

УДК 524.31.08:524.63-862

О. В. Захожай^{1,2}

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03143

²Национальная нанотехнологическая лаборатория, Казахский национальный
государственный университет имени аль-Фараби,
050012, г. Алматы, ул. Толе би 96А
zkho@mao.kiev.ua

О признаках формирования спутников у звезд Sz54 и Sz59 — молодых систем с протопланетными дисками

Изучается распределение энергии в спектрах двух молодых систем Sz54 и Sz59 в области звездообразования Хамелеон II. Результаты моделирования указывают на то, что в протопланетных дисках этих систем сформировались полости в пылевом компоненте. Эти полости могли образоваться в результате формирования планетных или субзвездных спутников, которые аккумулировали вещество дисков и, таким образом, вычистили полости вдоль траектории своего орбитального движения. В работе определены физические параметры дисков. На основе данных о геометрических размерах полостей анализируются физические характеристики спутников, которые могли бы их вычистить.

ПРО ОЗНАКИ ФОРМУВАННЯ СУПУТНИКІВ У ЗІР Sz54 ТА Sz59 — МОЛОДИХ СИСТЕМ З ПРОТОПЛАНЕТНИМИ ДИСКАМИ, Захожай О. В. — Досліджується розподіл енергії у спектрах систем Sz54 та Sz59 в області зореутворення Хамелеон II. Результати моделювань вказують на те, що у протопланетних дисках цих систем утворилися порожнини у пиловому компоненті. Ці порожнини могли утворитися в результаті формування планетних чи субзоряних супутників, що акумулювали речовину дисків і, таким чином, вичистили порожнини вздовж траєкторії свого руху. У роботі отримано фізичні характеристики дисків. На основі даних про геометричні розміри порожнин аналізуються фізичні характеристики супутників, що могли б їх спричинити.

ON SIGNATURES OF COMPANION FORMATION IN STARS SZ54 AND SZ59 — YOUNG SYSTEMS WITH PROTOPLANETARY DISKS, by Zakhochay O. V. — We study spectral energy distributions of two young systems Sz54 and Sz59, that belong to Chameleon II star forming region. The results of the modeling indicate that protoplanetary disks of these systems contain gaps in the dust component. These gaps could be a result of a planetary or brown dwarf companion formation, because the companion would accumulate a disk material, moving along its orbit. In a present work we have determined physical characteristics of the disks. We also discuss possible companion characteristics, based on the geometrical parameters of the gaps.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство планет и коричневых карликов с массами меньше 0.04 массы Солнца формируются в протопланетных дисках, окружающих молодые звезды [7]. В процессе своего формирования планета «выметает» вещество вдоль своей орбиты, в результате чего образуются полости в пылевом компоненте диска [4, 5, 8, 11]. Наблюдения с помощью интерферометра ALMA (Atacama Large Millimeter/ submillimeter Array) протопланетных дисков HL Tau [1] и TW Hya [2] обнаружили такие структуры в дисках. В настоящей работе продолжается начатое в работе [12] исследование возможности идентифицировать полость, вычищенную спутником в протопланетном диске, на основе анализа распределения энергии в спектре (РЭС) излучающей системы. Ранее было показано, что формирование спутника на расстоянии до 10 а. е. и вычищение им полости, ширина которой определяется диаметром сферы Хилла, инициирует дополнительный минимум на интервале длин волн от 10 до 100 мкм [12]. Положение (длина волны) и глубина этого минимума определяются прежде всего массой спутника и его удаленностью от центральной звезды.

В работе анализируются наблюдательные РЭС от Sz54 и Sz59 — двух молодых звезд спектральных классов K5 и K7 соответственно. Они принадлежат области звездообразования Хамелеон II, которая находится на расстоянии 178 ± 18 пк [10]. Объекты Sz54 и Sz59 были выбраны из работы [10] по следующим критериям: 1) масса центральной звезды должна быть близкой к $0.8M_{Sun}$ — массе объекта, для которого анализировались РЭС в работе [12], 2) профиль РЭС от диска должен иметь форму, характерную для наличия полости, анализируемой в работе [12], 3) модельный поток, имеющий лучшее соответствие с наблюдательными данными (согласно результатам [10]), не имеет идеального визуального совпадения с ними, т. е. предыдущие модели недостаточно хорошо описывали наблюдательные данные.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЭС ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКОВ

При расчете РЭС от систем предполагалось, что каждый поток является суммой потоков от звезды и от диска. Поток от звезды рассчитывался в чернотельном приближении с использованием оценок температур и радиусов, полученных ранее в работе [10]. Поток от диска представлялся разницей общего потока от диска и потенциального потока от области с размерами полости, которую вычистил спутник. Таким образом, предполагалось, что внутри полости значительно меньше пыли, и потоком излучения от этой области можно пренебречь. Общий поток излучения диска определялся выражением

$$F_{disc} = \int_{R_{in}}^{R_{out}} d^2 B(T_r) (1 - e^{-\tau_r}) 2\pi r dr,$$

где r — радиальное расстояние в диске, d — расстояние от системы до Солнца, $B(T_r)$ — функция Планка, R_{in} и R_{out} — внутренний и внешний радиусы диска, τ_r — оптическая глубина диска, ρ_r — поверхностная плотность, которая зависит от расстояния от звезды, κ_r — коэффициент поглощения, зависящий от частоты [15]. Соотношение массы газа к массе пыли равно 100. Поверхностная плотность и температура диска изменяются с расстоянием по законам $\rho_r \propto r^{-p}$ и $T_r \propto r^{-q}$ соответственно.

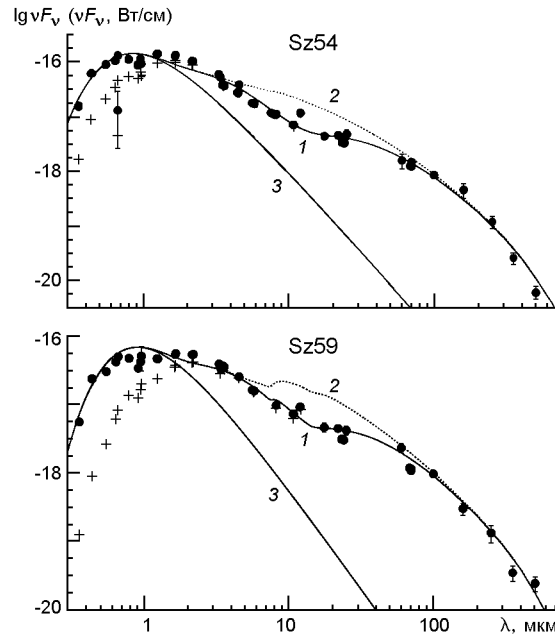
Моделирование РЭС от центральных звезд выполнялись с использованием оценок, полученных в работе [10] (табл. 1). При расчетах потоков F от дисков предполагалось, что внутренний радиус R_{in} диска равен расстоянию R_{sub} от поверхности звезды, на котором при условии температурного баланса частицы пыли будут сублимировать; масса диска составляет 1 % от массы центральной звезды. Показатель степени радиального изменения поверхностной плотности p варьировался от 0 до 1.5 с шагом 0.1. Показатель степени q радиального изменения эффективной температуры варьировался от 0.35 до 0.80 с шагом 0.05. Значения для внешнего радиуса R_{out} и угла наклона i варьировались незначительно: от 100 а. е. до 400 а. е. с шагом 100 а.е. для R_{out} и от 0° до 40° с шагом 10° для i . Значения внутреннего и внешнего радиусов полости R_{g_in} и R_{g_out} варьировались от значения внутреннего радиуса диска до 10 а. е. (исключая случаи $R_{g_in} > R_{g_out}$) с шагом 0.01 для R_{g_in} и 0.1 для R_{g_out} . Потоки от дисков с ненулевым углом наклона рассчитывались с учетом геометрических особенностей систем, как в [13, 14].

