

УДК 524.35-355:520.27

## АНОМАЛИЯ СПЕКТРА ОСТАТКА СВЕРХНОВОЙ ЗС58

© 2019 В. П. Иванов\*, А. В. Ипатов, И. А. Рахимов, Т. С. Андреева

*Институт прикладной астрономии РАН, г. Санкт-Петербург, 191187 Россия*

Поступила в редакцию 19 января 2017 года; после доработки 15 ноября 2018 года; принята к публикации 15 ноября 2018 года

На радиотелескопе РТФ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН на четырех частотах от 1550 до 8450 МГц измерены мгновенные спектры остатка сверхновой ЗС58 на эпохи 2003.4, 2004.4 и 2013.2. Спектры ЗС58 для временных интервалов 1963–1971 гг., 1981–1998 гг. и 2004–2010 гг. получены на основе опубликованных данных, позволяющих сравнить интенсивности ЗС58 и стандартных источников. Для приведения всех данных в единую систему и построения спектров использовалась шкала потоков «искусственная луна». Сравнение спектров по данным, полученным в 1963–2013 гг., выявило нестационарные частотно-зависимые изменения плотностей потоков, а также локальные отклонения спектров ЗС58 от степенной частотной зависимости. Обсуждаются возможные причины обнаруженных аномалий.

Ключевые слова: *мера эмиссии, нестационарные изменения, остаток сверхновой, радиотелескоп, спектр*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Источник нетеплового радиоизлучения ЗС58 был открыт в 1952 г. и отождествлен с остатком сверхновой (ОСН) 1181 г. По структуре распределения радиояркости его относят к ОСН крабовидного типа. Как и Крабовидная туманность, ЗС58 содержит пульсар PSR J0205+6449, наблюдаемый на радиочастотах и в рентгеновском диапазоне. С открытием пульсара появилась серьезная проблема с определением возраста радиоисточника ЗС58, подробно обсуждаемая в работе [1]. Период пульсара по его динамическому возрасту оказался равным 5400 лет [2]. Близкая по величине оценка возраста получена при определении средней скорости расширения туманности ЗС58 по результатам сравнения изображений по данным VLA 1973 и 1998 гг., которой соответствует динамический возраст  $5000 \pm 2250$  лет [3]. В более поздней работе [4] это значение было уточнено: получен возраст около 7000 лет с нижним пределом на уровне  $3\sigma$  4300 лет. Таким образом, оказалось, что возраст радиотуманности сравним с возрастом пульсара и примерно в 5 раз превышает возраст сверхновой, наблюдавшейся в 1181 г. Анализ данных наблюдений в радио- и ИК-диапазонах показал наличие в спектре ЗС58 изломов на частотах, не превышающих 30 ГГц и 200 ГГц, в обоих случаях выше частоты излома крутизна спектра возрастает [5]. Предполагается [6], что более низкочастотный излом обусловлен скачком

показателя в энергетическом распределении частиц, инжектируемых пульсаром в туманность, в то время как второй излом связан с механизмом расходования энергии релятивистскими электронами на синхротронное излучение. В этом случае излом в спектре может указывать на длительную эволюцию туманности в течение времени, сравнимого с возрастом пульсара.

В то же время в динамике переменности ЗС58 присутствуют особенности, характерные для молодых ОСН. Анализ изменений плотностей потока ЗС58, полученных по данным измерений различных авторов на разных частотах, показал наличие нерегулярных изменений спектра источника, ранее обсуждавшихся в работе [1]. Относительные измерения плотностей потоков ЗС58/Cas A, проведенные на частоте 8000 МГц в 1978–1984 гг., выявили рост потока ЗС58 со средней скоростью  $(0.284 \pm 0.046)\%/год$  [7]. Измерения, выполненные на частоте 408 МГц в 1967 и 1986 гг. на одном и том же радиотелескопе и по одинаковой методике, показали рост потока ЗС58 со скоростью  $(0.32 \pm 0.13)\%/год$  [8]. Однако этот эффект не был стабильным: поток на частоте 5000 МГц не менялся с 1986 г. по 1996 г. [9], а по данным [4] плотность потока ЗС58 на этой частоте сохранялась на постоянном уровне с 1984 г. до 2004 г. Для выявления динамики эволюции источника на фоне нерегулярных изменений его радиоизлучения нужны были дальнейшие измерения спектров, выполненные в течение достаточно коротких временных интервалов.

\*E-mail: ivanov\_vp41@mail.ru

## 2. СПЕКТРЫ ЗС58, ИЗМЕРЕННЫЕ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РТФ-32

Измерения плотностей потоков ОСН ЗС58 относительно стандарта спектральной плотности потока ЗС295 были выполнены на радиотелескопе РТФ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН в апреле–мае 2003 г., в апреле–мае 2004 г. и в феврале–марте 2013 г. Параметры полноповоротного параболического радиотелескопа РТФ-32 диаметром 32 м обсерватории «Светлое» ИПА РАН приведены в таблице 1: (1)  $f$  — частота, МГц; (2)  $T_{\text{rec}}$  — шумовая температура входа приемника, К; (3)  $T_{\text{na}}$  — шумовая температура антенны, К; (4)  $T_{\text{sys}}$  — шумовая температура системы, К; (5)  $\Delta f$  — полоса пропускания приемника, МГц; (6) КИП — коэффициент использования поверхности; (7) НРВW — ширина диаграммы направленности на уровне 0.5 по мощности, в минутах дуги; поляризация всех облучателей круговая.

Важнейшим условием корректного решения задачи отображения изменений в спектрах исследуемых источников является сведение всех имеющихся данных сравнения потоков излучения этих объектов со стандартами в единую систему на основе прецизионной шкалы потоков. Шкала потоков VGPRW [13] для этой цели не пригодна вследствие причин, обсуждаемых в работе [14]. В нашей работе в этом качестве используется шкала потоков «искусственная луна» (ИЛ) [14–16], включающая более 15 стандартных источников со спектрами, перекрывающими диапазон частот 38 МГц–200 ГГц. Шкала потоков ИЛ базируется на абсолютных измерениях по методу «искусственной луны», превосходящем по точности другие методы. Существенным отличием от других шкал и преимуществом шкалы ИЛ является независимость от абсолютных измерений контроль формы спектров источников (метод относительных спектров). Шкала потоков ИЛ адаптирована на частоты до 200 ГГц и более на основе стандартного спектра Крабовидной туманности. Спектры Крабовидной туманности многократно и подробно измерялись методом «искусственной луны» в диапазоне частот 0.5–15 ГГц на временном интервале 1972.2–1992.7, а также определены в шкале потоков ИЛ по данным относительных измерений на 1955–1981 гг. в диапазоне частот (0.1–23) ГГц [17]. Эти спектры степенные, и на основе метода относительных спектров можно показать, что степенной закон выполняется, по крайней мере, до 200 000 МГц:

$$S(f) = S_0 \left( \frac{f}{f_0} \right)^\alpha, \quad (1)$$

где  $S(f)$  — плотность потока на частоте  $f$  [МГц] в Ю;  $S_0$  — параметр, равный плотности потока

на частоте  $f_0$  [МГц] в Ю;  $\alpha$  — спектральный индекс. Среднее значение  $\alpha = -0.327 \pm 0.002$  и не зависит от времени;  $\frac{1}{S} \frac{dS}{dt} = (-0.159 \pm 0.024) \%$ /год;  $S_0 = (8970 \pm 210)$  Ю на частоте  $f_0 = 1$  МГц на эпоху 1992.7.

