

Результаты расчетов непрерывных спектров субзвезд с дисками, имеющими внутреннюю щель

О. В. Захожай

*Главная астрономическая обсерватория НАН Украины,
ул. Академика Заболотного, 27, г. Киев, 03680 ГСП, Украина
E-mail: zkhohga@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 20 октября 2010 г.

Разработан алгоритм для расчетов спектральных распределений энергий субзвезд и дисков с внутренней щелью в зависимости от их геометрии, возраста и угла наклона к наблюдателю. Рассчитаны 560 распределений энергии в спектрах систем, удаленных на расстояние 10 пк, состоящих из субзвезд с массами от $(0.01 \div 0.08)M_{\odot}$ и возрастами $(1 \div 30)$ млн. лет и дисков (плоских или расширяющихся), наблюдаемых под углами $0^{\circ} \div 80^{\circ}$. Проанализированы основные закономерности изменения потоков излучения от таких систем в зависимости от их возраста и массы центрального объекта. Проведено сравнение полученных результатов с данными для систем с бесщелевыми дисками.

Ключевые слова: субзвезды, газопылевые диски, распределение энергии в непрерывном спектре

1. Введение

Согласно современным теориям звездообразования и формирования планетных систем звезды и субзвезды в возрасте нескольких миллионов лет могут быть окружены газопылевыми дисками. На этой стадии диск активно взаимодействует с центральным объектом и “прикреплен” к нему (т. е. в центральной области нет внутренней щели). В такой системе в возрасте $1 \div 3$ Мг (здесь и далее используется обозначение: Мг – млн. лет) в окрестностях центрального объекта начинается испарение вещества, ведущее к образованию внутренней щели в диске [1]. Время существования диска с внутренней щелью существенно дольше времени существования диска без щели. На ранней стадии развития щели ее радиус равен нескольким радиусам центрального объекта, на следующей осколочной стадии развития диска радиус центральной (внутренней) щели может достигать 100 а. е. Стадии эволюции диска с развивающимися цент-

ральными щелями в последнее десятилетие интенсивно исследуются как теоретическими методами [2-5], так и наблюдательными средствами [6-8].

Исследованиям непрерывного спектра излучения субзвезд с окружающими их бесщелевыми дисками, в зависимости от массы и возраста центрального объекта, была посвящена работа [9]. Целью настоящей работы является проведение аналогичных систематических расчетов распределения энергии в спектрах (РЭС) излучения субзвезд с массами от $0.01M_{\odot}$ до $0.08M_{\odot}$ и возрастом от 1 до 30 Мг, имеющих тонкие диски (т. е. их минимальная толщина меньше диаметра центрального объекта) с внутренней щелью, наклоненные к наблюдателю под углами $0^{\circ} \div 80^{\circ}$.

2. Алгоритм расчета

В зависимости от наклона диска к наблюдателю изменяется проекция системы на небесную сферу (т. е. картинную плоскость). Площади

элементов проекции (в общем случае плоской составляющей диска, его внутреннего и внешнего поясов) существенно зависят от угла наклона диска к наблюдателю. Поскольку они по-разному нагреты центральным источником (в рассматриваемом случае – субзвездой), следует ожидать наличия зависимости потока излучения такой системы от угла наклона диска.

На рис. 1. показаны конфигурации проекции системы, исследуемые в настоящей работе. Введем предельные значения угла наклона диска к наблюдателю β_i , определяющие следующие ключевые конфигурации проекции системы на небесную сферу. Диск наблюдается плашмя (рис. 1, а) при угле $\beta_0 = 0$. При увеличении угла наклона до предельного значения β_1 центральный объект и внутренний пояс диска не экранируют друг друга (рис. 1, б). При превышении этого угла центральный объект начинает экранировать проекцию внутреннего пояса (рис. 1, в). После превышения предельного значения β_2 субзвезда начинает затенять плоскую составляющую диска (рис. 1, г), а после β_3 центральный объект больше не доступен для наблюдений: он полностью перекрывается веществом диска (рис. 1, д). При угле наклона $\beta = \pi/2$ (рис. 1, е) для наблюдений доступен только внешний пояс диска. С помощью геометрических построений можно показать, что эти значения зависят от радиуса

субзвезды R_{ss} и толщин диска H_{in} и H_{out} , которые он имеет на расстояниях R_{in} и R_{out} от центра системы, следующим образом:

$$\beta_1 = \arctg \left\{ \frac{2}{H_{in}^2 - 4R_{ss}^2} \times \right. \\ \left. \times \left[H_{in} R_{in} - \sqrt{H_{in}^2 R_{in}^2 - (H_{in}^2 - 4R_{ss}^2)(R_{in}^2 - R_{ss}^2)} \right] \right\}, \\ \beta_2 = 2 \arctg \left[\frac{H_{in}}{2(R_{in} + R_{ss})} + \right. \\ \left. + \sqrt{\frac{H_{in}^2}{4(R_{in} + R_{ss})^2} + \frac{R_{in} - R_{ss}}{R_{in} + R_{ss}}} \right], \\ \beta_3 = \frac{\pi}{2} - \arctg \left(\frac{H_{out} - R_{ss}}{R_{out}} \right).$$

Из рис. 1 видно также, что при $\beta_0 = 0$ поток излучения от системы состоит из потоков от субзвезды F_{circ} и от плоской составляющей диска F_{pl-d} . При углах в пределах $\beta_0 \div \beta_1$ поток является суммой F_{circ} , F_{pl-d} и потоков от внутреннего F_{in_rim} и внешнего F_{belt} поясов диска. При углах от β_1 до β_2 следует вычитать из потока от диска поток от внутреннего пояса, который экранируется субзвездой, $F_{z_in_rim}$, а из потока от субзвезды – поток,

