

## NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

## PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 309 (2016), 73 – 80

UDC 524.5

**L.I. Shestakova, B.I. Demchenko**

Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan

[shest1952@mail.ru](mailto:shest1952@mail.ru)**ORBITAL EVOLUTION OF SILICATE DUST PARTICLES DURING  
SUBLIMATION NEAR A-TYPE STARS**

**Abstract.** The results of orbital evolution modeling of the dust particles in the process of evaporation in the disk of A-type star  $\beta$ -Pictoris, are presented. Temperature calculations for dust particles, based on the solution of the heat balance equation "absorption=emission" were made for a set of radii from 0.01 to 100 microns, and for different distances from the star. The optical properties were calculated by the Mie theory for homogeneous spherical particles according to the refractive indexes of basalt material. We were considered the effect of radiation pressure as well as Poynting-Robertson drag on the dust dynamics.

It was found that particles with radii of less than 2 microns, coming off from the larger parent bodies moving in circular orbits outside sublimation zone, just fly away from the star under the action of light pressure. Particles larger sizes at first are moving in a spiral inward toward the star under the action of the Poynting-Rобертсон drag, and on reaching the sublimation zone, they evaporate till a radius of 1-2 microns and are moving on highly elliptical orbits, from which they will eventually fly away from the star. Complete evaporation is possible only for particles coming off from the parent bodies inside the zone sublimation.

It was found that the active region of sublimation of small particles with size  $<0.1$  microns starts at a distance of 50 - 60 solar radii. Larger particles in the range of radii 0.1-1.0 microns evaporate inside the region of sublimation if they come off from the parent bodies at a distance of 20 to 50 radius of the star. The border of sublimation zone for particles with radii more than 2 microns stabilize at approximately 20 tar radii.

**Keywords:**  $\beta$ -Pictoris, debris disk, circumstellar disk, dust grains, orbital evolution, dust sublimation

УДК 524.5

**Л.И. Шестакова, Б.И. Демченко**

Астрофизический институт им. В.Г.Фесенкова, Алматы, Казахстан

**ОРБИТАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СИЛИКАТНЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ  
В ПРОЦЕССЕ СУБЛИМАЦИИ ОКОЛО ЗВЕЗД КЛАССА А**

**Аннотация.** Представлены результаты моделирования орбитальной эволюции пылевых частиц в процессе испарения в диске звезды класса А  $\beta$ -Pictoris. Расчеты температуры пылевых частиц, основанные на решении уравнения теплового баланса «поглощение-излучение» выполнены для набора радиусов от 0.01 до 100 мкм и различных расстояний до звезды. Оптические свойства рассчитаны по теории Ми для однородных сферических частиц в соответствии с индексами рефракции земного материала - базальта. Учитывалось влияние давления радиации, а также эффектов торможения Пойнтинга-Робертсона на динамику пыли.

Получено, что частицы с радиусами меньше 2 мкм, срываются с более крупных родительских тел, движущихся по круговым орбитам, за пределами зоны сублимации, сразу улетают прочь от звезды под действием светового давления. Частицы большего размера сначала движутся по спирали внутрь по направлению к звезде под действием эффекта Пойнтинга-Робертсона, а по достижении зоны сублимации

они испаряются до радиуса 1-2 мкм и выходят на сильно вытянутые эллиптические орбиты, с которых, в конечном счете, улетают прочь от звезды. Полное испарение возможно только для частиц, отрывающихся от родительских тел внутри зоны сублимации.

Было установлено, что активная область сублимации мелких частиц с размером  $< 0,1$  мкм начинается на расстоянии 50 - 60 солнечных радиусов. Более крупные частицы в интервале радиусов 0.1-1.0 мкм испаряются внутри области сублимации, если они отрываются от родительских тел на расстоянии от 20 до 50 радиусов звезды. Граница зоны сублимации частиц радиусами более 2 мкм стабилизируется на расстоянии около 20 радиусов звезды.

**Ключевые слова:**  $\beta$ -Pictoris, осколочный диск, околозвездный диск, пылевые частицы, орбитальная эволюция, сублимация пыли

**Введение.** Осколочные диски около ближайших звезд главной последовательности: Веги, Фомальгаута и  $\beta$  Pictoris обнаружены в результате первых наблюдений в инфракрасном диапазоне с помощью миссии IRAS [1,2]. Избытки инфракрасного излучения были обнаружены на длинах волн 12, 25 и 100 мкм, что свидетельствуют о наличии пылевых дисков, окружающих эти звезды.