Основным стандартом шкалы потоков ИЛ является внегалактический источник ЗС295. Его характеризует стабильное радиоизлучение, на волнах длиннее 1 см, и малые угловые размеры:  $5'' \times 1''$  [18]. В шкале потоков ИЛ спектр ЗС295 в диапазоне частот 1425–8450 МГц определяется степенной функцией (1) с параметрами:  $\alpha = -1.007$ ;  $S_0 = 30570$  Ю на частоте  $f_0 = 1$  МГц.

На радиотелескопе РТФ-32 были измерены отношения плотностей потоков ЗС58/ЗС295 на четырех частотах: 1550, 2370, 4840 и 8450 МГц. По измеренным отношениям потоков были получены абсолютные спектры ОСН ЗС58. Погрешности измерений включают среднеквадратичное отклонение отношений пиковых антенных температур, которое на всех частотах не превышало 1.3%, а также погрешности поправок за частичное разрешение ЗС58 диаграммой направленности (ДН) антенны. Методика определения поправок аналогична применявшейся в работе [18] и многих других. Выполняются сканы в двух ортогональных направлениях вдоль большой и малой осей источника, профили антенных температур аппроксимируются гауссианами и их ширина сравнивается с шириной ДН. Поправочный коэффициент находится из выражения:

$$g = \sqrt{1 + \left( \frac{\theta_{u1}}{\theta_{0.5}} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{\theta_{u2}}{\theta_{0.5}} \right)^2},$$

где  $\theta_{u1}$  и  $\theta_{u2}$  — ширина гауссианы на уровне  $0.5T_{\text{amax}}$  вдоль большой и малой осей источника соответственно;  $T_{\text{amax}}$  — максимальное значение антенной температуры в пределах скана;  $\theta_{0.5}$  — ширина ДН на уровне половинной мощности при совпадении значений  $\theta_{0.5} = \theta_{0.5A} = \theta_{0.5h}$  в азимутальной и угломестной плоскостях, что выполняется в нашем случае.

Погрешность коррекции за разрешение источника зависит от разности профилей антенной температуры скана и аппроксимирующей гауссианы. В случае ЗС58 профили сканов вдоль обеих осей мало отличаются от гауссиан, и погрешность поправок, максимальная для волны  $\lambda = 3.5$  см, не превышает 3.8%. Профили определялись путем усреднения двух противоположно направленных сканов. При наблюдениях применялась методика «on-off» и направление позиционного угла источника при наведении на него антенны с круговой поляризацией и круговой симметрией луча поправок

**Таблица 1.** Параметры радиотелескопа РТФ-32 обсерватории «Светлое» ([10–12])

$f$ , MHz	$T_{\text{rec}}$ , K	$T_{\text{на}}$ , K	$T_{\text{sys}}$ , K	$\Delta f$ , MHz	КИП	HPBW, arcmin
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1550	10	38	48	450	0.60	21.9
2370	10	37	50	450	0.48	14.6
4840	10	23	33	1000	0.60	6.96
8450	12	27	39	1000	0.56	3.94

**Таблица 2.** Спектры ОСН 5С58, измеренные в шкале потоков ИЛ в 2003–2013 гг.

Эпоха	Плотность потока $S(f \text{ [MHz]}), \text{ Jy}$				$\alpha$	$S_0, \text{ Jy}$	$\sigma, \text{ Jy}$
	1550 MHz	2370 MHz	4840 MHz	8450 MHz			
2003	$27.0 \pm 0.6$	$27.1 \pm 0.5$	$25.4 \pm 0.8$	$25.5 \pm 1.0$	$-0.044 \pm 0.017$	$26.3 \pm 0.3$	0.2
2004	$27.6 \pm 0.6$	$28.1 \pm 0.5$	$26.0 \pm 1.0$	$25.2 \pm 1.0$	$-0.057 \pm 0.025$	$26.9 \pm 0.4$	0.26
2013	$26.9 \pm 0.6$	$29.2 \pm 0.6$	$28.4 \pm 1.0$	$27.6 \pm 1.1$	$+0.017 \pm 0.044$	$28.2 \pm 0.8$	0.52

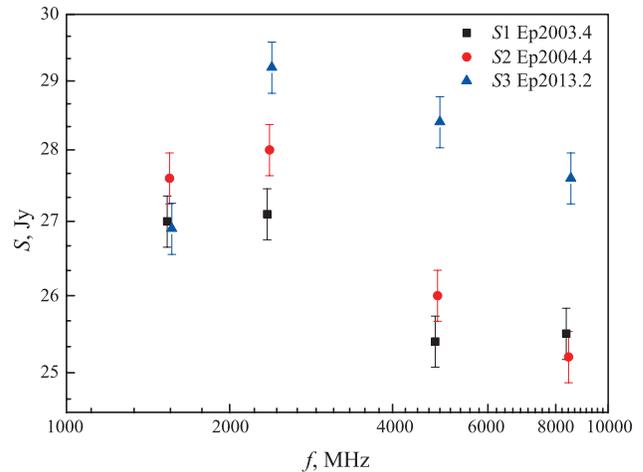
не требует. Коррекция за атмосферное поглощение вводилась в виде множителя  $e^\gamma$ , где  $\gamma = A_\lambda / \sin h$ ,  $h$  — угол места (высота) антенны. Для волн 18, 13, 6.2, 3.5 см  $A_\lambda$  составляет соответственно 0.01, 0.011, 0.012, 0.013.

Причиной погрешности определения плотности потока 3С58 при сравнении с 3С295 может быть различие спектральных индексов (соответственно менее 0.1 и 1.007). Эта погрешность зависит от отношения  $\Delta f/f$  и может быть устранена путем коррекции. В нашем случае максимальное значение корректирующего множителя не превышает 1.006 (для  $f = 1550$  МГц) и поправки не вводились.

Измерения на разных частотах делались неодновременно, однако продолжительность полного цикла измерений каждого спектра не превышает 2 месяцев.

Отношения плотностей потоков 3С58 и 3С295 на эпохи 2003.4 и 2004.4, а также соответствующие погрешности опубликованы в работе [1]. Плотности потоков 3С58 на эпохи 2003.4, 2004.4 и 2013.2 на частотах 1550, 2370, 4840 и 8450 МГц, определённые в шкале потоков ИЛ, приведены в таблице 2, где  $\alpha$  и  $S_0$  [Jy] — параметры степенной аппроксимации: спектральный индекс и плотность потока на частоте  $f_0 = 3500$  МГц;  $\sigma$  [Jy] — среднеквадратичное отклонения (СКО) измеренных плотностей потоков от степенной аппроксимации спектра.

Измерения на эпохи 2003.4, 2004.4 и 2013.2 выполнены на одном и том же радиотелескопе, применялись одинаковые методики измерений и

**Рис. 1.** Спектры 3С58 по наблюдениям на РТФ-32 «Светлое»: S1, S2 и S3 — соответственно эпохи 2003.4, 2004.4 и 2013.2

коррекции данных, следовательно, систематические погрешности также одинаковы для всех трех эпох. Потому для иллюстрации динамики эволюции спектра 3С58 на временном интервале 2003–2013 гг. на рис. 1 приведены только случайные погрешности. На рис. 1 виден существенно превышающий погрешности рост потоков со временем на частотах 2370–8450 МГц. Измеренные на этих частотах в 2013 г. плотности потоков оказались на 8–12% выше, чем в 2003 г.

Мгновенные спектры 3С58 на эпохи 2003.4, 2004.4 и 2013.2 представлены на рис. 1.

