

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 5, Number 309 (2016), 55 – 63

UDC 524.5

L.I. Shestakova, B.I. Demchenko

Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan
shest1952@mail.ru

THE ACTION OF RADIATION PRESSURE ON THE DYNAMICS OF ATOMS AND IONS IN DEBRIS DISKS OF A-TYPE STARS

Abstract. The results of calculations of radiation pressure on atoms and ions, formed after the disintegration of dust and larger bodies in the disk of star β -Pictoris, are presented. It is concluded that the circumstellar medium enriched by elements, weakly susceptible to light pressure in a neutral state, and/or after the first ionization. Among them there are elements with high abundance of space: N, O, C, Na, P, S, K. Moreover, the elements: F, Cl, Se, Br, I, Ir, Hg and a noble gas atoms remain in the disk.

Interstellar medium can be enriched primarily by ions Al, which are strongly influenced by the radiation pressure in the neutral state and in the first and second stages of ionization. The interstellar medium is also enriched by elements exposed to strong radiation pressure in a neutral state, and after the first ionization: Be, Mg, Ca, Sc, Ti, Mn, Fe, Sr, Ba. Lithium among the neutral atoms is exposed to the maximum pressure of the radiation that exceeds the gravitational force at 1000 times. The hydrogen atoms also can leave the star system under the action of radiation pressure, in the case of separation of the atoms from the parent bodies outside the hydrogen ionization zone.

Keywords: β -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

ДЕЙСТВИЕ СВЕТОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА ДИНАМИКУ АТОМОВ И ИОНОВ В ОСКОЛОЧНЫХ ДИСКАХ ЗВЕЗД КЛАССА А

Аннотация. Представлены результаты расчетов радиационного давления на атомы и ионы в диске звезды типа β -Pictoris, образовавшиеся после распада пыли и более крупных тел. Сделан вывод, что околозвездная среда обогащается элементами, слабо подверженными световому давлению в нейтральном состоянии и/или после первой ионизации. Среди них имеются элементы с достаточно высоким космическим обилием: N, O, C, Na, P, S, K. Кроме того, элементы: F, Cl, Se, Br, I, Ir, Hg и атомы благородных газов остаются в диске.

Межзвездная среда может обогащаться в первую очередь ионами Al, которые подвержены сильному влиянию светового давления в нейтральном состоянии и в первой и второй стадиях ионизации. Межзвездная среда также обогащается элементами, подверженными сильному радиационному давлению в нейтральном состоянии и после 1-й ионизации: Be, Mg, Ca, Sc, Ti, Mn, Fe, Sr, Ba. Литий среди нейтральных атомов подвержен максимальному давлению излучения, которое превышает силу тяготения в 1000 раз. Атомы

водорода также могут покинуть звездную систему под действием радиационного давления, в случае отделения атомов от родительских тел за пределами зоны ионизации водорода.

Ключевые слова: β -Pictoris, осколочный диск, околозвездный диск, пылевые частицы, орбитальная эволюция, сублимация пыли.

Введение. В середине 80-х годов после первых наблюдений в инфракрасном диапазоне с помощью миссии IRAS [1,2] были обнаружены избытки эмиссии на длинах волн 12, 25 и 100 мкм около ближайших звезд: Веги, Фомальгаута и β Pictoris [2,3]. Избытки инфракрасного излучения свидетельствуют о наличии пылевых дисков, которые впоследствии были названы осколочными дисками, окружающими эти звезды. Оказалось, что среди звезд с осколочными дисками около 50% - молодые звезды класса А и 25% - А-звезды, заканчивающие свою жизнь на главной последовательности [4]. Это обусловлено двумя обстоятельствами:

Во-первых, благодаря короткому времени жизни (в среднем около 850 миллионов лет) в сравнении с солнцеподобными звездами или М-карликами, они могли сохранить первоначальный диск.

Во-вторых, А-звезды обычно ярче звезд других классов, диски около которых невозможно обнаружить.

Звезда класса AV5 - β Pictoris (HR 2020) является прототипом звезд класса А с переменной околозвездной компонентой. Протопланетный диск около β Pictoris имеет сходные черты с Солнечной системой [5]. 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 (β Pictoris) определяются различиями в возрасте и классе звезды. Большая часть гранул около β Pictoris может немного отличаться по составу от типичного для Солнечной системы межпланетного и кометного материала. Содержание углерода меньше, чем в стандартном составе хондритов и углеродосодержащих метеороидов. Особенно светлым выглядит состав гранул около β Pictoris в сравнении с темной кометной пылью Солнечной системы.

Роль радиационного давления, действующего на пыль, проявляется в околозвездном диске β Pictoris сильнее, чем в Солнечной системе. Появляется возможность лавинообразного потока коллизионных осколков субмикронных размеров и их фрагментов наружу сквозь диск. Недостаток углерода в составе частиц также может быть обусловлен сильным световым давлением, поскольку углеродосодержащие частицы сильнее подвержены этому эффекту, за счет чего может происходить некоторая «сепарация» состава частиц световым давлением. Особенно сильно световое давление проявляется на нейтральных атомах.