Осколочные диски в результате коллизионного взаимодействия постоянно воспроизводят пыль, которая затем эволюционирует в составе диска в зависимости от размеров частиц с различным финалом: либо пылевые частицы испаряются в области сублимации, либо покидают систему родительской звезды и пополняют межзвездную среду.

Оказалось, что среди звезд с пылевыми дисками около 50% - молодые звезды класса А, которые могли сохранить первоначальный диск, благодаря короткому времени жизни (в среднем около 850 миллионов лет) в сравнении со звездами более поздних классов [3]. Кроме того А-звезды обычно ярче звезд других классов, диски около которых недоступны для наблюдений.

Расчеты орбитальной эволюции пылевых частиц для звезд класса А проведены с параметрами, типичными для звезды класса AV5 -  $\beta$  Pictoris (HR 2020). Для расчетов выбран силикатный материал – базальт, как наиболее соответствующий наблюдениям границы области сублимации для околозвездной пыли [4,5].

Звезда  $\beta$  Pictoris является прототипом звезд класса А с переменной околозвездной компонентой. Протопланетный диск около  $\beta$  Pictoris имеет сходные черты с Солнечной системой [6]: химический состав пыли около  $\beta$  Pictoris подобен материалам частиц в Солнечной системе и испарившийся и ионизованный газ планетезималей, наблюдаемый вблизи звезды, имеет обычное солнечное химическое обилие.

Различия в процессах, происходящих в пылевых дисках около Солнца и звезды класса А ( $\beta$  Pictoris) определяются различиями в возрасте и классе звезды. Среди существенных различий можно отметить роль радиационного давления, действующего на пыль, которая проявляется у  $\beta$  Pictoris сильнее, чем в нашей Солнечной системе. Появляется возможность лавинообразного потока коллизионных осколков субмикронных размеров и их фрагментов наружу сквозь диск, что подтверждается и нашими расчетами орбитальной эволюции пылевых частиц.

**Исходные данные.** Используются следующие параметры звезды:  $T_s=8052\text{K}$  – эффективная температура фотосферы звезды;  $r_s=1.8r_\odot$  - радиус звезды в единицах радиуса Солнца;  $M_s = 1.75M_\odot$  - масса звезды в единицах солнечной массы.

Параметры материала - базальта описываются таблицей комплексных индексов рефракции  $m(\lambda)=n(\lambda)+ik(\lambda)$ , согласно [7,8] с добавлением экстраполированных величин со стороны ультрафиолета. Расчеты проведены для интервала длин волн  $\lambda$  от  $\lambda_1= 0.0075$  мкм до  $\lambda_2 = 50$  мкм. Для пылевых частиц базальта принято среднее значение плотности  $\delta=2.5$  г/см<sup>3</sup> и молекулярный вес материала  $M_g=67.0$ . Распределение энергии в спектре звезды описывается функцией Планка с  $T_s=8052\text{K}$ .

Расчеты орбитальной эволюции частиц и всех сопутствующих параметров проведены для интервала радиусов частиц (s) от 0.01мкм до 100мкм.

**Расчеты теплового баланса и светового давления.** Основное уравнение теплового баланса согласно [8] выглядит следующим образом:

$$E_{abs} = \pi s^2 (\Omega / \pi) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{abs}(\lambda, s, m) B(\lambda, T_s) d\lambda = E_{rad} = 4\pi s^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{abs}(\lambda, s, m) B(\lambda, T_g) d\lambda, \quad (1)$$

где  $s$  — радиус пылевой частицы;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — пределы интегрирования;  $r$  — расстояние от звезды;  $\Omega = 2\pi(1 - \sqrt{1 - r_s^2 / r^2})$  — телесный угол диска звезды, видимый с расстояния  $r$ , где  $r_s$  — радиус звезды. Если  $r > 10r_s$ , то выражение для  $\Omega$  можно упростить:  $\Omega = \pi(r_s^2 / r^2)$ .  $Q_{abs}(\lambda, s, m)$  — фактор эффективности поглощения, рассчитывается по теории Ми [9,10],  $m(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$  — комплексный индекс рефракции материала частиц.  $B(\lambda, T_s)$  — функция излучения Планка для звезды с эффективной температурой  $T_s$ .  $B(\lambda, T_g)$  — функция Планка для пылевой частицы, нагретой до температуры  $T_g$ .