### 3. СПЕКТРЫ ЗС58, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО ОПУБЛИКОВАННЫМ ДАННЫМ

Точность относительных радиоастрономических измерений была достаточно высокой уже к 1964 г. С тех пор опубликовано значительное количество работ, по данным которых можно получить отношения потоков ЗС58 и одного или нескольких стандартных источников шкалы потоков ИЛ и определить в этой шкале плотности потоков ЗС58. Таким образом, совокупность результатов многочисленных измерений потоков ЗС58 [3, 5, 8, 19–30] была приведена нами в единую систему на основе шкалы потоков ИЛ. Полученные данные образуют три группы, различающиеся по времени измерений и частотным интервалам, и представлены в виде таблиц 3, 4 и 5 и соответствующих им рис. 2–4, где в логарифмическом масштабе изображены спектры ЗС58 в шкале потоков ИЛ.

Обозначения и размещение данных в таблицах 3, 4 и 5: (1) частота измерений  $f$ ; (2) плотность потока ЗС58 в шкале потоков ИЛ,  $S_{\text{ИЛ}}$  [Jy]; (3) абсолютная погрешность измерения потока  $\text{Err}$  [Jy]; (4) опубликованное значение плотности потока ЗС58,  $S_p$  [Jy]; (5) Source — источник-калибратор (Sample в случае нескольких стандартных источников); (6) множитель перехода к шкале ИЛ,  $k$ ; (7) эпоха измерений,  $\text{EPOCH}$ , и (8) Ref — ссылка на первоисточник.

Результаты измерений (точки на рис. 2) образуют две группы, в каждой из которых зависимость плотности потока от частоты — степенная в виде (1), с малыми отклонениями от аппроксимирующих линий. Две группы данных не разделяются во времени.

Параметры степенной зависимости  $S(f)$  главной (верхней) последовательности, A4:  
 $\alpha = -0.111 \pm 0.006$ ;  $S_0 = (67.24 \pm 2.9)$  Jy на частоте  $f_0 = 1$  МГц.

Для нижней последовательности (частоты 178, 408 и 5000 МГц), A2:

$\alpha = -0.075 \pm 0.004$ ;  $S_0 = (45.41 \pm 1.31)$  Jy на частоте  $f_0 = 1$  МГц.

Две группы нельзя рассматривать как единую совокупность данных, поскольку плотности потоков на частотах 178 и 408 МГц отличаются от верхней последовательности более чем на  $3\sigma$ , а на 5000 МГц — на  $2.4\sigma$ . Есть основания предполагать, что столь значительные различия не являются следствием грубых ошибок измерений. Более подробно этот вопрос рассмотрен в разделе «Обсуждение результатов».

Результаты измерения плотностей потоков ЗС58 в 1981–1998 гг. представлены в таблице 4 и на рис. 3 (черные квадраты). Красными кружками на рис. 3 изображены точки с избытком потока

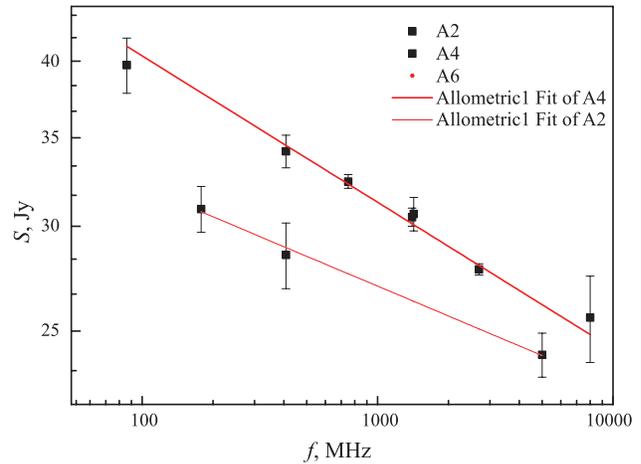


Рис. 2. Спектр ОСН ЗС58 в шкале потоков ИЛ по данным 1963–1971 гг. (таблица 3).

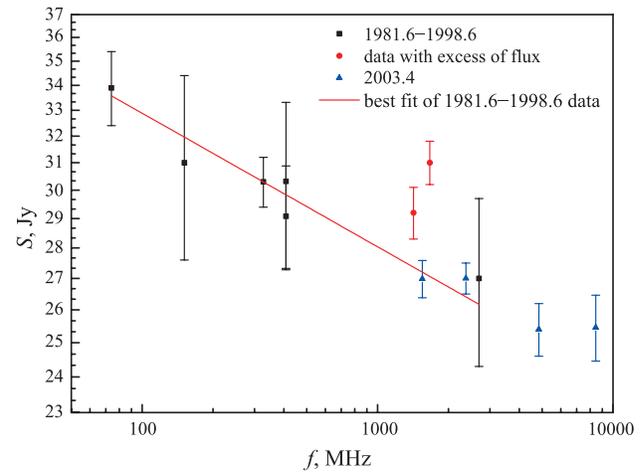


Рис. 3. Спектр ОСН ЗС58 в шкале потоков ИЛ: квадраты и кружки — по данным 1981–1998 гг. (таблица 4); треугольники — полученный на РТФ-32 в 2003 г. (таблица 2).

на частотах 1420 и 1667 МГц. Совокупность данных 1981–1998 гг. хорошо согласуется с общей степенной зависимостью плотности потока от частоты вида (1).

Спектр 1981–1998 гг. обозначим  $S_b(f)$  и далее будем использовать его для сравнений как базовый. Параметры степенной зависимости  $S_b(f)$ :  
 $\alpha = -0.069 \pm 0.008$ ;  $S_0 = (45.2 \pm 2.15)$  Jy на частоте  $f_0 = 1$  МГц.

Треугольниками на рис. 3 представлены оценки плотности потоков по измерениям 2003 г. на радиотелескопе РТФ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН. Измерения на частотах 1550, 2370, 4840 и 8450 МГц в пределах погрешностей совпадают со спектром по данным 1981–1998 гг. (прямая

**Таблица 3.** Спектр ОСН ЗС58 в шкале потоков ИЛ по данным измерений 1964–1971 гг.

$f$ , GHz	$S_{ил}$ , Jy	Err, Jy	$S_p$ , Jy	Source	$k$	Epoch	Ref
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
86	39.7	1.9	39.5	Sample	1.006	1966	[19]
178	30.9	1.2	28.5	Sample	1.085	1964.9	[20]
408	28.55	1.6	35	ЗС295	0.820	1967.9	[8]
408	34.2	1.0	35.1	Sample	0.970	1970.9	[21]
750	32.4	0.4	33.3	Sample	0.970	1963.4	[20]
1400	30.5	0.5	32.6	Sample	0.935	1963.4	[20]
1425	30.7	0.9	34.2	Sample	0.900	1965	[22]
2695	27.8	0.3	30.6	Sample	0.910	1966.7	[20]
5000	24.0	0.9	27.2	Sample	0.880	1967.1	[20]
8000	25.6	1.9	26.7	Sample	0.960	1964	[23]

**Таблица 4.** Спектр ОСН ЗС58 в шкале потоков ИЛ по данным измерений 1981–1998 гг.

$f$ , GHz	$S_{ил}$ , Jy	Err, Jy	$S_p$ , Jy	Source	$k$	Epoch	Ref
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
74	33.9	1.5	33.6	Sample	1.01	1998.6	[3]
151	31.0	3.4	36	Sample	0.86	1984.6	[24]
327	30.3	0.9	33.9	Sample	0.89	1998.6	[3]
408	29.08	1.8	32.2	Sample	0.9	1997.9	[25]
408	30.32	3.0	35	Sample	0.87	1986.6	[8]
1420	29.2	0.9	31.9	Sample	0.915	1997.9	[25]
1667	31	0.8	31	ЗС295	1	1986.0	[26]
2695	27.0	2.7	30	ЗС295	0.9	1981.8	[24]

линия на рис. 3), что указывает на стабильность спектра ЗС58 в диапазоне частот 74–8450 МГц с параметрами:

$\alpha = -0.061 \pm 0.005$ ;  $S_0 = (42.95 \pm 1.49)$  Jy на частоте  $f_0 = 1$  МГц на временном интервале 1981–2003 гг.

