

ФУНКЦИЯ МАСС МОЛОДЫХ СПЕКТРАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД И ЗВЕЗД С ПРОТОПЛАНЕТНЫМИ ДИСКАМИ

¹О.В. Еретнова, ¹Д.В. Тарасова, ²Г.Н. Дремова

¹Челябинский государственный университет

²Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина

eretnova@csu.ru G.N.Dryomova@mail.ru

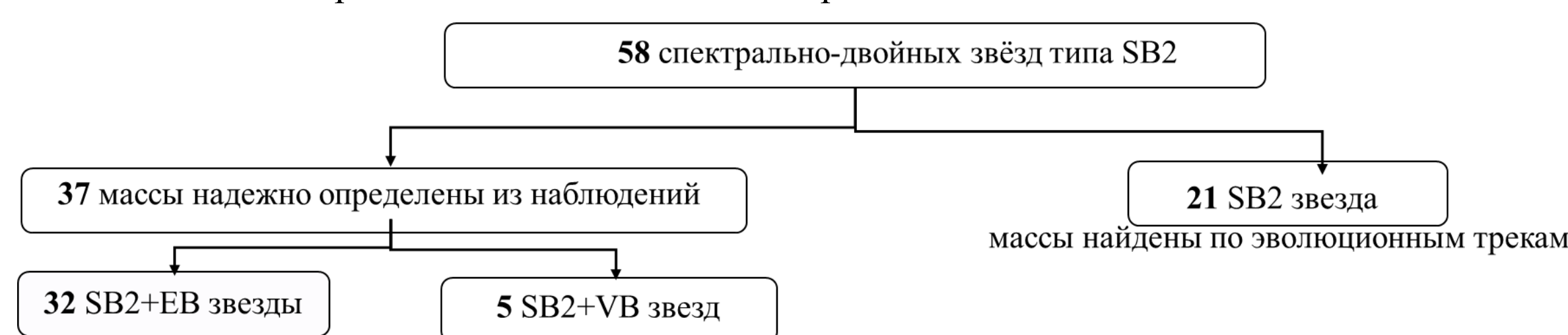
Введение

Начальная функция масс (НФМ) для звезд главной последовательности исследована многими авторами, начиная с работ Солпитера [1, 2]. За последние десятилетия значительно повысились чувствительность и пространственное разрешение астрономических инструментов, что позволило активно открывать молодые двойные звезды и звезды с дисками в областях звездообразования. Эти звезды находятся на стадии сжатия к начальной главной последовательности (НГП) и являются промежуточным эволюционным звеном между ядрами молекулярных облаков и звездами НГП. Поэтому значительный интерес представляет исследование распределения молодых звезд по массам.

В настоящей работе мы исследовали как наблюдаемые распределения по массам компонент молодых спектрально-двойных звезд с двумя линиями в спектре (SB2) и звезд с протопланетными дисками, так и распределения с учётом эффектов наблюдательной селекции.

