

# АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

# АСТРОФИЗИКА

ТОМ 17

ФЕВРАЛЬ, 1981

ВЫПУСК 1

УДК 524.7

## ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЕЛ СЛАБЫХ ГАЛАКТИК

Л. М. ФЕСЕНКО

Поступила 18 марта 1980

Принята к печати 14 июля 1980

На основе ликских подсчетов галактик ярче  $\sim 19^m$  рассмотрено распределение чисел галактик по элементарным площадкам (э.п.)  $1^\circ \times 1^\circ$ . Каждое поле  $6^\circ \times 6^\circ$  изучено отдельно. Изменения от пластинки к пластинке исключены введением нормированных чисел галактик. При  $|b| > 40^\circ$  вероятность наблюдать в э.п.  $n$  галактик есть экспоненциальная убывающая функция от величины  $n$ , если  $n > \langle n \rangle$ . Средняя видимая кратность галактики равна  $2.8 \pm 0.9$ . Изучено теоретическое распределение чисел галактик в модели простого скучивания. Получено аппроксимирующее выражение для теоретической функции распределения. Наилучшее согласие этой функции с данными наблюдений получилось для областей неба с пониженными значениями межзвездного поглощения света и с улучшенными атмосферными и другими условиями в период наблюдений.

1. *Введение.* Одной из характеристик видимого распределения галактик по небу является функция  $f(n)$ , определяющая вероятность того, что в данной элементарной площадке (э.п.) будет наблюдаться точно  $n$  галактик ярче видимой звездной величины  $\bar{m}$ . Знание функции  $f(n)$  необходимо, например, для оценки верхней и нижней границ чисел галактик переднего и заднего фона в области скопления или группы галактик. Эта функция отражает свойства распределения галактик в пространстве и может быть использована для проверки моделей, описывающих это распределение.

До сих пор основное внимание уделялось исследованиям корреляционных функций чисел галактик. Функция  $f(n)$  изучена недостаточно. Известно, что эта функция не соответствует пуассоновскому распределению, и выяснены причины такого несоответствия: 1) галактики образуют груп-

пы и скопления и 2) глубина исследуемого пространства изменяется от области к области вследствие неравномерного поглощения света [1]. Кроме того, флуктуации чисел галактик возрастают благодаря изменчивости условий наблюдений от пластинки к пластинке.

Зонн [2] показал, что если исключить галактики, принадлежащие четко различным группам и скоплениям, то функция  $f(n)$  приблизительно соответствует гамма-распределению. При этом влияния неравномерного поглощения и неоднородности данных наблюдений не исключались. Аналогичный результат получен в [3] для распределения редуцированных чисел галактик после исключения флуктуаций, вызванных реальными сгущениями и неоднородностью данных.

Ниже оценивается реальная функция распределения величины  $\xi$ , линейно зависящей от  $n$ . Переход от  $n$  к  $\xi$  вызван необходимостью исключения влияния изменчивости условий наблюдений от пластинки к пластинке и эффекта уменьшения чисел галактик от центра пластинки к ее краям. Таким образом, на распределение величины  $\xi$  влияют: естественные сгущения галактик (группы, скопления), неравномерное поглощение света и изменчивость условий наблюдений в пределах пластинки, вызванная атмосферными причинами и, возможно, особенностями самой пластинки и методов ее обработки.

Распределение величины  $\xi$  сравнительно слабо зависит от  $\langle n \rangle$  и это позволяет использовать для оценки такого распределения большой статистический материал, полученный в разное время, на разных пластинках.

Сравнивая результаты, полученные для разных областей и в разное время, можно оценить роль неравномерного поглощения и ухудшения атмосферных условий. Связь между интегральными распределениями величин  $\xi$  и  $n$  довольно простая; она определяется приближенным равенством (4). Распределение (3) и другие аналогичные распределения, рассмотренные в этой работе, соответствуют галактикам ярче  $\sim 19^m$  в э. п. размерами  $1^\circ \times 1^\circ$ . В этом случае типичные угловые размеры групп и скоплений существенно меньше размеров э. п. Среднее число галактик в э. п. порядка 50, то есть довольно близкое к среднему числу галактик фона, проецирующихся на далекие скопления Эйбелла.