Сравнение спектра 2013 г. с обобщенным спектром  $S_b$  1981–1998 гг. показывает, что его наклон на частотах 2370–8450 МГц близок к наблюдавшемуся ранее  $\alpha = -0.043 \pm 0.003$ . Плотности потоков на частотах 2370–8450 МГц выше приблизительно на 12.5%, а на частоте 1550 МГц ниже общего спектра на 1%.

Спектры ОСН ЗС58 по данным 1963–1971 гг. и 1981–2003 гг. приведены для сравнения на рис. 4.

Точки главной (верхней) последовательности обозначены на рис. 4 как 1963–1971 погт.

В таблице 5 и на рис. 5 представлены данные измерений плотностей потоков ЗС58 на частотах 14 200–143 000 МГц. За исключением двух — на частотах 32 000 МГц (epoch 1983.5) [30] и 84 200 МГц (epoch 1986.0) [31] — измерения выполнены в 2004–2010 гг. Для перехода к шкале потоков ИЛ в качестве стандарта применялся спектр Крабовидной туманности, измерявшийся в тех же наблюдательных сессиях.

В 2004 г. плотности потоков ЗС58 и Крабовидной туманности были измерены на частотах 22 700, 32 960, 40 640, 60 520 и 92 940 МГц по программе WMAP [28]. Без учета наблюдений на частоте

Таблица 5. Спектр ОСН ЗС58 в шкале потоков ИЛ по данным измерений 2004–2010 гг.

$f$ , GHz	$S_{\text{ил}}$ , Jy	Err, Jy	$S_p$ , Jy	Source	$k$	Epoch	Ref
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
14.2	21.17	1.03	24.7	Crab	0.86	2007.5	[27]
15	19.97	1.0	24.3	Crab	0.82	2007.5	[27]
15.7	18.99	0.89	23.4	Crab	0.81	2007.5	[27]
16.4	18.0	0.83	21.8	Crab	0.83	2007.5	[27]
17.1	17.85	0.84	21.2	Crab	0.84	2007.5	[27]
17.9	18.5	0.91	22.4	Crab	0.83	2007.5	[27]
22.7	18.1	0.35	20.8	Crab	0.87	2004.5	[28]
32.96	16.38	0.26	19.0	Crab	0.86	2004.5	[28]
40.64	14.85	0.26	17.1	Crab	0.87	2004.5	[28]
60.52	12.38	0.26	14.1	Crab	0.88	2004.5	[28]
92.94	10.32	0.542	11.4	Crab	0.91	2004.5	[28]
30	15.78	1.56	22.2	Crab	0.71	2010.3	[5]
44	13.93	1.36	16.4	Crab	0.85	2010.3	[5]
70	11.34	1.12	14.2	Crab	0.80	2010.3	[5]
100	9.32	0.95	12.7	Crab	0.73	2010.3	[5]
143	7.69	0.78	10.8	Crab	0.71	2010.3	[5]
32	17.87	1.037	24.2	Crab	0.74	1983.5	[29]
84.2	9.84	1.314	15.0	Crab	0.66	1986.0	[30]

те 22 700 MHz полученные данные в шкале потоков ИЛ образуют степенной спектр с параметрами:  $\alpha = -0.454 \pm 0.006$ ;  $S_0 = (1847.5 \pm 44)$  Jy на частоте  $f_0 = 1$  MHz (рис. 5, черные квадраты); оценка потока на частоте 22.7 GHz расположена ниже линии аппроксимации на 7%.

В 2007 г. выполнены измерения потоков излучения ЗС58 и Крабовидной туманности на частотах 14 200–17 900 MHz по программе АМІ (Arcminute Microkelvin Imager) [27] (треугольники на рис. 5). Очевидны отклонения от степенного закона из-за провала на частоте  $f_{\text{min}} \approx 16.5$  GHz. Параметры степенной аппроксимации по двум крайним точкам:  $\alpha = -0.583$ ;  $S_0 = 5553.6$  на частоте  $f_0 = 1$  MHz. Поток на частоте 16 400 MHz ниже этой аппроксимации на 8% ( $1.6\sigma$ ).

Измерения для ЗС58 и Крабовидной туманности на 9 частотах от 30 000 до 857 000 MHz выполнены по программе Planck [5] между 13 августа 2009 г. и 27 ноября 2010 г. (средняя эпоха 2010.3). На частотах 70 000–143 000 MHz спектр степенной с

параметрами:

$\alpha = -0.544 \pm 0.003$ ;  $S_0 = (4883.8 \pm 77.1)$  Jy на частоте  $f_0 = 1$  MHz.

Потоки на частотах 30 000 MHz и 44 000 MHz ниже этой аппроксимации на 14% и 5% соответственно.

Сравнение оценок потоков из таблицы 5 (рис. 5) на частотах выше 30 000 MHz не обнаруживает систематических различий, выходящих за пределы ошибок. В то же время следует отметить, что разность спектральных индексов для данных WMAP и Planck больше суммы их  $1\sigma$ -погрешностей.

Все данные, включенные в таблицу 5, в целом следуют степенной зависимости от частоты с наклоном от  $\alpha = -0.454$  до  $\alpha = -0.544$ , существенно большим, чем на более низких частотах (таблица 4). Между участком, измеренным на частотах 74–8450 MHz, и более высокочастотными данными, представленными в таблице 5, наблюдается излом спектра. Частота излома спектра ЗС58 определяется по параметрам спектров (таблицы 4 и 5).

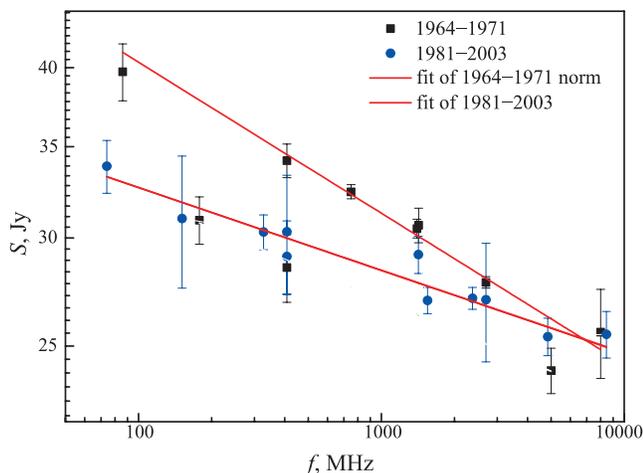


Рис. 4. Спектры по данным 1964–1971 гг. и 1981–2003 гг. (таблицы 3, 4 и 2).

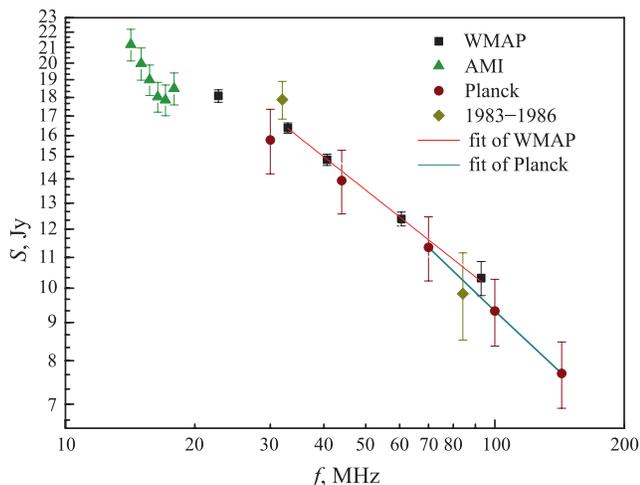


Рис. 5. Спектры ОСН 3C58 в шкале потоков ИЛ по данным таблицы 5 (2004–2010 гг.).