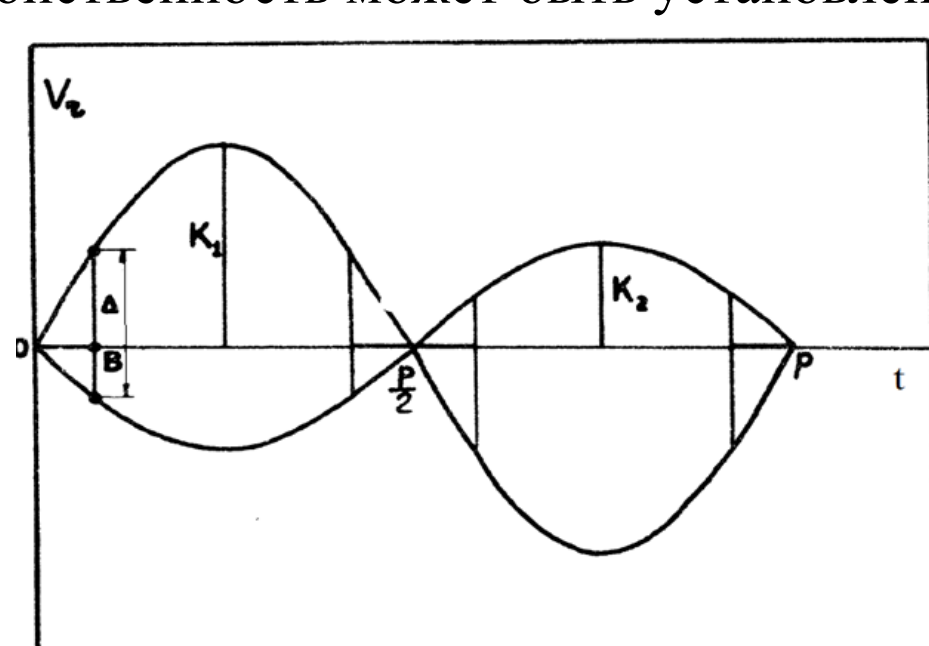
Выборка молодых SB2 звезд

Выборка содержит наблюдательные данные о 58 молодых SB2 системах. Массы 36 SB2 систем надежно определены из наблюдений и приведены в [3, 4]. К ним мы добавили затменную SB2 систему TIC 43152097 [5]. Массы остальных получены путем линейной интерполяции между эволюционными треками Baraffe et al. [6] для звезд с $M = (0.1 - 1.4) M_{\odot}$, Dotter et al. [7] для звезд с $M = (1.5 - 5.0) M_{\odot}$. Массы компонент варьируются от $0.11 M_{\odot}$ до $5.9 M_{\odot}$, звезды находятся в различных областях звездообразования.



Вероятность открытия SB2 систем

Расчет вероятности обнаружения звезды как SB2 состоит из двух этапов. На *первом этапе* вычисляем «геометрическую» вероятность (p), определяемую как время в долях периода, в течение которого спектральная двойственность может быть установлена по одной спектрограмме [8]:



$$p = 1 - \frac{4}{2\pi} \arcsin \frac{\Delta}{K_1 + K_2}, \quad (1)$$

Δ - порог разделения спектральных линий, $\Delta = 20$ км/с для нашей выборки,
 $K = K_1 + K_2$ - сумма полуамплитуд лучевых скоростей.

Если двойственность устанавливается по n -спектрограммам, то

$$p_n = 1 - (1 - p)^n. \quad (2)$$

Рис.1. К определению «геометрической» вероятности.

На *втором этапе* вычисляем вероятность p_K того, что среди всех SB2 нам встретились двойные, у которых значения $K = K_1 + K_2$ попадают в определённые интервалы $[K, K + dK]$. Поскольку $K = 2\pi A \sin i / P$, то используя третий обобщенный закон Кеплера, можно получить что:

$$K = 437 \sqrt{\frac{(1+q)M_1}{A}} \sin i, \quad (3)$$

где M_1 - масса главной компоненты, $[M_{\odot}]$; A - большая полуось орбиты, $[R_{\odot}]$; $K = K_1 + K_2$, $[км/с]$; $q = M_2/M_1$ - отношение масс компонент двойной звезды.

Теперь можем преобразовать вероятности $p_{K_{lim}} = \int_{K_{lim}} f(M_1) dM_1 \int_{q_{lim}} f(q) dq \int_{A_{lim}} f(A) dA \int_{i_{lim}} f(i) di$ рассчитанные на основе наблюдаемых функций распределения двойных систем по M_1 , q , A , i в K^{klm} - матрицу вероятностей. В каждом интервале $[K, K+dK]$, определяем число попавших в него элементов K^{klm} - матрицы и суммируем соответствующие значения $p_{K_{lim}}$, определив таким образом p_K . **Результирующая вероятность** будет определяться как $p_{SB2} = p_K$, она представлена на Рис. 2. Уменьшение вероятности в точке $\Delta/K = 0.05$ связано с тем, что в выборке отсутствуют SB2 звёзды с $M > 6 M_{\odot}$, у которых значения K должны быть большие при тех же A и i . При наличии в выборке массивных звёзд результирующая вероятность должна стремиться к единице.

