

ISSN 2518-1726 (Online),
ISSN 1991-346X (Print)

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ
Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің

Х А Б А Р Л А Р Ы

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Қазақстан Республикасының Ғылым
Академиясының Әл-Фараби атындағы
Қазақ ұлттық университетінің

NEWS

OF THE ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
Al-Farabi Kazakh
National University

SERIES
PHYSICO-MATHEMATICAL

3 (337)

MAY – JUNE 2021

PUBLISHED SINCE JANUARY 1963

PUBLISHED 6 TIMES A YEAR

ALMATY, NAS RK

NAS RK is pleased to announce that News of NAS RK. Series physico-mathematical journal has been accepted for indexing in the Emerging Sources Citation Index, a new edition of Web of Science. Content in this index is under consideration by Clarivate Analytics to be accepted in the Science Citation Index Expanded, the Social Sciences Citation Index, and the Arts & Humanities Citation Index. The quality and depth of content Web of Science offers to researchers, authors, publishers, and institutions sets it apart from other research databases. The inclusion of News of NAS RK. Series of chemistry and technologies in the Emerging Sources Citation Index demonstrates our dedication to providing the most relevant and influential content of chemical sciences to our community.

Қазақстан Республикасы Ұлттық ғылым академиясы «ҚР ҰҒА Хабарлары. Физикалық-математикалық сериясы» ғылыми журналының Web of Science-тің жаңаланған нұсқасы Emerging Sources Citation Index-те индекстелуге қабылданғанын хабарлайды. Бұл индекстелу барысында Clarivate Analytics компаниясы журналды одан әрі the Science Citation Index Expanded, the Social Sciences Citation Index және the Arts & Humanities Citation Index-ке қабылдау мәселесін қарастыруда. Web of Science зерттеушілер, авторлар, баспашылар мен мекемелерге контент тереңдігі мен сапасын ұсынады. ҚР ҰҒА Хабарлары. Химия және технология сериясы Emerging Sources Citation Index-ке енуі біздің қоғамдастық үшін ең өзекті және беделді химиялық ғылымдар бойынша контентке адалдығымызды білдіреді.

НАНПК сообщает, что научный журнал «Известия НАНПК. Серия физико-математическая» был принят для индексирования в Emerging Sources Citation Index, обновленной версии Web of Science. Содержание в этом индексировании находится в стадии рассмотрения компанией Clarivate Analytics для дальнейшего принятия журнала в the Science Citation Index Expanded, the Social Sciences Citation Index и the Arts & Humanities Citation Index. Web of Science предлагает качество и глубину контента для исследователей, авторов, издателей и учреждений. Включение Известия НАНПК в Emerging Sources Citation Index демонстрирует нашу приверженность к наиболее актуальному и влиятельному контенту по химическим наукам для нашего сообщества.

Бас редактор:

МҰТАНОВ Ғалымқайыр Мұтанұлы, техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, ҚР БҒМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты» бас директорының м.а. (Алматы, Қазақстан) Н-5

Редакция алқасы:

ҚАЛИМОЛДАЕВ Мақсат Нұрәділұлы (бас редактордың орынбасары), физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, ҚР БҒМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты» бас директорының кеңесшісі, зертхана меңгерушісі (Алматы, Қазақстан) Н-7

БАЙГУНЧЕКОВ Жұмаділ Жаңабайұлы (бас редактордың орынбасары), техника ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Кибернетика және ақпараттық технологиялар институты, Сатпаев университетінің Қолданбалы механика және инженерлік графика кафедрасы, (Алматы, Қазақстан) Н-3

ВОЙЧИК Вальдемар, техника ғылымдарының докторы (физика), Люблин технологиялық университетінің профессоры (Люблин, Польша) Н=23

БОШКАЕВ Қуантай Авғазыұлы, Ph.D. Теориялық және ядролық физика кафедрасының доценті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан) Н-10

QUEVEDO Hernando, профессор, Ядролық ғылымдар институты (Мехико, Мексика) Н-28

ЖҮСПОВ Марат Абжанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, теориялық және ядролық физика кафедрасының профессоры, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан) Н-7

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, Украина ҰҒА академигі, Қолданбалы математика және механика институты (Донецк, Украина) Н-5

МИХАЛЕВИЧ Александр Александрович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Беларусь ҰҒА академигі (Минск, Беларусь) Н-2

РАМАЗАНОВ Тілекқабұл Сәбитұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің ғылыми-инновациялық қызмет жөніндегі проректоры, (Алматы, Қазақстан) Н-26

ТАКИБАЕВ Нұрғали Жабағаұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан) Н-5

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, академик, Молдова Ғылым Академиясының президенті, Молдова техникалық университеті (Кишинев, Молдова) Н-42

ХАРИН Станислав Николаевич, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Қазақстан-Британ техникалық университеті (Алматы, Қазақстан) Н-10

ДАВЛЕТОВ Асқар Ербуланович, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан) Н – 12

КАЛАНДРА Пьетро, Ph.D (физика), Наноқұрылымды материалдарды зерттеу институтының профессоры (Рим, Италия) Н = 26

«ҚР ҰҒА Хабарлары. Физика-математикалық сериясы».