В случае сравнения спектров 1981–2003 гг. и данных WMAP частота излома  $f_b = 14080$  MHz, для 1981–2003 гг. и данных Planck эта частота  $f_b = 17830$  MHz. Судя по рис. 5, излом плавный и его частота может меняться со временем.

На рис. 6 представлены спектры на частотах 74–8450 MHz и по данным Planck на частотах 30 000–143 000 MHz, полученные в 1981–2003 гг.

Сравнение данных наблюдений в обсерватории «Светлое» 2003–2013 гг., а также опубликованных данных, приведенных к шкале потоков ИЛ, показало, что нестационарные изменения спектра являются характерной особенностью эволюции 3C58. В течение временного интервала 1963.4–2013.2 в спектре источника имели место изменения спектрального индекса, а также отклонения плотностей

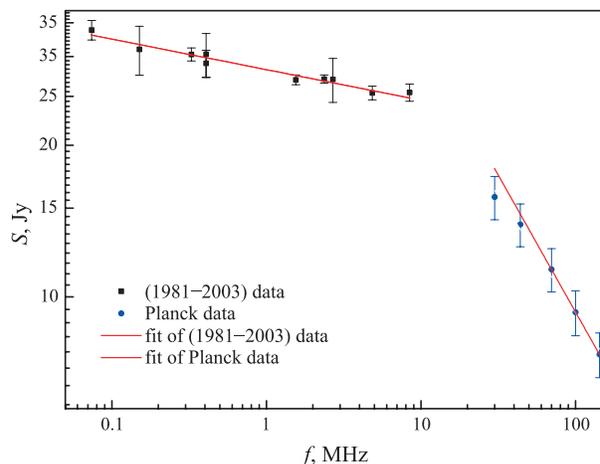


Рис. 6. Спектры 1981–2003 гг. и данные Planck.

потоков от среднего спектра как в большую, так и в меньшую стороны. Для спектров 1963.4–1970.9 и 1981.8–2003.4 были рассчитаны плотности потоков на частотах радиотелескопа РТФ-32. Зависимости от времени изменений потоков 3C58 на частотах 1550, 2370, 4840 и 8450 МГц на временном интервале 1963.4–2013.2 приведены на рис. 7. Погрешности вычислены с учетом случайных и систематических составляющих.

Отметим обнаруженные вариации потока 3C58 по данным с 1963 по 2013 гг.:

- поток на частоте 1550 МГц с 1963 по 2013 гг. падал со средней скоростью 0.2%/год;
- на частоте 2370 МГц между 1971 и 1981 гг. поток уменьшился на 5.5%, до 1998 г. не менялся, после чего к 2013 г. вырос на 8%;
- поток на частоте 4840 МГц между 1980 и 2003 гг. сохранялся на постоянном уровне, после чего к 2013 г. вырос на 12%;
- на частоте 8450 МГц между 1971 и 1998 гг. поток вырос на 1%, после чего к 2013 г. увеличился еще на 11%;
- с 1983 по 2010 гг. поток на частоте 32 000 MHz падал со средней скоростью 0.38%/год.

На рис. 8 показана зависимость потока на частоте 32 000 MHz от времени.

#### 4. ДИНАМИКА ЭВОЛЮЦИОННЫХ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ 3C58

В результате измерений на радиотелескопе РТФ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН, а также приведения многочисленных опубликованных данных к шкале потоков ИЛ нами получена

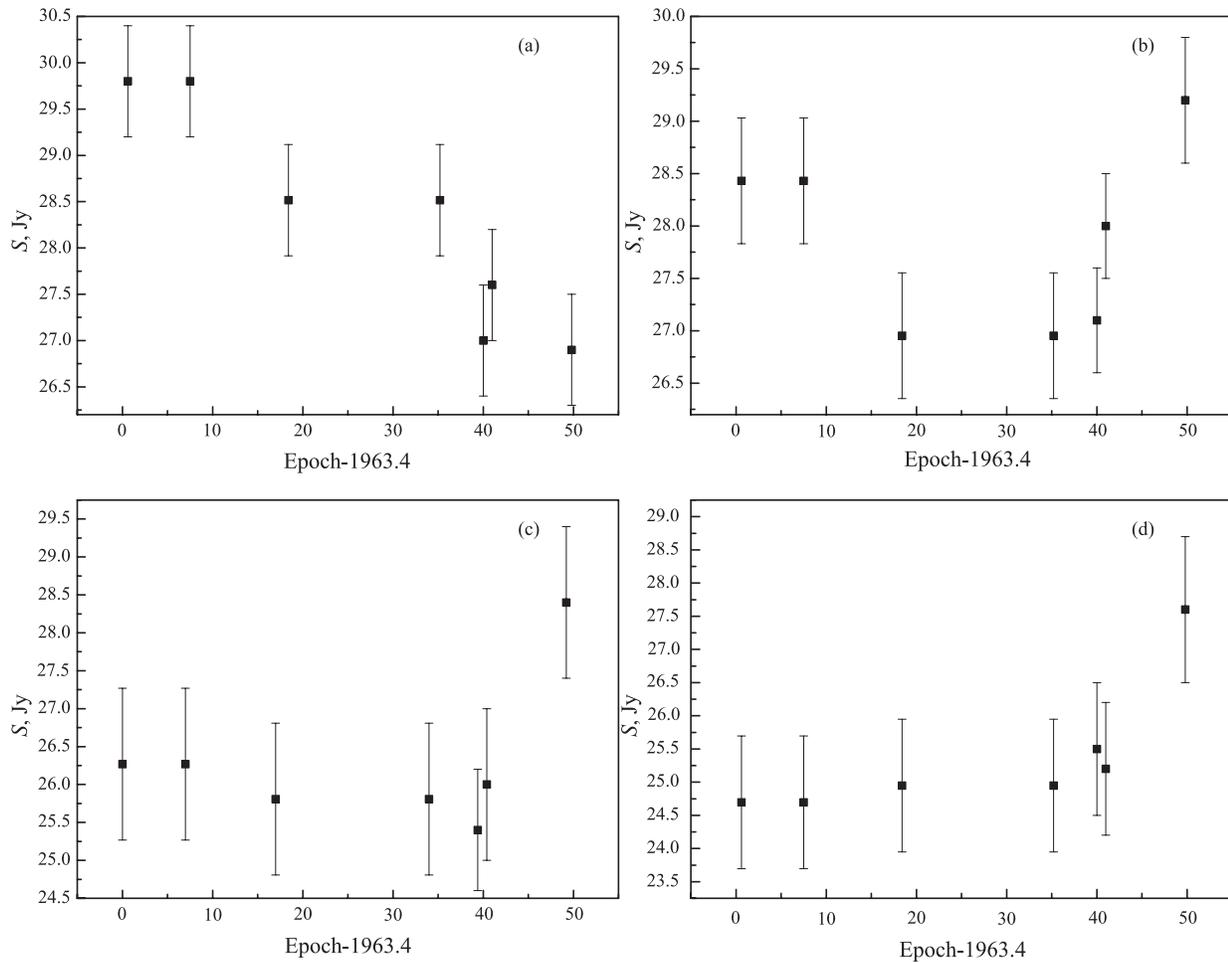


Рис. 7. Плотности потоков ЗС58 с 1963 по 2013 гг. на частоте (а) 1550 МГц, (б) 2370 МГц, (с) 4840 МГц и (д) 8450 МГц.

