

УДК: 524.523

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ
H II, НАБЛЮДЕННЫХ В КОНТИНУУМЕ И РАДИОЛИНИИ
H 110_α. II

А. В. ОСКАНЯН

Поступила 11 февраля 1988

Принята к печати 12 мая 1988

Изучение редуцированных выборок областей H II показывает, что их распределение по радиусу Галактики соответствует распределению, наблюдаемому у спиральных галактик типов Sc и SBc, а интегральная функция радиосветимости — аналогичным функциям, построенным для других спиральных галактик. Оценка общего числа областей H II в Галактике ~ 1000 (по порядку равна числу O-ассоциаций), а их средней массы $\sim 100 M_{\odot}$. Масса нейтрального газа, образовавшегося от прекративших свое существование областей H II Галактики, по этим оценкам составляет около 65% общей массы галактического нейтрального газа (время жизни областей H II принято равным $6 \cdot 10^5$ лет).

1. *Введение.* Статистическое исследование результатов радионаблюдений галактических областей H II [1] показывает значение использования редуцированных выборок данных, освобождающих статистические выводы от влияния наблюдательной селекции. Цель данного исследования заключается в получении свободного от влияния наблюдательной селекции распределения радиоизлучающих областей H II по радиусу Галактики, их интегральной функции радиосветимости, а также в проведении сравнительного анализа результатов с известными исследованиями. Делается также попытка оценки средних масс, общего количества галактических областей H II и доли межзвездного газа Галактики, возникшего из прекративших свое существование областей H II, возможно, связанных с O-ассоциациями. В связи с этим надо отметить, что области H II входят в состав O-ассоциаций вместе со звездами O-ассоциаций, а иногда также с молодыми очагами звездообразования (например, O-ассоциации Sgr OB 1, Ori OB 1, Cas OB 6 и др.). Следует обратить внимание на то, что термин «области H II» часто употребляется как синоним O-ассоциаций. Это не вполне целесообразно, поскольку существуют O-ассоциации, в которых не наблюдаются области H II (например, Peg, OB 1, Cas OB 2, Cen OB 1

и др.). Точно также существуют области Н II, которые возбуждаются изолированными звездами или кратными горячими звездами, но находятся вне пределов О-ассоциаций*.

2. *Распределение областей Н II по радиусу Галактики.* Для построения распределения областей Н II по радиусу Галактики использованы списки данных, опубликованные в [2]. С применением редуцированных выборок (см. [1]) вычислены поверхностные плотности N_i/S_i объектов в плоскости Галактики при значениях $D_{\odot} = 7, 8, \dots, 11$ кпк (обозначения в настоящей работе, приведенные без оговорок, те же, что и в [1]), где N_i — число объектов, попадающих в i -ю зону расстояния от центра Галактики, а S_i — площадь, на которой расположены эти объекты (рис. 1),

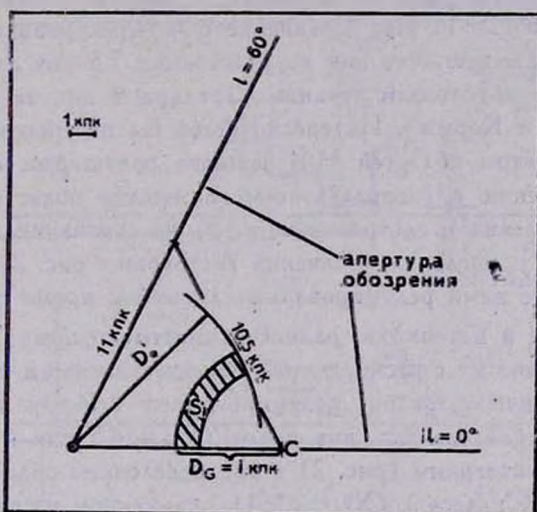


Рис. 1. Определение площадей — S_i галактоцентрического кольца. С и \odot отмечены, соответственно, центр Галактики и Солнце. Направления $l = 0^\circ$ и $l = 60^\circ$ указывают на границы радиообзора по галактической долготе.