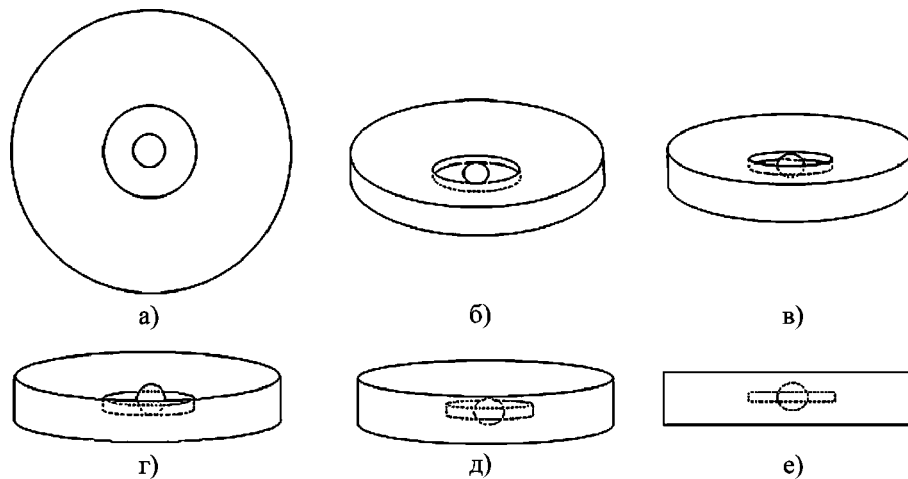


Рис. 1. Схематическое представление различных конфигураций системы, состоящей из субзвезды и диска, имеющего щель, в зависимости от угла наклона диска

который закрывается внутренней частью диска $F_{z_{-}ss}$. При углах в пределах $\beta_2 \div \beta_3$ необходимо вычитать из потока от диска еще и поток от плоской составляющей, который экранирует субзвезда, $F_{z_{-}d}$. При некоторых углах необходимо также вычитать из потока от субзвезды поток, экранируемый внешним краем диска, (этот вариант в работе специально не изучался из-за того, что внутренний край диска при рассматриваемых его параметрах в пределах углов наклона, соответствующих рис. 1, б и рис. 1, г, закрывает лимб звезды раньше, чем внешний край диска). Очевидно, что перечисленные составляющие потоков зависят от углов наблюдения системы и геометрии диска.

Таким образом, все перечисленные комбинации проекции системы на картинную плоскость, которые исследовались в настоящей работе, можно представить в виде суммы и разности потоков от субзвезды и диска в следующем общем виде:

$$F_{ss} = F_{circ} - F_{z_{-}ss}, \quad (1)$$

$$F_d = F_{pl_{-}d} + F_{in_{-}rim} + F_{belt} - F_{z_{-}in_{-}rim} - F_{z_{-}d}. \quad (2)$$

Если поток от субзвезды экранируется внешним краем диска, край щели не будет доступен для наблюдения. В этом случае под $F_{z_{-}ss}$ следует понимать поток от субзвезды, который закрывается внешней частью диска. Учет или неучет (т. е. приравнивание нулю) определенных потоков зависит от выбора интервала углов, при которых производились численные расчеты РЭС субзвезд с дисками.

Все спектральные плотности мощности излучения источника описывались с помощью планковского закона чернотельного излучения с учетом различных площадей источника, доступных для наблюдения и зависящих от геометрических параметров системы. В этом случае оказалось целесообразным ввести понятие стандартного удельного потока излучения (далее СУИ поток), под которым будем понимать регистрируемую с расстояния $d = 10$ пк спектральную плотность мощности излучения источника, имеющего наблюдаемую площадь S :

$$F_{\lambda} = \frac{S}{d^2} \left[\frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_{ef}}} - 1 \right)^{-1} \right],$$

где λ – длина волны, h – постоянная Планка, c – скорость света, k – постоянная Больцмана, T_{ef} – эффективная температура источника излучения.

Таким образом, СУИ поток от субзвезды (незатененной составляющими диска) с радиусом R_{ss} может быть вычислен по формуле

$$F_{\lambda_{-}circ} = \frac{\pi R_{ss}^2}{d^2} \left[\frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_{efss}}} - 1 \right)^{-1} \right],$$

где T_{efss} – эффективная температура субзвезды.

СУИ поток от субзвезды, который закрывается внутренней (или, в общем случае, внешней) частью диска, $F_{\lambda_{-}z_{-}ss}$ необходимо учитывать при расчетах РЭС систем, наклоненных к наблюдателю под углами $\beta_1 < j < \beta_3$. Площадь области субзвезды, перекрываемой внутренней частью диска, полученная из геометрических построений, равна

$$S_{z_{-}ss} = \left(H_{in} \sin j + \sqrt{R_{ss}^2 - x_2^2} - \sqrt{R_m^2 - x_2^2} \cos j \right) x_2 + (R_{ss}^2 - R_m^2 \cos j) \arcsin \frac{x_2}{R_{ss}},$$

где j – угол наклона системы, x_2 – декартова координата пересечения границы внутреннего пояса диска с окружностью субзвезды.