2. *Наблюдаемое распределение чисел галактик.* При изучении распределения чисел галактик обычный метод редукции данных мало пригоден. При введении поправочных коэффициентов, учитывающих изменчивость условий наблюдений, сорт пластинки, зенитное расстояние и многое другое, неизбежно вносятся существенные искажения, так как точное значение соответствующих коэффициентов неизвестно. К тому же метод их использования не является строгим.

Вводим величину

$$\xi = \frac{n - M(n)}{\sqrt{kM(n)}}, \quad (1)$$

где  $k$  — постоянная и  $M(n)$  — математическое ожидание чисел галактик  $n$  в данной э. п.

Если бы распределение чисел галактик было пуассоновским, то распределение величины  $\xi$  не зависело бы от  $M(n)$  при достаточно больших значениях последней величины. Аналогичное утверждение справедливо и в случае, когда величина  $n$  есть линейная функция величин с пуассоновскими распределениями. Изучая величину  $\xi$  вместо  $n$ , можно в значительной степени погасить влияние систематических изменений параметра  $\langle n \rangle$  в больших областях неба, изменений, которые вызваны изменчивостью условий наблюдений и крупномасштабными колебаниями межзвездного поглощения.

Для исключения известного эффекта уменьшения плотности числа наблюдаемых галактик от центра пластинки к ее краям значение  $\xi$  определяем равенством:

$$\xi = \frac{n - \zeta \langle n \rangle}{\sqrt{k\zeta \langle n \rangle}}, \quad (2)$$

где  $\langle n \rangle$  — среднее число галактик в э. п. для всей изучаемой пластинки и  $\zeta$  — множитель, зависящий от положения э. п. на пластинке. 36 значений  $\zeta$  были вычислены по данным для обобщенной пластинки, которые получены в [4] суммированием подсчетов на всех пластинках. Величина  $\zeta \langle n \rangle$  соответствует математическому ожиданию  $M(n)$  числа галактик в данной э. п. Значение постоянной  $k$  принято равным 3.46, как и в [5]. При пуассоновском распределении выполнялись бы равенства:

$$\langle \xi \rangle = 0, \quad \langle \xi^2 \rangle = \frac{1}{k}.$$

В табл. 1 приводится распределение 4500 э. п. по значениям величины  $\xi$ . Эти э. п. принадлежат случайным 125 полям каталога [4] при  $|b| > 40^\circ$ . В третьем столбце приводится теоретическое распределение, рассчитанное при помощи интерполяционной функции:

$$F(\bar{\xi}) = \begin{cases} \exp(-0.5806 + 0.7471 \bar{\xi} - 0.0209 \bar{\xi}^2 + 0.2036 \bar{\xi}^3), & \bar{\xi} < 0 \\ 1 - \exp(-0.820 - 0.949 \bar{\xi}), & \bar{\xi} \geq 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $F(\bar{\xi})$  — вероятность выполнения неравенства:  $\xi < \bar{\xi}$ . Таким образом,  $F(\bar{\xi})$  есть интегральная функция распределения. Для получения

плотности вероятности следует найти производную от  $F(\xi)$ . Приближенный переход от  $F(\xi)$  к интегральной функции распределения чисел галактик  $F(n)$  выполняется при помощи равенства:

$$F(\xi) = F\left(\frac{n - \xi \langle n \rangle}{\sqrt{k^2 \langle n \rangle}}\right). \quad (4)$$