т. е. область, образованная пересечением галактоцентрического кольца с внешним и внутренним радиусами, равными соответственно i и $i-1$ кпк, и апертурой обзора. Так как использованный список данных полон до величины потока $s_0 = 2.2$ Ян, то при редуцировании отбрасывались области Н II, радиосветимости которых меньше $2.2 \cdot 7^2, \dots, 2.2 \cdot 11^2$ Ян \cdot кпк², а также те из них, поверхностные яркости которых меньше $2.2/2.6^2$ Ян/□', где 2.6 — полуширина диаграммы направленности антенны в угловых минутах дуги. В данной статистике использованы также объекты с двойны-

* За это замечание мы благодарны В. А. Амбарцумяну.

ми расстояниями, которые составляют не более 25% объектов использованного списка. При редуцировании этих объектов в статистику включались объекты, удовлетворяющие следующим двум условиям: а) D_{\odot} (далее) $\leq D_{\odot}$, б) $s_i \cdot D_{\odot}$ (ближнее)² $\geq s_0 \cdot D_{\odot}$ ².

Гистограммы, построенные для принятых значений D_{\odot} , приведены на рис. 2. Столбцы гистограмм отмечены числами использованных объектов — N_i и среднеквадратичными ошибками, оцененными по формуле $\sigma \sim (N_i)^{1/2}$. Малое количество объектов, с помощью которых построены гистограммы, позволяет делать только оценочные выводы. На гистограммах выделяются два локальных максимума, на расстояниях $D_G = 4.5$ и 7.5 кпк. Поверхностная плотность областей Н II убывает до нуля в интервале (7.5, 9.5 кпк). Надо отметить, что, как видно из рис. 1, указанные гистограммы не могут дать информацию о распределении областей Н II на расстояниях $D_G > 11$ кпк. Сравнение с четырехрукавной моделью Галактики [3] показывает, что пик на расстоянии 7.5 кпк от центра Галактики может быть обусловлен рукавом Стрельца, а пик на $D_G = 4.5$ кпк — рукавами Щита и Кормы*. Интересно было бы построить распределение $N_i/S_i - D_G$ с учетом областей Н II южного полушария, опубликованных в [4]. По сравнению с распределением гигантских областей Н II ($400 < < ln < 5000$ Ян·кпк²), построенным в [5] на основании данных, опубликованных в [6, 7], численные значения гистограмм рис. 2 больше, так как в использованные нами редуцированные ансамбли кроме гигантских областей Н II входят и источники, радиосветимости которых $200 \leq ln < 400$ Ян·кпк². Сравнение же с распределениями, приведенными в работах [2, 8], показывает, что использование редуцированных выборок привело к более выразительному разделению двух пиков ($D_G = 4.5$ кпк и $D_G = 7.5$ кпк). Сопоставление гистограмм (рис. 2) с распределением областей Н II в спиральной галактике класса Y (NGC 3184), полученном из наблюдений в линии H_α [9], показывает сходство распределений. Рассмотрение данных табл. 1, приведенной в [9], показывает, что объекты класса Y в основном представлены спиральными галактиками типов Sc и SBc, со средней абсолютной звездной величиной (-20.5 ± 1.0). Распределения отличаются лишь тем, что в центральных областях NGC 3184 не выделяется группа областей Н II, как на рис. 2. Не исключено, что это является следствием ограниченности разрешения наблюдений вблизи ядра этой галактики. Таким образом, сделанное сопоставление и учет абсолютной звездной величины Галактики ($M_B = -20.6$) [10] свидетельствуют в пользу того, что, по-видимому, Галактика принадлежит к типу Sc либо SBc. Почти аналогичное утверждение было сделано на основе распределения O-ассоциаций

* За это замечание мы благодарны Р. Р. Андрееву.