Это позволило записать выражение для СУИ потока $F_{\lambda_{-}z_{-}ss}$ в следующем виде:

$$F_{\lambda_{-}z_{-}ss} = \frac{S_{z_{-}ss}}{d^2} \left[\frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_{efss}}} - 1 \right)^{-1} \right].$$

При угле наклона к наблюдателю $j \geq \beta_3$ СУИ потоки от субзвезды и ее части, закрываемой

составляющими диска, равны, $F_{\lambda_{z-ss}} = F_{\lambda_{circ}}$. Следовательно, в этом случае “остаточный” СУИ поток от субзвезды $F_{\lambda_{ss}} = 0$.

СУИ поток от плоской составляющей диска зависит от его внутреннего и внешнего радиуса и закона изменения его эффективной температуры вдоль текущего радиуса диска r . Алгоритм расчета этого СУИ потока в зависимости от угла наклона диска, его геометрии и влияния ее на распределение температуры диска подробно был описан в работе [9].

СУИ поток от внутреннего пояса диска, который следует учитывать при углах наклона $0 < j < \beta_3$, рассчитывался по формуле

$$F_{\lambda_{in_rim}} = \frac{S_{in_rim}}{d^2} B(T_{in_rim}),$$

где $B(T_{in_rim})$ – функция Планка для внутреннего пояса диска с температурой $T_{ef} = T_{in_rim}$, S_{in_rim} – площадь проекции видимой части внутреннего пояса на картинную плоскость. Посредством геометрических построений была рассчитана связь этой площади с геометрическими параметрами диска:

$$S_{in_rim} = R_{in}^2 \cos j \left(\pi - 2 \arcsin(x_1/R_{in}) \right) + 2x_1 \left(H_{in} \sin j - 2\sqrt{R_{in}^2 - x_1^2} \cos j \right),$$

где $x_1 > 0$ – декартова координата точки пересечения эллипсов, описывающих верхний и нижний край внутреннего пояса диска.

Для расчета температуры внутреннего пояса использовалась связь, полученная из выражения для теплового баланса,

$$T_{in_rim} = \left(\frac{(1-A)R_{ss}^2 R_{in}}{4R_{in}^3} \right)^{1/4} T_{efss},$$

где A – геометрическое альbedo пыли диска.

СУИ поток от внутреннего пояса диска, который экранируется субзвездой, вычислялся по формуле

$$F_{\lambda_{z_in_rim}} = \frac{S_{z_in_rim}}{d^2} B(T_{in_rim}). \quad (3)$$

Здесь $S_{z_in_rim}$ – площадь проекции внутреннего пояса диска, которую экранирует субзвезда, полученная как функция его геометрических параметров:

$$S_{z_in_rim} = (x_3 + x_4)H_{in} \sin j + x_4 \sqrt{R_{ss}^2 - x_4^2} - x_3 \sqrt{R_{ss}^2 - x_3^2} + R_{ss}^2 \left(\arcsin \frac{x_4}{R_{ss}} - \arcsin \frac{x_3}{R_{ss}} \right) - \left(x_4 \sqrt{R_{in}^2 - x_4^2} - x_3 \sqrt{R_{in}^2 - x_3^2} \right) \cos j - R_{in}^2 \left(\arcsin \frac{x_4}{R_{in}} - \arcsin \frac{x_3}{R_{in}} \right) \cos j, \quad (4)$$

где x_3 и x_4 – декартовы координаты точек пересечения круга, описывающего центральное тело, и графиков функций, описывающих верхний и нижний край внутреннего пояса диска, имеющих форму эллипсов.

Этот СУИ поток от внутреннего пояса диска учитывался при углах наклона $\beta_2 < j \leq \beta_3$. При $j \leq \beta_1$ и $j > \beta_3$ площадь экранируемой поверхности равна нулю, при $\beta_1 < j \leq \beta_2$ площадь $S_{z_in_rim} = S_{z_ss}$.

СУИ поток от плоской составляющей диска, затененной субзвездой, $F_{\lambda_{z-d}}$ имеет место при $\beta_2 < j \leq \beta_3$. Его можно рассчитать с помощью формул (7-9) из статьи [9] с учетом пределов интегрирования для подынтегральных величин $r \in r_1 \div r_2$ и $\theta \in \zeta \div \pi - \zeta$:

$$\zeta = \operatorname{arccotg} \sqrt{\left(\frac{R_{ss}}{y} \right)^2 - 1},$$

где $y = 0.5 \left[H_{in} + \left(H_{in}^2 (1 - \sin^2 j) + 4 \cos^2 j \times (R_{in}^2 - R_{ss}^2) \right)^{1/2} \right] \operatorname{cosec} j$.

Для СУИ потока от внешнего пояса диска F_{λ_belt} алгоритм вычисления не отличается от полученного в статье [9].

3. РЭС субзвезд с дисками, имеющими внутреннюю щель

Считается, что остывание газопылевого облака с солнечным элементным составом в околозвездной (или околозвездной) области до температуры 1500 К инициирует процесс сублимации его вещества, следствием которого является образование внутренней щели в окружающем диске [2]. Остывание субзвезд ведет к дальнейшему понижению температуры в околозвездной области и, как следствие, к увеличению внутреннего радиуса диска.

В настоящей работе производился расчет РЭС на интервале времен эволюции субзвезд с дисками от 1 до 30 Мг (с шагом $4 \div 5$ Мг) для углов наклона j от 0° до 80° (с шагом в 20°). Массы субзвезд рассматривались в интервале от $0.01M_\odot$ до $0.08M_\odot$ (с шагом $0.01M_\odot$). Зависимость эффективной температуры субзвезд (как функции их масс) от возраста вычислялась по данным эволюционной модели субзвезд [10]. Внешний радиус диска и его утолщение рассчитывались по формулам (12) и (13) из работы [9], полученным соответственно в работах [11, 12]. Значение геометрического альбеда принималось равным $A=0.1$, т. е. среднему значению величин, приведенных в работе [13]. Согласно введенному определению все СУИ потоки рассчитывались для систем, удаленных от Солнца на расстояние $d = 10$ пк.