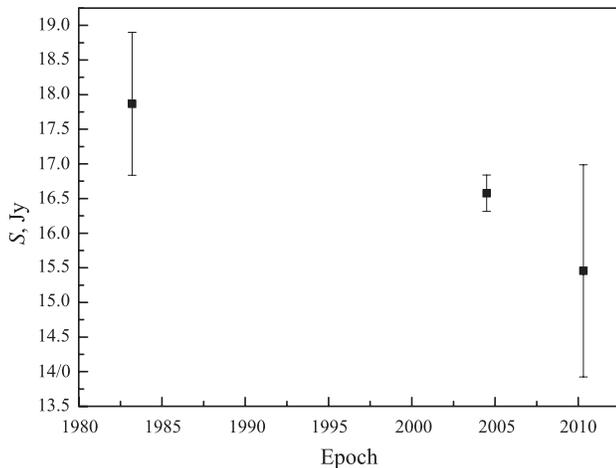


Рис. 8. Плотности потоков ЗС58 на частоте 32000 МГц с 1983 по 2010 гг.

эволюционная последовательность спектров ОСН ЗС58. Существенно, что все спектры ЗС58 этой последовательности получены на основе спектров

стандартных источников шкалы потоков ИЛ и относительных измерений. Это обеспечивает высокую точность определения спектров и их взаимного сравнения и позволяет выявить особенности временных вариаций спектра ОСН ЗС58.

Наблюдаемые изменения можно отнести к двум разным типам, отличающимся по широкополосности процессов. Сравнение спектров 1963–1971 гг. и 1981–2003 гг. показывает, что один из типов переменности представляет собой глобальные изменения спектра в целом. На частотах 74–8450 MHz спектральный индекс уменьшился от раннего значения  $\alpha = -0.111 \pm 0.006$  до более позднего  $\alpha = -0.061 \pm 0.005$  (рис. 4). На частотах около 8 GHz и выше поток незначительно вырос, в то же время на 100 MHz упал на 24%. Возможно, что частью этого процесса можно считать обнаруженный на частоте 8000 MHz рост потока на  $(0.284 \pm 0.046)\%/год$  [7]. Серия наблюдений, состоявшая в сравнении излучений источников ЗС58 и Кассиопея А, выполнена между эпохами 1978.3 и 1984.6. Считая, что скорость падения потока Кассиопея А

хорошо известна, получен результат: поток 3С58 за время наблюдений вырос на  $(1.79 \pm 0.29)\%$ .

Такая переменность может быть следствием изменения энергетического спектра релятивистских частиц, инжектируемых пульсаром в туманность. Однако тот факт, что спектральный индекс изменился практически скачком за малый интервал времени (не более 10 лет), не согласуется с этим предположением. Линейные размеры области, в которой генерируется излучение с наблюдаемыми изменениями, не могут превышать 2.5 пк (угол  $160''$ ), что значительно меньше размеров 3С58.

К другому типу переменности следует отнести аномалии спектра, наблюдаемые в ограниченной полосе частот. Эффект избытка потока в полосе частот относительно среднего спектра наиболее заметен в спектре S3, измеренном на радиотелескопе РТФ-32 в 2013 г. Точки S3 на частотах 2370, 4840 и 8450 МГц расположены выше аппроксимации спектра 1981–1998 гг. на 10–14%. Данные близких по времени измерений потоков 3С58 на других частотах в этом диапазоне отсутствуют, и спектр S3 сравнивается со спектром 1981–1998 гг. Между 2003 и 2013 гг. на частотах 2370, 4840 и 8450 МГц плотности потоков росли, средняя скорость роста составила 0.65%/год; 1.1%/год и 0.9%/год соответственно. Однако процесс мог начаться существенно позднее 2003 г., поскольку данные обсерватории «Светлое» на эту эпоху мало отличаются от спектра 1981–1998 гг.

Аномальные эффекты в спектре 3С58 в виде избытка потока по сравнению с основным спектром видны на некоторых частотах в спектре 1981–1998 гг. Поток на частоте 1667 МГц, измеренный в 1986 г., выше среднего спектра на 13% ( $4\sigma$ ) [26], а на частоте 1420 МГц по данным измерений [25] в 1998 г. превышение составило 5.2% ( $1.7\sigma$ ).

К аномалиям в ограниченной полосе частот следует отнести обнаруженный на частоте 408 МГц [8] рост потока  $(0.32 \pm 0.13)\%/год$ . Этот результат заслуживает подробного обсуждения. В спектре 1963–1971 гг. (рис. 2) содержится две группы точек: основная, включающая большинство данных, и группа, состоящая из трех точек, плотности потоков в которой значимо меньше аппроксимации основной группы. Есть аргументы в пользу того, что точки нижней последовательности не являются следствием грубых ошибок измерений. Одна из них, оценка плотности потока на частоте 408 МГц, получена по данным [8]. В процессе выполнения этой работы дважды, в 1967 и в 1986 гг., поток 3С58 измерялся на одном и том же радиотелескопе и по одинаковой методике, в результате чего

обнаружен рост потока 3С58 на  $(6.2 \pm 0.3)\%$  на интервале 18.9 лет. В качестве опорного источника использовался внегалактический источник 3С386. В 1986 г. при наблюдениях обоих источников, 3С58 и 3С386, калибровка проводилась по 3С295. Следует отметить, что измеренная в 1986 г. плотность потока хорошо согласуется с общим спектром на 1981–2003 гг., следовательно, точка 1968 г. действительно ниже спектра 1981–2003 г. на 6.4% и на 21% ниже спектра 1963–1971 гг. Поток 3С386 за 19 лет мог измениться, но маловероятно, что столь значительно, примерно на 20%. Поэтому «провал» точки 408 МГц, измеренной в 1968 г., можно считать установленным фактом, как и то, что это явление было ограничено во времени: оценка потока по измерениям на той же частоте в эпоху 1970.9 [21] хорошо согласуется со спектром, включающим большинство данных 1963–1971 гг. Обнаруженный в работе [8] рост потока выглядит как восстановление после спада.

Измерения потока 3С58 на частотах 178 и 5000 МГц выполнены в ходе массового определения [20] потоков источников 3С каталога. Техника и методика измерений и коррекции данных были хорошо отработаны, что определило высокую относительную точность полученных оценок. Оценка потока 3С58 на частоте 178 МГц на  $22.5\%$  ( $5.6\sigma$ ), а на частоте 5000 МГц на  $9\%$  ( $2.4\sigma$ ) ниже основного спектра. Вероятность большой ошибки этих измерений мала, и соответствующие данные заслуживают доверия.

Необходимо отметить, что при наличии обсуждаемых здесь кратковременных аномалий спектра анализ ограниченных по времени и диапазону частот измерений может привести к ошибкам в определении параметров спектра. Так, при определении спектра 3С58 по данным [20] на частотах 1400, 2695 и 5000 МГц на эпоху 1966.5 из-за аномально низкого значения потока на частоте 5000 МГц в работе [1] получено ошибочное значение спектрального индекса  $\alpha \approx 0.2$  в спектре 1965 г.

Примером особенности в виде «провала» в спектре на частотах выше излома служат данные измерений АМ1 в диапазоне частот 14.2–17.9 GHz (см. таблицу 5).

В итоге можно считать установленным, что в спектре ОН 3С58 наблюдаются кратковременные (длительностью порядка одного года–нескольких лет) нестационарные «избытки» и «провалы» плотностей потоков относительно основного спектра в ограниченной полосе частот с последующим их восстановлением до среднего по спектру уровня. Оценка частотных и временных параметров динамики нестационарных изменений плотностей потоков на основе спектров, измеренных в 2013 г. в обсерватории «Светлое», а также

данных таблиц 3 и 4, показывает, что линейные размеры физических объектов, порождающих аномалии, существенно ограничены.