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 2224-346X (Print)

Меншіктенуші: «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы» РҚБ (Алматы қ.).
Қазақстан Республикасының Ақпарат және қоғамдық даму министрлігінің Ақпарат комитетінде
14.02.2018 ж. берілген № 16906-Ж мерзімдік басылым тіркеуіне қойылу туралы куәлік.

Тақырыптық бағыты: *физика-математика ғылымдары және ақпараттық техникалар саласындағы басым ғылыми зерттеулерді жариялау.*

Мерзімділігі: жылына 6 рет.

Тиражы: 300

Редакцияның мекен-жайы: 050010, Алматы қ., Шевченко көш., 28, 219 бөл., тел.: 272-13-19, 272-13-18
<http://www.physico-mathematical.kz/index.php/en/>

© Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы, 2021

Типографияның мекен-жайы: «Аруна» ЖК, Алматы қ., Муратбаева көш., 75.

Главный редактор:

МУТАНОВ Галимкаир Мутанович, доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, и.о. генерального директора «Института информационных и вычислительных технологий» КН МОН РК (Алматы, Казахстан) Н - 5

Редакционная коллегия:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нурадилович, (заместитель главного редактора), доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, советник генерального директора «Института информационных и вычислительных технологий» КН МОН РК, заведующий лабораторией (Алматы, Казахстан) Н - 7

БАЙГУНЧЕКОВ Жумадил Жанабаевич, (заместитель главного редактора), доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, Институт кибернетики и информационных технологий, кафедра прикладной механики и инженерной графики, университет Сатпаева (Алматы, Казахстан) Н - 3

ВОЙЧИК Вальдемар, доктор технических наук (физ.-мат.), профессор Люблинского технологического университета (Люблин, Польша) Н=23

БОШКАЕВ Куантай Авгазыевич, доктор Ph.D, преподаватель, доцент кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан) Н - 10

QUEVEDO Nemando, профессор, Национальный автономный университет Мексики (UNAM), Институт ядерных наук (Мехико, Мексика) Н - 28

ЖУСУПОВ Марат Абжанович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан) Н - 7

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, академик НАН Украины, Институт прикладной математики и механики (Донецк, Украина) Н - 5

МИХАЛЕВИЧ Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, академик НАН Беларуси (Минск, Беларусь) Н - 2

РАМАЗАНОВ Тлеккабул Сабитович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, проректор по научно-инновационной деятельности, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан) Н – 26

ТАКИБАЕВ Нургали Жабагаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан) Н - 5

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, доктор физико-математических наук, академик, президент Академии наук Молдовы, Технический университет Молдовы (Кишинев, Молдова) Н - 42

ХАРИН Станислав Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, Казахстанско-Британский технический университет (Алматы, Казахстан) Н – 10

ДАВЛЕТОВ Аскар Ербуланович, доктор физико-математических наук, профессор, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан) Н – 12

КАЛАНДРА Пьетро, доктор философии (Ph.D, физика), профессор Института по изучению наноструктурированных материалов (Рим, Италия) Н = 26

«Известия НАН РК. Серия физика-математическая».

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 2224-346X (Print)

Собственник: Республиканское общественное объединение «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы).

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации Министерства информации и общественного развития Республики Казахстан № 16906-Ж выданное 14.02.2018 г.

Тематическая направленность: *публикация статей по геологии и техническим наукам.*

Периодичность: 6 раз в год.

Тираж: 300

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, оф. 219, тел.: 272-13-19, 272-13-18

<http://www.physico-mathematical.kz/index.php/en/>

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2021

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75.

Editor in chief

MUTANOV Galimkair Mutanovich, doctor of technical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, acting director of the Institute of Information and Computing Technologies of SC MES RK (Almaty, Kazakhstan) H - 5

Editorial board:

KALIMOLDAYEV Maksat Nuradilovich (Deputy Editor-in-Chief), doctor in Physics and Mathematics, Professor, Academician of NAS RK, Advisor to the General Director of the Institute of Information and Computing Technologies of SC MES RK, Head of the Laboratory (Almaty, Kazakhstan) H - 7

BAYGUNCHEKOV Zhumadil Zhanabayevich, (Deputy Editor-in-Chief), doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Institute of Cybernetics and Information Technologies, Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan) H - 3

WOICIK Waldemar, Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor, Lublin University of Technology (Lublin, Poland) H=23

BOSHKAYEV Kuantai Avgazievich, PhD, Lecturer, Associate Professor of the Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan) H - 10

QUEVEDO Hemando, Professor, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Institute of Nuclear Sciences (Mexico City, Mexico) H - 28

ZHUSSUPOV Marat Abzhanovich, Doctor in Physics and Mathematics, Professor of the Department of Theoretical and Nuclear Physics, al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan) H - 7

KOVALEV Alexander Mikhailovich, Doctor in Physics and Mathematics, Academician of NAS of Ukraine, Director of the State Institution «Institute of Applied Mathematics and Mechanics» DPR (Donetsk, Ukraine) H - 5