РЭС субзвезд с окружающими их плоскими и расширяющимися дисками рассчитывались в виде суммы потоков (1) и (2) с учетом угла наклона систем к наблюдателю и, как следствие, наличия составляющих потоков, входящих в эти выражения. В результате было рассчитано 560 РЭС (с разрешением 1989 точек на одно РЭС), типичный пример такого распределения представлен на рис. 2.

На рис. 3–6 приведены выборки зависимости СУИ потока от возраста и угла

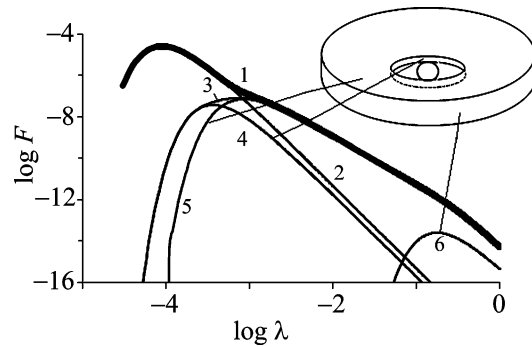


Рис. 2. РЭС и геометрическая конфигурация системы в возрасте 15 Мг, включающей субзвезду с массой $0.02M_\odot$ и плоский диск со щелью, наклоненный к наблюдателю под углом 40° ; F – поток излучения, $\text{эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{см})$; λ – длина волны, см. РЭС системы в целом – жирная линия 1; субзвезды – кривая 2; диска в целом – кривая 3; вкладов внутреннего пояса, плоской составляющей и внешнего пояса – соответственно кривые 4, 5 и 6

наклона системы для масс субзвезд $0.02M_\odot$, $0.04M_\odot$, $0.06M_\odot$ и $0.08M_\odot$ на длинах волн 10 мкм, 100 мкм, 1 мм и 1 см. Расчеты потоков проводились в системе СГС, а данные, вынесенные в табл. 1 (потоки для крайних значений масс субзвезд ($0.01M_\odot$ и $0.08M_\odot$), углов наклона (0° и 80°) и возрастов системы (1 Мг и 30 Мг)) приведены в янских. Переход от единиц системы СГС к янским осуществлялся по формуле $F_v = 10^{23} F_\lambda \lambda^2 / c$, где F_v – поток, Ян; F_λ – поток, $\text{эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{см})$.

Как и в системах с бесщелевыми дисками [9], потоки от субзвезд с расширяющимися дисками имеют систематически большие значения. Увеличение массы центральной субзвезды ведет к росту потока от систем и увеличению разности между потоками от систем с расширяющимися и плоскими дисками с увеличением их возраста. Увеличение возраста систем сопровождается уменьшением общего потока от них.

Сравнение потоков, рассчитанных для субзвезд с бесщелевыми дисками в работе [9] и для субзвезд с дисками, имеющими центральную щель, в настоящей работе, позволило выявить следующие тенденции. На длине волны 10 мкм для всех масс субзвезд и малых

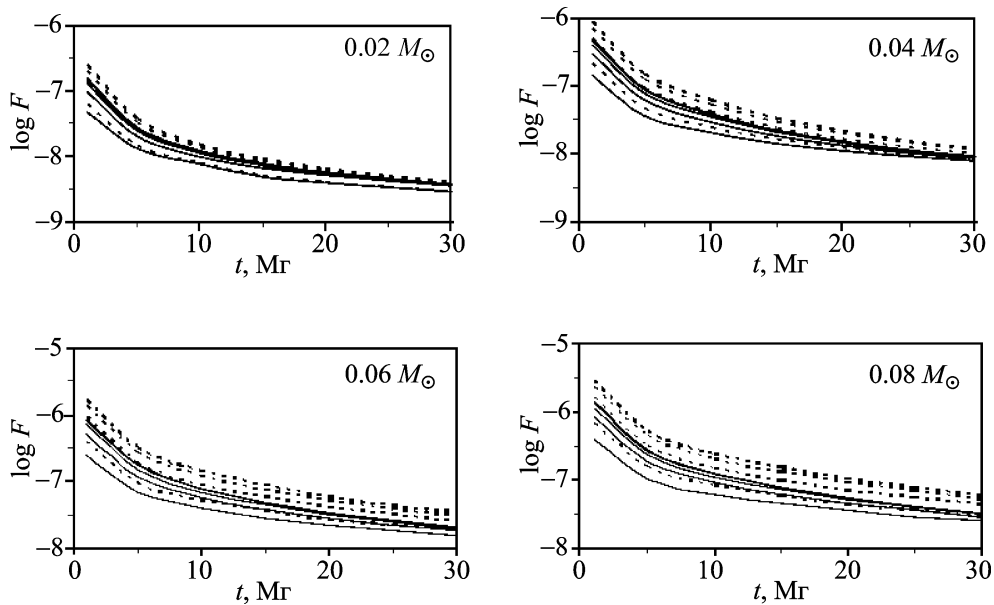


Рис. 3. Зависимости изменения СУИ потоков (рассчитанных в единицах СГС) на длине волны 10 мкм от возраста субзвезд с различными массами с окружающими их расширяющимися (пунктирные линии) и плоскими (сплошные линии) дисками со щелями, наклоненными к наблюдателю под углами: 0° , 20° , 40° , 60° , 80° . Кривые, соответствующие этим углам, расположены сверху вниз