Таблица 1

| $\xi$    | Количество э. п.          |                   |                          |                     |
|----------|---------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|
|          | Наблюдаемое распределение | Распределение (3) | Нормальное распределение | Гамма-распределение |
| -4- -3   | 1                         | 0.9               | 35.5                     | 1.4                 |
| -3- -2   | 101                       | 101.0             | 212.7                    | 141.8               |
| -2- -1   | 851                       | 851.0             | 714.8                    | 863.1               |
| -1- 0    | 1565                      | 1565.4            | 1283.6                   | 1433.2              |
| 0-1      | 1180                      | 1214.7            | 1283.6                   | 1154.2              |
| 1-2      | 495                       | 470.2             | 714.8                    | 591.8               |
| 2-3      | 177                       | 182.1             | 212.7                    | 224.6               |
| 3-4      | 78                        | 70.5              | 34.5                     | 67.5                |
| 4-5      | 34                        | 27.3              | 3.2                      | 17.6                |
| 5-6      | 10                        | 10.6              | 0.2                      | 4.0                 |
| 6-7      | 5                         | 4.1               |                          | 0.8                 |
| 7-8      | 2                         | 1.6               |                          |                     |
| $\geq 8$ | 1                         | 1.0               |                          |                     |

Как видно из столбцов 2 и 3 табл. 1, распределение (3) хорошо согласуется с данными наблюдений. С другой стороны, нормальное и гамма-распределение заметно отличаются от наблюдаемого распределения. В этих случаях дисперсия теоретических распределений принята равной наблюдаемой дисперсии значений  $\xi$  (1.592).

Из (3) следует, что при  $\xi \geq 0$ , то есть при  $n \geq \langle n \rangle$ , плотность вероятности величины  $\xi$  убывает по экспоненциальному закону вплоть до значений  $\xi \approx 8$ . Это наиболее важный результат этого раздела. Число всех галактик составило 220 500. Среднее число галактик в одной э. п. равно 49. Вследствие изменчивости условий наблюдений от пластинки к пластинке величина  $\langle n \rangle$  изменяется от поля к полю; ее среднее квадратическое отклонение составило 12.5.

Распределение (3) можно рассматривать как типичное распределение для областей неба с  $|b| > 40^\circ - 50^\circ$  при среднем числе галактик ярче  $\sim 19^m$  в одной э. п. порядка 50. При большом отклонении  $\langle n \rangle$  от этого значения характер распределения меняется. Это хорошо видно из

табл. 2, в которой сравниваются относительные числа э. п. в укрупненных интервалах значений  $\xi$  при разной величине  $\langle n \rangle$ . Вероятности малых и больших значений  $\xi$  возрастают при увеличении  $\langle n \rangle$ .

Таблица 2

| $\xi$   | Относительное число э. п.               |                                        |                                          |
|---------|-----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|
|         | $\langle n \rangle = 26.4$<br>468 э. п. | $\langle n \rangle = 49$<br>4500 э. п. | $\langle n \rangle = 81.2$<br>4329 э. п. |
| -4 — -1 | 0.173                                   | 0.212                                  | 0.268                                    |
| -1 — 1  | 0.677                                   | 0.610                                  | 0.519                                    |
| 1 — 3   | 0.137                                   | 0.149                                  | 0.171                                    |
| >3      | 0.013                                   | 0.029                                  | 0.042                                    |

3. *Искажения данных.* Распределение галактик лихских подсчетов искажено неравномерным поглощением света. Как показано в [6], при наличии таких искажений выполняется равенство:

$$\frac{\sigma^2(n)}{\langle n \rangle} \approx \langle s \rangle + (\langle s \rangle - 1) 2x/3 + K \langle n \rangle, \quad (5)$$

где  $\langle s \rangle$  — средняя кратность галактик в выборке по блеску,  $x$  — отношение среднего углового диаметра систем галактик к ширине э. п. и  $K$  — постоянная, учитывающая величину искажений данных. При выводе (5) предполагалось, что размеры неоднородностей поглощающего слоя больше  $1-2^\circ$ .

В правой части (5) величина  $x$  слабо зависит от  $\langle n \rangle$ , так как типичный угловой диаметр систем изменяется как  $\langle n \rangle^{-1/3}$ . В дальнейшем такой зависимостью пренебрегаем. Полагая

$$\frac{\sigma^2(n)}{\langle n \rangle} = \left\langle \frac{(n - \xi \langle n \rangle)^2}{\xi \langle n \rangle} \right\rangle, \quad (6)$$

где усреднение выполняется по всевозможным э. п. в пределах одной пластинки, и учитывая (5), составим систему уравнений:

$$\left\langle \frac{(n - \xi \langle n \rangle)^2}{\xi \langle n \rangle} \right\rangle_i = L + K \langle n \rangle, \quad (7)$$

где  $L$  и  $K$  считаются постоянными,  $i$  — номер пластинки.