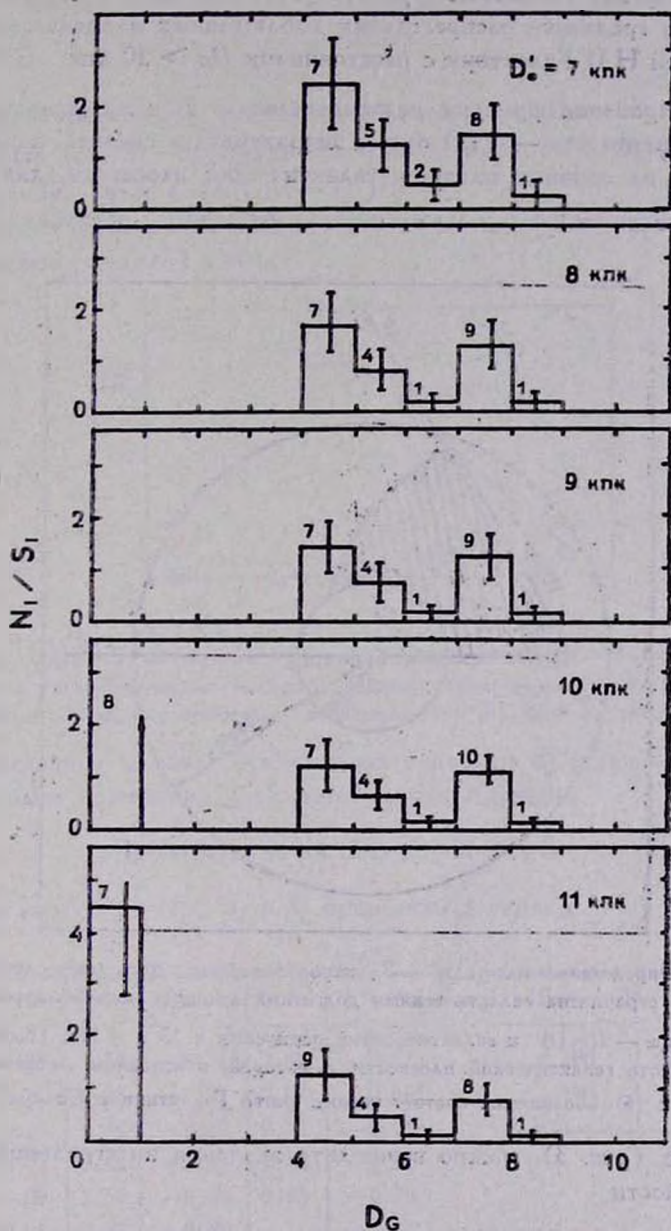


Рис. 2. Гистограммы распределения числа областей Н II на единицу площади галактической плоскости — N_1/S_1 по галактическому радиусу — D_G . Значения D_0 указаны в правых верхних углах функций.

во внешних частях Галактики в работе [11], а также в [12], основываясь на данных о градиенте распределения наблюдаемых в оптическом диапазоне областей Н II Галактики с расстояниями $D_G > 10$ кпк.

3. *Интегральная функция радиосветимости.* Под интегральной функцией радиосветимости — $\Phi(x)$ будем подразумевать среднее число тех областей Н II на единицу площади галактической плоскости, для которых $In \geq x$. Проведя от Солнца последовательные круги с радиусами $D_{\odot} = 1,$

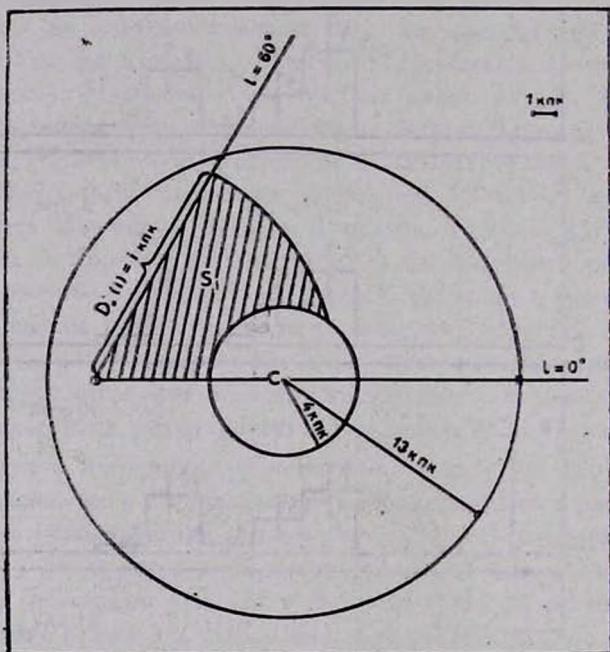


Рис. 3. Определение площадей — S_i , использованных при вычислениях $\Phi(In)$ (1). Площадь ограничена галактическими долготами границы радиообзора, расстоянием от Солнца — $D_{\odot}(t)$ и галактическими радиусами в 13 и 4 кпк. Последние ограничивают область галактической плоскости, в которой, в основном, встречаются области Н II. С и \odot обозначены соответственно центр Галактики и Солнце.