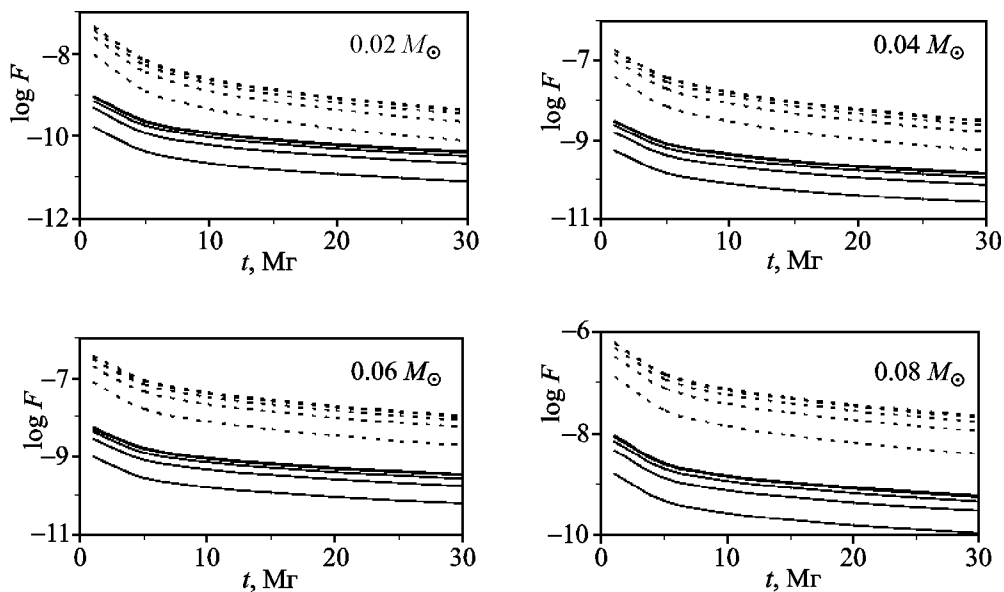


Рис. 4. Зависимости изменения СУИ потоков на длине волны 100 мкм от возраста субзвезд. Представление зависимостей такое же, как и на рис. 2

углов наклона значения потоков от систем в возрасте 1 Мг с плоскими и расширяющимися дисками (в которых есть центральная щель и

ее нет) различаются не более чем на 27 % (у систем со щелями они систематически меньше из-за несколько меньшей площади

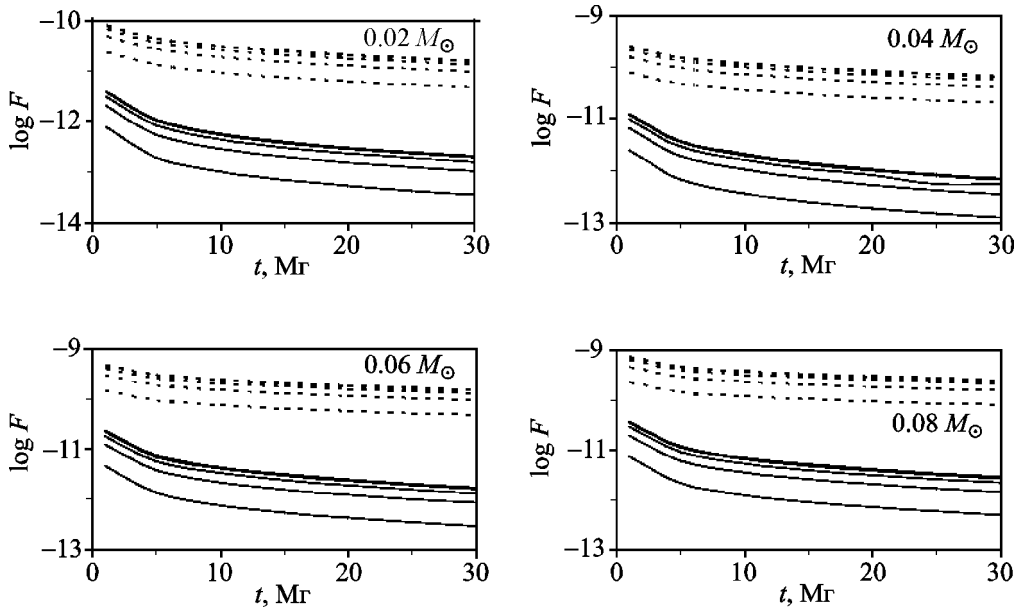


Рис. 5. Зависимости изменения СУИ потоков на длине волны 1 мм от возраста субзвезд. Представление зависимостей такое же, как и на рис. 2

