

УДК 524.31.08:524.63–862

### **О. В. Захожай**

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680  
e-mail: zkho@mao.kiev.ua

## **О возможности обнаружения субзвезды в типичном осколочном диске по данным распределения энергии в непрерывном спектре системы**

*Планета или субзвезда в процессе формирования вычищает полость вдоль своего орбитального движения в протопланетном диске. Изучается возможность идентификации образующейся полости в диске и спутника в ней, опираясь исключительно на данные о распределении энергии в непрерывном спектре. Представлены результаты моделирования для системы в возрасте 100 млн лет с маломассивной звездой, типичным осколочным диском и субзвёздным спутником. Ширина полости, вычищенной спутником, определяется значением диаметра сферы Хилла.*

*ПРО МОЖЛИВІСТЬ ЗНАЙТИ СУБЗОРЮ В ТИПОВОМУ ОСКОЛКОВОМУ ДИСКУ ЗА ДАНИМИ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ У НЕПЕРЕРВНОМУ СПЕКТРІ СИСТЕМИ, Захожай О. В. — Планета чи субзоря, формуючись у протозоряному диску, вичищує порожнину вздовж траєкторії свого орбітального руху. Вивчається можливість ідентифікувати таку порожнину та спутника в ній, базуючись виключно на даних розподілу енергії у спектрі. Приведені результати моделювань для систем у віці 100 млн років з маломасивною зорею, типовим осколковим диском та субзоряним спутником. Ширина порожнини, утвореної спутником, визначається як діаметр сфери Хілла.*

*ABOUT THE POSSIBILITY TO DETECT BROWN DWARFS IN TYPICAL DEBRIS DISKS FROM SPECTRAL ENERGY DISTRIBUTIONS, by Zakhzhay O. V. — When planets and brown dwarfs are formed in protoplanetary disks, they clear gaps along their orbits. We investigate the possibility to identify these gaps and hence to detect the presence of planetary or*

*substellar companions in debris disk via spectral energy distributions. We present the results for a modelled system at 100 Myrs, with a low-mass stellar object surrounded by a typical debris disk that includes embedded substellar companion. The width of the gap opened by the companion is determined as the diameter of the Hill sphere of the substellar companion.*

## ВВЕДЕНИЕ

Один из основных методов исследования протопланетных дисков у звезд (ранних стадий формирования планетарных систем) опирается на анализ их совместного распределения энергии в непрерывном спектре (РЭС). Обнаружить планету или субзвезду (далее спутник) таким методом невозможно, так как интенсивность их излучения на несколько порядков меньше излучения центральной звезды.

С другой стороны, если вокруг звезды ещё есть осколочный диск, то спутник в процессе формирования вычищает полость вдоль траектории своего движения [7, 13]. Можно предположить, что наличие такой полости в диске может спровоцировать уменьшение интенсивности на определённых длинах волн в профиле РЭС. Уже есть некоторые наблюдательные свидетельства наличия в диске полости, спровоцированной планетой, которая формируется из вещества диска [3, 8, 10, 11]. Также уже появляются модели, описывающие сценарий формирования планеты, которая выметает полость в околозвездном диске [6, 7, 12, 13].

В данной работе изучается возможность обнаружения сформировавшегося спутника в осколочном диске на основе анализа профиля РЭС. Рассматривается осколочный диск с типичными параметрами для возраста 100 млн лет и сформировавшаяся субзвезда с массой  $0.04M_{\odot}$ . Такое значение соответствует максимальной массе объекта, который может сформироваться в протопланетном диске [9].

## МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В НЕПРЕРЫВНОМ СПЕКТРЕ ДЛЯ СИСТЕМ С ОСКОЛОЧНЫМИ ДИСКАМИ

Для расчёта РЭС от системы с диском поток удобно разделить на две составляющие: центральный объект (звезда, субзвезда или планета) и диск. Поток от осколочного диска  $F_{,disk}$  рассчитывается на основе предположения о том, что диск является осесимметричным, и динамика пылевых частиц в оптически тонком диске определяется столкновительными процессами, а соотношение газа к пыли составляет менее 0.1 [8]:

$$F_{,disk} = \frac{a^2 Q}{d^2} \int_{R_{in}}^{R_{out}} B(T_r) n_r 2\pi r dr,$$

где  $r$  — радиальное расстояние в диске,  $a$  — характеристический радиус пылевых частиц,  $d$  — расстояние от системы до Солнца,  $B(T_r)$  — функция Планка,  $R_{in}$  и  $R_{out}$  — внутренний и внешний радиусы диска. Плотность распределения частиц  $n_r = \rho_r/m_g$ , где  $m_g$  — масса пылевой частицы и поверхностная плотность, которая изменяется с расстоянием по закону  $\rho_r \propto r^{-1.5}$  согласно [2]. Эффективность излучения зависит от длины волны как  $Q = 1 - \exp[-(2\pi a/\lambda)]$ . Как и в работе [4], предполагается, что индекс  $n = 1$ , что соответствует модели Дрейна [5] для аморфных сферических силикатных частиц. Нулевое значение частоты  $\lambda_0 = c/(2\pi a)$ , где  $c$  — скорость света.

Распределение температуры в диске изменяется с расстоянием по закону [8]:

$$T_r = \frac{L_*}{r^2} \frac{1}{240} \frac{1}{(3)!} \frac{1}{(4)Q_0} \frac{k}{hc} \lambda_0^{-1/4},$$

где  $L_*$  — светимость звезды,  $z$  — функция Римана,  $Q_0$  — эффективность эмиссии пылевой частицы на длине волны  $\lambda_0 = 2\pi a$ .

### ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ С ДИСКОМ, В КОТОРОМ СФОРМИРОВАЛАСЬ СУБЗВЕЗДА

Когда формирующийся спутник движется по стабильной орбите, вдоль траектории своего движения он выметает полость. Это является следствием того, что газ, пылевые частицы и осколки, находящиеся в пределах сферы Хилла (с учётом пертурбаций, возникающих под воздействием центрального объекта), начинают аккрецировать на центр масс этой области, т. е. на спутник. Радиус сферы Хилла определяется выражением

$$R_H = r_p \left( \frac{1}{3} \frac{M_p}{M_*} \right)^{1/3},$$

где  $r_p$  — удалённость спутника от центрального объекта,  $M_*$  — масса центрального объекта,  $M_p$  — масса спутника. Для расчёта ширины полости будем предполагать, что её внутренняя и внешняя границы равны соответственно  $R_{p\_in} = r_p - R_H$  и  $R_{p\_out} = r_p + R_H$ .

Если спутник выметает полость в диске, но находится достаточно близко к центральной звезде, то температура спутника на дневной стороне увеличивается за счёт подогрева от центральной звезды. Это дает основание записать, что на дневной стороне температура спутника приближенно равна

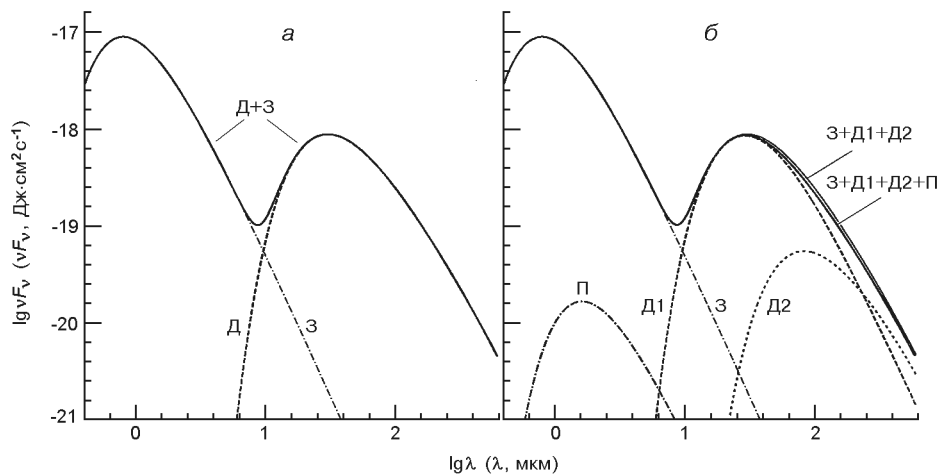
$$T_{pl,ef,d}^4 = T_{pl}^4 \frac{L_*}{4 r_p^2},$$