2, ..., 18 кпк (рис. 3), можно вычислить значения интегральной функции радиосветимости

$$\Phi(In_j) = \sum_{i=1}^j P_{ij} \cdot \frac{N_{ij}}{S_i}, \quad j=1, 2, \dots, 18, \quad (1)$$

где статистические веса определяются из выражения

$$P_{ij} = \frac{N_{ij}}{\sum_{i=1}^j N_{ij}}$$

N_{ij} — число объектов в секторе с индексом i , радиосветимости которых больше ln_j , S_i — площадь сектора с индексом i , $D_{\odot}(i)$ — радиус, равный i кпк, $ln_j = s_0 \cdot D_{\odot}(j)^2 = s_0 \cdot j^2$.

Значения функции $\Phi(ln)$, вычисленные на основе данных списков [2], приведены в табл. 1 и рис. 4.

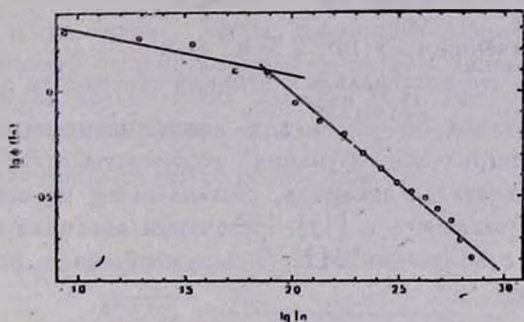


Рис. 4. Значения интегральной функции радиосветимости — $\Phi(ln)$ (обозначены кружками) в логарифмическом масштабе. Прямые представляют аппроксимацию функции для значений радиосветимостей — ln больше 100 Ян · кпк² и меньше 100 Ян · кпк².

Приведенные в табл. 1 численные значения функции аппроксимированы методом наименьших квадратов двумя прямыми

$$\lg \Phi(ln) = \beta_i \cdot \lg ln + \alpha_i, \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

Значения коэффициентов α_i и β_i приведены в табл. 2.

Таблица 1

$\lg ln$	$\lg \Phi(ln)$	$\lg ln$	$\lg \Phi(ln)$	$\lg ln$	$\lg \Phi(ln)$
0.94	0.28	2.14	-0.14	2.63	-0.51
1.29	0.25	2.25	-0.21	2.69	-0.56
1.54	0.22	2.34	-0.30	2.75	-0.62
1.74	0.09	2.42	-0.37	2.80	-0.71
1.89	0.09	2.50	-0.44	2.85	-0.79
2.03	-0.06	2.57	-0.48		

Таблица 2

ln (Ян · кпк ²)	α_i	β_i
≤ 100	0.516	-0.223
≥ 100	1.728	-0.865

Характерным для кривой $\Phi(ln)$ является изменение ее наклона при значении $ln \approx 100$ Ян · кпк². При исследовании областей Н II в других спиральных галактиках сделан вывод [13], что функция $\Phi(ln)$, построен-

ная для больших значений ln , должна иметь подобное поведение при переходе к меньшим значениям ln . Коэффициент наклона для больших значений ln близок к верхней границе интервала значений β , приведенных в [13].

В связи с этим интересно отметить, что, согласно [14], оценка дифференциальной функции светимости $\nu(L)$ в дальнем инфракрасном диапазоне для горячих молекулярных облаков привела к формуле

$$\nu(L) = 10^{7.97 \left\{ \begin{array}{l} 0.76 \\ -0.78 \end{array} \right\} L^{-2.00 \pm 0.12}}$$

для интервала значений $(3.5 \cdot 10^4, 2.5 \cdot 10^7 L_{\odot})$.

Легко видеть, что интегральная функция светимости в этом диапазоне будет пропорциональна $L^{-1.00 \pm 0.12}$, т. е. коэффициент наклона β близок к значению для интегральной функции радиосветимости. Надо отметить, что в [14] использовался ансамбль, составленный на основе источников списка AFGL, приведенного в [15]. Источники ансамбля характерны тем, что ассоциируют с областями Н II, обнаруженными в радио либо оптическом диапазоне.