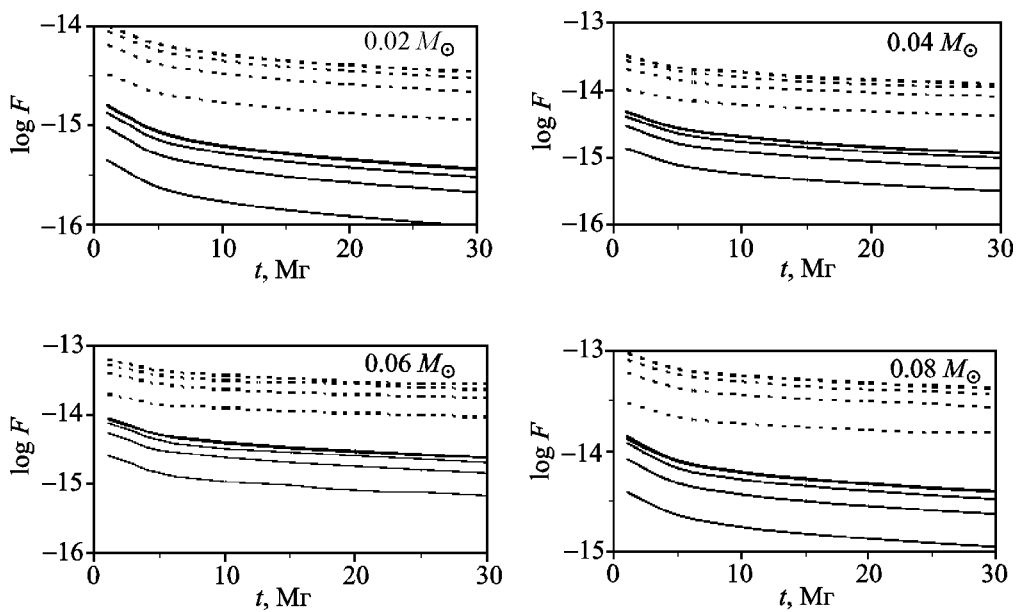


Рис. 6. Зависимости изменения СУИ потоков на длине волны 1 см от возраста субзвезд. Представление зависимостей такое же, как и на рис. 2

плоской составляющей). Увеличение угла наклона j в таких системах ведет к меньшей разности между потоками от систем со щелями и без них: при $j = 80^\circ$ наибольшее различие между потоками (8 %) наблюдается

у систем, содержащих субзвезды с массой $0.01M_\odot$, наименьшее – у систем с субзвездами с массой $0.08M_\odot$. У систем со щелями потоки больше за счет того, что площади центрального объекта систематически больше.

Таблица 1. *Потоки излучения (в янских) на длинах волн $\lambda = 10$ мкм, 100 мкм, 1 мм и 1 см от систем возрастом 1 и 30 Мг с расширяющимися (расш.) и плоскими (пл.) дисками, имеющими центральную щель, наклоненных к наблюдателю под углами 0° и 80°*

λ , см	j	$0.01 M_\odot$				$0.08 M_\odot$			
		1 Мг		30 Мг		1 Мг		30 Мг	
		пл.	расш.	пл.	расш.	пл.	расш.	пл.	расш.
10^{-3}	0°	0.1572	0.2111	0.005	0.0051	4.6483	9.2745	0.1045	0.1915
	80°	0.0528	0.062	0.0041	0.0041	1.3231	2.1241	0.0821	0.0972
10^{-2}	0°	0.0898	3.0750	0.0039	0.0177	2.9713	203.7063	0.1940	7.2935
	80°	0.0159	0.5825	0.0007	0.0031	0.5221	42.7808	0.0349	1.2766
10^{-1}	0°	0.0394	0.7869	0.0019	0.1155	1.253	25.1877	0.0959	8.6459
	80°	0.0075	0.2332	0.0003	0.0314	0.2488	7.8027	0.0167	2.7577
10^0	0°	0.0017	0.0105	0.0004	0.0031	0.0467	0.3133	0.0131	0.14
	80°	0.0005	0.0032	0.0001	0.001	0.0129	0.1	0.0036	0.05

При углах наблюдения $j < \beta_1$ центральный объект не экранируется внутренним краем диска. При $j > \beta_1$ площадь проекции видимой части центрального объекта тем больше, чем больше значение радиуса центральной щели диска R_{in} . Разность между потоками от систем с плоскими и расширяющимися дисками со щелью и без нее систематически увеличивается с их старением. При угле наклона $j = 60^\circ$ наибольшая разность, 61 %, наблюдается у систем, содержащих субзвезду с массой $0.01M_\odot$ и расширяющийся диск, а наименьшая, 3 %, у систем с субзвездами с массой $0.01M_\odot$ и плоским диском. Ситуация кардинально меняется для систем, у которых диски со щелью наклонены более чем на $80^\circ \div 82^\circ$ (минимальный угол, 80.1° , соответствует системе с субзвездой с массой $0.02M_\odot$ в возрасте 20 Мг; максимальный, 82.2° , – системе с массой субзвезды $0.01M_\odot$ в возрасте 1 Мг). У таких систем поток от субзвезд полностью экранируется диском, поэтому потоки от них существенно меньше, чем от систем с бесщелевыми дисками. Потоки от систем с внутренней щелью и с массами звезд $0.01M_\odot$ и $0.08M_\odot$ при угле наклона $j = 80^\circ$ (для возраста 1 Мг) различаются в случае плоских дисков в 25 раз, а в случае расширяющихся дисков в 34 раз.

С увеличением длины волны описанные изменения систематически уменьшаются так, что на длине волны 1 см соответствующие потоки от систем, включающих субзвезды с массами больше $0.02M_\odot$, содержащих и не содержащих центральные щели, различаются в пределах 4 %. Потоки от систем с возрастом 1 Мг, в состав которых входят субзвезды с массой $0.01M_\odot$ с расширяющимися дисками, наклоненными под углом 60° , различаются на 18 %. Таким образом, инфракрасная коротковолновая часть спектра наилучшим образом подходит для выявления щелей у дисков в системах возрастом более 1 Мг (причем чем старше система, тем надежнее результат).