Фактор  $Q_{abs}(\lambda, s, m)$  входит как в левую, так и в правую части равенства (1). Это означает, что эффективность поглощения падающего излучения на длине волны  $\lambda$  такая же, что и эффективность излучения на этой же длине волны. Температура пылевой частицы  $T_g$  находится из условия (1), которое можно рассматривать как нелинейное уравнение относительно  $T_g$ . Результаты решения этого уравнения представлены на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что температура реальных частиц сильно отличается от температуры абсолютно черного тела и заметно зависит как от размера частиц, так и от расстояния до звезды. Температуры частиц разных размеров заметно отличаются, даже если они находятся на одинаковом расстоянии от звезды. Максимальную температуру имеют частицы с радиусами около 0.03-0.1 мкм. Физическая природа этого явления заключается в общности свойств рассеяния, а именно, дифракцией света на малых частицах, которая сильно зависит от отношения размера частиц к длине волны. Эффективность процесса тяготеет к длинам волн, близких к максимуму излучения звезды. Из рисунка 1 видно также, что для частиц малых размеров ( $s < 1$  мкм) реальные температуры выше температуры черного тела и только для крупных частиц они практически совпадают.

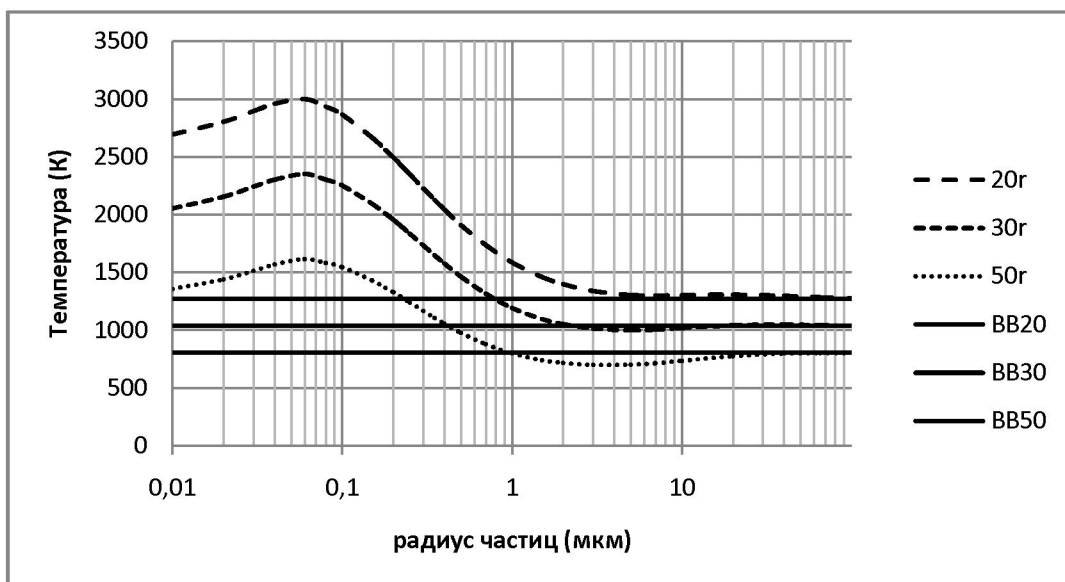


Рисунок 1 – Температура пыли на расстояниях  $20r_s$ ,  $30r_s$  и  $50r_s$  от звезды в зависимости от радиуса частиц  $s$ . Горизонтальные линии соответствуют температурам черного тела на тех же расстояниях

Можно сделать вывод, что на расстояниях, меньших  $20$  радиусов звезды, температура нагрева частиц превышает температуру плавления силикатов, которая близка к  $1300\text{K}$ , поэтому на расстояниях  $r < 20r_s$  пыль в виде облака твердых частиц существовать не может. Сила радиационного давления  $F_{pre}$  вычисляется, согласно [11], по формуле:

$$F_{pre} = \frac{\pi s^2}{c} \frac{r_s^2}{r^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{pre}(\lambda, s, m) B(\lambda, T_s) d\lambda, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света,  $Q_{pre}(\lambda, s, m)$  – фактор эффективности светового давления, рассчитанный по теории Ми,  $B(\lambda, T_s)$  – функция Планка для звезды с эффективной температурой  $T_s$ .

