

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 11

МАЙ, 1975

ВЫПУСК 2

СПЕКТР ПЛАНЕТАРНОЙ ТУМАННОСТИ IC 4997 В БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ

Р. И. НОСКОВА

Поступила 14 августа 1974

Измерены абсолютные интенсивности 22 эмиссионных линий в области спектра λ 6300—11000 Å. По линиям [S II] и H I оценено межзвездное поглощение $A_{\lambda} = 1^m 35$. Получено распределение энергии в абсолютных единицах в непрерывном спектре ядра и туманности.

Вычислен теоретический спектр туманности для области от $\lambda = 3000$ Å до радиодиапазона. При калибровке его по нашим измерениям он проходит выше радиоконтинуума. Его можно удовлетворительно согласовать с имеющимися радионаблюдениями, если предположить, что IC 4997 становится оптически толстой на $\lambda \sim 2$ см.

Введение. Исследованная в настоящей работе яркая звездообразная планетарная туманность IC 4997 является одним из интереснейших астрофизических объектов. В ее спектре уже не раз [1, 2] отмечалась переменность запрещенных линий кислорода [OI] λ 6300 Å, [OII] λ 7325 Å и [OIII] λ 4363 Å, а также аномальная интенсивность эмиссий [OIII] λ 4363 [3] и OI λ 8446 [2]. Поэтому периодические измерения абсолютных интенсивностей линий этой туманности очень важны для установления характера переменности и причин аномальной интенсивности кислородных линий. ИК-избытки излучения, обнаруженные у ряда планетарных туманностей, в том числе и у IC 4997, ставят в разряд актуальнейших проблем измерение непрерывных спектров планетарных туманностей в абсолютных единицах по всему наблюдаемому спектральному диапазону, от области ближнего ультрафиолета до радио.

Наблюдения. В 1972—1973 гг. на Крымской станции ГАИШ было получено более 20 спектрограмм планетарной туманности IC 4997.

Наблюдения проводились с дифракционным спектрографом в кассе-греновском фокусе 125-см рефлектора. Исследовалась область спектра λ 6300—11000 Å. В качестве приемников излучения использовались фотоконтактные ЭОП как с мультищелочным (до λ 8000 Å), так и с кислородно-цезиевым катодом (λ 8000—11000 Å). Дисперсия снимков 90, 180 и 270 Å/мм. О методике наблюдений и обработки подробно сообщалось в [4]. Значительным изменением методики явился новый способ впечатывания сенситометрических шкалок, подробно описанный в [5]. Использовалась астрономическая фотоэмульсия А 600, для которой был определен коэффициент Шварцшильда $p = 0.85$.

Звездой сравнения служила BD + 17° 4282 спектрального класса A0, для которой автором по фотоэлектрическим наблюдениям на 60 см телескопе Крымской станции были определены следующие величины и показатели цвета: $V = 7^m 83$, $B - V = +0^m 18$, $U - B = +0^m 19$. На основе этих наблюдений с учетом величины покраснения $A_V = 0^m 5$ и распределения энергии в спектре „нормальной средней“ звезды A0 V [4, 6] было получено абсолютное распределение энергии в непрерывном спектре BD + 17° 4282 (см. табл. 1).

Таблица 1
НАБЛЮДАЕМОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ
В СПЕКТРЕ ЗВЕЗДЫ BD + 17° 4282

λ (Å)	$F_\lambda \times 10^{12}$ (эрг/см ² ·сек·1Å)	λ (Å)	$F_\lambda \times 10^{12}$ (эрг/см ² ·сек·1Å)
5500	2.58	8500	0.96
5750	2.36	8750	0.90
6000	2.16	9000	0.84
6250	1.97	9250	0.80
6500	1.78	9500	0.76
6750	1.60	9750	0.72
7000	1.45	10000	0.69
7250	1.33	10250	0.66
7500	1.26	10500	0.62
7750	1.16	10750	0.59
8000	1.08	11000	0.56
8250	1.01		

Время экспозиции менялось для звезды сравнения от 2 до 12 мин, для туманности от 20 до 80 мин.