где  $T_{pl}$  — температура спутника без учёта подогрева от центрального объекта,  $L_*/(4 r_p^2)$  — поток излучения, который получает спутник от центральной звезды. На ночной стороне дополнительный нагрев планеты от диска пренебрежимо мал, вследствие чего предполагается, что его температура равна  $T_{pl}$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчеты проводились для системы с центральной звездой с массой  $M_* = 0.8M_\odot$  и субзвёздным спутником с массой  $M_p = 0.04M_\odot$ , возраст которой 100 млн лет. Их температуры и радиусы брались из работы [1]. Потоки от центрального объекта и спутника рассчитывались в чернотельном приближении. Для моделирования потока излучения от диска использовались типичные параметры для осколочных дисков в этом возрасте:  $R_{in} = 0.1$  а. е.,  $R_{out} = 150$  а. е., характеристический размер частиц  $a = 1$  мм и масса диска  $M_d = 10^{-5} M_*$ . Масса субзвезды выбиралась на основе предполагаемого максимального значения массы объекта, который может сформироваться в протозвёздном диске [8]. Расчёты были выполнены для разных расстояний спутника от звезды в пределах размера диска. Результаты показали, что наибольшая разница между профилями РЭС от дисков без и со спутником, соответствует системе со спутником, расположенным максимально близко к внутреннему радиусу диска — 1 а. е. (соответственно  $R_{p\_in} = 0.75$  а. е.,  $R_{p\_out} = 1.25$  а. е.).

На рисунке представлены результаты моделирования потока  $F$  для системы, расположенной на расстоянии  $d = 250$  пк от Солнца, с осколочным диском (а), а также с осколочным диском, в котором сформировалась субзвезда (б). Литерой З на обоих фрагментах обо-



Распределение энергии в непрерывном спектре системы с осколочным диском: а — без сформировавшегося спутника (З — звезда, Д — диск); б — с субзвёздным спутником ( $M_p = 0.04M_\odot$ ) на расстоянии 1 а. е. (П — планета, Д1 и Д2 — внутренняя и внешняя части осколочного диска)

значен поток от звезды массой  $M_* = 0.8M_\odot$ , Д — поток от диска, Д+З — поток от звезды с диском, П — поток от спутника, Д1 и Д2 — потоки от внутренней и внешней частей диска, З+Д1+Д2+П — суммарный поток от всех составляющих системы, З+Д1+Д2 — поток от аналогичной системы без сформировавшейся субзвезды. Физические и геометрические характеристики диска указаны в тексте. В обоих случаях диск расположен в картинной плоскости, т. е. перпендикулярно к лучу зрения.

Из визуального анализа рисунка (б) видно, что крайне сложно заподозрить наличие субзвезды в системе, опираясь исключительно на профиль РЭС. Расчёты показывают, что максимальная разность потоков (от системы с диском и с диском, в котором сформировался спутник и вычистил полость) на длине волны  $75 \text{ мкм}$  составляет  $410 \text{ Дж см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , что соответствует 10 мЯн. Из всех действующих телескопов только у космического телескопа HERSCHEL чувствительность приемника PACS (фотокамера со спектрометром низкого разрешения) в этом диапазоне длин волн близка к полученной величине.