Решение системы уравнений (7) для 99 полей с  $|b| > 40^\circ$  и  $\langle n \rangle \geq 35$  дает

$$K = 0.041 \pm 0.018 \text{ и } L = 3.8 \pm 1.0.$$

Аналогичная система уравнений была рассмотрена для 45 полей с 5—31

$30^\circ \leq |b| \leq 40^\circ$  и  $\langle n \rangle \geq 35$ . Они содержали 75 000 галактик. Получено

$$K = 0.165 \pm 0.046 \text{ и } L = -1.6 \pm 2.1.$$

Таким образом, эффект искажений данных, характеризуемый величиной  $K$ , возрастает вблизи Млечного Пути, как и следовало ожидать.

Величина  $L$  пропорциональна видимой средней кратности галактики. Распределение ошибок значения  $L$  не подчиняется нормальному закону, как это видно из сопоставления результатов для разных выборок (здесь эти результаты не приводятся). Среднее весовое из приведенных выше значений  $L$  равно  $2.8 \pm 0.9$ , что не противоречит оценке средней кратности (3.46), полученной в [7].

В случае  $\langle n \rangle < 35$  признаком влияния межзвездной среды является увеличение дисперсий величин, стоящих в левых частях равенств типа (7), в 2.12 раза при переходе от высоких широт к низким. Числа полей были равны 25 и 26 соответственно, а средние числа галактик в э. п. практически совпадали (29.7 и 29.3). Заметим, что причины понижения значений  $\langle n \rangle$  в этих случаях не одинаковы. При  $|b| \geq 40^\circ$  исследованы только те поля, снимки которых получены при ухудшенных атмосферных условиях, либо на пластинках малой чувствительности. При  $30^\circ \leq |b| \leq 40^\circ$  условия наблюдений были хорошими, но зато более сильным, чем в предыдущем случае, было поглощение света.

4. Моделированное распределение чисел галактик. Согласно модели простого сгущивания галактик, рассмотренной в [7], в случае ликских подсчетов число галактик в э. п.  $1^\circ \times 1^\circ$  можно представить в виде:

$$n = \sum_{s=1}^{165} s n_s, \quad (8)$$

где  $n_s$  — число систем видимой населенности  $s$  в э. п. Величины  $n_s$  распределены по закону Пуассона. Справедливо приближенное равенство:

$$\frac{s \langle n_s \rangle}{\langle n \rangle} = \frac{0.508}{s^2}, \quad s = 1, 2, \dots, 165. \quad (9)$$

Задав  $\langle n \rangle$ , можно рассчитать  $\langle n_s \rangle$  при  $s = 1, 2, \dots, 165$  и моделировать величины  $n_s$  и  $n$ . Повторив этот процесс достаточное число раз, можно найти затем и распределение величины  $n$ . Аналитический метод расчета оказывается в данном случае слишком сложным.

Вычисления выполнялись на малой ЭВМ «Наири-К» для  $\langle n \rangle = 10 (10) 70$ . При каждом значении  $\langle n \rangle$  получалось приблизительно по 600 значений. Ввиду их громоздкости, результаты моделирования здесь

не приводятся. Оказалось, что моделированное распределение величины  $n$  можно аппроксимировать распределением непрерывной величины  $x$  с плотностью вероятности вида:

$$\varphi(x) = kx^{-p}e^{-\gamma/x}, \quad 0 < x < \infty, \quad (10)$$

где  $k$ ,  $p$  и  $\gamma$  — положительные постоянные, определяемые так:

$$\begin{aligned} k &= \frac{\gamma^{p-1}}{\Gamma(p-1)}, \\ p &= \frac{\langle n \rangle}{3.46} + 3, \\ \gamma &= \frac{\langle n \rangle^2}{3.46} + \langle n \rangle. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь  $\Gamma$  — гамма-функция.