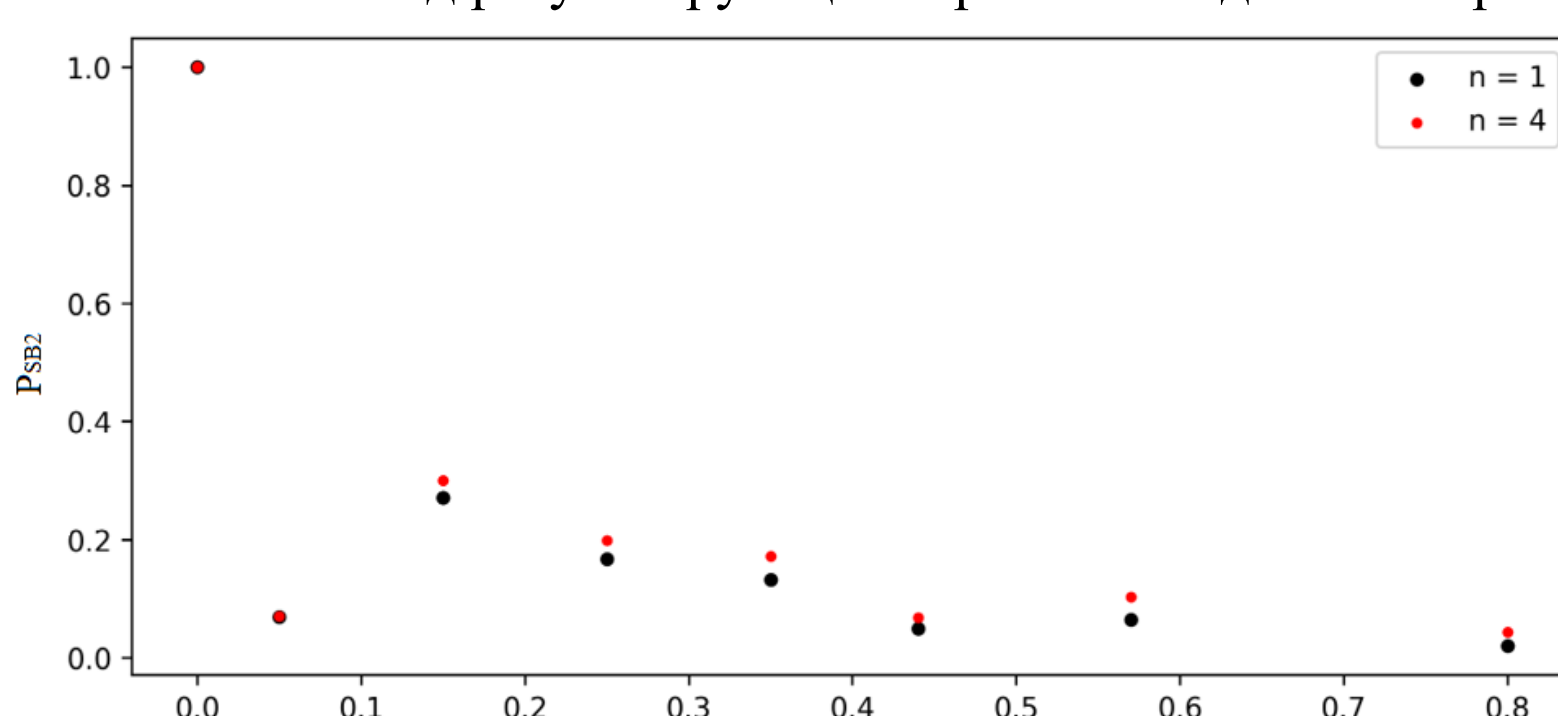


Рис.2. Результирующая вероятность обнаружения молодых звезд как SB2 в зависимости от отношения Δ/K . Черным цветом показана вероятность обнаружения по одной спектрограмме, красным - по четырём спектрограммам.

Распределение по массам компонент молодых SB2 систем

На Рис. 3 представлены гистограммы наблюдаемого распределения компонент молодых SB2 систем (Рис. 3а) и распределения по массам с учетом наблюдательной селекции (Рис. 3б). Чтобы построить распределение с учетом наблюдательной селекции, нужно определить для каждой системы вероятность ее открытия p_{SB2}^i , найти «истинную» численность звезд $dN_0 = \sum 1/p_{SB2}^i$ в заданном интервале изменения $\lg M_i$ и разделить на объем пространства V_i , в котором наблюдаются звезды с данными массами. Объем пространства оценивался как объем шарового слоя толщиной $h = 180$ пк [9]:

$$\begin{cases} V = \pi h r^2 - \frac{\pi}{12} h^3, & r > \frac{h}{2} \\ V = \frac{4}{3} \pi r^3, & r < \frac{h}{2} \end{cases} \quad (4)$$

r - расстояние до звезды.