Эмиссионный спектр. В табл. 2 приведены наблюдаемые эмиссионные линии и вычисленные для них абсолютные интенсивности

F ($\text{эрг}/\text{см}^2\text{сек}$). Указана средняя квадратическая ошибка σ для линий, число измерений которых $n > 2$. Наши результаты F сравнены с наблюдениями фотографическими [7] и фотоэлектрическими [8] (для абсолютизации последних измерений приняты 2 значения потока в H_β : $F_{\text{H}\beta} = 32 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}/\text{см}^2\text{сек}$ [9] и $F_{\text{H}\beta} = 25 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}/\text{см}^2\text{сек}$ [10]). Гра-

Таблица 2

СПИСОК НАБЛЮДАЕМЫХ ЭМИССИЙ И ИХ АБСОЛЮТНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ

λ (Å)	Элемент	$F_\lambda \times 10^{12}$ ($\text{эрг}/\text{см}^2\text{сек}$)	σ	n	$F_\lambda \times 10^{12}$ ($\text{эрг}/\text{см}^2\text{сек}$)		
					[7]	[8, 9]	[8, 10]
6300	[OI] + [SIII]	3.5	—	1	2.6	—	—
6364	[OI]	0.8	—	1	0.7	—	—
6563	H_γ	П	—	—	П	136	106
6678	H_α I	2.8	—	1	2.5	—	—
6725	[S II]	1.3	—	1	0.8 + 0.5	—	—
7065	H_α I	5.5	0.4	5	—	5.8	4.5
7136	[A III]	3.8	0.6	5	—	3.4	2.7
7325	O II	7.0	0.5	5	—	6.8	5.3
7751	[A III]	1.8	0.2	6	2.1	—	—
8046	[Cl IV]	2.0	0.0	2	—	—	—
8446	OI + P ₁₀	4.4	0.3	9	5.7	—	—
8598	P ₁₄	0.9	0.1	2	1.4	—	—
8665	P ₁₃	1.4	0.2	4	1.6	2.4	1.9
8750	P ₁₂	1.0	0.2	2	1.6	1.6	1.3
8863	P ₁₁	1.4	0.1	4	—	1.9	1.5
9015	P ₁₀	1.5	0.1	2	—	1.3	1.0
9069	[S III]	10.2	0.9	5	—	10.2	8.0
9229	P ₉	2.8	0.3	5	—	2.8	2.2
9539	[S III] + P ₈	14.1	0.2	2	—	17.9	14.0
10049	P ₇	4.2	0.4	8	—	4.3	3.4
10320	[S II]	0.8	0.2	2	—	2.4	1.9
10829	H_α I	83	6.0	2	—	111	86
10936	P ₆	6.6	1.5	2	—	9.0	7.0

Примечание: П — перерисованные эмиссионные линии.

фическое сопоставление (см. рис. 1) этих данных обнаруживает их неплохое согласие. Разброс точек не превышает ошибок фотографической фотометрии. Следует отметить, что наши измерения подтверждают аномально большую интенсивность линии OI λ 8446Å в спектре IC 4997. Этот интересный факт был обнаружен еще в 1959 г. француз-

скими астрономами [11], которые предложили для его объяснения флуоресцентный механизм возбуждения линий водорода I.

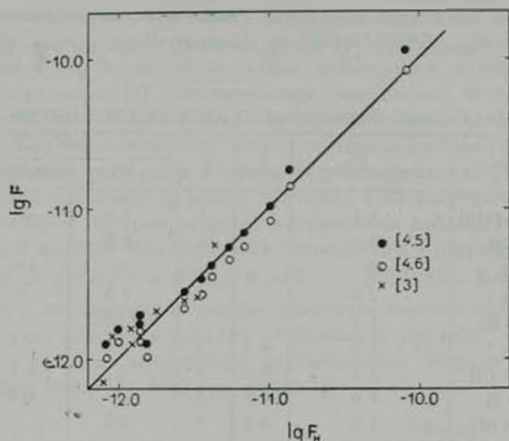


Рис. 1. Сопоставление результатов измерений абсолютных интенсивностей эмиссионных линий наших $\lg F_n$ и других авторов.