Среднее значение и дисперсия величины  $x$  совпадают с аналогичными характеристиками случайной величины  $n$ , определенной в (8). Распределение (10) отличается от гамма-распределения более медленным убыванием  $\varphi(x)$  при больших  $x$ .

5. *Сопоставление теоретического распределения с наблюдаемым.* Сравним распределение, определенное в (10)—(11), с распределением для галактик ликских подсчетов. Благодаря неравномерному поглощению света и неоднородности процесса получения и последующей обработки снимков, среднее число галактик может изменяться в пределах пластинки. Следовательно, теоретическое распределение нужно определять как сумму распределений типа (10) — (11) при различных значениях  $\langle n \rangle$ . Это должно приводить к сглаживанию максимума распределения и к существенному изменению в его крыльях. Вероятность малых значений  $n$  возрастает благодаря существованию небольших областей с повышенным поглощением. Вероятности больших значений  $n$  увеличиваются из-за присутствия «окоп» в межзвездной среде. Наилучшего согласия между теоретическим и наблюдаемым распределениями следует ожидать после отбрасывания крыльев распределения.

Сравнение распределений выполнено в табл. 3 при  $-2 \leq \xi \leq 5$  для областей с  $|b| > 60^\circ$  и с поверхностной плотностью межзвездного нейтрального водорода  $N_H < 15$  (по данным [8]). Рассматривались поля с улучшенными условиями видимости галактик (см. ниже). Плотность водорода выражена в единицах  $10^{19} \text{ см}^{-2}$  и соответствует атомам со скоростями  $-25 - +25 \text{ км/с}$  относительно местного центроида.

Теоретическое распределение величины  $\xi$  определялось отдельно для каждой э. п. с учетом локального значения для математического ожидания.

чисел галактик (учет эффекта края поля), с использованием равенства (1) при  $k = 3.46$  и аппроксимирующего распределения (10) — (11). С другой стороны, значения  $\xi$  рассчитывались по наблюдаемым значениям  $n$  по формуле (2) и затем строилось «наблюдаемое распределение».

Таблица 3

| $\xi$   | Число э. п. |         |
|---------|-------------|---------|
|         | Набл.       | Теорет. |
| -2 — -1 | 262         | 254.9   |
| -1 — 0  | 496         | 541.0   |
| 0 — 1   | 379         | 381.9   |
| 1 — 2   | 163         | 164.3   |
| 2 — 3   | 60          | 59.9    |
| 3 — 4   | 22          | 18.1    |
| 4 — 5   | 7           | 5.3     |

За пределы табличных значений  $\xi$  попало только 3.5% всех э. п. Применение критерия согласия Пирсона показало, что наблюдаемое распределение хорошо согласуется с теоретическим; вероятность того, что равное наблюдаемому или большее расхождение двух распределений могло получиться случайно, составляет около 0.5. Тем самым косвенно подтверждена модель сгущения галактик, предложенная в [7].

Таблица 4

|                                                        | Число э. п. | $\chi^2$ | $\bar{\eta}$ | $< n >$ |
|--------------------------------------------------------|-------------|----------|--------------|---------|
| $ b  > 60^\circ, N_n < 15$ ,<br>хорошие условия        | 1440        | 5.36     | 2.1          | 61.4    |
| $ b  > 60^\circ, N_n < 15$ ,<br>плохие условия         | 936         | 12.49    | 1.4          | 41.2    |
| $ b  > 60^\circ, N_n > 15$ ,<br>плохие условия         | 2124        | 34.11    | 2.8          | 46.9    |
| $30^\circ \leq  b  \leq 40^\circ$ ,<br>хорошие условия | 2952        | 21.10    | 3.7          | 37.6    |

В табл. 4 наблюдаемое и теоретическое распределения сравниваются для областей неба с разной величиной искажений данных при том же интервале значений  $\xi$ , что и в табл. 3. Приведены значения величины  $\chi^2$ , используемой в критерии Пирсона. При  $\chi^2_1 < 12.6$  согласие между распределениями можно считать удовлетворительным при 95% уровне значи-

мости. Величина  $\varphi$  характеризует избыток наблюдаемых чисел э. п.  $N$  по сравнению с их теоретическим числом  $T$  при  $\xi < -2$  и равна  $(N-T)/T$ .