В результате получим пространственную плотность компонент молодых SB2 систем, $dN_r = \frac{dN_0}{V_i} \cdot \pi r^2$

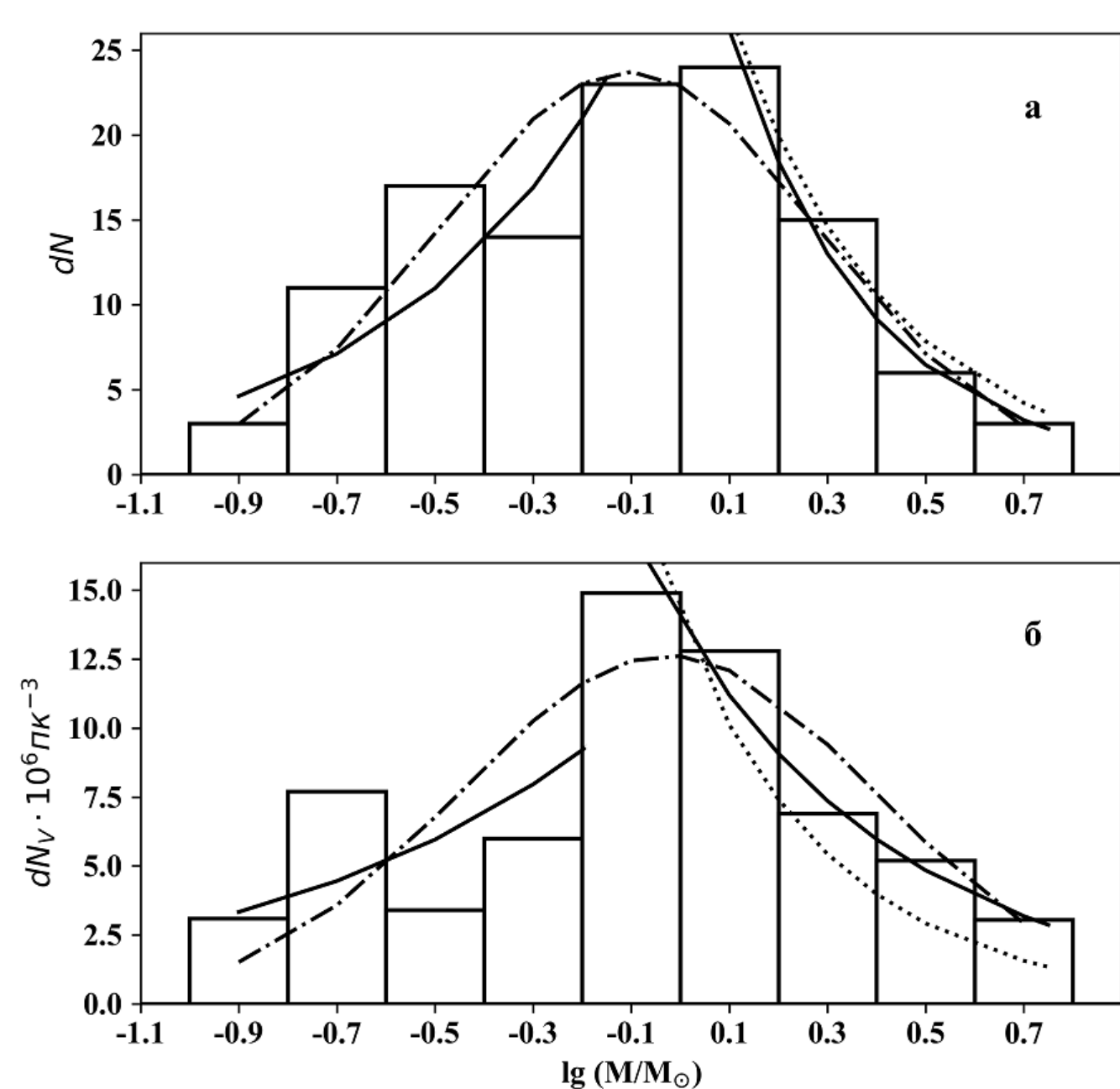


Рис.3. Гистограммы распределения компонент молодых SB2 звезд по массам. Панель (а) - наблюдаемое распределение, панель (б) - распределение с учетом наблюдательной селекции. Сплошная кривая - аппроксимация гистограммы степенной функцией, штрихпунктирная линия - аппроксимация логнормальным законом. Пунктирная линия - солпитеровская функция масс, $dN \sim M^{-1.35}$.