Рассмотрение влияния светового давления на нейтральные атомы в Солнечной системе [6,7] позволило сделать вывод, что для некоторых из них давление радиации превосходит действие гравитации, и эти атомы могут быть ускорены световым давлением до различных скоростей и проявлять свое присутствие в составе солнечного ветра [8].

В 1990 году нами был сделан прогноз интенсивности резонансного свечения некоторых атомов и ионов, оказавшихся около Солнца в результате распада комет, метеорных потоков и испарения зодиакальной пыли [7]. Были выбраны наиболее перспективные для оптических наблюдений атомы и ионы. Расчеты динамики первых ионов кальция показали, что под действием светового давления они могут разогнаться до скоростей 300- 400 км/сек [9]. В результате поисков резонансного свечения иона кальция в линиях H и K CaII около Солнца во время полного солнечного затмения 26.02.1998 была обнаружена обширная область свечения в интервале расстояний от 3.5 до 18 солнечных радиусов к западу от Солнца [10,11]. Наблюдаемые лучевые скорости ионов CaII достигали величин до 300 км/сек. Очевидно, что наблюдаемые скорости намного превосходят кеплеровские. Происхождение таких высоких скоростей легко объясняется влиянием светового давления в резонансных линиях.

Интенсивные резонансные линии являются основой для расчета действия светового давления. Световое давление максимально в случае, когда сильные резонансные линии оказываются в области максимума излучения звезды. Несомненно, что для звезд более раннего спектрального класса, таких как звезды класса А, этот эффект будет более значимым из-за их более высокой температуры и светимости.

Работа выполнена с целью выяснения влияния светового давления на изменения химического состава околозвездного диска и окружающей межзвездной среды.

Метод расчета. Сила светового давления F_L в центре резонансной линии определяется из выражения:

$$F_L = \alpha_L \frac{\pi}{c} \frac{F_\lambda \chi_L}{(r/r_\odot)^2}, \quad (1)$$

где F_λ - интенсивность излучения в среднем по диску звезды в единичном интервале длин волн в непрерывном спектре между линиями, либо заменяющая ее функция Планка; χ_L - остаточная интенсивность в центре линии в долях единицы (за единицу принимается непрерывный спектр F_λ), r/r_\odot - расстояние от центра звезды в звездных радиусах, c - скорость света; $\alpha_L = \pi e^2 \lambda^2 f_L / m_e c^2$ - коэффициент поглощения в линии согласно [12], где e и m_e - заряд и масса электрона, f_L - сила осциллятора для излучения в данной линии.

Световое давление F_{rad} на каждый атом или ион определяется суммой давлений по всем резонансным линиям L :

$$F_{rad} = \sum_L F_L. \quad (2)$$

Механизм ускорения обеспечивается суммой давлений для всех резонансных линий данного атома. Чем больше сила осциллятора атома и чем мощнее интенсивность солнечного спектра в соответствующей длине волны, тем сильнее радиационное давление.

Дальнейший сценарий поведения атома или иона зависит в основном от времени его жизни в поле излучения и отношения силы светового давления к силе притяжения: $\beta = F_{rad}/F_{grav}$. Если $\beta > 1$, элемент получает ускорение, направленное от звезды. Поскольку силы, действующие на разные элементы различны, то различны и их терминальные скорости. Это обстоятельство и может обусловить пространственное разделение элементов в процессе их удаления из системы звезды и образование облаков, обогащенных разными элементами.

Сравнение спектра звезды класса А с солнечным спектром. Основной формулой для электромагнитного излучения абсолютно черного тела является функция Планка, которую мы запишем в виде [13]:

$$B(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1}, \quad (3)$$

где λ - длина волны, T - температура в градусах К, C_1 , C_2 - первая и вторая радиационные постоянные ($C_1 = 2hc^2$, $C_2 = hc/k$, h - постоянная Планка, c - скорость света, k - постоянная Больцмана).

Значения постоянных: $C_1 = 1.19106 \cdot 10^{-16}$ Вт·м²/ср, $C_2 = 1.438786 \cdot 10^{-2}$ м·град. При таком выборе постоянных размерность $B(\lambda, T)$ представим в виде: дж/(сек · м² · мкм · ср), то есть эта функция показывает, сколько джоулей энергии излучается за 1сек с 1м² в интервале длин волн, равном 1 мкм и в телесном углу 1 стерадиан. Распределение энергии в солнечном спектре (F_λ), взятое в [13] мы привели в единую систему единиц, то есть выразили в единицах дж/(с · м² · мкм · ср) и оцифровали.