Важными параметрами для оценки поведения пылевых частиц в окрестности звезды являются: среднее значение эффективного фактора светового давления  $Q_{pr}(s, m)$  и отношение силы светового давления к силе гравитации  $\beta(s, m)$ .

В качестве спектральной плотности излучения звезды берется функция Планка при температуре  $T_s = 8052\text{K}$ . Расчетные формулы имеют вид:

$$Q_{pr}(s, m) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_{pre}(\lambda, s, m) \cdot B(\lambda, T) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda, T) \cdot d\lambda}, \quad \beta(s, m) = \frac{F_{pre}(s, m)}{F_{grav}} = \frac{3 \cdot Q_{pr}(s, m) \cdot L}{16\pi \cdot c \cdot \mu \cdot \delta \cdot s}, \quad (3)$$

где  $Q_{pre}(\lambda, s, m)$  – эффективный спектральный фактор давления, рассчитанный по теории Ми,  $L = 8.7L_{\odot}$  – полная светимость звезды  $\beta$ -Pictoris,  $\mu = 2.322 \cdot 10^{20} \text{ м}^3/\text{с}^2$  – гравитационный параметр звезды (т.е. произведение гравитационной постоянной на массу),  $\delta = 2.5\text{г}/\text{см}^3$  – плотность базальта.

Результаты расчетов отношения силы давления к силе притяжения  $\beta(s, m)$  для частиц базальта представлены на рисунке 2.

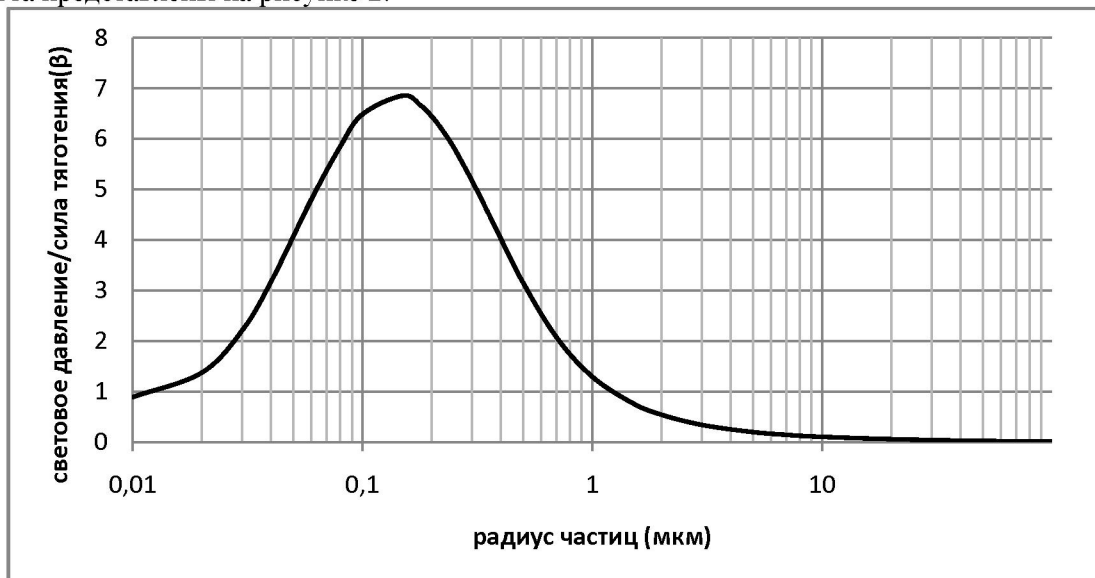


Рисунок 2 – Зависимость отношения силы светового давления к силе притяжения ( $\beta = F_{pre}/F_{grav}$ ) от радиуса частицы

Максимальное значение  $\beta$ , согласно рисунку 2, достигается вблизи радиусов частиц 0.1-0.2 мкм.