Гистограммы аппроксимированы степенной функцией $dN \sim M^{-\Gamma} d(\lg M)$, показатель степени равен:

наблюдаемое распределение	распределение с учетом наблюдательной селекции
$\Gamma = -(0.94 \pm 0.86)$, $0.1 < M/M_{\odot} < 1.0$	$\Gamma = -(1.20 \pm 3.18)$, $0.1 < M/M_{\odot} < 0.63$
$\Gamma = 1.52 \pm 0.42$, $1.0 < M/M_{\odot} < 6.3$	$\Gamma = 0.92 \pm 0.23$, $0.63 < M/M_{\odot} < 6.3$

Видно, что на интервалах от максимумов распределений до $\lg(M/M_{\odot}) = 0.8$ показатели степени в пределах погрешности совпадают с солпитеровской НФМ. Большая погрешность на интервалах от $\lg(M/M_{\odot}) = -1.0$ до максимумов распределений связана с немонотонностью гистограмм. В работе Дудорова, Еретновой [3] для наблюдаемого распределения молодых звезд на меньшем наблюдательном материале получено $\Gamma = 1.15 \pm 0.30$ для звезд с массами $1.0 < M/M_{\odot} < 6.3$.

На всем интервале масс гистограммы можно аппроксимировать логнормальным законом

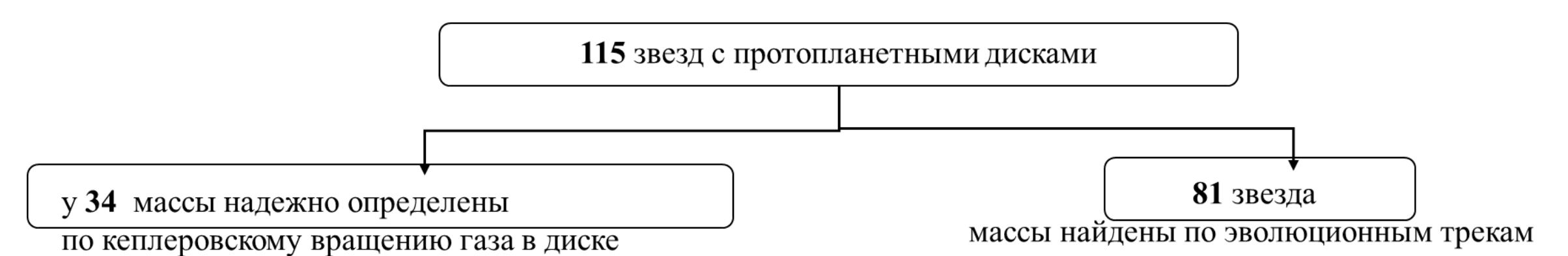
$$\Phi(\lg M_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\lg M_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

где $\Phi(\lg M_i)$ - функция масс (плотность распределения по логарифму масс); μ - логарифм наиболее вероятного значения массы; σ - среднеквадратичное отклонение от μ .

Для наблюдаемого распределения наиболее вероятное значения массы $M_{вер} = (0.79 \pm 0.08) M_{\odot}$, $\sigma = 0.39 \pm 0.02$, для исправленного за наблюдательную селекцию: $M_{вер} = (0.95 \pm 0.05) M_{\odot}$, $\sigma = 0.42 \pm 0.02$. В работе [3] получено $M_{вер} = (0.86 \pm 0.08) M_{\odot}$, $\sigma = 0.36 \pm 0.05$.

Выборка звезд с протопланетными дисками

Выборка содержит наблюдательные данные о 115 звездах с протопланетными дисками. Массы 34 из них найдены из наблюдений в предположении, что вращение газа в диске кеплеровское [10, 11], массы остальных получены по эволюционным трекам [12 - 14]. Массы компонент варьируются от $0.1 M_{\odot}$ до $2.9 M_{\odot}$. Звезды находятся в областях звездообразования Ophiuchus, Chamaeleon, Taurus и Orion.



Распределение по массам звезд с протопланетными дисками

На Рис. 4 представлены гистограммы наблюдаемого распределения звезд с дисками по массам (Рис. 4а) и распределения по массам с учетом объема пространства, в котором эти звезды наблюдаются (Рис. 4б). Объем пространства вычислялся по формуле (4). В наиболее удаленной области звездообразования Орион массы звезд лежат в интервале $\lg(M/M_{\odot}) > -0.2$.