Как видно из рисунка 1, функция Планка практически совпадает с солнечным спектром на длинах волн $\lambda > 0.5$ мкм. Значительные различия возникают в области $\lambda < 0.5$ мкм из-за насыщенности реального спектра линиями поглощения разных элементов. В ультрафиолетовом

диапазоне в солнечном спектре преобладает излучение хромосферы и короны, которое сильно отличается от чернотельного. На рисунке 1 заметен характерный максимум хромосферной эмиссии водорода в линии L_{α} на $\lambda = 0.1215$ мкм. Выбор эффективной температуры $T_{\text{eff}} = 5779\text{K}$, сделанный в [13], основан на совпадении полной энергии излучения, полученной после интегрирования по длинам волн реального спектра Солнца и спектра, аппроксимированного функцией Планка.

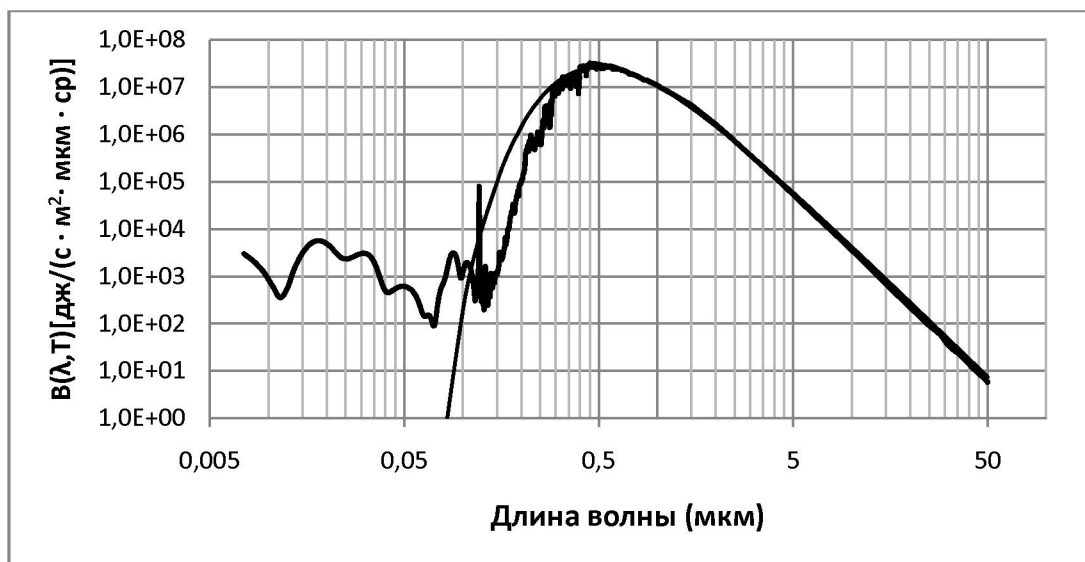


Рисунок 1 – Распределение энергии в солнечном спектре согласно [13] – жирная линия и функция Планка с $T_{\text{eff}} = 5779\text{K}$ - тонкая линия

Для расчетов светового давления на атомы и ионы в дисках звезд класса А мы выбрали звезду β Pictoris, как типичную и достаточно подробно исследованную звезду, обладающую осколочным диском. Для расчетов использованы следующие параметры β Pictoris, взятые согласно [14]: $M=1.75 M_{\odot}$, $T_{\text{eff}} = 8200\text{K}$, $R = 1.732r_{\odot}$. Необходимые атомные данные для расчетов давления радиации в резонансных линиях атомов и ионов взяты согласно приведенным в [15].