Как и системы с бесщелевыми дисками [9], системы, содержащие диск со щелью, имеют наименьший поток (10^{-4} Ян) в возрасте 30 Мг, когда излучают на длине волны 1 см, содержат субзвезду с массой $0.01M_\odot$, окруженную плоским диском, который наклонен к наблюдателю под углом 80° (табл. 1). Расширение такого диска ведет к увеличению потока в 10 раз, а увеличение массы центрального объекта в 8 раз при сохранении геометрии диска ведет к росту потока в ≈ 36 раз. Наибольший поток от субзвезд с дисками, имеющими щель, ожидается в дальнем инфракрасном диапазоне. В табл. 1 приведено значение потока на длине волны 100 мкм, которое составляет ≈ 204 Ян.

С увеличением возраста таких систем до 30 Мг поток уменьшается в 28 раз. Если такая система наблюдается при угле наклона 80° , увеличение возраста ведет к уменьшению потока в 33 раза. Все системы, для которых производились расчеты, с возрастом до 30 Мг имеют потоки больше 0.0001 Ян на длинах волн меньше 1 см.

Проведенные расчеты РЭС субзвезд с дисками, содержащими центральные щели, подтвердили общие закономерности, выявленные в РЭС систем с бесщелевыми дисками в работе [9]. Сравнительно большой поток излучения от систем в длинноволновой части непрерывного спектра также вызван наличием у них дисков: поток от дисков сначала сравнивается с потоком от центральной субзвезды, а с увеличением длины волны – превышает ее (причем чем больше масса центральной субзвезды, тем в более коротковолновой инфракрасной области спектра это происходит, и у расширяющихся дисков это наступает на меньших длинах волн). С увеличением возраста систем потоки выравниваются в длинноволновой области, а рост наклона диска к наблюдателю ведет к еще большему увеличению длин волн, начиная с которых поток от диска превосходит поток от субзвезды.

При нулевом наклоне плоского диска к наблюдателю поток от него сравнивается с потоком от субзвезды с возрастом 1 Мг и массой

$M_{ss} = 0.01M_\odot$ и $M_{ss} = 0.08M_\odot$ на длинах волн 7.2 и 5.2 мкм соответственно. Поток от диска у таких систем начинает превышать поток от субзвезды в 2 раза на длинах волн 9.7 и 6.7 мкм соответственно. Увеличение наклона диска до 60° ведет к увеличению длины волны (10.2 мкм для $M_{ss} = 0.01M_\odot$ и 6.5 мкм для $M_{ss} = 0.08M_\odot$), на которой поток от расширяющегося диска сравнивается с потоком от субзвезды, а на длинах волн 14.1 мкм ($0.01M_\odot$) и 8.7 мкм ($0.08M_\odot$) поток от субзвезды в 2 раза меньше, чем от диска. При старении системы до 30 Мг перечисленные характерные отношения потоков, согласно выполненным расчетам, сдвигаются на длины волн 40.8 и 56.6 мкм (для $M_{ss} = 0.01M_\odot$) и 10 и 11.8 мкм (для $M_{ss} = 0.08M_\odot$) для угла наклона 0° , а для угла наклона 60° они равны 24 и 32.2 мкм (для $M_{ss} = 0.01M_\odot$) и 10.6 и 13.3 мкм (для $M_{ss} = 0.08M_\odot$) соответственно.

Отношение потоков излучения от диска (плоского и расширяющегося) и субзвезды с возрастом < 30 Мг на длинах волн ≤ 1 мкм меньше 10^{-4} . Общие тенденции изменения отношения потоков от дисков и субзвезд для крайних значений характеристик систем на длинах волн 10 мкм, 100 мкм, 1 мм и 1 см отражает табл. 2. При углах наклона $j > 75^\circ$ весь наблюдаемый поток от систем обязан только излучению диска.

Таблица 2. Отношения потоков излучения от диска и субзвезды на длинах волн $\lambda = 10$ мкм, 100 мкм, 1 мм и 1 см для систем с расширяющимися (расш.) и плоскими (пл.) дисками, имеющими центральную щель, с возрастом 1 и 30 Мг, наклоненных к наблюдателю под углами 0° и 60°

λ , см	j	$0.01 M_\odot$				$0.08 M_\odot$			
		1 Мг		30 Мг		1 Мг		30 Мг	
		пл.	расш.	пл.	расш.	пл.	расш.	пл.	расш.
10^{-3}	0°	2.1	3.2	$9 \cdot 10^{-2}$	0.1	5.3	12	1	2.7
	60°	1	$3.3 \cdot 10^{-3}$	$6.3 \cdot 10^{-2}$	$7.3 \cdot 10^{-2}$	2.7	5.9	0.8	1.7
10^{-2}	0°	$1.2 \cdot 10^2$	$4.1 \cdot 10^3$	34	$1.6 \cdot 10^2$	$3.3 \cdot 10^2$	$2.2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^2$	$1.1 \cdot 10^4$
	60°	61	$2.5 \cdot 10^2$	17	79	$1.6 \cdot 10^2$	$1.2 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^2$	$5.7 \cdot 10^3$
10^{-1}	0°	$5.1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^5$	$1.6 \cdot 10^3$	$9.6 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^4$	$2.7 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^6$
	60°	$2.7 \cdot 10^3$	$4.8 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^2$	$5.6 \cdot 10^4$	$7.1 \cdot 10^3$	$1.7 \cdot 10^5$	$7.3 \cdot 10^3$	$8.2 \cdot 10^5$
10^0	0°	$2.2 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^5$	$3.1 \cdot 10^4$	$2.6 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^4$	$3.4 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^6$
	60°	$1.3 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$1.8 \cdot 10^4$	$1.6 \cdot 10^5$	$2.9 \cdot 10^4$	$2.1 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^5$	$1.4 \cdot 10^6$

