

Результаты расчетов непрерывных спектров субзвезд с бесщелевыми дисками

О. В. Захожай

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

Статья поступила в редакцию 29 июня 2010 г.

Разработан алгоритм для расчетов спектральных распределений энергий субзвезд с бесщелевыми дисками в зависимости от их геометрии, возраста и угла наблюдения. Рассчитаны 336 распределений энергии в спектрах систем удаленных на расстояние 10 пк, состоящих из субзвезды, с массой $(0.01 \div 0.08)M_{\odot}$, возрастом $1 \div 30$ млн лет и плоского или расширяющегося бесщелевого диска, наблюдаемого под углами от 0° до 80° . Потоки излучения от таких систем > 0.001 Ян на длинах волн в интервале от 1.7 мкм до 1 см, а на длинах волн > 40 мкм потоки от дисков, независимо от угла наблюдения, являются определяющими в общем излучении систем.

1. Введение

Диски вокруг космических тел – одна из важнейших составляющих их эволюционного развития. Наличие дисков предполагается у черных дыр (аккреционные диски), у звезд и протозвезд, вокруг которых формируются планеты (протопланетные диски или облака). Обнаруженные “инфракрасные избытки” у нескольких десятков субзвезд интерпретируются существованием у них дисков [1]. Условия для возникновения околозвездных дисков связывают с определенным угловым моментом протозвезды [2]. Если возникший диск не подвержен внешнему воздействию (гравитационное влияние со стороны близкого компонента или взрыв соседствующей сверхновой), его развитие может закончиться возникновением в нем протопланет. Следовательно, поиск дисков вокруг космических тел можно отнести к важным задачам астрофизики и звездной астрономии.

Открытие околозвездных дисков на основе анализа непрерывного спектра звезд началось в середине 80-х гг. XX столетия, когда появи-

лись данные обсерватории IRAS об инфракрасном излучении космических объектов на длинах волн 12, 25, 60 и 100 мкм [3]. Обнаружение “инфракрасных избытков” у Веги положило начало систематическим поискам дисков у звезд путем анализа их РЭС (распределения энергии в спектрах) [4]. К настоящему времени по выявленным “инфракрасным избыткам” излучения открыто более 900 звезд, у которых предполагается существование дисков [5].

Чтобы убедиться в том, что природа выявленного “инфракрасного избытка” связана с наличием диска у звезды, необходимо выполнить расчет непрерывного спектра такой системы с учетом ее физических параметров, которые априори не известны. А именно по заданным значениям массы, радиуса, эффективной температуры центрального источника и физическим параметрам диска рассчитываются РЭС системы. Из расчетного непрерывного спектра, наиболее похожего на наблюдаемый, судят о размерах диска, его средней температуре, массе и концентрации частиц. Число задаваемых параметров может быть больше, если необходимо учесть химический состав

диска, его геометрию, наличие в нем центральной щели и прочее. Существенными параметрами являются толщина диска, его наклон к наблюдателю и размер. Если диски бесщелевые, то от их толщины зависят площадь видимой части звезды, доступная для наблюдения, и доля энергии, которую блокирует звезда на окружающем ее диске. Существуют и другие особенности, требующие отдельного конкретного анализа и учета. Менее всего исследованы системы с дисками, в центре которых находятся субзвезды. Систематических расчетов таких систем почти не проводилось за исключением работ, в которых анализировались отдельные объекты, [6, 7] и др.

Целью работы является проведение систематических расчетов РЭС субзвезд с массами от $0.01M_{\odot}$ до $0.08M_{\odot}$ с бесщелевыми дисками, наклоненными к наблюдателю под углами $0^{\circ} \div 80^{\circ}$, с возрастом от 1 до 30 млн лет (далее употребляется сокращение: млн лет – Мг).

В первых исследованиях звезд с дисками, общая продолжительность их существования оценивалась от нескольких до 30 Мг [8]. Позже, для коричневых карликов и холодных звезд, возраст которых менее 30 Мг, приводилось время жизни их дисков ~ 6 Мг [9]. Поскольку полной ясности в этом вопросе не существует, выбор верхней границы возраста (30 Мг) может рассматриваться вполне обоснованным.