### 5. АНАЛИЗ ДАННЫХ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛИ ИСТОЧНИКА

Частотное распределение плотностей потоков в спектре ЗС58 на эпоху 2013.2 имеет особенности, характерные для теплового источника: плоский спектр с завалом в области более низких частот. Эти особенности хорошо видны на рис. 1. Нами рассмотрена модель спектра радиоизлучения ЗС58, предполагающая наличие двух составляющих: синхротронной и нестационарной тепловой компоненты в спектре 2013 г., измеренном на радиотелескопе РТФ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН. Из спектра S3 вычиталась синхротронная составляющая, соответствующая спектру 1981–1998 гг., разность интерпретируется, как тепловая компонента. Параметры спектра тепловой компоненты определяются из условия минимума среднеквадратичного отклонения тепловой аппроксимации от разности измеренного и синхротронного спектров. Такая процедура позволила определить параметры тепловой компоненты для спектра 2013 г. Попытка определить тепловую составляющую в спектрах 2003 и 2004 гг. не дала результата.

Поскольку распределение яркостной температуры теплового источника неизвестно, далее предполагается, что она постоянна в пределах телесного угла теплового источника  $\Omega_t$ . Плотность потока  $S_t$  тепловой компоненты для источника с яркостной температурой  $T_B(f)$ , постоянной в пределах  $\Omega_t$ , определяется соотношением:

$$S_t = \frac{2k}{c^2} f^2 T_B(f) \Omega_t, \quad (2)$$

где  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  Дж К<sup>-1</sup>,  $T_B = T_k(1 - e^{-\tau})$ ,  $\tau = \frac{0.34 EM}{f^{2.1}}$ ,  $\tau$  — оптическая толщина источника на частоте  $f$  [МГц],  $EM$  (пк см<sup>-6</sup>) — мера эмиссии.

В предположении, что тепловой источник представляет собой диск,  $\Omega_t = \pi \theta^2/4$ , а кинетическая температура электронов в источнике  $T_k = 10^4$  К, соотношение (2) принимает вид:

$$S_t = 7.67 \pi \theta^2 f^2 (1 - e^{-\tau}), \quad (3)$$

где плотность потока  $S_t$  измеряется в Ян, частота  $f$  — в МГц, угловой диаметр источника  $\theta$  — в рад, телесный угол теплового источника  $\Omega_t$  — в ср.

Результаты подбора параметров теплового источника представлены в таблице 6 со следующими обозначениями:

$(S3)_{\text{term}}$  — расчетные значения плотностей потоков теплового источника при заданных значениях параметров теплового спектра ( $7.67 \pi \theta^2$ ) и ( $0.34 EM$ );

$(S3 - S_b)$  — разности плотностей потоков измененного спектра S3 и базового нетеплового спектра  $S_b$  1981–1998 гг.

Оптимальные значения двух параметров теплового спектра,  $7.67 \pi \theta^2$  и  $0.34 EM$ , подобраны так, что для частот 2370, 4840 и 8450 МГц среднеквадратичное отклонение  $[(S3 - S_b) - (S3)_{\text{term}}]$  достигает минимального значения. На этих частотах затухание излучения основного источника, проходящего через тепловой источник, мало, в отличие от частоты 1550 МГц, где поглощается 80% мощности проходящего через тепловой источник излучения. Предполагается, что плотности потоков ЗС58 на частотах  $\leq 1550$  МГц должны быть ниже базового спектра  $S_b$  из-за поглощения в тепловом источнике, хотя оценка величины затухания затруднена из-за неопределенности локализации теплового источника. Согласно данным таблицы 6, разность  $[(S3)_{\text{term}} - (S3 - S_b)]$  на частоте 1550 МГц составляет 2.27 Ю, откуда следует, что для соответствия расчетному тепловому спектру разность  $S3 - S_b$  должна быть увеличена на 2.27 Ю, т.е. вычитаемая величина потока должна быть ниже спектра  $S_b$  на 2.27 Ю (более 8% плотности потока  $S_b$ ).

Наблюдаемый в спектре 2013 г. эффект в виде избытка потока на частотах 2370, 4840 и 8450 МГц удовлетворительно объясняется наличием компактного теплового источника в ОСН ЗС58 в эпоху наблюдений. По той же причине возможен «провал» спектра на частотах, не превышающих 1550 МГц, но данных наблюдений на эпоху 2013 нет.

Таким образом, нестационарные «избытки» и «провалы» в спектре ЗС58 могут быть обусловлены активностью компактных тепловых источников с коротким временем жизни.

Значения  $\theta$ , линейного диаметра  $D$ ,  $EM$  предполагаемого теплового источника приведены в таблице 7.

Остается невыясненным вопрос о причинах многократного возникновения компактных тепловых источников в ОСН ЗС58.

### 6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате измерений на радиотелескопе РТФ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН, а также приведения имеющихся опубликованных данных к шкале потоков ИЛ, нами получены спектры ОСН ЗС58 для интервала времени 1963–2013 гг. Существенно, что все плотности

**Таблица 6.** Оценка основных характеристик теплового источника.

$f$ , МГц	$f^2$	$f^{2.1}$	$7.67 \pi \theta^2$	$0.34 EM$	$\tau$	$e^{-\tau}$	$(S3)_{\text{term}}$	$(S3 - S_b)$	$(S3 - S_b) - (S3)_{\text{term}}$
1550	2.40E+06	5.01E+06	1.02E-06	7.97E+06	1.59	0.20	1.94	-0.33	-2.27
2370	5.62E+06	1.22E+07	1.02E-06	7.97E+06	0.65	0.52	2.73	2.79	0.06
4840	2.34E+07	5.47E+07	1.02E-06	7.97E+06	0.15	0.86	3.22	3.22	1.5E-06
8450	7.14E+07	1.76E+08	1.02E-06	7.97E+06	0.05	0.96	3.20	3.42	0.22

**Таблица 7.** Характеристики теплового источника на эпоху 2013.2

$\theta$ , as	$D$ , pc	$EM$ , pc cm <sup>-6</sup>
$42.4 \pm 2.2$	$0.66 \pm 0.034$	$(2.3 \pm 0.6) \times 10^7$

потоков 3С58 в этом временном интервале определены на основе стандартных спектров источников шкалы потоков ИЛ и относительных измерений. Это обеспечивает высокую точность определения данных и возможность их взаимного сравнения.

Сравнение данных наблюдений в обсерватории «Светлое» 2003–2013 гг., а также опубликованных данных 1963–2010 гг., приведенных к шкале потоков ИЛ, указывает на нестационарные изменения радиоизлучения ОСН 3С58, которые проявляются в изменениях спектрального индекса, а также в отклонениях плотностей потоков от среднего спектра как в большую, так и в меньшую стороны. Два этих проявления переменности могут быть обусловлены разными причинами.

Один из типов переменности представляет собой глобальные изменения спектра в целом, включая спектральный индекс, что может быть следствием изменения энергетического спектра релятивистских частиц, инжектируемых пульсаром в туманность. Однако этот процесс должен быть достаточно длительным, чтобы энергетическое распределение частиц в туманности изменилось. Обращает на себя внимание тот факт, что спектральный индекс был стабилен в течение длительных интервалов времени 1963–1971 гг., 1981–2003 гг., изменившись между 1971 и 1981 гг., а этот промежуток времени представляется недостаточным для такого процесса. Наблюдаемые изменения не являются эволюционными.