Оценка межзвездного поглощения. Полученные интенсивности $F_{нн}$ пашеновских линий водорода $P_6, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}$ использовались для расчета константы поглощения C из соотношения:

$$\lg \frac{I_{нн}}{I_{\phi}} = \lg \frac{F_{нн}}{F_{\phi}} + C \cdot f,$$

где f — функция кривой поглощения согласно [12]. Интенсивности соответствующих бальмеровских линий $H_6, H_9, H_{10}, H_{11}, H_{12}$ и H_{13} были взяты из работы [13] и абсолютизированы посредством величины F_{H_9} [9]. Отношения теоретических интенсивностей линий $I_{нн}/I_{\phi}$ были приняты согласно [14] для случая В и $T_e = 19000^\circ$. Получена средняя оценка по 6-и парам линии $C = 0.57 \pm 0.07$.

Величина межзвездного поглощения была также оценена по линиям [S II] $\lambda 10320\text{Å}$ и $\lambda 4068\text{Å}$, имеющих общий верхний уровень. Теоретическое значение отношения интенсивностей было вычислено по формуле:

$$\frac{I_{нн}}{I_{\phi}} = \frac{A_{нн}}{A_{\phi}} \frac{f_{\phi}}{f_{нн}},$$

где A — вероятности переходов взяты из работы [15]. Интенсивность линии [S II] λ 4068 Å была принята согласно [13]. Получена константа поглощения $C = 0.52$, что в пределах ошибок совпадает с полученной выше величиной. Следует отметить, что в работе [4] интенсивность линии [S II] λ 10320 Å, по-видимому, завышена, возможно, из-за учета излучения ночного неба в той же линии. В среднем, по нашим данным величина $C = 0.54$, что совпадает с принятым в [16]. Это значение было взято для дальнейших редукций.

Непрерывный спектр. Измерение континуума планетарных туманностей представляет большие трудности не только из-за его малой интенсивности. У многих туманностей имеются яркие центральные звезды и, следовательно, возникает проблема учета распределения энергии в их непрерывном спектре.

Для планетарной туманности IC 4997 до сих пор не было опубликовано никаких абсолютных измерений распределения энергии в континууме в оптической и ближней ИК-области спектра. В настоящей работе удалось измерить суммарный континуум ядра и туманности для области спектра λ 6400—11000 Å. Наблюдаемое сглаженное распределение энергии в непрерывном спектре IC 4997 в абсолютных единицах F_{λ} (эрг/см² сек 1 Å) приведено в табл. 3 и на рис. 2. Для наших измерений на рис. 2 указана средняя квадратическая ошибка. На том же рисунке нанесены результаты оценок непрерывного спектра, сделанных В. П. Архиповой по спектрограммам, полученным в Крыму с помощью 50-см телескопа Максудова с объективной призмой, а также пересчитанные на 1 Å результаты наблюдений туманности в В и V фильтрах после учета вклада всех ярких эмиссионных линий. (Согласно фотоэлектрическим наблюдениям, выполненным В. П. Архиповой в 1969 г., для туманности IC 4997 получено $U = 10^{\text{m}83}$; $B = 11^{\text{m}22}$; $V = 10^{\text{m}65}$). Следует отметить, что для этой туманности в пределах ошибок измерений не наблюдаются ни балмеровский, ни пашеновский скачки.

Между тем, IC 4997 — молодая звездообразная туманность, имеющая согласно [16] очень большую электронную плотность $n_e = 6.9 \cdot 10^3$ и высокую электронную температуру $T_e = 19000^\circ$. С этими параметрами для спектральной области λ 3000—10000 был вычислен теоретический непрерывный спектр с использованием расчетов [17]. Суммировалось рекомбинационное излучение H, He и He⁺, двухквантовое и свободно-свободное излучение. Получены теоретические значения скачков: $D_{B\alpha} = 0.65$ и $D_{P\alpha} = 0.21$.