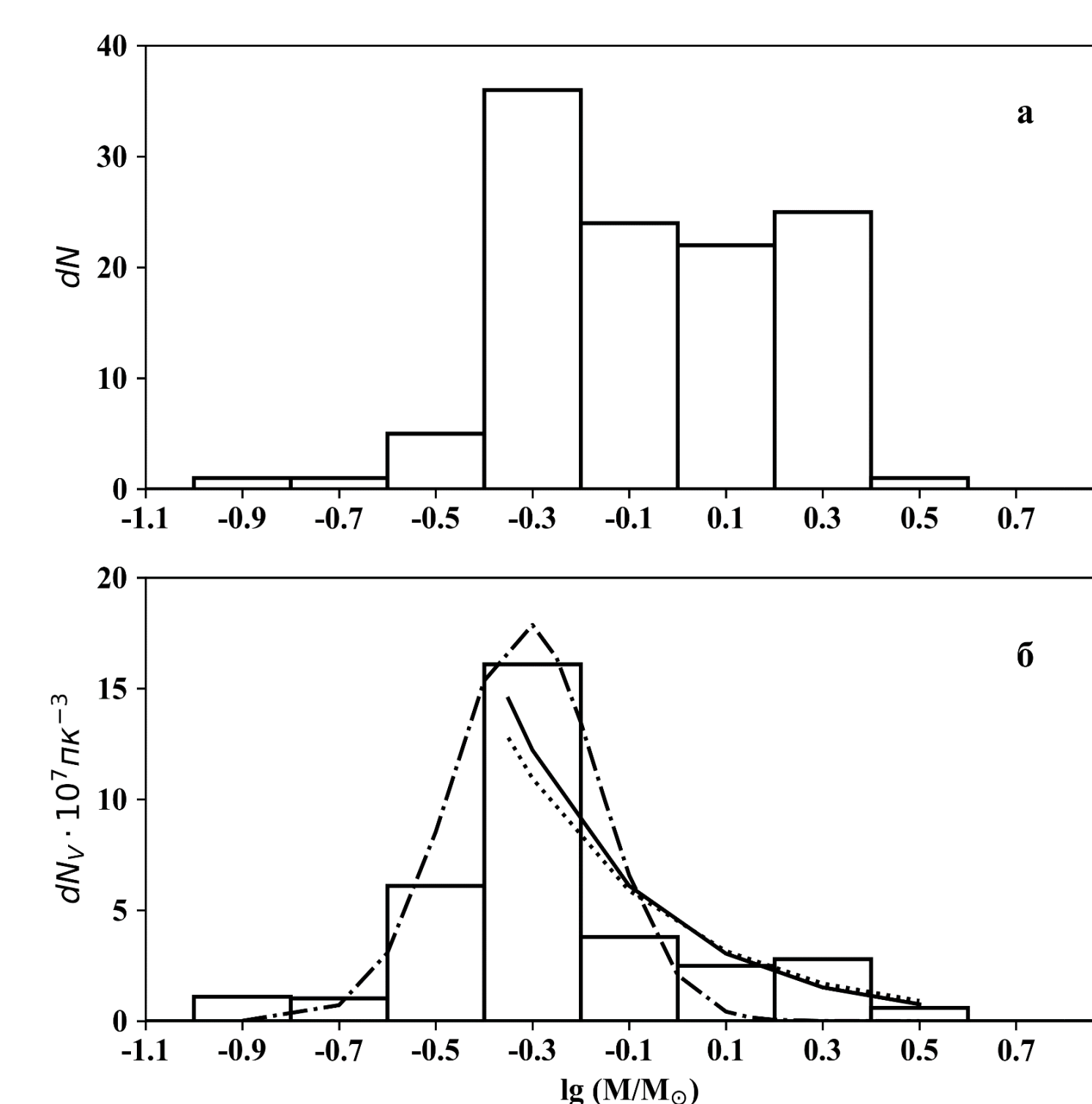


Рис.4. Гистограммы распределения звезд с дисками по массам. Панель (а) - наблюдаемое распределение, панель (б) - распределение с учетом объема пространства, в котором звезды наблюдаются. Сплошная кривая - аппроксимация гистограммы степенной функцией, штрихпунктирная линия - аппроксимация логнормальным законом. Пунктирная линия - солпитеровская функция масс, $dN \sim M^{-1.35}$.