2. Алгоритм расчета

Систему субзвезды с диском достаточно охарактеризовать следующими параметрами: R_{ss} и T_{efss} – радиус и эффективная температура субзвезды соответственно; H_{in} и H_{out} – толщины диска, которые он имеет на расстояниях R_{in} и R_{out} от центра системы, соответствующих его внутреннему и внешнему радиусам; $T_f = T_f(r)$ – закон изменения эффективной температуры диска в зависимости от расстояния до центра системы r (который разный для плоского, T_{flat} , и расширяющегося, T_{flared} , дисков). Поток излучения от такой системы является строго аддитивной величиной потоков от субзвезды, F_{ss} , и диска, F_{disk} , когда система наблюдается под углом $j = 0^{\circ}$, т. е. плашмя:

$$F = F_{ss} + F_{disk}.$$

При $j > 0$ часть диска экранируется возвышающейся над ним субзвездой, что ведет к уменьшению его потока на величину F_{shadow} , а “появление” для наблюдателя внешнего пояса диска толщиной h_{out} приводит к увеличению общего потока на величину F_{belt} . Таким образом, суммарный поток от системы в общем случае составляет

$$F = F_{ss} + F_{disk} - F_{shadow} + F_{belt}. \quad (1)$$

При расчете РЭС звезд с дисками ограничиваются, как правило, планковским законом излучения [10, 11]. Непрерывный спектр субзвезд принципиально не отличается от звездного, за исключением того, что его эффективная температура и радиус меняются с возрастом. Поэтому в выбранной модели для потоков излучения также используют планковский закон:

для субзвезд

$$F_{ss} = \frac{S'_{ss}}{d^2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T_{efss}}\right) - 1 \right)^{-1}, \quad (2)$$

и для дисков

$$F_{disk} = \cos j \frac{2\pi hc^2}{d^2 \lambda^5} \int_{R_{in}}^{R_{out}} \frac{r}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T_{disk}}\right) - 1} dr, \quad (3)$$

где S'_{ss} – площадь проекции видимой части субзвезды на картинную плоскость со стороны наблюдателя, d – расстояние до системы, λ – длина волны, h – постоянная Планка, c – скорость света, k – постоянная Больцмана, $\cos j$ учитывает наклон диска к наблюдателю. Поскольку эффективная температура диска изменяется с удалением от центра субзвезды ($T_{disk} = T_f = T_f(r)$), планковский закон излучения принимает интегральный вид (3)

(см., например, [10]). Явный вид изменения температуры $T_f = T_f(r)$ в зависимости от геометрии диска хорошо исследован [11] и имеет следующий вид:

$$T_{flat} = (2/(3\pi))^{1/4} (R_{ss}/r)^{3/4} T_{efss}, \quad (4)$$

$$T_{flared} = (\alpha/2)^{1/4} (R_{ss}/r)^{1/2} T_{efss}, \quad (5)$$

где α – угол, под которым свет от центрального объекта падает на поверхность диска.

Несложно показать, что площадь проекции субзвезды, доступная наблюдателю, S'_{ss} ,

при $j \rightarrow 0$ стремится к $S'_0 = \pi r_*^2$,

при $j \rightarrow \frac{\pi}{2}$ стремится к $S'_{\pi/2} = \frac{\pi R_{ss}^2}{2} - R_{ss}^2 \varphi - r_*^2 \operatorname{tg} \varphi$,

где r_* – радиус субзвезды, доступный для наблюдения, $\pm \varphi$ – широта субзвезды, в пределах которой диск соприкасается с нею, рад.

Используя очевидное равенство

$$r_* \operatorname{tg} \varphi = (H_{in}/2) \sin j,$$

получим выражение для площади проекции видимой части субзвезды на картинную плоскость со стороны наблюдателя для произвольного угла наклона j :

$$\begin{aligned} S'_{ss} = & \pi \left(R_{ss}^2 - \frac{H_{in}^2}{4} \sin^2 j \right) \cos^2 \frac{j}{2} + \\ & + \frac{H_{in}}{2} \left(\frac{\pi H_{in}}{4} \sin j - \sqrt{R_{ss}^2 - \frac{H_{in}^2}{4} \sin^2 j} \right) \sin j - \\ & - R_{ss}^2 \arcsin \left(\frac{H_{in}}{2R_{ss}} \sin j \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Введем расстояния r_1 и r_2 – пределы, в которых диск экранируется возвышающей-

ся над ним частью субзвезды. Эти границы нетрудно получить из геометрических построений:

$$r_1 = \frac{1}{2} \sqrt{4R_{ss}^2 - H_{in}^2}, \quad (7)$$

$$r_2 = l \sqrt{\frac{4R_{ss}^2 - H_{in}^2}{4l^2 \cos^2 \varphi + (4R_{ss}^2 - H_{in}^2) \sin^2 \varphi}}, \quad (8)$$

$$\text{где } l = \frac{2R_{ss} \operatorname{cosec} j - H_{in} + \sqrt{4R_{ss}^2 - H_{in}^2}}{\frac{H_{out} - H_{in}}{R_{out} - R_{in}} + 2 \operatorname{ctg} j}.$$