Таблица 3

НАБЛЮДАЕМОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В НЕПРЕРЫВНОМ СПЕКТРЕ ПЛАНЕТАРНОЙ ТУМАННОСТИ IC 4997

λ (Å)	$\lg F_{\tau+\kappa}^0$ (эрг/см ² сек 1Å)	γ (Å)	$\lg F_{\tau+\kappa}^0$ (эрг/см ² сек 1Å)
6400	14.95	9000	14.70
6600	14.94	9200	14.70
6800	14.92	9400	14.70
7000	14.90	9600	14.70
7200	14.89	9800	14.72
7400	14.87	10000	14.75
7600	14.85	10200	14.77
7800	14.83	10400	14.79
8000	14.82	10600	14.82
8400	14.73	10800	14.84
8600	14.72	11000	14.87
8800	14.71		

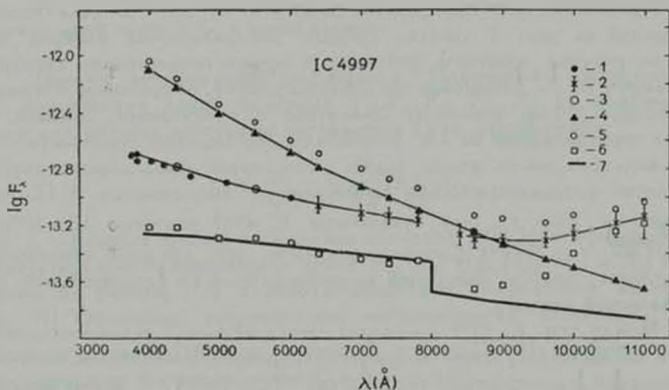


Рис. 2. 1—фотографические измерения суммарного континуума $F_{\tau+\kappa}$; 2—ИК-наблюдения суммарного континуума $F_{\tau+\kappa}$; 3—В, V наблюдения суммарного континуума $F_{\tau+\kappa}$; 4—исправленное за межзвездное поглощение распределение энергии в континууме ядра $F_{\tau+\kappa}^0$; 5—исправленное за межзвездное поглощение суммарное излучение континуума $F_{\tau+\kappa}^0$; 6—распределение энергии в континууме туманности F_{τ}^0 ; 7—теоретическое распределение энергии в континууме туманности F_{τ}^0 .

Отсутствие в наблюдаемом континууме скачков заставляет предположить, что в видимой области спектра очень велик вклад ядра. Мы попытались оценить вклад ядра следующим образом: используя графики [18] $\lg F_\lambda/F_{H\alpha}$ от $1/\lambda$, мы для области $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ вычислили поток излучения туманности, который после исправления за межзвездное поглощение составил величину $F_\tau^0 = 5.4 \cdot 10^{-14} \text{ эрг/см}^2 \text{ сек 1 \AA}$. При этом использовалось наблюдаемое значение $F_{H\alpha} = 4.8 \cdot 10^{-12} \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$ [10]. После вычитания значения F_τ^0 из исправленного за межзвездное поглощение суммарного излучения ядра и туманности $F_{\tau+\alpha}^0$ у $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ на долю ядра приходится величина $F_\alpha^0 = 4.0 \cdot 10^{-13} \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек 1 \AA}$. В предположении, что в видимой области ядро излучает как абсолютно черное тело с $T_\alpha = 30000^\circ$, была построена кривая Планка для спектрального интервала $4000-11000 \text{ \AA}$ и абсолютизирована посредством вычисленной выше величины потока F_α^0 у $\lambda = 5000 \text{ \AA}$. Цветовая температура T_α была определена В. П. Архиповой по показателям цвета $B-U$, $U-B$ ядра, вычисленным из фотоэлектрических наблюдений после учета суммарного излучения ярких эмиссий и фильтрах U , B , V и континуума туманности. Полученное распределение энергии в континууме центральной звезды F_α^0 приведено на рис. 2. После вычета этой величины из исправленного за межзвездное поглощение суммарного излучения ядра и туманности $F_{\tau+\alpha}^0$, было получено распределение энергии в континууме туманности F_τ^0 . Найденный указанным выше способом спектр туманности был абсолютизирован посредством величины $\lg F_\tau^0$ ($\lambda = 5000 \text{ \AA}$) $= 14.73$ и построен также на рис. 2. Полученные из наблюдений точки неплохо согласуются с теоретическим континуумом в области $4000-8000 \text{ \AA}$. После пашеновского скачка имеется расхождение теоретического и наблюдаемого континуумов, усиливающееся в ИК-область.