Из результатов вычислений отношения силы светового давления к силе тяжести, представленных на рисунке 2, можно сделать вывод, что частицы с радиусами от 0.01 мкм до 1 мкм покидают систему звезды  $\beta$  Pictoris, если они отрываются от родительского тела за пределами зоны сублимации. Действительно, чем больше значение  $\beta$ , тем меньше у частицы шансов остаться в околозвездном пространстве. Если  $\beta > 1$ , то такие частицы безусловно покидают пределы системы, так как на любых расстояниях сила радиационного отталкивания превышает силу гравитационного притяжения. Но и частицы со значениями  $\beta$  от 0.5 до 1.0 также с большой вероятностью способны улететь в бесконечность в процессе испарения при выходе их на высокоэллиптические орбиты.

Таким образом, радиационное давление звезды приводит к сильному разделению пылевой составляющей в околозвездном пространстве на несколько фракций в зависимости от размеров пылинок.

**Расчеты орбитальной эволюции пылевых частиц.** Расчет орбитальной эволюции пылевых частиц основан на численном интегрировании системы дифференциальных уравнений:

$$\ddot{r} = r\dot{\phi}^2 - \frac{\mu}{r^2} \cdot (1 - \beta) \quad (4)$$

$$\ddot{\phi} = -\frac{1}{r^2} \cdot \left[ 2r \cdot \dot{r}\dot{\phi} + \alpha \cdot \dot{\phi} \cdot \left( 1 + \frac{r_{sun}^2}{2r^2} \right) \right] \quad (5)$$

$$\dot{s} = \frac{0.0408}{\delta} \cdot P \cdot \sqrt{\frac{M_g}{T}} \quad (6)$$

Для вычисления давления насыщенных паров  $P$  служит формула [12,13]:  $\lg(P)=10.915 - 24928.3/T$ , где  $P$  выражено в торах ( $1\text{тор} = 1\text{мм.рт.ст.}$ ). В уравнении (6) давление  $P$  выражено в торах, а плотность  $\delta$  выражено в  $\text{г/см}^3$ ,  $\dot{S}$  в  $\text{см/сек}$ . Приняты следующие обозначения:

$\dot{r} = dr/dt$  - скорость изменения  $r$  со временем;  $\ddot{r} = d^2r/dt^2$  - ускорение;  $\phi$  - полярный угол (угол поворота вектора  $\vec{r}$ );  $\dot{\phi} = d\phi/dt$  - угловая скорость изменения  $\phi$  со временем;  $\ddot{\phi} = d^2\phi/dt^2$  - угловое ускорение;  $\dot{s} = ds/dt$  - скорость изменения радиуса частицы  $s$  со временем;  $M_g$  - молекулярный вес материала частицы;  $\alpha = \beta \cdot \mu/c$ .

Совокупность 3-х уравнений эквивалентна системе из пяти дифференциальных уравнений 1-го порядка относительно искомым функций времени:  $r, \dot{r}, \phi, \dot{\phi}, s$ . Для решения этой системы применяется метод Рунге-Кутты 4-го порядка точности с постоянным шагом.

Орбитальная эволюция частиц рассчитана для ряда начальных радиусов частиц  $s_0$  от 0.01 мкм до 100 мкм и различных стартовых расстояний  $r_0$  вблизи зоны сублимации. Предполагается, что частица срывается с родительского тела, двигающегося по круговой орбите.



Рисунок 3 – Орбитальная эволюция частицы базальта с начальным радиусом  $s_0 = 5$  мкм. Стартовое расстояние  $20r_s$

Как видно из рисунков 3 и 4 орбитальная эволюция частицы с начальным радиусом  $s_0 = 5.0$  мкм зависит от стартового расстояния вблизи зоны сублимации. Частица, стартующая с расстояния  $20r_s$ , испаряется после 21 орбитального оборота. При этом она на последнем обороте

успеваает вылететь на высокоэллиптическую орбиту почти до  $300 r_s$ . Такая же частица, стартующая с расстояния  $22r_s$ , покидает звездную систему после 101-го орбитального оборота (рис.4).