Тогда поток от области, которую “затеняет” центральный объект, для малой толщины диска может быть записан в полярных координатах ($r \in [r_1, r_2]$, $\theta \in [0, \pi]$) в следующем виде:

$$F_{shadow} = \frac{\cos j}{d^2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \int_0^{\pi} \int_{r_1}^{r_2} r \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_{disk}}} - 1 \right)^{-1} dr d\theta. \quad (9)$$

Внешний пояс диска (имеющий толщину h_{out}) имеет постоянную температуру $T_{belt} = T_f(r = R_{out})$.

Поэтому поток от него рассчитывается по формуле Планка:

$$F_{belt} = \frac{S_{belt}}{d^2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left(e^{\frac{hc}{\lambda k T_{belt}}} - 1 \right)^{-1}, \quad (10)$$

где площадь внешнего пояса диска, доступная для наблюдения, в зависимости от угла наклона диска j определяется из простого выражения

$$S_{belt} = 2R_{out} H_{out} \sin j. \quad (11)$$

3. РЭС субзвезд с бесщелевыми дисками

Начальные условия для расчета непрерывных спектров субзвезд с дисками целесообразно связать с массами субзвезд (хотя они и не фигурируют в моделях в явном виде) по следующим причинам. Субзвезды – объекты без внутренних источников энергии, которые эволюционируют только за счет запасов своей внутренней энергии. После окончания стадии протозвезды их эффективная температура и радиус уменьшаются по-разному, в зависимости от выбранной эволюционной модели. В настоящей работе используются полученные в [12] данные, позволяющие задавать значения радиуса и эффективной температуры для звезды определенного возраста.

Внутренний радиус диска принимался равным радиусу субзвезды, внешний радиус диска (в астрономических единицах) рассчитывался по формуле

$$R_{out} = 150(M_{ss}/M_{\odot})^{0.75}, \quad (12)$$

полученной в работе [13]. В соответствии с выбранным интервалом масс субзвезд M_{ss} внешний радиус диска R_{out} получался в соответствии с формулой (12) в пределах от 5 до 23 а. е. Толщина диска принималась равной $H_{in} = 0.1R_{ss}$, что следует из формулы Кенъена и Хартмана [14]

$$H = 0.1R_{ss} (r/R_{ss})^{9/8} \quad (13)$$

для $r = R_{in} = R_{ss}$.

Возраст систем выбирался с шагом в 5 Мг в пределах от 1 до 30 Мг для углов от 0° до 80° с шагом в 20° . Расчеты для угла наклона равного 90° не проводились, т. к. при этой конфигурации диск полностью закрывает субзвезду и для наблюдений доступен только внешний его пояс. Все потоки рассчитывались для систем, удаленных от Солнца на расстояние $d = 10$ пк.

Потоки для субзвездных систем с плоскими и расширяющимися дисками рассчитывались

по формуле (1) с учетом выражений (2)–(5) и (6)–(13). В результате было получено 336 РЭС. Пример одного из рассчитанных распределений для субзвезды (с массой $0.08M_{\odot}$ в возрасте 1 Мг) с диском, наклоненным под углом 40° к наблюдателю, показан на рис. 1. Так как представить все полученные РЭС в настоящей статье не представляется возможным, были построены зависимости изменения потока от возраста и угла наклона системы для интервала субзвездных масс на длинах волн 10 мкм, 100 мкм, 1 мм и 1 см (рис. 2-5).

Расчеты потоков в работе проводились в системе СГС (т. е. в единицах эрг/(см²·с·см)). Для инфракрасного диапазона потоки в литературе приводятся как в единицах СГС, так и в янских. Поэтому для удобства анализа полученных данных в табл. 1 потоки для крайних значений масс субзвезд ($0.01M_{\odot}$ и $0.08M_{\odot}$), углов наклона (0° и 30°) 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, эрг/(см²·с·см); λ – длина волны, см; c – скорость света, см/с.