4. Оценка числа радиоизлучающих областей Н II в Галактике. Учитывая физический смысл функции $\Phi(ln)$, нетрудно оценить общее число радиоизлучающих областей Н II, при грубом предположении об их однородном распределении в плоскости Галактики,

$$N_{\text{Н II}} = \pi \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot \Phi(ln_{\text{min}}), \quad (3)$$

где R_2 и R_1 — соответственно внешний и внутренний радиусы зоны Галактики, в которой встречаются области Н II ($R_2 = 13$ кпк, $R_1 = 4$ кпк). $ln_{\text{min}} = 10$ Ян·кпк² (по данным списка [2] представляется возможным определить значения функции $\Phi(ln)$ для значений ln больше указанной величины). Подстановка соответствующих значений в (3) определяет $N_{\text{Н II}} \approx 950$ областей Н II в Галактике. Таким образом, ожидаемое число областей Н II того же порядка, что и число О-ассоциаций ~ 1000 , оцененное в [16]. Эти значения в 3—4 раза меньше приведенной в [15] оценки Л. Блица (3500 галактических молекулярных комплексов ассоциирующих с О-ассоциациями). По-видимому, можно утверждать, что значительная часть радиоизлучающих областей Н II связана с О-ассоциациями. Из 24-х радиоисточников и их комплексов с $D_{\odot} < 3$ кпк [3] все, кроме комплексов Суг X, NGC 7000, G 305.2 + 0.2, G 308.6 + 0.6 (RCW 79), G 326.5 + 0.9 (RCW 94), G 351.4 + 0.7 (NGC 6334), G 353.1 + 0.7 (NGC 6357), ассоциируют с О-ассоциациями, входящими в списки [17—20]. Надо отметить, что расстояние до комплекса Суг X может

оказаться больше 1.5 кпк, потому что в данном направлении мы наблюдаем вдоль галактического рукава, и что туманность NGC 7000 проектируется рядом с Т-ассоциацией Т1 Суг, входящей в список Т-ассоциаций, опубликованный в [21].

Интересно также отметить, что подавляющее большинство радиоизлучающих областей Н II, приведенных в [3] с расстояниями от Солнца менее 3 кпк, наблюдаются в оптическом диапазоне. Поэтому не исключено, что далекие радиоисточники не наблюдаются в оптическом диапазоне в основном из-за галактического поглощения.

5. Средние и суммарные массы радиоизлучающих областей Н II в Галактике. Используя редуцированные ансамбли данных, нетрудно оценить средние массы галактических областей Н II. Легко видеть, что в редуцированном ансамбле объектов с радиосветимостями не менее I_n , средние массы — $\overline{M(I_n)}$ определяются по формуле

$$\overline{M(I_n)} = \frac{\int_{I_n}^{\infty} \Phi'(x) M(x) dx}{\int_{I_n}^{\infty} \Phi'(x) dx}. \quad (4)$$

Здесь $\Phi'(x)$ — производная от $\Phi(x)$, а $M(x)$ — статистическая зависимость между массой области Н II и радиосветимостью (см. [1]).

Вычисленные значения $\overline{M(I_n)}$ для ряда значений I_n приведены в табл. 3 и в логарифмическом масштабе на рис. 5. Аппроксимация полученных значений, проведенная методом наименьших квадратов, позволяет оценить величину $\overline{M(I_n)}$ для заданного значения I_n . Для $I_n = 10 \text{ Ян} \cdot \text{кпк}^2$ получим $\sim 100 M_{\odot}$.

Таблица 3

I_n	$\overline{M(I_n)}$	I_n	$\overline{M(I_n)}$	I_n	$\overline{M(I_n)}$
8.8	82.1	105.6	914.6	316.8	1590.7
19.8	173.8	140.8	1056.9	371.8	1638.2
35.2	167.6	178.2	1371.5	431.2	2261.5
55.0	399.8	220.0	1265.0	495.0	2497.2
79.2	617.1	266.2	1455.8	563.2	2745.6
635.8	2824.2	712.8	3400.4	794.2	3655.8
968.0	3968.2	970.2	4294.1	1064.8	4622.2
1163.8	4793.0				