MIKHALEVICH Alexander Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NAS of Belarus (Minsk, Belarus) H - 2

RAMAZANOV Tlekkabul Sabitovich, Doctor in Physics and Mathematics, Professor, Academician of NAS RK, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activity, al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan) H – 26

TAKIBAYEV Nurgali Zhabagaevich, Doctor in Physics and Mathematics, Professor, Academician of NAS RK, al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan) H - 5

TIGHINEANU Ion Mikhailovich, Doctor in Physics and Mathematics, Academician, Full Member of the Academy of Sciences of Moldova, President of the AS of Moldova, Technical University of Moldova (Chisinau, Moldova) H - 42

KHARIN Stanislav Nikolayevich, Doctor in Physics and Mathematics, Professor, Academician of NAS RK, Kazakh-British Technical University (Almaty, Kazakhstan) H – 10

DAVLETOV Askar Erbulanovich, Doctor in Physics and Mathematics, Professor, al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan) H - 12

CALANDRA Pietro, PhD in Physics, Professor at the Institute of Nanostructured Materials (Monterotondo Station Rome, Italy)

News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

Physical-mathematical series.

ISSN 2518-1726 (Online),

ISSN 2224-346X (Print)

Owner: RPA «National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan» (Almaty).

The certificate of registration of a periodical printed publication in the Committee of information of the Ministry of Information and Social Development of the Republic of Kazakhstan No. 16906-Ж, issued 14.02.2018

Thematic scope: *publication of papers on geology and technical sciences.*

Periodicity: 6 times a year.

Circulation: 300

*Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,
<http://www.physico-mathematical.kz/index.php/en/>*

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2021

Address of printing house: ST «Aruna», 75, Muratbayev str, Almaty.

NEWS

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

ISSN 1991-346X

Volume 3, Number 337 (2021), 156 – 166

<https://doi.org/10.32014/2020.2518-1726.58>

УДК: 524.3 - 85; 524.5

МРНТИ: 41.23.21; 41.25.29

Л.И. Шестакова¹, А.И. Кенжебекова²

¹Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан

²Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

e-mail: shest1952@mail.ru, akm_74_08@mail.ru

СУБЛИМАЦИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ ВБЛИЗИ БЕЛОГО КАРЛИКА G29-38

Аннотация. Проведены расчеты температурного баланса и орбитальной эволюции силикатных и графитовых пылевых частиц в области сублимации около белого карлика G29-38. Темп сублимации (испарения) задается температурой нагрева пылевых частиц в зависимости от расстояния до звезды, параметров материала и радиусов пылинок в пределах от 0.01 до 100 мкм. Учитывалось влияние давления радиации и эффекта торможения Пойнтинга-Робертсона на динамику пыли. В расчётах предполагается, что частицы срываются с родительских тел, движущихся по круговым орбитам.

Наши расчёты показали, что гранулы могут образовать резкую границу области сублимации на определённом расстоянии от звезды в зависимости от материала частиц. Если около звезды с параметрами, близкими к G29-38, преобладают силикатные частицы, то внутренняя граница зоны сублимации для крупных гранул радиусами $s > 5$ мкм образуется на расстоянии около $45 R_{\text{star}} \approx 0.6 R_{\text{sun}}$. Малые силикатные частицы радиусами $s < 0.1$ мкм не могут приблизиться к звезде на расстояние ближе $300 R_{\text{star}} \approx 4 R_{\text{sun}}$ из-за быстрого испарения. Если преобладают графитно-карбоновые частицы, то граница зоны сублимации для частиц радиусами $s > 0.2$ мкм возможна на расстоянии около $12.5 R_{\text{star}} \approx 0.16 R_{\text{sun}}$. Карбоновые частицы радиусами $s < 0.1$ мкм испаряются за пределами расстояния $0.6 R_{\text{sun}}$. Если согласно Rearch (2009) температура пыли $T = 950\text{K}$, то наблюдаемая часть пылевого облака (диска) соответствует расстоянию от звезды около $1 R_{\text{sun}}$, где могут существовать только крупные силикатные частицы радиусами $s > 5$ мкм или карбоновые радиусами $s > 0.5$ мкм.

Ключевые слова: белый карлик, диск обломков, сублимация (испарение), динамика пылевых зерен.

Введение. Белые карлики (БК) являются конечной стадией эволюции большинства звезд Галактики с массами от 0.07 до 5–12 масс Солнца, что составляет от 95 до 97% от всех звезд Галактики [1]. Предполагается, что перед тем как стать белыми карликами звезды проходят стадию красного гиганта и сбрасывают значительную часть своей массы, попутно уничтожая основную часть своей планетной системы, если таковая имеется. Тем не менее, существуют доказательства наличия планетарных остатков вокруг этих звезд. В частности, порядка 25% БК показывают наличие линий металлов в их атмосферах [1,2,3,4]. Кроме того, порядка 4% БК проявляют наличие избытка излучения в инфракрасной (ИК) области спектра [5,6,1]. Этот факт, наряду с результатами ИК спектроскопии, показывающими наличие линий силикатов, интерпретируется большинством исследователей как индикатор активной аккреции пыли от астероидов или комет [5,6,7]. Исследование БК с признаками загрязнения металлами особенно интересно, поскольку, скорее всего наше Солнце ожидает именно такое будущее.