Из табл. 4 видно, что наилучшее согласие между наблюдаемым и теоретическим распределениями чисел галактик наблюдается при  $|b| > 60^\circ$ ,  $N_H < 15$  и хороших условиях видимости. Но даже в этом случае  $\varphi > 1$ , что может указывать на присутствие небольших областей с повышенным поглощением света. Различие между распределениями возрастает при увеличении плотности водорода и при ухудшении условий видимости галактик. В табл. 4 термин «хорошие условия» соответствует значению параметра, характеризующего видимость галактик на пластинке, меньшему 0.79. Данные об этом параметре приводятся в [4] для каждого поля. Чем меньше его значение, тем больше плотность числа галактик. Термин «плохие условия» соответствует значениям параметра, большим 0.79.

6. Выводы. 1. Распределение нормированных чисел галактик ярче  $\sim 19^m$  по э. п. размерами  $1^\circ \times 1^\circ$  внутри полей  $6^\circ \times 6^\circ$  при  $|b| > 40^\circ$  описывается интегральным законом (3). Вероятности чисел галактик убывают по экспоненциальному закону при  $n > \langle n \rangle$ .

2. Средняя видимая кратность галактик, выведенная из соотношений типа (7), равна  $2.8 \pm 0.9$ . Почти такое же значение было получено в [6] другим методом.

3. После учета искажений, вносимых неравномерным поглощением и неоднородностью данных, распределение чисел галактик может быть приближенно описано дифференциальным законом (10)–(11).

4. Имеются признаки существенного влияния межзвездного поглощения света на распределение галактик даже при  $|b| > 40^\circ$ – $60^\circ$ . Возможно, что ухудшение атмосферных условий также увеличивает отклонение наблюдаемого распределения чисел галактик от теоретического в пределах одного поля  $6^\circ \times 6^\circ$ .

Псковский педагогический  
институт

## THE FUNCTION OF THE DISTRIBUTION OF NUMBERS OF FAINT GALAXIES

L. M. FESSENKO

The Lick observatory counts of galaxies are considered. The distribution of number of galaxies in elementary regions (e. r.) of  $1^\circ \times 1^\circ$  is investigated. Each field of  $6^\circ \times 6^\circ$  was treated separately and plate to plate variations were excluded with the introduction of normalized counts

of galaxies. At  $|b| > 40^\circ$  the probability to observe of  $n$  galaxies in e. r. is an exponential decreasing function of  $n$ , if inequality  $n > \langle n \rangle$  were fulfilled. The mean apparent multiplicity of a galaxy ( $2.8 \pm 0.9$ ) was derived. The galaxy number distribution was stimulated with accounting of a simple model for the number of various systems of galaxies, the superclustering of galaxies was not introduced. Based on that model the approximate expression for galaxy number distribution was considered and was compared with observed distributions. The agreement between these distributions become better with the diminishing of the interstellar absorption of light and of other distortion of data.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Т. А. Агекян, Астрон. ж., 34, 371, 1957.
2. W. Zopp, Acta Astronomica, 18, 273, 1968.
3. Б. И. Фесенко, Астрон. ж., 52, 287, 1975.
4. C. D. Shane, C. A. Wirtanen, Publ. Lick Obs., 22, 1, 1967.
5. Б. И. Фесенко, Астрон. ж., 56, 1165, 1979.
6. Б. И. Фесенко, А. М. Фесенко, Астрон. ж., 55, 262, 1978.
7. Б. И. Фесенко, Н. П. Путьев, Астрон. ж., 51, 736, 1974.
8. Ch. R. Tolbert, Astron. Astrophys., Suppl. ser., 3, 349, 1971.