Таблица 1. Физические параметры исследуемых звезд [10]

Звезда	Sp	A_V	M_{st}/M_{Sun}	R_{st}/R_{Sun}	T , К	L_{st}/L_{Sun}	R_{sub} , а. е.
Sz54	K5	3.18^m	0.97	2.42	4350	1.87	0.047
Sz59	K7	2.67^m	0.82	1.96	4060	0.93	0.034

Таблица 2. Физические и геометрические параметры дисков, полученные в данной работе

Имя	R_{out} , а. е.	R_{g_in} , а. е.	R_{g_out} , а. е.	p	q	i , град	L_d/L_{Sun}
Sz54	300 ¹⁰⁰ ₁₀₀	0.09 ^{0.01} _{0.01}	0.6 ^{0.5} _{0.3}	0.2 ^{0.5} _{0.2}	0.75 ^{0.05} _{0.05}	30 ¹⁰ ₃₀	0.495
Sz59	400 ¹⁰⁰ ₃₀₀	0.11 ^{0.02} _{0.02}	0.8 ^{0.2} _{0.6}	0.2 ^{0.7} _{0.1}	0.65 ^{0.1} _{0.1}	0 ⁴⁰	0.391



Модельные значения потоков F для Sz54 и Sz59. Линия 1 — суммарные РЭС систем «звезда + диск с полостью», которые имеют минимальные значения χ^2 , 2 — РЭС от аналогичных систем, но с диском без полости, 3 — потоки от звезд без дисков. Крестики — наблюдательные данные, точки — потоки с учетом межзвездного поглощения

Радиус сублимации R_{sub} рассчитывался на основе оценок L_{st} для каждой звезды в предположении, что температура сублимации $T_{sub} = 1500$ К.

Модель, имеющая наилучшее соответствие с наблюдениями, выбиралась из условия минимума статистики χ^2 . В результате были получены физические и геометрические значения дисков, указанные в табл. 2. Все параметры указаны вместе с погрешностью моделирования, которая определялась с помощью модифицированного χ^2 -критерия, как в работе [6]. Суммарная светимость L_d диска была рассчитана методом [15] для системы с результатами, которые лучшим образом описывают наблюдательные данные.

На рисунке представлены модельные значения потоков для Sz54 и Sz59. Крестиками показаны наблюдательные данные (из международной базы данных VizieR: <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>), точками — потоки с учетом межзвездного поглощения. Суммарные РЭС

систем (звезда + диск с полостью), которые имеют минимальные значения q^2 , показаны линией 1, РЭС от аналогичных систем с диском без полости — линией 2, а потоки от звезд без дисков — линией 3.

Опираясь на ширину полости, которую предположительно вычистил спутник, его удаленность и массу центральной звезды, мы получили оценки возможных масс спутников обеих систем. Неоднозначность полученных значений для масс спутника определяется тем, что невозможно обоснованно предположить, как долго он находился на своей орбите. После того как спутник начинает двигаться по одной и той же орбите, он достаточно быстро вычищает полость, ширина которой изначально равна диаметру сферы Хилла. Затем с увеличением количества его орбитальных оборотов ширина полости увеличивается, что зависит от размера частиц диска, соотношения массы газа к массе пыли, истинного эксцентриситета орбиты и других факторов. Значения показателя степени радиального распределения температуры дисков, $q = 0.75$ и 0.65 для Sz54 и Sz59 соответственно, указывают на то, что уже началось оседание более крупных частиц к средней плоскости дисков (то есть диск уплощается и уменьшается эффективность его нагрева излучением звезды), а значит, диски уже немолодые. Это также согласуется с оценкой возраста системы порядка 4 млн лет [10] и говорит о том, что сформировавшийся спутник также должен двигаться по своей орбите достаточно давно. А значит, полости, вычищенные спутниками, могут соответствовать 5—10 радиусам Хилла [3, 9]. В таком случае масса спутника системы Sz54 может быть в интервале от 19 до $1.2M_J$ (M_J — масса Юпитера), а системы Sz59 — от 17 до $1.1M_J$. С большей точностью определить массы спутников невозможно, так как невозможно предположить истинное значение эксцентриситета спутника, а также определить, как долго спутник движется вдоль своей орбиты.