В последнее десятилетие произошел значительный прогресс в изучении экзопланетных систем, благодаря таким проектам, как CoRot, Kepler, GAIA, TESS. Открыто много планет как у

звезд главной последовательности (ГП) так и у некоторых проэволюционировавших звезд. В частности в каталоге Gaia Data Release 2 (DR2) [8] имеется несколько тысяч кандидатов в БК. В работе [9] сообщается, что из анализа наблюдений миссии GAIA обнаружено 524 БК в пределах 40пк, у которых в спектре обнаружены линии щелочных металлов и других тяжелых элементов.

В работе [10] докладывается о исследовании 124 белых карликов в среднем ик диапазоне с помощью космического телескопа spitzer с использованием изображений iras. Избытки ик излучения из-за присутствия околозвездной пыли выявили у 4-х карликов, включая $zz\ psc = wd\ 2326+049 = giclas\ 29-38 = g29-38$, который является первым белым карликом такого рода. Используя оптически толстую, геометрически тонкую модель диска, в работе [10] получено, что внутренние края диска около $g\ 29-38$ находятся на расстоянии $\geq 0.1 - 0.2\ r_{sun}$ от звезды, а внешние края диска на $\approx 0,3-0,6\ r_{sun}$. Согласно [5], $g\ 29-38$ обладает двумя главными наблюдаемыми признаками присутствия внешнего вещества, причём избыток ик излучения у бк $g29-38$ является самым высоким из всех известных бк, а обилие фотосферных металлов также является одним из самых высоких. Прародитель главной последовательности $g29-38$, вероятно, был звездой $a\ c$ с массой $\approx 3,1M_{sol}$.

Согласно данным наблюдений [5], ИК избыток энергии в спектре $G29-38$ особенно выделяется вокруг длин волн 4,5 мкм и 9-11 мкм. Авторы относят континуум между 3-6 мкм аморфной углеродной пыли, а область 9-11 мкм присутствию силикатных материалов. Детальный анализ минералогического и химического состава частиц пыли около белого карлика $G\ 29-38$ выполнен в работе [6] с использованием ИК спектра от 1 до 35 мкм. Сделан вывод, что наиболее распространенными минералами вокруг $G29-38$ являются аморфный углерод и различного рода силикаты, которые преобладают во внешнем облаке.

Целью нашего исследования является моделирование переходных процессов между двумя наблюдаемыми признаками на примере звезды $G29-38$. Будут выполнены расчёты орбитальной эволюции пылевых частиц из внешнего пылевого облака, обеспечивающие аккрецию этого вещества на поверхность звезды, вследствие чего происходит обогащение атмосферы звезды тяжелыми элементами – металлами.

Параметры звезды взяты из работы [10]: температура поверхности $T_{eff} = 11600K$, масса $M=0.56M_{sun}$ и радиус $R_{star} = 0.013R_{sun}$.

Известно, что белый карлик $G29-38$ относится к классу DAV, по типу переменности к звёздам типа ZZ Ceti. Кроме того, согласно [10] его можно характеризовать как БК типа DAZd (dusty), что означает карлик (D) с водородной атмосферой (A) с присутствием металлов (Z). Добавка d (dusty) означает присутствие пыли.

Исходные данные. Для расчетов орбитальной эволюции пылевых частиц выбраны два типа материалов, которые присутствуют в межзвёздной среде: силикатный и графитовый. Из силикатных материалов мы выбрали базальт, как наиболее удовлетворяющий наблюдениям в области сублимации около Солнца [11, 12]. Подробное обоснование выбора этого материала дано в работе [13]. Для расчетов испарения задается темп сублимации, который зависит от температуры гранулы. Температура, в свою очередь, зависит от размеров частиц, материала, из которого они состоят, и расстояния до звезды.

Предполагается, что пылинки имеют форму шара и однородны по составу. Рассмотрен диапазон радиусов частиц (s) от 0.01мкм до 100мкм. В расчетах использована теория Ми [14,15], в которой используется алгебра комплексных чисел. Данные лабораторных измерений комплексных индексов рефракции $m(\lambda)=n(\lambda)+ik(\lambda)$ для интервала длин волн от $\lambda_1 = 0.0075$ мкм до $\lambda_2 = 50$ мкм взяты согласно [16,17] для базальта и [18] для графита.

Параметры материала базальта и графита и константы для расчетов испарения частиц сведены в таблице 1. Темп сублимации рассчитывается согласно [19]. Для исследования орбитальной эволюции пылевых частиц мы выбрали звезду $ZZ\ Psc = G29-38$ с признаками присутствия внешнего вещества. Параметры звезды $G29-38$ приняты согласно [10]: $R_{star}= 0.013\ R_{sun}$, $M_{wd} = 0.56\ M_{\odot}$, $T_{eff} = 11600\ K$.