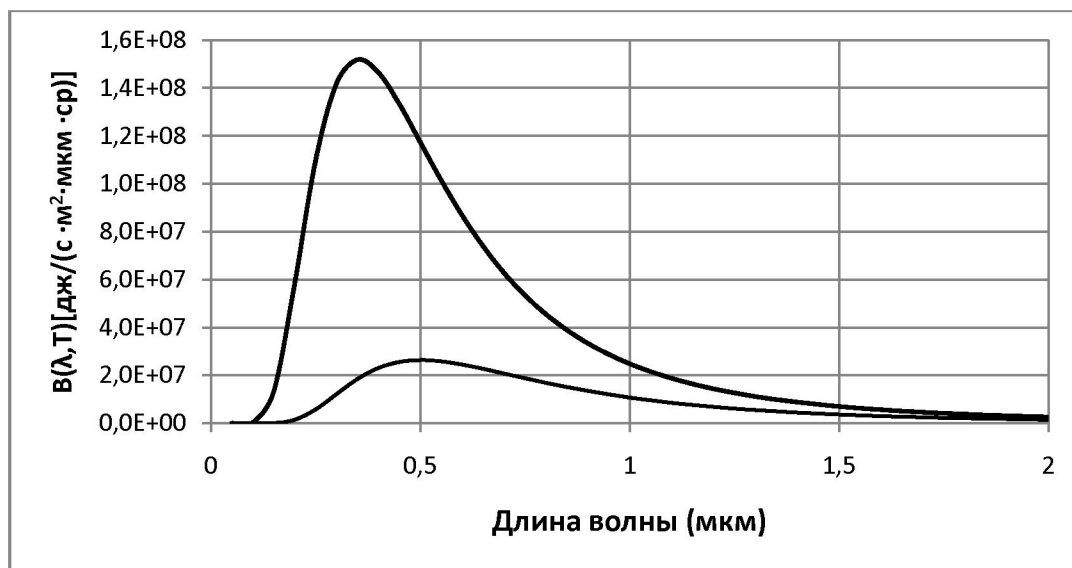


Рисунок 2 – Чернотельные спектры, рассчитанные согласно функции Планка для звезд с эффективными температурами $T_{\text{eff}} = 8200\text{K}$ (β Pictoris) и $T_{\text{eff}} = 5779\text{K}$ (Солнце по [13])

Результаты расчетов. Атомы. Результаты расчетов светового давления на атомы и ионы в диске звезды класса А (типа β Pictoris) получены в чернотельном приближении согласно (7) с использованием функции Планка.

В расчетах не учитывался фактор χ_λ – остаточная интенсивность в центре линии, поскольку планковский спектр не позволяет его учесть. Тем не менее, известно, что спектр звезды класса А имеет неглубокие линии в сравнении с солнечным спектром, за исключением линий водорода, поэтому ошибки в подобных расчетах невелики. Но даже для атомов водорода, обладающих высокими радиальными скоростями, такие расчеты можно считать точными. Оценки светового давления на некоторые атомы в системе β Pictoris выполнены в [16] и ряде других работ. Расхождения наших оценок невелики, в основном они объясняются различиями в принятых параметрах звезды и учета глубины линий.

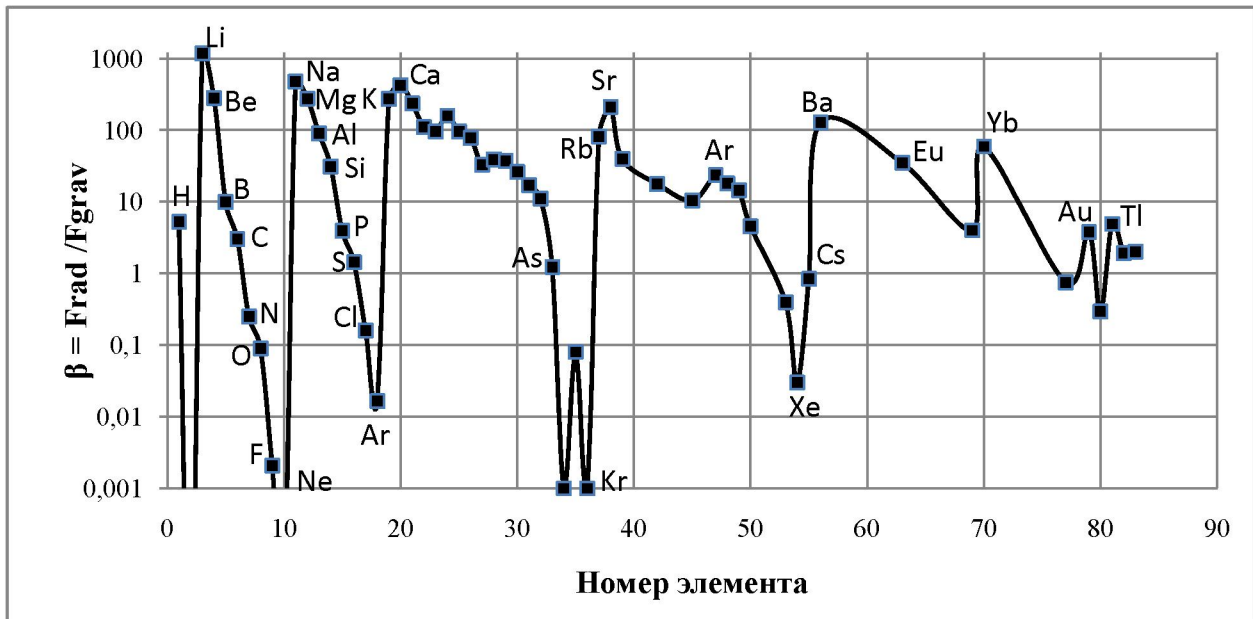


Рисунок 3 – Отношение светового давления к силе тяготения (β) для нейтральных атомов в диске звезды β Pictoris в зависимости от номера элемента, $T_{\text{eff}}=8200\text{K}$.

Причина увеличения силы светового давления для быстролетающих атомов объясняется доплеровским смещением по длине волны. Чем больше будет соответствующее радиальной скорости доплеровское смещение, тем сильнее световое давление, которое достигнет максимума, когда скорость атома будет достаточно велика, чтобы по доплеровскому смещению длина волны поглощаемого атомом света вышла из ядра линии на уровень непрерывного спектра звезды. Строго говоря, результаты наших расчетов соответствуют световому давлению, действующему на быстролетающие атомы и ионы, линии поглощения которых из-за доплеровского смещения сместились по длине волны на уровень непрерывного спектра.