При таком разделении суммарного излучения в области балмеровского и пашеновского скачков континуум туманности составляет соответственно лишь 5 и 35% от общего излучения, и можно легко оценить, что видимые скачки не должны превышать $D_{B\alpha} \sim 0.1$; $D_{P\alpha} \sim 0.05$. При больших ошибках фотографической фотометрии такие скачки можно и не обнаружить.

Используя величины полученных потоков, не исправленные за межзвездное поглощение, у $\lambda = 4400 \text{ \AA}$ и $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ и абсолютную калибровку системы UBV Джонсона, можно легко оценить видимые звездные величины ядра и континуума туманности в системе B и V , которые оказались равными $B_\alpha = 11^m7$; $B = 14^m2$; $V_\alpha = 11^m5$ и $V = 13^m4$.

Обсуждение результатов. Интересно было сопоставить имеющиеся измерения абсолютных потоков для исследуемой туманности по всему наблюдаемому диапазону спектра, от оптики до радио. На рис. 3 построено распределение энергии F_ν в непрерывном спектре туманности IC 4997 согласно имеющимся в литературе измерениям [19—22]. Для сравнения с наблюдениями построен теоретический непрерывный спектр. Для области $\lambda > 1\mu$ теоретический спектр был рассчитан согласно [19]. Калибровка теоретического спектра была произведена по пашеновскому континууму, измеренному в данной работе и исправленному за межзвездное поглощение.

Вычисленный в настоящей работе континуум туманности дает согласующийся с теоретическим пашеновский скачок $D_{p_2} \sim 0.2$. Автор не настаивает на реальности роста потока к $\lambda = 1.1\mu$, так как в этой области спектра континуум оценивался по недодержанным спектрограммам и возможны систематические ошибки, вносимые характеристической кривой. Но совпадение уровней потоков, измеренных в настоящей работе на $\lambda = 1.08$ и 1.1μ с фотоэлектрическими наблюдениями [19] на $\lambda = 1.25\mu$ возможно и неслучайно.

В работе [23] для IC 4997 был измерен значительный ИК-избыток на $\lambda = 11\mu$ с полосой пропускания $\sim 1\mu$. Но наблюдения, выполненные позже [21], показали, что этот поток ошибочен. Значительная доля этого излучения приходится на эмиссию [S IV] ($\lambda = 10.52\mu$). Новая величина потока на $\lambda = 11\mu$, приведенная на рис. 3, почти на порядок меньше измеренной ранее. Следует отметить, что все ИК-наблюдения от $\lambda = 1\mu$ до $\lambda = 11\mu$ показывают избыток излучения по сравнению с теоретическим.

Что касается вопроса о „стыковке“ вычисленного и абсолютизированного по нашим результатам теоретического спектра с радионаблюдениями, то, как видно из рис. 3, он проходит выше радиочастотной ветви, как она проведена в [19]. Вряд ли это расхождение обусловлено завышением константы межзвездного поглощения S . Представляется более невероятным предположить, что для этой туманности излом радиоспектра возможен в более коротковолновом диапазоне $\lambda \sim 2$ см. Поскольку IC 4997 — одна из наиболее плотных планетарных туманностей, то вполне реально, что она становится оптически толстой на более коротких длинах волн, чем это обычно наблюдается у большинства туманностей. Кроме этого, величины радиопотоков для этой туманности очень невелики и измерены с большими ошибками, так что проведение радиоконтинуума, как это сделано в [19], нам кажется хотя и возможным, но не вполне обоснованным.