## ВЫВОДЫ

В данной статье изучается возможность заподозрить наличие сформировавшейся субзвезды в осколочном диске в возрасте 100 млн лет. Разработан алгоритм моделирования РЭС дисков с полостями с использованием стандартной модели для осколочных дисков в этом возрасте. Представлены результаты для системы с маломассивной звездой ( $M_* = 0.8M_\odot$ ) и субзвездным спутником ( $M_p = 0.04M_\odot$ ), который находится внутри осколочного диска. Результаты моделирования показывают, что практически невозможно обнаружить субзвезду в осколочном диске с типичными параметрами (распределение температуры и плотности, размер частиц, геометрические размеры диска), используя только профиль РЭС.

В дальнейшем планируется развить этот метод и исследовать физически обоснованные вероятные отклонения параметров диска от стандартных с целью поиска конфигураций, для которых наличие сформировавшейся субзвезды (а возможно, и планеты-гиганта) могло бы иметь более яркие индикаторы в результирующем РЭС системы.

Автор статьи выражает благодарность руководителю целевой программы научных исследований «Фундаментальні властивості матерії у широкому інтервалі масштабів простору і часу» отделения физики и астрономии НАН Украины, в рамках которой проводилась данная работа.

1. Baraffe I., Chabrier G., Allard F., Hauschildt P. H. Evolutionary models for solar metallicity low-mass stars: mass-magnitude relationships and color-magnitude diagrams // *Astron. and Astrophys.*—1998.—337.—P. 403—412.

2. *Carpenter J., Bouwman J., Mamajek E. E., et al.* Formation and evolution of planetary Systems: Properties of debris dust around solar-type stars // *Astrophys. J. Supl. Ser.*—2009.—**181**.—P. 197—226.
3. *Donaldson J. K., Lebreton J., Roberge A., et al.* Modeling the HD32297 debris disk with far-IR HERSCHEL data // *Astrophys. J.*—2013.—**772**.—P. 17—26.
4. *Donaldson J. K., Roberge A., Chen C. H., et al.* HERSCHEL PACS observations and modeling of debris disks in the Tucana-Horologium association // *Astrophys. J.*—2012.—**753**.—P. 147—158.
5. *Draine B. T.* On the submillimeter opacity of protoplanetary disks // *Astrophys. J.*—2006.—**636**.—P. 1114—1120.
6. *Ertel S., Wolf S., Rodmann J.* Observing planet-disk interaction in debris disks // *Astron. and Astrophys.*—2012.—**544**.—P. A61—A76.
7. *Johansen A., Blum J., Tanaka H., et al.* The multifaceted planetesimal formation process // *Protostars and planets VI* / Eds H. Beuther, R. Klessen, C. Dullemond, Th. Henning. — University of Arizona Press, 2014.—P. 547—570.
8. *Hughes A. M., Wilner D. J., Andrews S. M., et al.* Resolved submillimeter observations of the Hr 8799 and HD 107146 debris disks // *Astrophys. J.*—2011.—**740**.—P. 38—46.
9. *Ma B., Ge J.* Statistical properties of brown dwarf companions: implications for different formation mechanisms // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2014.—**439**.—P. 2781—2789.
10. *Matthews B. C., Kennedy G., Sibthorpe B., et al.* Resolved imaging of the HR 8799 debris disk with HERSCHEL // *Astrophys. J.*—2014.—**780**.—P. 97—108.
11. *Moor A., Abraham P., Kospal A., et al.* A resolved debris disk around the candidate planet-hosting star HD 95086 // *Astrophys. Lett.*—2013.—**775**.—P. L51—L56.
12. *Rodigas T. J., Malhotra R., Hinz P. M.* Predictions for shepherding planets in scattered light images of debris disks // *Astrophys. J.*—2014.—**780**.—P. 65—74.
13. *Thebault P.* A new code to study structures in collisionally active, perturbed debris discs: application to binaries // *Astron. and Astrophys.*—2012.—**537**.—P. A65—A74.

Статья поступила в редакцию 06.10.14