Как видно из рисунка 3, легче всего поддаются действию светового давления атомы щелочной группы, такие как Li, Na, K, Rb. Они имеют на внешней оболочке один электрон и мощные резонансные дублеты с длиной волны $\lambda > 0,5$ мкм, которые находятся на спаде спектра с длинноволновой стороны от максимума (рисунок 2). Однако, такой процесс ускорения для атомов щелочной группы длится недолго, поскольку они имеют низкий потенциал первой ионизации и быстро ионизируются ультрафиолетовым излучением звезды.

Начиная с кальция, атомы второй группы, такие как Ca, Sr, Ba, имеющие 2 электрона на внешней оболочке, становятся более подверженными световому давлению, чем щелочные металлы

и далее по убыванию (рис. 3) располагаются атомы элементов последующих групп таблицы Менделеева. Минимальным световым давлением обладают атомы благородных газов: Ne, Ar, Kr, Xe.

Интересно отметить, что кроме выделенных «активных» в смысле светового давления столбцов таблицы Менделеева, обнаружилось еще и «активные» строки: IV-й, начинающийся с K и V-й, начинающийся с Rb. Интересен также VI-й ряд, начинающийся с Cs, содержащий редкоземельные металлы лантаноиды. Те из них, для которых известны силы осцилляторов (Nd, Eu, Yb) показывают высокие β для атомов и первых ионов.

Несмотря на отсутствие данных о силах осцилляторов для VII - ряда таблицы Менделеева, по аналогии с лантаноидами можно ожидать такого же поведения у группы актиноидов, содержащих радиоактивные элементы, Th, U и т.д.

Основной вывод, который можно сделать из рассмотрения динамического поведения нейтральных атомов, состоит в том, что большинство их них, особенно это касается атомов с высоким космическим обилием, существенно подвергаются световому давлению, то есть имеют $\beta > 1$.

Результаты расчетов. Ионы. Атомы 2-го столбца таблицы Менделеева, имеющие на внешней оболочке по 2 электрона, такие, как Be, Mg, Ca, Sr, Ba после 1-й ионизации становятся лидерами по силе светового давления (рисунок 4). При этом они имеют гораздо лучшие перспективы в смысле «выживания» в звездном диске около звезды, поскольку у них достаточно большое время жизни, чтобы ускориться до больших скоростей.

Эти атомы имеют сильные резонансные линии вблизи максимума излучения звезды в нейтральном состоянии, кроме того после первой ионизации, они становятся ионами, подобными атому Li и у них появляются еще более мощные резонансные дублеты, смещенные в УФ сторону, но также находящиеся вблизи максимума излучения звезды. Таким образом, ускорение этих атомов продолжается после 1-й ионизации и они могут успеть ускориться до больших скоростей прежде, чем перейдут на следующий уровень ионизации.

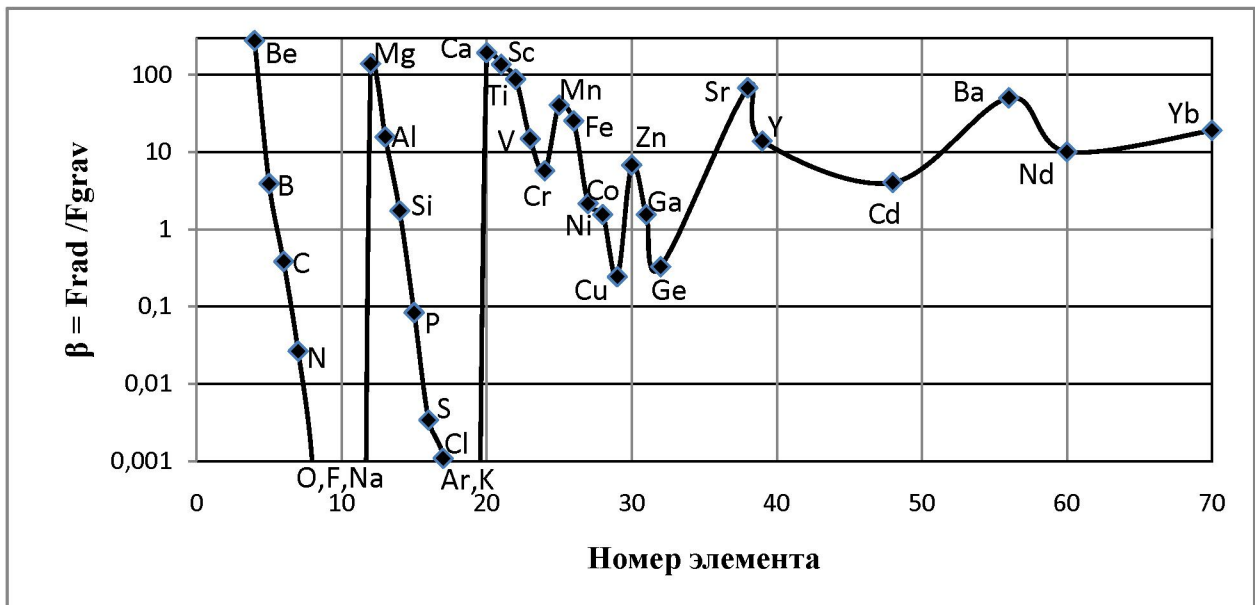


Рисунок 4 – Отношение светового давления к силе тяготения (β) для ионов первой степени ионизации в диске звезды β Pictoris в зависимости от номера элемента