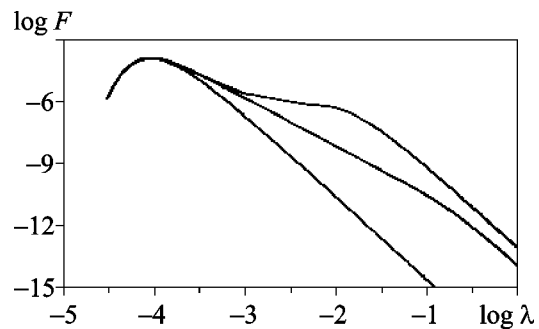


Рис. 1. РЭС субзвезды с массой $0.08M_{\odot}$ (нижняя линия), а также субзвезды и окружающего ее плоского (средняя линия) и расширяющегося (верхняя линия) бесщелевого диска. Системы имеют возраст 1 Мг, а их диски наклонены под углом 40° к наблюдателю. F – поток излучения, эрг/(см²·с·см), λ – длина волны, см

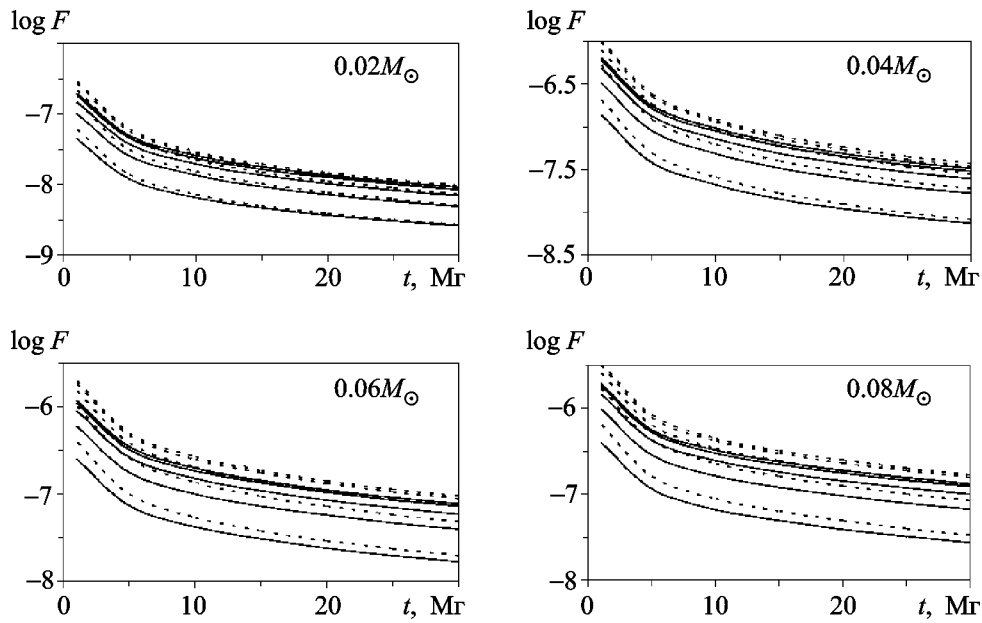


Рис. 2. Зависимости изменения потоков (рассчитанных в единицах СГС) на длине волны 10 мкм от возраста субзвезд с различными массами (приведены на панелях рисунка) с окружающими их расширяющимися (пунктирные линии) и плоскими (сплошные линии) безщелевыми дисками, наклоненными к наблюдателю под углами: 0° , 20° , 40° , 60° , 80° . Кривые, соответствующие этим угла расположены сверху вниз

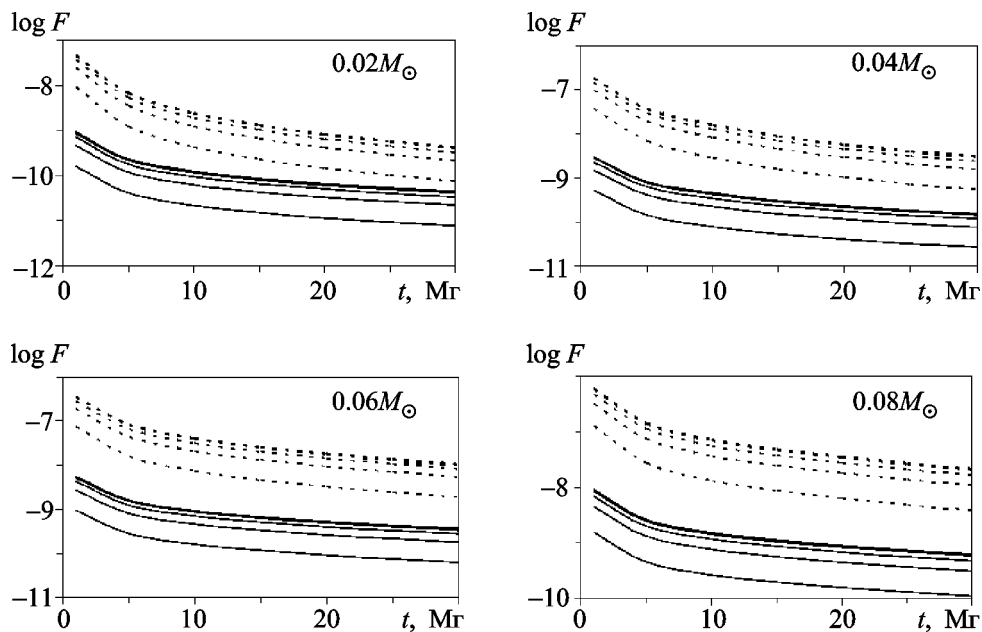


Рис. 3. Зависимости изменения потоков на длине волны 100 мкм от возраста субзвезд. Представление зависимостей такое же, как на рис. 2