Расчёты по теории Ми. Теория Ми описывает взаимодействие электромагнитных волн с частицами малых размеров с характерным масштабом, сравнимым с длиной волны. Все расчеты проведены по компьютерным кодам, составленным согласно [14] и тщательно проверены по известным опубликованным образцам расчетов [14,15].

Результаты расчётов по теории Ми зависят только от свойств материала и размеров частиц и не зависят от параметров звезды. Для расчётов теплового баланса используются эффективные факторы поглощения (Q_{abs}), а для расчётов орбитальной эволюции факторы светового давления (Q_{pre}). Результаты расчетов факторов поглощения Q_{abs} , определяющих наблюдаемый ИК спектр звезды в зависимости от длины волны, для частиц базальта и графита различных радиусов приведены на рисунках 1 и 2.

Из рисунков 1 и 2 видно, что факторы поглощения для различных размеров частиц сильно различаются между собой и изменяются на несколько порядков величины в зависимости от длины волны. На рисунке 1 выделяются максимумы вблизи длин волн 10 мкм и 20 мкм, характерные для ИК эмиссии силикатов. У частиц графита (рисунок 2) локализация максимумов сильно меняется в зависимости от размеров частиц. Величины Q_{abs} для этих материалов при $s \rightarrow \infty$ ведут себя по-разному. В случае базальта $Q_{abs} \rightarrow 1$ при увеличении радиуса частицы (рисунок 1), а для частиц графита (рисунок 2) такое поведение не характерно. В суммарном значении потери энергии в световом пучке ($Q_{ext} = Q_{abs} + Q_{sca}$) при прохождении его около частицы графита большую роль играет фактор рассеяния Q_{sca} . Например, для частицы радиусом $s=100\mu\text{м}$ величина $Q_{abs} = 0.17238$ и $Q_{sca} = 1.9678$, что в сумме составляет $Q_{ext} = 2.1402$.

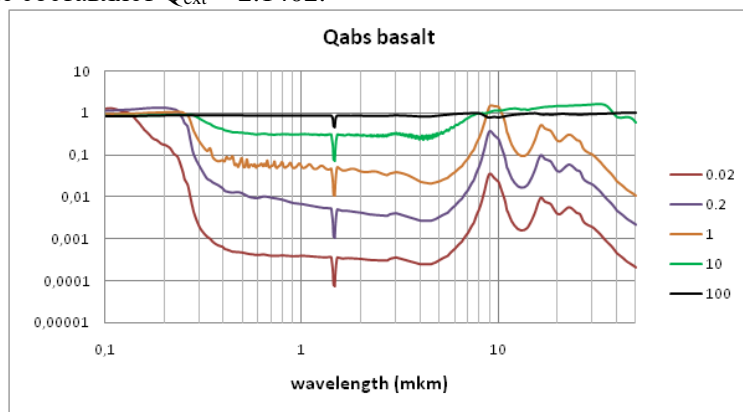


Рисунок 1 - Факторы поглощения Q_{abs} для частиц базальта различных радиусов (s), указанных в микрометрах

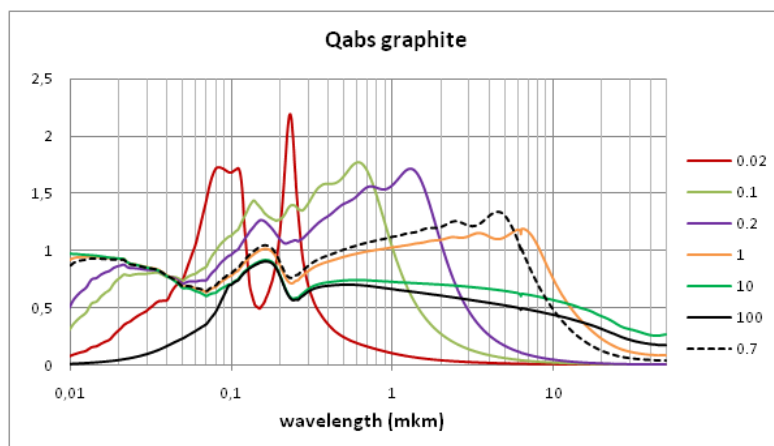


Рисунок 2 - Факторы поглощения Q_{abs} для частиц графита различных радиусов (s), указанных в микрометрах

Наблюдаемый у звезды G29-38 избыток ИК излучения в области $\lambda \approx 4.5$ мкм, который авторы работы [5] относят к частицам углеродной пыли, может быть обеспечен частицами радиусом около 0.7 мкм (рисунок 2).

Тепловой баланс и испарение частиц. Для расчета температуры пылинок используется естественное физическое условие теплового равновесия: поглощаемая энергия должна быть равна излучаемой энергии плюс потери на испарение. Использована кинетическая теория газов. Свойства материалов собраны по данным [19, 20, 21] для базальта с использованием данных таблиц [22]. Данные по графиту взяты из [18].