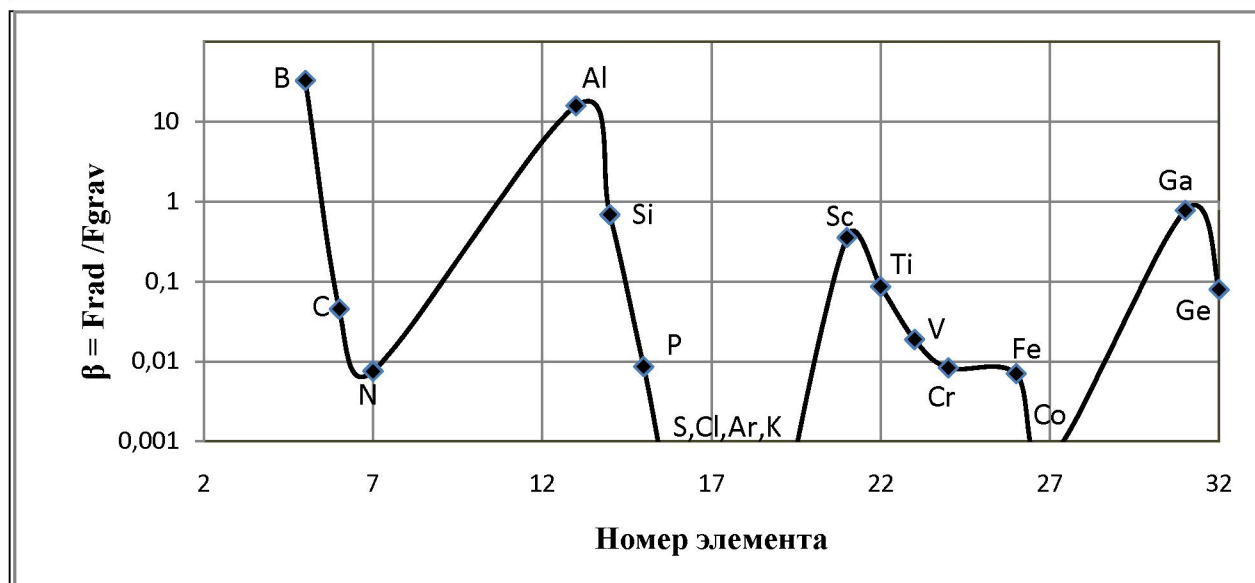


Рисунок 5 – Отношение светового давления к силе тяготения (β) для ионов первой степени ионизации в диске звезды β Pictoris в зависимости от номера элемента

После второй ионизации на первый план по силе светового давления выходят элементы 3-го столбца таблицы Менделеева типа бора (B) и алюминия (Al) (рис. 5), а при дальнейшей ионизации световое давление превышает силу тяготения только для ионов кремния (SiIV).

Обсуждение результатов и выводы. Из рисунков 3 - 5 можно сделать вывод о том, что давление радиации в резонансных линиях может оказывать существенное влияние на химический состав как звездных атмосфер, так и межзвездной среды, а также о перераспределении вещества внутри околозвездного диска, включая планетную систему.

Эволюцию диска осколков схематично можно проследить следующим образом. Осколки диска и пыль в результате взаимных столкновений дробятся. Образующаяся пыль разделяется световым давлением на 2 основные группы: мелкая пыль, радиусами < 1 мкм [17] выметается в межпланетную среду, либо осаждается на более крупных телах, а более крупные частицы остаются в диске и, под действием эффекта торможения Пойнтинга – Робертсона, постепенно приближаются к звезде. После достижения зоны сублимации пылевые частицы испаряются и распадаются на атомы, которые подвергаются действию светового давления в резонансных линиях и ионизации ультрафиолетовым излучением звезды.

Из рисунка 3 видно, что большая часть атомов начнет ускоряться световым давлением прочь от звезды, кроме атомов благородных газов (Ne, Ar, Kr, Xe), атомов с высоким оптическим обилием – азота и кислорода (N, O) и еще ряда элементов (F, Cl, Se, Br, I, Ir, Hg). После первой ионизации (рис. 4) в дополнение к указанным элементам прекращается ускорение ионов C, Na, P, S, K. После второй ионизации ситуация меняется. Большинство элементов прекращают ускорение, направленное от звезды. Остаются сильно подверженными световому давлению B и Al и несколько элементов со световым давлением, близким к 1 (Si, Sc, Ga). При дальнейшей ионизации световое давление превышает силу тяготения только для ионов кремния (SiIV).