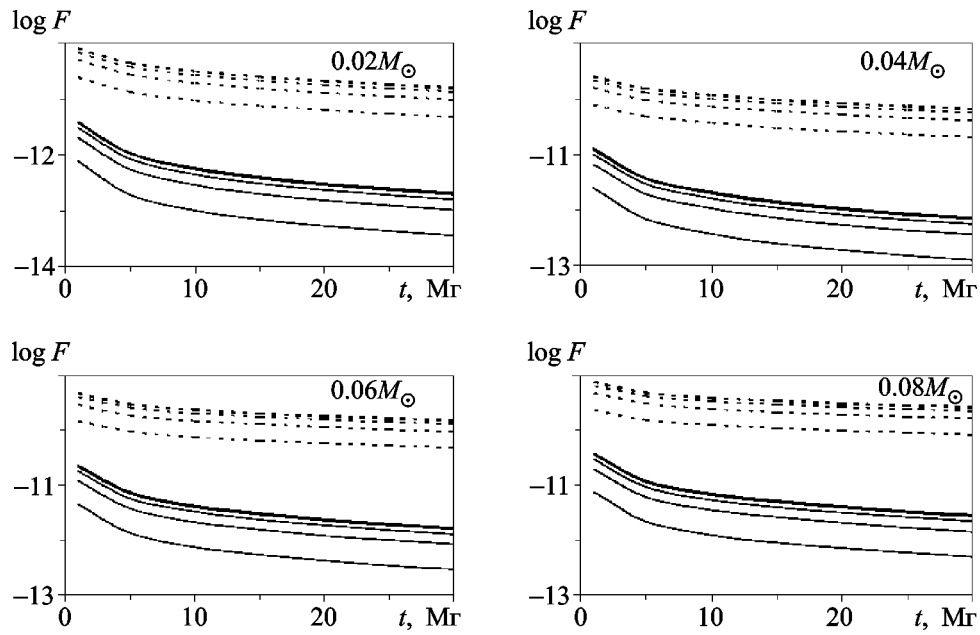


Рис. 4. Зависимости изменения потоков на длине волны 1 мм от возраста субзвезд. Представление зависимостей такое же, как на рис. 2

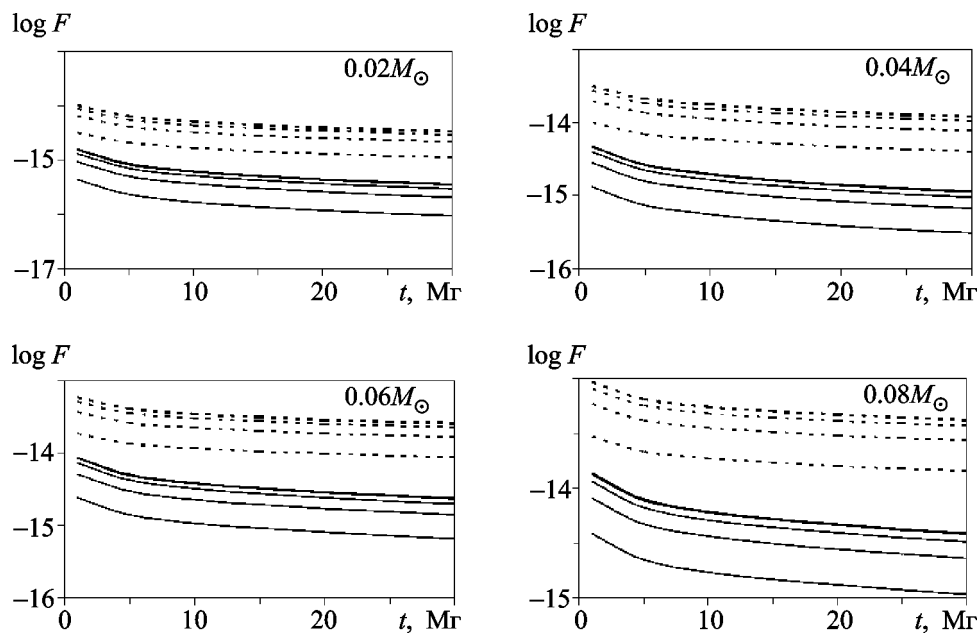


Рис. 5. Зависимости изменения потоков на длине волны 1 см от возраста субзвезд. Представление зависимостей такое же, как на рис. 2