ТАБЛИЦА 1 - СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В РАСЧЕТАХ

вещество	δ г/см ³	μ	H эрг/г	P _m дин/см ²	T ₀ К	H _L , 10 ⁻²⁰ дж/мол	C ₂ (T ₀ , H _L)	C ₃ (H _L)
базальт	2.7	67.0	7.12e10	1.07e14	2284	79.2	10.915	24928.3
графит	1.95	12.0	7.27e11	4.31e16	3373	144.9	13.5129	45579.12

Все данные после пересчета и дополнения сведены в таблицу 1. Метод расчёта теплового баланса описан нами в [13]. В таблице 1 дано: δ – плотность материала, μ – молекулярный вес в а.е.м. H – латентная теплота на единицу массы или удельная теплота парообразования. Пересчитать H(эрг/г) в H_L(дж/молекула) легко из очевидного соотношения: H_L = (H × 10⁻⁴) (μ_H) = 1.66057 × 10⁻³¹ μH, P_m = 1330 exp[H_L/(kT₀)] дин/см², откуда T₀ = H_L/[kln(P_m/1330)]. Темп сублимации рассчитывается согласно [19]:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{0.0408}{\delta} P \sqrt{\frac{\mu}{T_g}} \text{ см/сек}, \quad (1)$$

где T_g – температура пылинки, P- давление насыщенных паров.

Для вычисления давления насыщенных паров P, от которого зависит ds/dt, служит формула: lg(P) = C₂ – C₃/T_g, с коэффициентами C₂ и C₃, приведенными в таблице 1, где P выражено в торах.

На рисунке 3 представлено распределение температур базальтовых частиц с расстоянием относительно звезды G29-38. Из рисунка 3 видно, что реальные температуры частиц радиусами меньше 100 мкм на больших расстояниях от звезды, превышающих 15R_{star} ≈ 0.2 R_{sun} превосходят температуры, полученные в чернотельном приближении (bb – штриховая линия). Во внутренней зоне, ближе 15R_{star} от звезды, температуры всех частиц значительно ниже чернотельных, что объясняется охлаждением за счёт испарения.

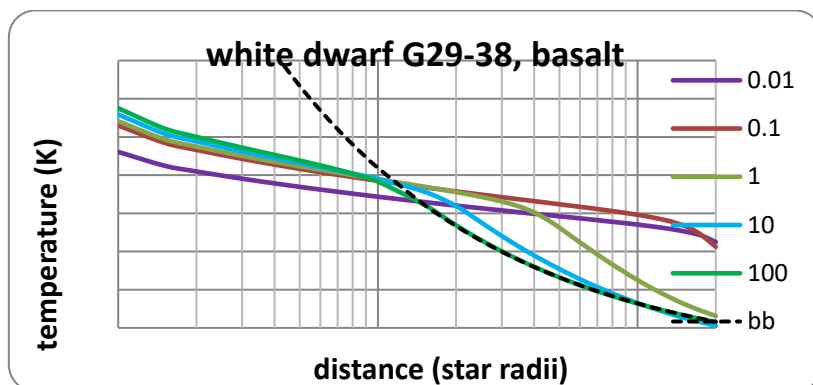


Рисунок 3 - Температура частиц базальта радиусами 0.01, 0.1, 1, 10, 100 мкм в зависимости от расстояния до звезды с T_{eff} = 11600K, bb – черное тело



Рисунок 4 - Температура частиц графита радиусами 0.01, 0.1, 1, 10 мкм в зависимости от расстояния до звезды с $T_{\text{eff}} = 11600\text{K}$, bb – черное тело

Аналогичные расчёты температуры, проведённые для графитовых частиц (рисунок 4), показали несколько иные результаты. Понижение температуры графитовых частиц на близких расстояниях от звезды ($< 10R_{\text{star}}$) выражено не так сильно, как для базальтовых частиц (рисунок 3) и на поверхности звезды они имеют температуры немного выше 4000K, в то время, как все базальтовые частицы холоднее 3500K. На больших расстояниях от звезды, превышающих $5R_{\text{star}}$, (рисунок 4) графитовые частицы микронных размеров от 1мкм и выше показывают чернотельные температуры, при этом субмикронные частицы радиусами $s = 0.01, 0.1\text{мкм}$ показывают температуры выше чернотельной.

Световое давление. Расчет среднего фактора радиационного давления и отношения силы давления к силе тяготения $\beta = F_{\text{pre}}/F_{\text{grav}}$ проводился в зависимости от радиуса пылинки. Эти параметры не зависят от расстояния до звезды. Метод расчёта светового давления описан нами в работе [13] и более ранних работах, опубликованных в Известиях НАН РК [23].

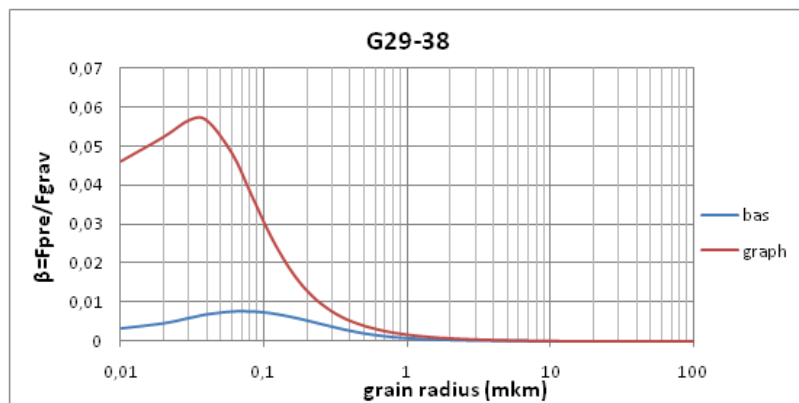


Рисунок 5 - Отношение давления радиации к силе тяготения в зависимости от радиусов частиц, bas - базальт, graph – графит.