Таким образом, околозвездная среда обогащается элементами, слабо подверженными световому давлению в нейтральном состоянии и/или после первой ионизации. Среди них имеются элементы с достаточно высоким космическим обилием: N, O, C, Na, P, S, K. Кроме этого остаются в диске: F, Cl, Se, Br, I, Ir, Hg и атомы благородных газов.

Межзвездная среда обогащается элементами: Li, для которого $\beta \approx 1000$. даже если этот атом быстро ионизируется, то при таком ускорении он успеет приобрести высокую скорость, чтобы покинуть систему звезды. Величина β близка к 100 для атомов Be, Na, Mg, Al, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Rb, Sr, Ba, Yb, которые тоже могут приобрести значительные скорости. После 1-й ионизации время жизни до 2-й ионизации значительно увеличивается.

Среди первых ионов величина β близка к 100 для ионов Be, Mg, Ca, Sc, Ti, Sr, Ba. Именно эти элементы имеют максимальные шансы приобрести скорость, превышающую скорость убегания от звезды. Вплотную к ним приближаются ионы, для которых β находится между 10 и 100: Al, V, Cr, Mn, Fe, Zn, Y, Nd, Yb. Если посмотреть на эти элементы в следующей стадии ионизации (рис. 5), то только 1 из них – Al имеет $\beta > 10$. Близкую величину β во 2-й стадии ионизации имеет только элемент В.

Таким образом, межзвездная среда может обогащаться в первую очередь ионами Al, которые подвержены сильному влиянию светового давления во всех трех состояниях: АII, АIII, АIII, включая их изотопы. Далее следуют элементы, с высоким световым давлением в двух состояниях: Be, Mg, Ca, Sc, Ti, Mn, Fe, Sr, Ba. Следует выделить атом Li, для которого $\beta \approx 1000$, а также атом водорода, который при $\beta > 1$ имеет возможность значительно долей покинуть систему горячей звезды и обогатить межзвездную среду.

РАБОТА ВЫПОЛНЕНА ПО ПРОЕКТУ ГРАНТОВОГО ФИНАНСИРОВАНИЯ № 0075/ГФ4 КОМИТЕТА НАУКИ МОН РК.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Smith B.A. and Terrile 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] Backman D.E., Paresce F. eds. Mainsequence stars with circumstellar solid material //The Vega phenomenon. 1993. P.1253-1304.
- [4] Trilling et al. Debris Disks around Sun-like Stars //Ap.J. 2008. V.674. P.1086.
- [5] Artymowicz P. BETA PICTORIS: An Early Solar System? //Annu.Rev.Earth Planet Sci. 1997.V.25. P.175-219.
- [6] Шестакова Л.И. О механизме пространственного разделения атомов и ионов световым давлением // Известия НАН РК. Серия физ.-мат. 2005. №4. С. 82-86.
- [7] Шестакова Л.И. Существует ли область резонансного свечения атомов и ионов вокруг Солнца? // Письма в Астрон. Журн. 1990. Т. 16. № 6. С. 550-559. Shestakova L.I. Is there a region of resonance emission by atoms and ions around the sun? // Sov. Astron. Lett. 1990. V. 16. P. 236-240.
- [8] Shestakova L.I. Solar Radiation Pressure as a Mechanism of Acceleration of Atoms and First Ions with Low Ionization Potentials// Solar System Research. - 2015. - V.49. - P.139 – 145.
- [9] Shestakova L.I. Cometary-Meteoritic Gas in the Solar Corona: The Dynamic of Ca Ions // Solar System Research. 2004. V.38. № 1. P.76-84.
- [10] Гуляев Р.А., Щеглов П.В. Эмиссионные образования в F-короне // ДАН России. 1999. Т. 366. № 2. - С.199-201.
- [11] Гуляев Р.А., Щеглов П.В. Интерферометрические наблюдения S-короны // Изв.АН (Россия),Серия физическая. 1999. Т.63. №11. -С.2186-2190.
- [12] Аллен К.У. Астрофизические величины //Москва. Мир, 1977. 446 С.
- [13] Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. Поток солнечного излучения. М., “Наука”, 1991, 401 с.
- [14] Kervella P., Thévenin F., Morel P., Provost J., Berthomieu G., S’egransan D., Queloz D., Bord’e P., Di Folco E., Forveille T. VINCI/VLT observations of Main Sequence Stars, A. K. Dupree and A. O. Benz, Eds. //Stars as Suns: Activity, Evolution, and Planets, IAU Symposium. – 2004. - V. 219. - P.80-84.
- [15] Verner D.A, Barthel P.D. and Tytler P.D. Atomic data for absorption lines from the ground level at wavelengths grater than 228Å // Kapteyn Institute Preprint. 1994. №142. - 69 P.
- [16] Brandeker, A. . Liseau, R.; Olofsson, G.; Fridlund, M. The spatial structure of the β Pictoris gas disk // Astron. Astrophys. 2004. V. 413. - P. 681.
- [17] Шестакова Л.И., Демченко Б.И., Байнакатова Г.М. Поведение околозвездной пыли вблизи звезды типа β Pictoris // Известия НАН РК, Серия физ. –мат. –2012.– Т.3. –С.46-52.