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

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°	0.1881	0.2426	0.0079	0.0080	6.3941	11.0683	0.4406	0.5583
	80°	0.0486	0.0579	0.0030	0.0030	1.3224	2.1315	0.0917	0.1121
10^{-2}	0°	0.0905	3.0781	0.0419	0.0180	3.0039	203.8822	0.2071	7.3127
	80°	0.0159	0.5829	0.0008	0.0032	0.5238	42.8134	0.0361	1.2787
10^{-1}	0°	0.0395	0.7874	0.0020	0.1157	1.2537	25.2046	0.0962	8.6513
	80°	0.0075	0.2334	0.0003	0.0314	0.2490	7.8087	0.0167	2.7617
10^0	0°	0.0017	0.0105	0.0004	0.0031	0.0460	0.3135	0.0131	0.1410
	80°	0.0005	0.0032	0.0001	0.0010	0.0129	0.0998	0.0036	0.0484

Из рис. 2-5 видно, что потоки от расширяющихся дисков имеют систематически большие значения. Увеличение массы центральной субзвезды ведет к росту потока от систем и увеличению разности потоков между расширяющимися и плоскими дисками с увеличением их возраста. Старение систем ведет к уменьшению их общего потока.

Наименьший поток (10^{-4} Ян) был получен для излучающей на длине волны 1 см системы, содержащей субзвезду с массой $0.01M_\odot$, окруженную плоским диском, который наклонен к наблюдателю под углом 80° и имеет возраст 30 Мг (табл. 1). Расширение такого диска приведет к увеличению потока в 10 раз, а увеличение массы центрального объекта в 8 раз при сохранении геометрии диска – к росту потока в ≈ 130 раз.

Наибольший поток от систем субзвезд с дисками ожидается в дальнем инфракрасном диапазоне ($\lambda \sim 100$ мкм). Абсолютный максимум потока равный 232 Ян соответствует системам с возрастом 1 Мг, содержащим субзвезду с массой $0.08M_\odot$, окруженную расширяющимся диском, который наблюдается плашмя. В табл. 1 видна составляющая этого потока на длине волны 100 мкм равная 204 Ян. С увеличением возраста таких систем до 30 Мг поток от системы уменьшается в 28 раз. Если такая система наблюдается

при угле наклона 80° , увеличение возраста ведет к уменьшению потока в 33 раза.

Все системы субзвезд с расширяющимися дисками, для которых производились расчеты, с возрастом до 30 Мг имеют потоки больше 0.001 Ян на длинах волн меньше 1 см. Уменьшение порогового излучения в 10 раз (т. е. до 0.01 Ян) не приводит к ограничению наблюдений молодых субзвезд ($t \leq 30$ Мг) с расширяющимися дисками в таком же интервале длин волн.

Сравнительно большой поток излучения систем в длинноволновой части непрерывного спектра вызван наличием у них дисков. Именно в этой части диапазона электромагнитных волн вклад потока от дисков сначала сравнивается с потоком от центральной субзвезды, а с увеличением длины волны превышает его. Чем больше масса центральной субзвезды, тем в более коротковолновой области спектра инфракрасного излучения это происходит. У расширяющихся дисков это наступает на меньших длинах волн. С увеличением возраста систем потоки выравниваются в длинноволновой области. Рост угла наблюдения диска ведет к тому, что выравнивание потоков наступает на больших длинах волн, начиная с которых поток от диска превосходит поток от их центральных субзвезд.

Описанные закономерности у систем, содержащих субзвезды с массой $0.08M_\odot$, про-

являются на длинах волн в интервале от 1 до 10 мкм. При нулевом наклоне диска к наблюдателю его поток сравнивается с потоком от субзвезды (с возрастом 1 Мг) на длине волны 3 мкм; на длине волны несколько больше 4 мкм поток от диска начинает превышать поток от субзвезды в 2 раза. Увеличение наклона диска до 80° ведет к увеличению длины волны (5.5 мкм), на которой поток от расширяющегося диска сравнивается с потоком от субзвезды, а на $\lambda = 7.4$ мкм, поток от нее в 2 раза меньше, чем от диска. При старении системы до 30 Мг перечисленные характерные значения отношения потоков, согласно выполненным расчетам, наблюдаются на длинах волн 8.4 и 9.4 мкм соответственно.