Гистограмма на Рис. 4б аппроксимирована степенной функцией $dN \sim M^{-\Gamma} d(\lg M)$ на интервале масс $-0.4 < \lg(M/M_{\odot}) < 0.6$, что в пределах погрешности совпадает с солпитеровской НФМ. На интервале масс $-1.0 < \lg(M/M_{\odot}) < 0.4$ гистограмму можно аппроксимировать логнормальным законом (5) с параметрами $\mu = -(0.315 \pm 0.015)$, $\sigma = 0.15 \pm 0.03$. Наиболее вероятное значение массы $M_{вер} = (0.48 \pm 0.02) M_{\odot}$.

Заключение

На основе собранных из литературы данных о 58 молодых SB2 системах и 115 звездах с протопланетными дисками построены как наблюдаемые, так и исправленные за эффекты наблюдательной селекции распределения по массам компонент. Для SB2 систем проведено восстановление их «истинной» численности с учетом вероятности обнаружения по кривым лучевых скоростей и учтен объем пространства, в котором наблюдаются звезды данной массы. Для молодых звезд с протопланетными дисками введена поправка только на объем пространства.

Распределения аппроксимированы степенной функцией, $dN \sim M^{-\Gamma} d(\lg M)$. Показатели степени на интервалах от максимумов распределений до наибольшего значения массы, в пределах погрешности, близки к солпитеровской НФМ как для компонент молодых SB2 систем, так и для звезд с дисками.

В целом, распределения молодых звезд по массам можно аппроксимировать логнормальным законом, наиболее вероятное значение массы $M_{вер} = (0.48 \pm 0.02) M_{\odot}$ для звезд с дисками, $M_{вер} = (0.95 \pm 0.05) M_{\odot}$ - для компонент SB2 систем. Наиболее вероятные значения для функции масс ядер молекулярных облаков в Aquila, Cepheus, Perseus составляет $M_{вер} = (0.4 - 0.6) M_{\odot}$, для НФМ звезд Chabrier получил $M_{вер} = 0.25 M_{\odot}$ [1, 2]. Молодые звезды занимают промежуточное положение между дозвездными ядрами и звездами НГП. Значения наиболее вероятной массы молодых звезд с дисками и дозвездных ядер молекулярных облаков близки, у компонент SB2 систем оно существенно больше. Возможно, это связано с тем, что с уменьшением массы звезд их сложнее обнаружить как спектрально-двойные, поэтому для SB2 звезд с $M < 1.0 M_{\odot}$ выборка существенно неполная и ее нужно расширять.

Работа Еретновой О.В. выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 24-22-20041).

Литература

- Offner S. S. R., Clark, P. C., Hennebelle P. et al. 2014, Protostars and Planets VI, p. 53-75.
- Lee Y.-N., Offner S.S.R., Hennebelle P. et al. 2020, Space Science Reviews, v. 216, p. 70.
- Дудоров А. Е., Еретнова О. В. 2021, Челябинский физ.-мат. ж., т. 6, с. 347-362.
- Еретнова О. В. 2023, Астрон. ж., т. 100, с. 800-810.
- Frasca A., Alonso-Santiago J., Catanzaro G., et al. 2023, A&A, v. 677, A154.
- Baraffe I., Homeier D., Allard F., Chabrier G., et al. 2015, A&A, v. 577, A42.
- Dotter A., Chaboyer B., Jevremovi'c D. et al. 2008, Ap&SS, v. 178, p. 89-101.
- Попов М.В. 1970, Переменные Звезды, т. 17, с. 209-223.
- Истомин Л.Ф. 1978, Звездные скопления и двойные системы, с. 148-154.
- Guilloteau S., Simon M, Piétu V. et al. 2014, A&A, v. 567, A117.
- Simon M, Guilloteau S., Beck T.L. et al. 2019, ApJ, v. 884, A42.
- Garufi A., Ginski C., van Holstein R. G. et al. 2024, A&A, v. 685, A53.
- Valegård P. -G., Ginski C., Derkink A. et al. 2024, A&A, v. 685, A54.
- Ginski C., Garufi A., Benisty M. et al. 2024, A&A, v. 685, A52.

ВАК 2024

«Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр»
 Секция «Звезды и межзвездная среда»