. J. Brodfrick, and J. J. Gondon*, *Astron. and Astrophys.* **135**, 199 (1984).
52. *S. R. Spangler and J. M. Cordes*, *Astrophys. J.* **505**, 766 (1998).
53. *A. L. Fey, S. R. Spangler, and R. L. Mutel*, *Astrophys. J.* **337**, 730 (1989).
54. *S. R. Spangler and J. M. Cordes*, *Astrophys. J.* **332**, 346 (1988).
55. *L. G. Spitler and S. R. Spangler*, *Astrophys. J.* **632**, 932 (2005).
56. *B. J. Geldzahler and D. B. Shaffer*, *Astron. and Astrophys.* **76**, L21 (1979).
57. *I. P. Williamson*, *Monthly. Not. Roy. Astron. Soc.* **157**, 55 (1972).
58. *S. R. Spangler, R. L. Mutel, J. Benson, and J. M. Cordes*, *Astrophys. J.* **301**, 312 (1986).