Уменьшение масс центральных субзвезд ведет к незначительному росту длин волн, на которых сравниваются потоки от них и от дисков, наблюдаемых плашмя, и к существенному увеличению длин волн (до ≈ 40 мкм), на которых поток от дисков в два и более раз превышает поток от субзвезд. Именно такая ситуация, согласно проведенным расчетам, ожидается в системах, содержащих субзвезды с массой $0.01M_{\odot}$. Потоки от расширяющихся дисков, наблюдаемых плашмя, вокруг субзвезд с возрастом 1 Мг уравниваются с по-

токами от субзвезд на длине волны 5.4 мкм, а на длине волны 7.4 мкм уже превосходят последние в 2 раза.

Общие тенденции изменения отношения потоков от дисков и субзвезд для крайних значений характеристик систем отражены в табл. 2. Приведенные в этой таблице данные характеризуют вклад потоков в спектры излучения анализируемых систем и совместно с данными табл. 1 позволяют выбрать оптимальный диапазон длин волн для наблюдения анализируемых систем.

4. Выводы

В работе получены следующие результаты.

Разработан алгоритм расчета РЭС субзвезд с бесщелевыми дисками в зависимости от возраста, геометрии и угла наблюдения.

Рассчитаны 336 РЭС систем, содержащих субзвезды (с массами $(0.01 \div 0.08)M_{\odot}$ и возрастaми $(1 \div 30)$ Мг) и плоские и расширяющиеся диски (наблюдаемые под углами $0^{\circ} \div 80^{\circ}$).

Наличие вокруг субзвезд дисков, видимых плашмя, вносит определяющий вклад в РЭС на длинах волн превышающих $10 \div 40$ мкм (в зависимости от массы центральной суб-

Таблица 2. Отношения потоков излучения от диска и субзвезды на длинах волн $\lambda = 1$ мкм, 10 мкм, 100 мкм, 1 мм и 1 см для систем с расширяющимися (расш.) и плоскими (пл.) дисками с возрастом 1 Мг и 30 Мг, наклоненных к наблюдателю под углами 0° и 80°

λ , см	j	$0.01 M_{\text{д}}$				$0.08 M_{\text{д}}$			
		1 Мг		30 Мг		1 Мг		30 Мг	
		пл.	расш.	пл.	расш.	пл.	расш.	пл.	расш.
10^{-4}	0°	$4.9 \cdot 10^{-3}$	$5.2 \cdot 10^{-3}$	$<10^{-5}$	$<10^{-5}$	$6.1 \cdot 10^{-2}$	$6.2 \cdot 10^{-2}$	$<10^{-5}$	$5.4 \cdot 10^{-2}$
	80°	$9.7 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$<10^{-5}$	$<10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$<10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$
10^{-3}	0°	2.8	3.8	0.72	0.74	7.7	14	7.5	9.7
	80°	0.75	1.1	0.18	0.18	2.2	4.2	2.2	2.9
10^{-2}	0°	$1.2 \cdot 10^2$	$4.1 \cdot 10^3$	37	$1.6 \cdot 10^2$	$3.3 \cdot 10^2$	$2.2 \cdot 10^4$	$3.2 \cdot 10^2$	$1.1 \cdot 10^4$
	80°	37	$1.4 \cdot 10^3$	11	50	$1.0 \cdot 10^2$	$8.5 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^2$	$3.6 \cdot 10^3$
10^{-1}	0°	$5.1 \cdot 10^3$	$1.0 \cdot 10^5$	$1.6 \cdot 10^3$	$9.6 \cdot 10^5$	$1.4 \cdot 10^4$	$2.7 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^6$
	80°	$1.7 \cdot 10^3$	$5.4 \cdot 10^4$	$5.1 \cdot 10^2$	$4.7 \cdot 10^4$	$4.8 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^5$	$4.6 \cdot 10^3$	$7.5 \cdot 10^5$
10^0	0°	$2.2 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^5$	$3.1 \cdot 10^4$	$2.6 \cdot 10^5$	$5.0 \cdot 10^4$	$3.4 \cdot 10^5$	$2.0 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^6$
	80°	$1.1 \cdot 10^4$	$7.4 \cdot 10^4$	$1.4 \cdot 10^4$	$1.5 \cdot 10^5$	$2.5 \cdot 10^4$	$1.9 \cdot 10^5$	$9.9 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^6$

звезды). Изменение угла наблюдения систем с дисками и их возраст существенно влияют на величину отношения потоков от диска и от субзвезды.