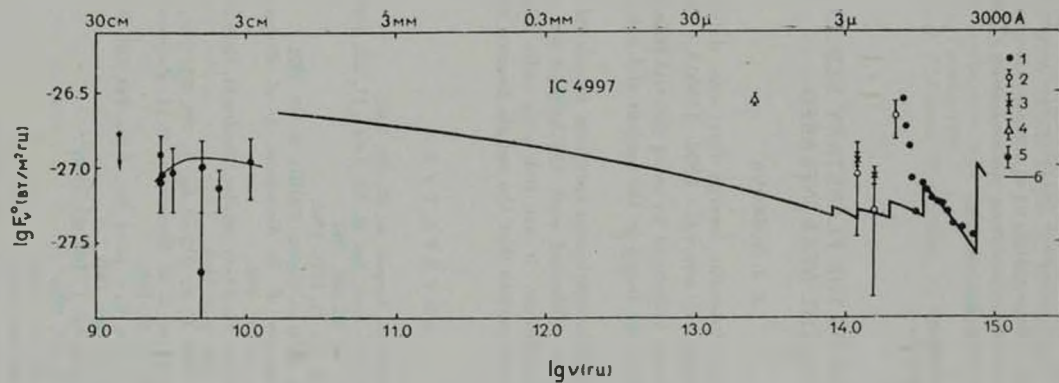


Рис. 3. 1 — наши результаты, 2 — [19], 3 — [20], 4 — [21], 5 — [22], 6 — [19].

В заключение автор выражает большую благодарность В. П. Архиповой за полезные обсуждения и за предоставление результатов фотографических и фотоэлектрических наблюдений IC 4997, а также Е. Б. Костяковой за полезные советы.

Государственный астрономический
институт им. П. К. Штернберга

THE SPECTRUM OF THE PLANETARY NEBULA IC 4997 IN THE NEAR INFRARED

R. I. NOSKOVA

The absolute monochromatic energy flux was determined for 22 emission lines in the spectral interval λ 6300–11000 Å. The interstellar extinction $A_3 = 1^m35$ was estimated by using spectral lines [S II] and H I. The energy distribution was found in the nucleus and nebula continuous spectrum.

The theoretical nebula continuous spectrum calculated from λ 3000 Å to the radio range and calibrated with the help of our measurements pass above the radiocontinuum. It can link with radio observations satisfactorily enough in assumption that the nebula become optically thick near $\lambda \sim 2$ cm.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Б. А. Воронцов-Вельяминов, Астрон. ж., 37, 994, 1960.
2. Y. Andrillat, L. Houziaux, Mem. Soc. R. Sci. Liège, 17, 275, 1969.
3. Г. С. Хромов, Астрон. ж., 38, 809, 1961.
4. Р. И. Носкова, Астрон. ж., 45, 1315, 1968.
5. Р. И. Носкова, Т. А. Бируля, Сообщ. ГАИШ, № 199, 1975.
6. Б. А. Воронцов-Вельяминов, Е. Б. Костякова, О. Д. Докучаева, В. П. Архипова, Астрон. ж., 42, 730, 1965.
7. I. Andrillat, L. Houziaux, Planetary nebulae, Dordrecht, Holland, 1968.
8. C. R. O'Dell, Ap. J., 138, 1018, 1963.
9. J. W. Collins, C. I. Duub, C. R. O'Dell, Ap. J., 133, 471, 1961.
10. Б. А. Воронцов-Вельяминов, Е. Б. Костякова, О. Д. Докучаева, В. П. Архипова, Труды ГАИШ, 40, 57, 1970.
11. Y. Andrillat, H. Andrillat, C. r. Acad. Sci., Paris, 249, 628, 1959.
12. A. E. Whitford, A. J., 63, 201, 1958.
13. L. H. Aller, J. B. Kaler, Ap. J., 140, 621, 1964.
14. A. Burgess, M. N., 118, 477, 1958.
15. J. S. Miller, Ap. J., 154, L57, 1968.
16. J. B. Kaler, Ap. J., 160, 900, 1970.
17. R. L. Brown, W. G. Mathews, Ap. J., 160, 939, 1970.

18. А. А. Болрчук, Р. Е. Гершберг, Н. В. Годовников, Илл. КраО, 38, 208, 1968.
19. Г. С. Хромов, В. И. Мороз, Астрон. ж., 48, 1122, 1971.
20. S. E. Persson, J. A. Frogel, Ap. J., 182, 503, 1973.
21. F. G. Gillett, K. M. Merrill, Ap. J., 172, 367, 1972.
22. L. A. Higgs, Catalogue of radio observations of planetary nebulae and related optical data, Canada, 1970.
23. F. G. Gillett, R. F. Knacke, W. A. Stein, Ap. J., 163, L 57, 1971