4. Выводы

В работе получены следующие результаты:

- 1) разработан алгоритм расчета РЭС субзвезд и дисков с внутренней щелью в зависимости от возраста, геометрии и угла наблюдения;
- 2) рассчитаны 560 РЭС систем, содержащих субзвезды с массами $(0.01 \div 0.08)M_{\odot}$ и возрастами $(1 \div 30)$ Мг, плоские и расширяющиеся диски с центральными щелями, наблюдаемые под углами $0^{\circ} \div 80^{\circ}$;
- 3) проанализированы выявленные закономерности в этих РЭС и проведено сравнение с соответствующими РЭС систем, в состав которых входят бесщелевые диски;
- 4) показано, что для выявления наличия щели в дисках более всего подходит ближний инфракрасный диапазон, в области длин волн ~ 10 мкм;
- 5) отношение потоков излучения от диска и субзвезды на миллиметровых и сантиметровых волнах превышает 800 (для плоской модели диска) и 1600 (для расширяющегося диска) для всех углов наблюдения и масс субзвезд, возраст которых превышает 1 Мг.

Литература

1. Muzerolle J., Lynne Hillenbrand L., Calvet N., Briceño C., and Hartmann L. Accretion in young stellar/substellar objects // *Astrophys. J.* – 2003. – Vol. 592. – P. 266-281.
2. Dullemond C. P., Dominik C., and Natta A. Passive irradiated circumstellar disks with an inner hole // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 560. – P. 957-969.
3. Isella A. and Natta A. The shape of the inner rim in proto-planetary disks // *Astron. Astrophys.* – 2005. – Vol. 438. – P. 899-907.
4. Isella A., Testi L., and Natta A. Large dust grains in the inner region of circumstellar disks // *Astron. Astrophys.* – 2006. – Vol. 451. – P. 951-959.
5. Suzuki T. K., Muto T., and Inutsuka Sh. Protoplanetary disk winds via magnetorotational instability: formation of an inner hole and a crucial assist for planet formation // *Astrophys. J.* – 2010. – Vol. 718. – P. 1289-1304.
6. Hughes A. M., Wilner D. J., Calvet N., D'Alessio P., Claussen M. J., and Hogerheijde M. R. An inner hole in the disk around TW Hydrae resolved in 7 mm dust emission // *Astrophys. J.* – 2007. – Vol. 664. – P. 536-542.

7. Muzerolle J., Adame L., D'Alessio P., Calvet N., Luhman K. L., Muench A. A., Lada Ch. J., Rieke G. H., Sieglar N., Trilling D. E., Young E. T., Allen L., Hartmann L., and Megeach S. T. Detections of circum(sub)stellar disks in IC 348: grain growth and inner holes? // *Astrophys. J.* – 2006. – Vol. 643. – P. 1003-1010.
8. Sicilia-Aguilar A., Henning T., and Hartmann L. W. Accretion in evolved and transitional disks in Cep OB2: looking for the origin of the inner holes // *Astrophys. J.* – 2010. – Vol. 710. – P. 597-612.
9. Захожай О. В. Результаты расчетов непрерывных спектров субзвезд с бесщелевыми дисками // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2010. – Т. 15, №4. – С. 399-407.
10. Писаренко А. И., Яценко А. А., Захожай В. А. Модель эволюции субзвездных объектов // *Астрон. ж.* – 2007. – Т. 84, № 8. – С. 675-684.
11. Захожай В. А. Проблема существования планетных систем. II. Ожидаемые свойства и первые результаты поиска // *Вісник астрономічної школи.* – 2005. – Т. 4, №2. – С. 55-72.
12. Kenyon S. J. and Hartmann L. Spectral energy distributions of T Tauri stars: disk flaring and limits on accretion // *Astrophys. J.* – 1987. – Vol. 323. – P. 714-733.
13. Mann I., Kohler M., Kimura H., Cechowski A., and Minato T. Dust in the solar system and in extrasolar planetary systems // *Astron. Astrophys. Rev.* – 2006. – Vol. 13, No. 3. – P. 159-228.

Результати розрахунків неперервних спектрів субзірок з дисками що мають внутрішню щілину

О. В. Захожай

Розроблено алгоритм для розрахунків спектральних розподілень енергії субзірок та дисків з внутрішніми щілинами залежно від їх геометрії, віку та кута нахилу до спостерігача. Розраховано 560 розподілів енергії в спектрах систем, віддалених на 10 пк, що містять субзірки з масою в межах $(0.01 \div 0.08)M_{\odot}$ і віком $(1 \div 30)$ млн. років та диски (плоскі або розширювані), які спостерігаються під кутами $0^{\circ} \div 80^{\circ}$. Проаналізовані основні закономірності змінювання потоків випромінювання від таких систем залежно від їх віку та маси центрального об'єкту. Виконано порівняння одержаних результатів з даними для систем з безщілинними дисками.

Continuous Spectra Calculation for Substars Possessing Disks with Inner Holes

O. V. Zakhzhay

The algorithm of spectral energy distribution simulation for substars and disks with inner hole has been developed versus their geometry, age and inclination angle. Calculations are made for 560 spectral energy distributions of systems spaced 10 pc apart, consisting of substars with mass $(0.01 \div 0.08)M_{\odot}$ and aged $(1 \div 30)$ Myr, and a flat or flaring disk with inner hole and inclined at angles $0^{\circ} \div 80^{\circ}$. Main regularities of flux changing are analyzed versus age and central object mass. The data obtained are compared with those for the systems without inner holes.