Суммарная масса — M_* галактических областей Н II получается равной

$$M_* = 1.0 \cdot 10^6 M_{\odot}. \quad (5)$$

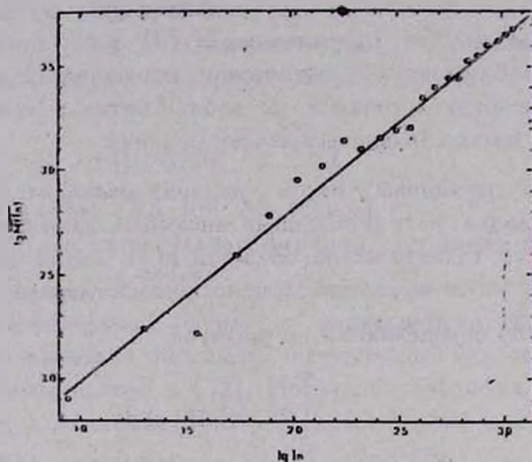


Рис. 5. Значения средних масс — $\overline{M(In)}$ (обозначены кружками) в логарифмическом масштабе. Прямая представляет аппроксимацию вычисленных значений.

Обозначая через t и T , соответственно, среднее время жизни области Н II и возраст Галактики и исходя из предположения о постоянстве частоты звездообразования, можно оценить общую массу нейтрального газа — $M_{нг}$, образованного за счет прекративших свое существование областей Н II (предполагая, что газ не конденсируется в звезды),

$$M_{нг} = (T/t) \cdot 10^6 M_{\odot}. \quad (6)$$

Для класса нормальных ($In < 400$ Ян·кпк²) радиоизлучающих областей Н II околосолнечного пространства $t \approx 5 \cdot 10^5$ лет [22]. С другой стороны, для класса гигантских ($400 < In < 5000$ Ян·кпк²) радиоизлучающих областей Н II время жизни оценивается в $7 \cdot 10^5$ лет [23]. Принимая среднее значение этих двух величин за время жизни радиоизлучающих областей Н II и с учетом того, что возраст Галактики $\approx 10^{10}$ лет, получаем

$$M_{нг} \approx 1.7 \cdot 10^9 M_{\odot}. \quad (7)$$

В работе [23] оценена масса ($1.6 \cdot 10^9 M_{\odot}$) так называемой галактической, ELD (extended low density), области Н II. Эта область с плотностью $N_e \lesssim 50$ см⁻³, по-видимому, представляет собой самые поздние ста-

дии расширения радиоизлучающих областей Н II, когда их зоны ионизации сливаются друг с другом, а в их возбуждении существенную роль начинают играть О-звезды поля [23]. Как видно, масса газа, находящегося в ELD-области Н II, составляет всего 10% массы газа, который мог находиться в состоянии Н II за всю историю Галактики.

Суммарная масса галактического нейтрального вещества оценивается в $2.6 \cdot 10^9 M_{\odot}$ ($1.2 \cdot 10^9 M_{\odot}$ входит в состав непрозрачных облаков, а $1.4 \cdot 10^9 M_{\odot}$ в состав межоблачной среды) [24]. Сравнивая эту величину с оценкой (7), получим, что нейтральный газ, образованный из прекративших свое существование областей Н II, того же порядка, что и масса вещества межоблачной среды Галактики.

6. Основные выводы. Рассмотрение редуцированных ансамблей галактических областей Н II привело к следующим результатам.

а) Распределение областей Н II по радиусу Галактики сходно с распределением областей Н II для галактик класса Y [9]. В этом классе галактики в основном представлены спиралями типов Sc и SBc. Исходя из этого, можно полагать, что Галактика принадлежит к типу Sc либо SBc.

б) Интегральная функция радиосветимости галактических областей Н II обладает теми же характеристиками, что и аналогичные функции, построенные для других спиральных галактик.

в) Число областей Н II в Галактике ≈ 1000 , того же порядка, что и число О-ассоциаций. По-видимому, значительная доля радиоизлучающих областей Н II ($In > Ян \cdot \text{жпк}^2$) связана с О-ассоциациями.

г) Средняя масса областей Н II $\approx 100 M_{\odot}$, а их суммарная масса $\approx 10^6 M_{\odot}$.