Анализ переменности в виде кратковременных отклонений плотностей потоков от среднего спектра («избытков» и «провалов») в ограниченной полосе частот показывает, что линейные размеры физических объектов, порождающих аномалии, существенно ограничены.

Нами рассмотрена модель спектра радиоизлучения 3С58, предполагающая наличие двух составляющих: синхротронной и нестационарной тепловой компоненты в спектре 2013 г., измеренном на радиотелескопе РТФ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН. Выполнены оценки параметров теплового источника, в частности, его углового ( $\theta$ ) и линейного ( $D$ ) диаметров:  $\theta = 42''.4 \pm 2''.2$ ;  $D = 0.66 \pm 0.034$  pc. Размеры теплового источника малы по сравнению с туманностью 3С58 и не противоречат скорости наблюдаемых изменений. На частотах 2370–8450 МГц тепловой источник создает наблюдаемые приращения потоков, на частотах  $f \leq 1550$  МГц плотности потоков должны уменьшиться на 8%, т. е. наблюдаемые изменения в спектрах могут быть объяснены в рамках рассматриваемой модели. Однако нельзя исключать действия других механизмов, возможно, нескольких.

Приведение данных наблюдений разных авторов в единую систему позволило уточнить частоту излома спектра 3С58. На основе имеющихся данных в 2007–2010 гг. она составляла  $16\,000 \pm 1900$  МГц. Излом плавный и возможно, что его частота меняется со временем.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Точные данные о радиоизлучении ОСН 3С58 на интервале времени 1963–2013 гг. в диапазоне частот 74–143 GHz получены в результате наблюдений на радиотелескопе РТФ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН и учета опубликованных данных, приведенных к шкале потоков ИЛ. Определены параметры спектров 3С58, обнаружены нестационарные изменения радиоизлучения остатка, обусловленные активностью короткоживущих компактных объектов. Для объяснения наблюдаемых явлений предложена модель теплового компактного источника внутри ОСН.

В настоящее время доминирует мнение, что 3С58 не содержит следов СН 1181 [4]. Приводятся аргументы об отсутствии вблизи 3С58 следов излучения на уровне самых чувствительных обзоров. Однако если остаток СН 1181 находится внутри старого объекта 3С58, то обнаружить его таким

образом невозможно. Объяснение нестационарной переменности, характерной для молодых остатков, для ОСН с возрастом не менее 5 тысяч лет встречается с трудностями. В работе [1] высказывалось предположение о том, что ЗС58 может быть остатком двух сверхновых, звезды-прародители которых составляли двойную систему, взорвавшихся с разницей в несколько тысяч лет. Основываясь на предположении, что более молодой остаток взаимодействует с веществом более старого остатка, внутри которого он эволюционирует, можно устранить противоречие между фактом нестационарных изменений в радиоизлучении ЗС58 и его возрастом.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. P. Ivanov, I. A. Rakhimov, S. G. Smolentsev, et al., *Astronomy Letters* **30**, 240 (2004).
2. F. Camilo, I. H. Stairs, D. R. Lorimer, et al., *Astrophys. J.* **571**, L41 (2002).
3. M. F. Bietenholz, N. E. Kassim, and K. W. Weiler, *Astrophys. J.* **560**, 772 (2001).
4. M. F. Bietenholz, *Astrophys. J.* **645**, 1180 (2006).
5. Planck Collaboration, M. Arnaud, M. Ashdown, et al., *Astron. and Astrophys.* **586**, A134 (2016).
6. P. Slane, D. J. Helfand, S. P. Reynolds, et al., *Astrophys. J.* **676**, L33 (2008).
7. H. D. Aller and S. P. Reynolds, in *The Crab Nebula and Related Supernova Remnants*, edited by M. C. Kafatos and R. B. C. Henry (1985), pp. 75–78.
8. D. A. Green, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **225**, 11P (1987).
9. V. P. Ivanov, A. M. Aslanyan, K. S. Stankevich, and A. M. Finkelstein, in *Problemy sovremenoy radioastronomii* (1997), p. 136.
10. A. M. Finkelstein, *Nauka v Rossii* **5**, 20 (2001).
11. A. Finkelstein, A. Ipatov, and S. Smolentsev, in *Fourth APSGP WorkShop*, edited by Q. Z.-h. H. Cheng (Shanghai Scientific and Technical Publishers, Shanghai, 2002), p. 47.
12. И. А. Рахимов, Ш. Б. Ахмедов, А. А. Зборовский, и др. *Труды Всероссийской астрономической конференции* (2001), с. 152.
13. J. W. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth, and A. Witzel, *Astron. and Astrophys.* **61**, 99 (1977).
14. V. P. Ivanov, A. V. Ipatov, I. A. Rakhimov, et al., *Astronomy Reports* **62**, 574 (2018).
15. V. P. Ivanov and K. S. Stankevich, *Radiofizika* **29**, 3 (1986).
16. V. P. Ivanov, A. V. Ipatov, I. A. Rakhimov, et al., *Trudy IPA* **14**, 20 (2006).
17. V. P. Ivanov, K. S. Stankevich, and S. P. Stolyarov, *Astronomy Reports* **38**, 654 (1994).
18. M. Ott, A. Witzel, A. Quirrenbach, et al., *Astron. and Astrophys.* **284**, 331 (1994).
19. V. S. Artyukh, V. V. Dagkesamanskii, R. D. Vitkevich, and V. N. Kozhukhov, *Sov. Astron.* **12**, 567 (1969).
20. K. I. Kellermann, I. I. K. Pauliny-Toth, and P. J. S. Williams, *Astrophys. J.* **157**, 1 (1969).
21. C. Fanti, M. Felli, A. Ficarra, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **16**, 43 (1974).
22. E. B. Fomalont, *Astrophys. J. Suppl.* **15**, 203 (1968).
23. W. A. Dent and F. T. Haddock, *Astrophys. J.* **144**, 568 (1966).
24. D. A. Green, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **218**, 533 (1986).
25. R. Kothes, K. Fedotov, T. J. Foster, and B. Uyaniker, *Astron. and Astrophys.* **457**, 1081 (2006).
26. А. М. Асланян, А. Г. Гулян, В. П. Иванов, и др. *Труды XIX Всесоюзной радиоастрономической конференции* (1987), с. 154.
27. N. Hurley-Walker, A. M. M. Scaife, D. A. Green, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **396**, 365 (2009).
28. J. L. Weiland, N. Odegard, R. S. Hill, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **192**, 19 (2011).
29. Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim, et al., *Astron. and Astrophys.* **586**, A141 (2016).
30. H. W. Morsi and W. Reich, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **69**, 533 (1987).
31. C. J. Salter, S. P. Reynolds, D. E. Hogg, et al., *Astrophys. J.* **338**, 171 (1989).

## Spectrum Anomaly of the Supernova Remnant 3C58

V. P. Ivanov, A. V. Ipatov, I. A. Rakhimov, and T. S. Andreeva

We measured the instantaneous spectra of the supernova remnant 3C58 for the epochs: 2003.4, 2004.4, and 2013.2 with the RTF-32 radio telescope of the «Svetloe» IAA RAS observatory at four frequencies from 1550 to 8450 MHz. The spectra of 3S58 for the time intervals: 1963–1971, 1981–1998, and 2004–2010 were obtained from the published data allowing us to compare the intensity of 3S58 and standard sources. To reduce all the data to a unified system and build the spectra, we used the «artificial moon» flux scale. Comparison of the spectra according to the data obtained in 1963–2013 revealed non-stationary frequency-dependent variations of flux densities, as well as local deviations of the 3C58 spectra from the frequency power law. Possible causes of the detected anomalies are discussed.

Keywords: *supernovae: individual: 3C58*