Как видно из рисунка 5, максимум светового давления приходится на субмикронные частицы. Графитовые частицы сильнее подвержены световому давлению.

Орбитальная эволюция. Алгоритм расчета орбитальной эволюции описан нами ранее [13, 23]. В данной работе мы предполагаем, что частицы, сорвавшиеся с родительского тела, движутся по круговым орбитам. Орбитальная эволюция частиц зависит от исходного стартового расстояния и начального радиуса частиц. Из-за изменения соотношения сил по мере испарения частицы ее орбита

постоянно меняется. На рисунке 6 приведен пример орбитальной эволюции частицы радиусом 1 мкм, стартующей с круговой орбиты с разных расстояний от звезды.

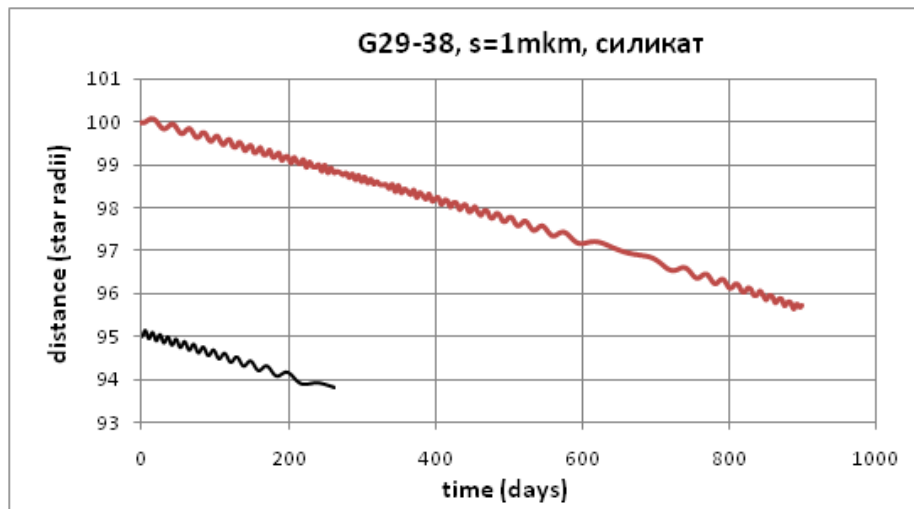


Рисунок 6 - Орбитальная эволюция частиц базальта радиусом $s = 1$ мкм, стартовые расстояния $95R_{\text{star}}$ и $100 R_{\text{star}}$

Расчеты показали (рисунок 6), что исходная круговая орбита деформируется, приобретает небольшую эллиптичность из-за действия светового давления.

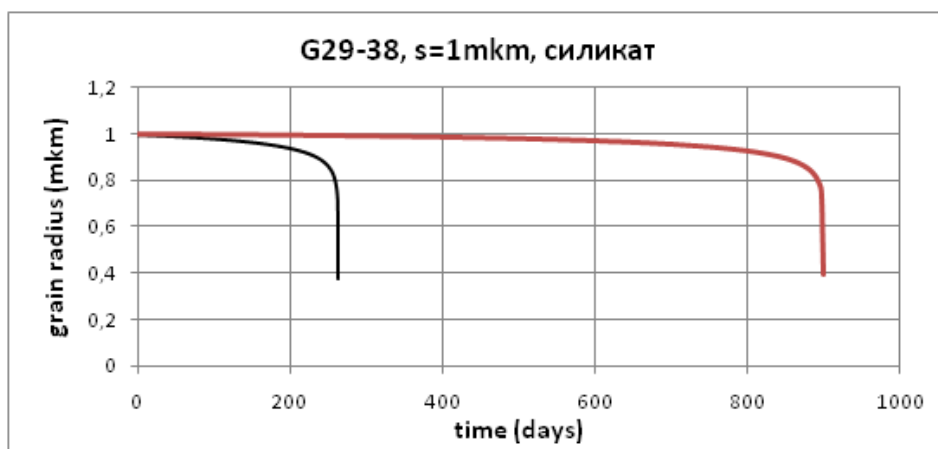


Рисунок 7 - Изменение размеров частиц базальта радиусом $s = 1$ мкм в процессе испарения, стартовые расстояния: $95 R_{\text{star}}$ (черная линия) и $100 R_{\text{star}}$ (красная линия)

Из рисунка 7 видно, что темп испарения частицы зависит от стартового расстояния. Различие температур на расстояниях $95R_{\text{star}}$ и $100R_{\text{star}}$ кажется небольшим: 1171К и 1126К соответственно, но при этом темп испарения ds/dt изменяется почти на порядок величины. Исходя из этих соображений, для частицы радиусом 1 мкм, находящейся в свободном движении на круговой орбите, мы считаем внутренней границей зоны сублимации величину $96R_{\text{star}}$, полученную с более далёкого старта (конец красной линии на рисунках 6 и 7).