д) Масса нейтрального газа Галактики, образованного из прекративших существование областей Н II ($1.7 \cdot 10^9 M_{\odot}$), составляет около 65% массы газа Галактики ($2.6 \cdot 10^9 M_{\odot}$).

Автор считает приятным долгом выразить глубокую благодарность В. А. Амбарцумяну за рассмотрение настоящей работы и за ряд ценных замечаний, а также сотрудникам обсерватории Ф. Г. Карашетян, М. О. Закарян и М. С. Мирзояну за помощь, оказанную при вычислениях.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория

STATISTICAL ANALYSIS OF GALACTIC H II REGIONS
OBSERVED IN CONTINUUM AND RECOMBINATION
LINE H 110 α . II

A. V. OSKANYAN

The analysis of reduced ensembles of galactic H II regions has shown that the distribution of H II regions along the galactic radius is similar to the distribution observed in spirals of types Sc and SBc, and the integral radio-luminosity function is similar to those obtained for other spiral galaxies. The total number of galactic H II regions is estimated to be of the order of 1000 (it is of the same order, as the number of O-associations in the Galaxy). The mean mass of the H II region is estimated to be 100 M_{\odot} . About 65% of the mass of neutral hydrogen observed in the Galaxy may originate from destroyed H II regions (the lifetime of an H II region is accepted to be equal to $6 \cdot 10^5$ years).

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Осканян, *Астрофизика*, 29, 197, 1988.
2. D. Downes, T. J. Wilson, J. Biegling, J. Wink, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, 40, 379, 1930.
3. Y. M. Georgelin, Y. P. Georgelin, *Astron. and Astrophys.*, 49, 57, 1976.
4. J. L. Caswell, R. P. Haynes, *Astron. and Astrophys.*, 171, 261, 1987.
5. P. G. Mezger, IAU Symp. No. 38, *The Spiral Structure of Our Galaxy*, eds. W. Becker, G. Contopoulos, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland, 1970, p. 107.
6. E. C. Reifenstein III, T. L. Wilson, B. F. Burke, P. G. Mezger, W. J. Altenhoff, *Astron. and Astrophys.*, 4, 357, 1970.
7. T. L. Wilson, P. G. Mezger, F. F. Gardner, D. K. Milns, *Astron. and Astrophys.*, 6, 364, 1970.
8. R. Genzel, D. Downes, *Astron. and Astrophys.*, 72, 234, 1979.
9. P. W. Hodge, R. C. Kennicutt, Jr., *Astrophys. J.*, 267, 563, 1983.
10. К. У. Аллен, *Астрофизические величины*, Мир, М., 1977.
11. В. А. Амбарцумян, *Докл. АН Арм.ССР*, 10, 149, 1949.
12. P. W. Hodge, *Publs. Astron. Soc. Pacif.*, 95, 721, 1983.
13. F. P. Israel, *Astron. and Astrophys.*, 90, 246, 1980.
14. S. Harris, P. E. Clegg, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 203, 955, 1983.
15. M. Rowan-Robinson, *Astrophys. J.*, 234, 111, 1979.
16. В. А. Амбарцумян, *Изв. АН СССР, сер. физ.*, 14, № 1, 15, 1950.
17. Б. Е. Маркарян, *Докл. АН Арм.ССР*, 15, 11, 1953.
18. W. W. Morgan, A. E. Whitford, A. D. Code, *Astrophys. J.*, 118, 318, 1953.
19. G. Alter, J. J. Ruprecht, V. Vangsek, *Catalogue of Star Clusters and Associations*, eds. G. Alter, B. Balázs, J. Ruprecht, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1970.

20. *J. Ruprecht, B. Balázs, R. E. White, Catalogue of Star Clusters and Associations, Suppl. I, Part B2, eds. B. Balázs, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1981.*
21. *П. Н. Холопов, Эруптивные звезды, ред. А. А. Боярчук и Р. Е. Гершберг, Наука, М., 1970, стр. 241.*
22. *L. F. Smith, P. Biermann, P. G. Mezger, Astron. and Astrophys., 66, 65, 1978.*
23. *P. G. Mezger, Astron. and Astrophys., 70, 565, 1978.*
24. *Д. Клейтон, Протозвезды и планеты, т. 1, ред. Т. Герелс, Мир, М., 1982, стр. 18.*