Литература

- Liu M. C., Najita J., and Tokunaga A. T. A Survey for Circumstellar Disks around Young Substellar Objects // *Astrophys. J.* – 2003. – Vol. 585. – L372-L391.
- Рузмайкина Т. В. Угловой момент протозвезд, порождающих протопланетные диски // *Письма в Астрон. ж.* – 1981. – Т. 7. – С. 188-190.
- Neugebauer G., Habing H. J., van Duinen R., Aumann H. H., Baud B., Beichman C. A., Beintema D. A., Boggess N., Clegg P. E., de Jong T., Emerson J. P., Gautier T. N., Gillett F. C., Harris S., Hauser M. G., Houck J. R., Jennings R. E., Low F. J., Marsden P. L., Miley G., Olton F. M., Pottasch S. R., Raimond E., Rowan-Robinson M., Soifer B. T., Walker R. G., Wesselius P. R., and Young E. The Infrared Astronomical Satellite (IRAS) mission // *Astrophys. J.* – 1984. – Vol. 278. – L1-L6.
- Aumann H. H., Beichman C. A., Gillett F. C., de Jong T., Houck J. R., Low F. J., Neugebauer G., Walker R. G., and Wesselius P. R. Discovery of a shell around Alpha Lyrae // *Astrophys. J.* – 1984. – Vol. 278. – L23-L27.
- Debris Disk Database <<http://www.roe.ac.uk/ukac/research/topics/dust/identification.html>> .
- Natta A., Testi L., Comeryn F., Oliva E., D'Antona F., Baffa C., Comoretto G., and Gennari S. Exploring brown dwarf disks in ρ Ophiuchi // *Astron. Astrophys.* – 2002. – Vol. 393 – P. 597-609.
- Pascucci I., Apai D., Henning T., and Dullemond C. P. The first detailed look at a brown dwarf disk // *Astrophys. J.* – 2003. – Vol. 590 – L111-L114.
- Perryman M. A. C. Extra-solar planets, review article // *Preprint Rep. Prog. Phys.* – 2000, 31 May. – P. 1-60.
- Apai D., Luhman K., Liu M. C. Disks around Brown Dwarfs and Cool Stars // 14th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun. – ASP Conf. Ser., Vol. 384. – Pasadena, CA (USA). – 2006. – P. 383.
- Armitage P. J. Lecture notes on the formation and early evolution of planetary systems <<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0701485>>.
- Chiang E. I. and Goldreich P. Spectral energy distributions of T Tauri stars with passive circumstellar disks // *Astrophys. J.* – 1997. – Vol. 490. – P. 368-376.
- Писаренко А. И., Яценко А. А., Захожай В. А. Модель эволюции субзвездных объектов // *Астрон. ж.* – 2007. – Т. 84, № 8. – С. 675-684.
- Захожай В. А. Проблема существования планетных систем. II. Ожидаемые свойства и первые результаты поиска // *Вісник астрономічної школи.* – 2005. – Т. 4, № 2. – С. 55-72.
- 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.

Результати розрахунків неперервних спектрів субзірок з безщілинними дисками

О. В. Захожай

Розроблено алгоритм для розрахунків спектральних розподілів енергії субзірок з безщілинними дисками залежно від їх геометрії, віку та нахилу. Розраховано 336 розподілів енергії в спектрах систем віддалених на 10 пк, що містять субзірку з масою $(0.01 \div 0.08)M_{\odot}$ та віком $1 \div 30$ млн років, та плоский або розширюваний безщілинний диск, що спостерігається під кутами від 0° до 80° . Потоки випромінювання від таких систем > 0.001 Ян на довжинах хвиль від 1.7 мкм до 1 см, а на довжинах хвиль > 40 мкм потоки від дисків, незалежно від кута їх спостереження, є визначальними у спільному випромінюванні систем.

Continuous Spectra Calculation for Substars with Disks without Inner Holes

O. V. Zakhozhay

The calculation algorithm for spectral energy distributions of substars with disks without inner holes in terms of their geometry, age and inclination has been developed. Calculations were made for 336 spectral energy distributions of systems located at distance of 10 pc and consisting of a substar with mass $(0.01 \div 0.08)M_{\odot}$ and aged $1 \div 30$ Myr, and a flat or flaring disk without inner hole and inclined at angles of $0^{\circ} - 80^{\circ}$. The fluxes of such systems are > 0.001 Jy for wavelength interval from 1.7 μm to 1 cm. On wavelength $> 40 \mu\text{m}$, disks fluxes are determinative in the total flux independently of the inclination angle.