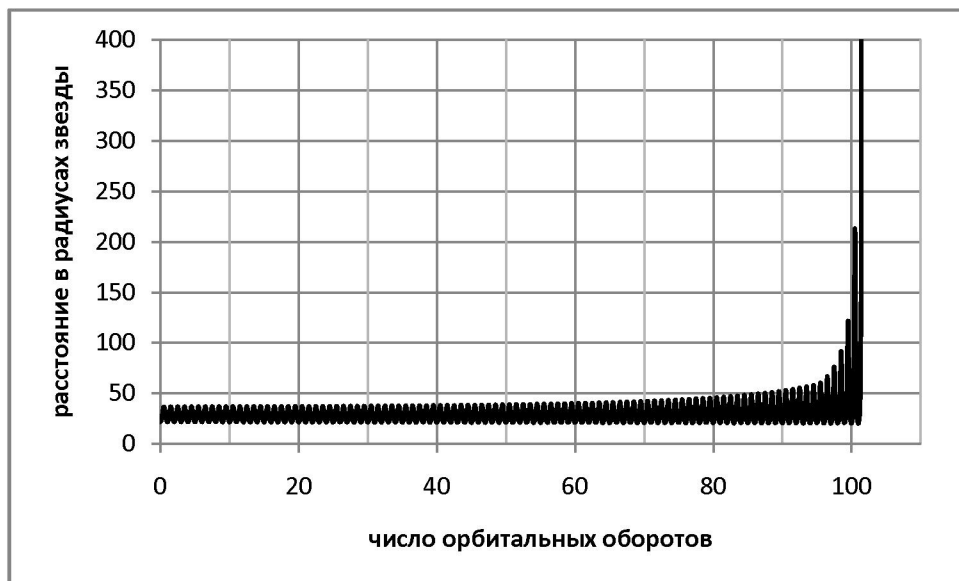


Рисунок 4 – Орбитальная эволюция частицы базальта с начальным радиусом  $s_0 = 5$  мкм. Стартовое расстояние  $22r_s$

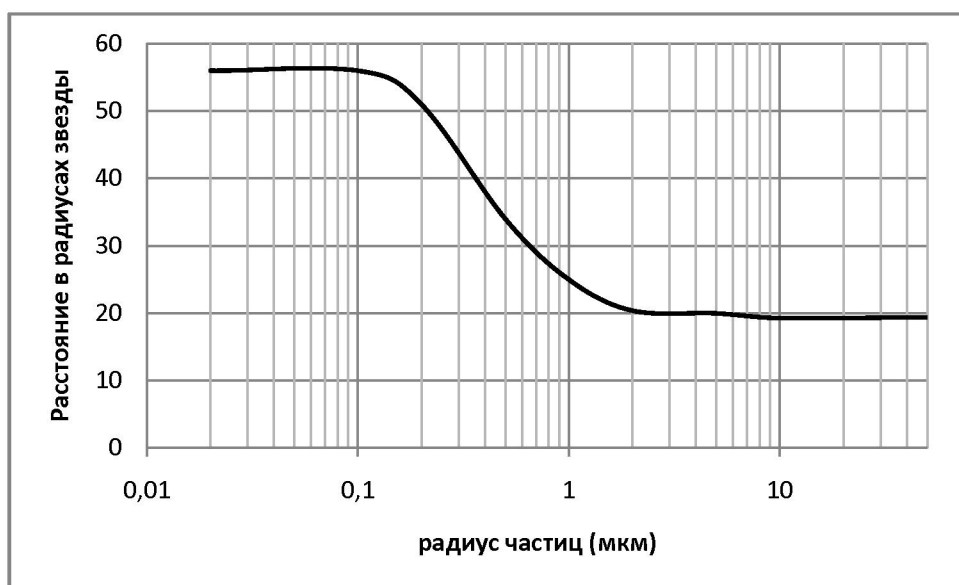


Рисунок 5 – Расстояние сублимации в зависимости от радиуса частиц

Из рисунка 5 видно, что частицы разных размеров испаряются на различных расстояниях от звезды, из-за различия температур частиц, которые сильно зависят от их размеров (рис.1). Дальше всех от звезды при попадании в область сублимации испаряются мелкие частицы, это происходит на расстоянии  $56-57r_s$ . Граница зоны сублимации более крупных частиц радиусами  $s > 2$  мкм стабилизируется на расстоянии около 20 радиусов звезды.

**Обсуждение результатов и выводы.** Температурный режим пыли отличается от режима абсолютно черного тела и сильно зависит от размера частиц (рис.1). Максимальную температуру имеют частицы с радиусами около 0,03-0,1 мкм. Частицы этих размеров испаряются, если они срываются от родительских тел внутри области до 56-57 радиусов звезды (рис.5). Вне этой области они изгоняются световым давлением (рис.2).