REFERENCES

- [1] Smith B.A. and Terrile R.J. *Science*, **1984**, 226, 1421-1424.
- [2] Aumann H.H. et al. *Astrophys.J. Letters*, **1984**, 278, L23-27.
- [3] Backman D.E., Paresce F. eds. *The Vega phenomenon*, **1993**, 1253-1304.
- [4] Trilling et al. *Ap.J.*, **2008**, 674, 1086.
- [5] Artymowicz P. *Annu.Rev.Earth Planet Sci.*, **1997**, 25, 175-219.
- [6] Shestakova L.I. *Izvestiya NAN RK. Serija fiz.-mat.*, **2005**, №4, 82-86. (In Russian).
- [7] Shestakova L.I. *Sov. Astron. Lett.*, **1990**, 16, 236-240.
- [8] Shestakova L.I. *Solar System Research*, **2015**, 49, 139-145.
- [9] Shestakova L.I. *Solar System Research*, **2004**, 38, № 1, 76-84.
- [10] Gulyaev R.A., Shcheglov P.V. *DAN Rossii*, **1999**, 366, №2, 199-201. (In Russian).
- [11] Gulyaev R.A., Shcheglov P.V. *Izvestiya RAN, Serija fiz.-mat*, **1999**, 63, №11, 2186-2190. (In Russian).
- [12] Allen C.W. *Astrophysical quantities*. Moscow. Mir.: **1977**, 446.
- [13] Makarova E.A., Kharitonov A.V. Kazachevskaja T.V. *Potok solnechnogo izlucheniya*. **1991**, Moscow, Nauka, 401 (in Russian).
- [14] Kervella P., Thévenin F., Morel P., Provost J., Berthomieu G., S'egransan D., Queloz D., Bord'e P., Di Folco E., Forveille T. *Stars as Suns: Activity, Evolution, and Planets*, A. K. Dupree and A. O. Benz, Eds. *IAU Symposium*. **2004**, 219, 80-84.
- [15] Verner D.A, Barthel P.D., Tytler D. *Kapteyn Institute Preprint*. **1994**. №142, 69.
- [16] Brandeker A., Liseau R., Olofsson G., Fridlund M. *Astron. Astrophys.* **2004**, 413, 681.
- [17] Shestakova L.I., Demchenko B.I., Bainakatova G.M. *Izvestiya NAN RK. Serija fiz.-mat.* **2012**, №3, 46-52. (In Russian).

Л.И. Шестакова, Б.И. Демченко

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

**А ТОБЫ ЖҰЛДЫЗДАРЫ ДИСКІЛЕРІНДЕ АТОМДАР МЕН ИОНДАР ДИНАМИКАСЫНА
СЫНЫҚ ЖАРЫҚ ҚЫСЫМЫНЫҢ ӘСЕРІ**

Аннотация. Тозаң және аса ірі денелердің ыдырауынан кейін құрылған β -Pictoris түріндегі жұлдыздардың дискісінде атомдар мен иондарға радиациялық қысымның есептерінің нәтижелері ұсынылды. Нейтралды жағдайға және/немесе бірінші иондалудан кейін жарық қысымына әлсіз бейімделген жұлдыз маңындағы орта элементтермен молаяды деген шешім жасалды. Олардың ішінде айтарлықтай жоғары ғарыш молдығы бар элементтерде бар: N, O, C, Na, P, S, K. Сонымен қатар элементтер: F, Cl, Se, Br, I, Ir, Hg және асыл газдардың атомдары дискіде қалады.

Жұлдыз аралық орта бірінші кезекте нейтралды жағдайда және бірінші, екінші иондалу кезеңдерінде жарық қысымының күшті әсерімен бейімделген Al иондарымен молаяды. Жұлдыз аралық орта сонымен қатар нейтралды жағдайда күшті радиациялық қысымға ұшыраған және 1-ші иондалудан кейін элементтермен толықтырылады: Be, Mg, Ca, Sc, Ti, Mn, Fe, Sr, Ba. Литий нейтралды атомдар ішінде 1000 рет арттыратын сәулеленудің максималды қысымымен бейімделген. Сутегі иондалу аймағы шегінен атомдардың аталық денеден бөлінуі кезінде сутегі атомдары радиациялық қысым әсерімен жұлдыздар жүйесінен кетуі мүмкін.

Түйін сөздер: β -Pictoris, сынық диск, жұлдыз маңындағы, тозаң бөлшектері, орбиталық даму, тозаң сублимациясы.