ВЫВОДЫ

В работе интерпретируются фотометрические данные для объектов Sz54 и Sz59, находящихся в области звездообразования Хамелеон II. Расчеты выполнялись в рамках предположения, что в протопланетных дисках мог сформироваться спутник и вычистить полость. Были получены геометрические размеры полостей и физические характеристики дисков. Анализируются вероятные массы спутников: $19^{+181}_{-18} M_J$ и $17^{+1083}_{-16} M_J$ для Sz54 и Sz59 соответственно. Существенный разброс возможных отклонений связан с невозможностью однозначно определить возраст спутника и параметры орбиты его движения. Полученные результаты обосновывают необходимость дальнейшего более детального анализа характеристик диска, полости и, возможно, спутника, для чего необходимы дальнейшие наблюдения с максимально высоким угловым разрешением.

Автор благодарен П. Пинилли и Н. ван дер Марел за обсуждение и важные комментарии, Я. Боллер за предоставленные таблицы для коэффициента поглощения, а также рецензенту за ценные замечания.

1. *ALMA Partnership, Brogan C. L., Perez L. M., Hunter T. R., Dent W. R. F., et al.* The 2014 ALMA long baseline campaign: first results from high angular resolution observations toward the HL Tau region // *Astrophys. J. Lett.*—2015.—**808**, N 1.—P. L3—L12.
2. *Andrews S. M., Wilner D. J., Zhu Zh., Birnstiel T., Carpenter J. M., et al.* Ringed substructure and a gap at 1 AU in the nearest protoplanetary disk // *Astrophys. J. Lett.*—**820**, N 2.—P. L40—L44.
3. *Dodson-Robinson S. E., Salyk C.* Transitional disks as signposts of young, multiplanet systems // *Astrophys. J.*—2011.—**738**.—P. 131—145.
4. *Fouchet L., Gonzalez J.-F., Maddison S. T.* Planet gaps in the dust layer of 3D protoplanetary disks. I. Hydrodynamical simulations of T Tauri disks // *Astron. and Astrophys.*—2010.—**518**.—P. A16.—11 p.
5. *Gonzalez J.-F., Pinte C., Maddison S. T., Menard F., Fouchet L.* Planet gaps in the dust layer of 3D protoplanetary disks. II. Observability with ALMA // *Astron. and Astrophys.*—2012.—**547**.—P. A58.—15 p.
6. *Kürster M., Trifonov T., Reffert S., Kostogryz N. M., Rodler F.* Disentangling 2:1 resonant radial velocity orbits from eccentric ones and a case study for HD 27894 // *Astron. and Astrophys.*—2015.—**577**.—P. A103—11 p.
7. *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.
8. *Meru F., Quanz S. P., Reggiani M., Baruteau C., Pineda J. E.* Long-lasting dust rings in gas-rich disks: sculpting by single and multiple planets // *arXiv:1411.5366*.
9. *Pinilla P., Benisty M., Birnstiel T.* Ring shaped dust accumulation in transition disks // *Astron. and Astrophys.*—2012.—**545**.—P. A81—12 p.
10. *Spezzi L., Cox N. L. J., Prusti T., et al.* The Herschel Gould belt survey in Chamaeleon II. Properties of cold dust in disks around young stellar objects // *Astron. and Astrophys.*—2013.—**555**.—A71.—17 p.
11. *Varniere P., Bjorkman J. E., Frank A., et al.* Observational properties of protoplanetary disk gaps // *Astrophys. J.*—2006.—**637**.—P. L125—L128.
12. *Zakhozhay O. V.* The influences of forming companions on the spectral energy distributions of stars with circumstellar discs // *Publs Astron. Soc. Austral.*—2017.—**34**.—id. e 015.
13. *Zakhozhay O. V., del Burgo C., Zakhozhay V. A.* Geometry of highly inclined protoplanetary disks // *Adv. Astron. and Space Phys.*—2015.—**5**.—P. 33—38.
14. *Zakhozhay V. A., Zakhozhay O. V., Vidmachenko A. P.* Peculiarities of simulation of thin flat discs with central objects in accordance with their spatial location // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2011.—**27**, N 3.—P. 140—153.
15. *Zakhozhay O., Zapatero Osorio M. R., Bejar V., Boehler Y.* Spectral energy distribution simulations of a possible ring structure around the young, red brown dwarf G196-3B // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2017.—**464**.—P. 1108—1118.

Статья поступила в редакцию 19.05.16