Действие светового давления приводит к тому, что силикатные частицы радиусами от 0.01 мкм до 1-2 мкм покидают систему звезды  $\beta$  Pictoris, если они отрываются от родительских тел вне области сублимации (рис.2).

Частицы более крупных размеров сначала «заспиральиваются» внутрь по направлению к звезде под действием эффекта торможения Пойнтинга-Робертсона, а по достижении зоны сублимации, испаряются до радиусов 1-2 мкм, а затем выходят на высокоэллиптические орбиты, с которых они в конечном итоге улетают прочь от звезды. Полное испарение возможно только для частиц, отрывающихся от родительских тел внутри зоны сублимации.

В результате решения уравнения теплового баланса выяснено (рис.1), что на расстояниях до 20 радиусов звезды, космическая пыль в виде облака твердых частиц существовать не может, так как температура нагрева за счет излучения превышает температуру плавления силикатов (рис.1). Этот же вывод можно сделать из расчетов орбитальной эволюции частиц (рис.5).

Для малых частиц радиусами менее 0.1 мкм граница зоны сублимации стабилизируется на расстоянии 56-57 радиусов звезды, а для крупных частиц радиусами более 2 мкм сублимация происходит на расстоянии около 20 радиусов. На расстояниях между 20 и 57 радиусов звезды испаряются частицы промежуточных размеров,

Важно отметить 2 главных вывода:

- Полное испарение возможно только для частиц, отрывающихся от родительских тел внутри зоны сублимации.
- Практически все частицы, оторвавшиеся от родительских тел вне зоны сублимации уносятся прочь от звезды и становятся источником коллизионных взаимодействий для более внешних слоев звездного диска.

Работа выполнена по программе целевого финансирования 0073/ПЦФ-14 «Астрофизические исследования звездных и планетных систем» Комитета науки МОН РК.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Smith B.A. and Terrell R.J. A circumstellar disk around Beta Pictoris // *Science*. 1984. V.226. P.1421-1424.
- [2] Aumann H.H. et al. Discovery of a shell around Alpha Lyrae // *Astrophys.J. Letters*. 1984. V.278. P.L23-27.
- [3] Trilling et al. Debris Disks around Sun-like Stars // *Ap.J.* 2008. V.674. P.1086.
- [4] Шестакова Л.И., Демченко Б.И. Орбитальная эволюция пылевых частиц в области сублимации около звезды солнечного типа // *Известия НАН РК. Серия физ.-мат.* 2013. № 5. С.77-87.
- [5] Shestakova L.I., Demchenko B.I. Results of Observations of the dust distribution in the F-corona of the Sun // *Solar System Research*. 2015. V.50. P.143 – 160.
- [6] Artymowicz P. BETA PICTORIS: An Early Solar System? // *Annu.Rev.Earth Planet Sci.* 1997.V.25. P.175-219.
- [7] Pollack J.B., Toon O.B. and Khare B.N. Optical properties of some terrestrial rocks and glasses // *Icarus* 1973. V.19. P.372-389.
- [8] Lamy P.L. Optical properties of silicates in the far ultraviolet. // *Icarus*. 1978. V.34. P.68-75.
- [9] Boren C.F, Hafmen D.R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles, 1983, John Wiley & Sons, Inc., 664p.
- [10] Matsumura M., Seki M. Polarization Efficiency and Phase Function Calculated on the Basis of the Mie Theory. // Faculty of Science, Tohoku University, SENDAI, JAPAN. Eighth Series. 1985.V.6. No.1. P. 11-48.
- [11] Shestakova L.I., Tambovtseva L.V. Dynamics of dust grains near the Sun. // *Astron. and Astrophys. Transactions*. 1995. V.8. P.59-81.
- [12] Lamy, P.L. The Dynamics of Circum-solar Dust Grains // *Astron. Astrophys.* 1974a. V.33. P. 191-194.
- [13] Lamy, P.L. Interaction of interplanetary dust grains with the solar radiation field // *Astron. Astrophys.* 1974b. V.35. P. 197-207.

#### REFERENCES

- [1] Smith B.A. and Terrell R.J. *Science*. **1984**. V.226. P.1421-1424.
- [2] Aumann H.H. et al. *Astrophys.J. Letters*. **1984**. V.278. P.L23-27.
- [3] Trilling et al. *Ap.J.* **2008**. V.674. P.1086.
- [4] Shestakova L.I., Demchenko B.I. *Izvestija NAN RK. Serija fiz.mat.* **2013**. № 5. С.77-87 (in russ).

- [5] Shestakova L.I., Demchenko B.I. *Solar System Research*, **2016**, 50, №2, 143-160.  
[6] Artymowicz P. *Annu.Rev.Earth Planet Sci.* **1997**. V.25. P.175-219.  
[7] Pollack J.B., Toon O.B. and Khare B.N. *Icarus*. **1973**. V.19. P.372-389.  
[8] Lamy P.L. *Icarus*. 1978. V.34. P.68-75.  
[9] Boren C.F, Hafmen D.R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, **1983**, John Wiley & Sons, Inc., 664P.  
[10] Matsumura M., Seki M. Faculty of Science, Tohoku University, SENDAL, JAPAN. Eighth Series. **1985**. V.6. No.1. P. 11-48.  
[11] Shestakova L.I., Tambovtseva L.V. *Astron. and Astrophys. Transactions*. **1995**. V.8. P.59-81.  
[12] Lamy, P.L. *Astron. Astrophys.* 1974a. V.33. P. 191-194.  
[13] Lamy, P.L. *Astron. Astrophys.* 1974b. V.35. P. 197-207.

**Л.И. Шестакова, Б.И. Демченко**

В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты, Алматы, Қазақстан

### **А ТОБЫ ЖҰЛДЫЗДАРЫ МАҢЫНДАҒЫ СУБЛИМАЦИЯ ПРОЦЕССИНДЕ СИЛИКАТТЫ ТОЗАҢ БӨЛШЕКТЕРІНІҢ ОРБИТАЛЫҚ ДАМУЫ**

**Түйін сөздер:**  $\beta$ -Pictoris, сынық диск, жұлдыз маңындағы диск, тозаң бөлшектері, орбиталық даму, тозаң сублимациясы

**Аннотация.** А  $\beta$ -Pictoris тобы жұлдыздары дискісінде булану процессінде тозаң бөлшектерінің орбиталық эволюциясының үлгілендіру нәтижелері ұсынылды. Тозаң бөлшектері температураларының есептері 0.1 ден 10 мкм дейін радиустер жиынтығы және жұлдыздарға дейінгі әртүрлі қашықтықтар үшін орындалған «жүту-сәулелену» жылу балансы теңдеулерінің шешіміне негізделген. Базальт жер материалының рефракциясының индекстерімен сәйкес біртекті сфералық бөлшектер үшін Ми теориясы бойынша оптикалық қасиеттері есептелді. Біз тозаң бөлшектері динамикасына радиация қысымының, сонымен қатар Пойнтинг-Робертсон тежегіштігі тиімділігі әсері есепке алынды.

Сублимация аймағы шегіндегі айналма орбиталар бойынша аса ірі аталық денелер жасырылатын 2 мкм аз радиустары бар бөлшектер алынды, жарық қысымы әсерінен жұлдыздардан алыс бірден ұшады. Үлкен көлемдегі бөлшектер алдымен Пойнтинг-Робертсон эффект әсерімен жұлдыздарға қарай бағытта ішкі шиыршық бойынша қозғалады, ал сублимация аймағы жетістігі бойынша 1-2 мкм радиусқа дейін олар буланып кетеді және ақыры соңында жұлдыздардан әрі ұшып кететін күшті созылық эллиптикалық орбиталарға шығады. Толық булану тек сублимация аймағы ішінде аталық денелерден бөлінген бөлшектерде ғана мүмкін.

<0,1 көлемдегі ұсақ бөлшектердің сублимациясы белсенді 50-60 күн күн радиустары қашықтығында басталатыны белгіленді. Аса ірі бөлшектер 0.1-1.0 мкм радиустер интервалында егер олар жұлдыздардың 20 ден 50 дейін радиустар қашықтығында аталық денелерден ажырайтын болса сублимация аймағы ішінде буланып кетеді. 2 мкм-ден аз емес радиусты бөлшектердің сублимация аймақтары шекарасы жұлдыздардың шамамен 20 радиусында тұрақтандырылады.