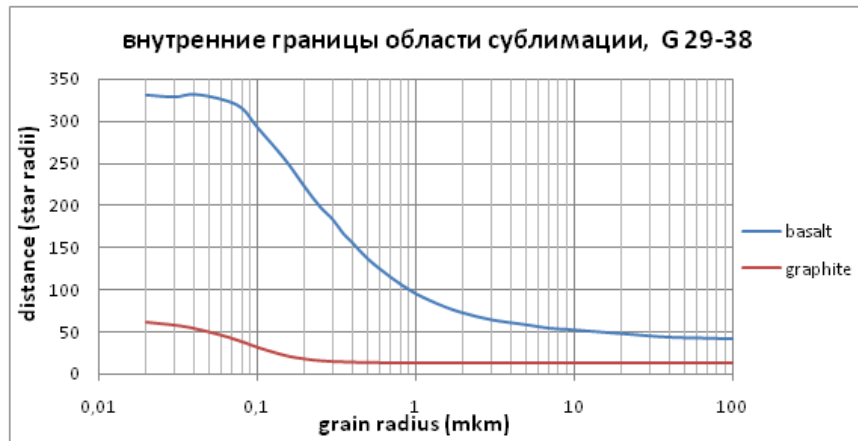


Рисунок 8 - Расстояния от звезды внутренних границ области сублимации частиц базальта и графита при свободном движении по круговым орбитам

Как видно из рисунка 8 крупные силикатные частицы радиусами $s > 10$ мкм испаряются на расстояниях $(40-50) R_{\text{star}} \approx (0.52-0.65)R_{\text{sun}}$. Малые частицы радиусами $s < 0.1$ мкм также образуют некую границу области сублимации и испаряются на расстоянии около $330 R_{\text{star}} \approx 4,3 R_{\text{sun}}$. Поскольку единой границы внутренней зоны сублимации для частиц всех размеров не существует, очевидно, что чернотельное приближение для поиска внутренней границы зоны сублимации пылевых частиц недостаточно. Частицы, движущиеся по круговым орбитам, начинают испаряться при достижении температур превышающих 1130К. Активное испарение происходит при температурах 1300-1500К, после чего частицы после многодневной эволюции на круговых орбитах практически мгновенно испаряются (рисунок 7).

Поведение частиц со свойствами графита сильно отличается от силикатов.

Во-первых, все частицы, включая частицы малых субмикронных размеров, испаряются внутри расстояний $60 R_{\text{star}} \approx 0.78 R_{\text{sun}}$.

Во-вторых, наблюдается довольно чёткая стабилизация границы полного испарения для частиц радиусами $s > 0.2$ мкм на расстоянии около $12.5 r_s \approx 0.16 R_{\text{sun}}$.

В – третьих, частицы начинают испаряться при достижении более высоких температур превышающих 1820К. Активное испарение происходит при температурах 2000-2200К, после чего частицы практически мгновенно испаряются при температурах, близких к 2500-2800К.

Дискуссия. Наши расчёты показали, что пыль, покидающая родительские тела с круговых орбит, по достижении области сублимации может образовывать резкие границы полного испарения на определённых расстояниях от звезды в зависимости от материала частиц.

Если около звезды с параметрами, близкими к G29-38 преобладают силикатные частицы, то на расстоянии около $0.6 R_{\text{sun}}$ от звезды могут существовать избытки ИК излучения с температурой около 1200К-1300К, и на расстоянии около $12.5 R_{\text{star}} \approx 0.16 R_{\text{sun}}$ с температурой около 2500-2800К, если преобладают графитно-карбоновые частицы. Такие избытки излучения могут стать наблюдаемыми, если внешняя зона оптически тонкая и не может экранировать излучение внутренних областей.

Поскольку у звезды G29-38 фактически наблюдается пыль с более низкой температурой: 290-890К [5], либо 950К [6], то это может быть дополнительным свидетельством наличия внешнего оптически толстого диска или плотной оболочки, экранирующей внутреннюю область сублимации пыли.

В работе [10] в таблице 1 приведены данные для 4-х белых карликов, включая G29-38. В предположении $T_{\text{subl}} = 2000\text{К}$ в этой работе в чернотельном приближении дана оценка $R_{\text{sub,BB}} = 0.18 R_{\text{sun}}$, что для радиуса звезды $R_{\text{star}} = 0.013 R_{\text{sun}}$ даёт величину $R_{\text{sub,BB}} = 13.8 R_{\text{star}}$. Удивительно, что эти

приблизительные оценки практически совпадают с нашими расчётами для частиц графита радиусами $s > 0.2$ мкм, для которых согласно нашим расчётам получена довольно чёткая стабилизация границы полного испарения на расстоянии около $12.5 R_{\text{star}} \approx 0.16 R_{\text{sun}}$.

Наблюдаемый у звезды G29-38 избыток излучения в ИК области на $\lambda \approx 4.5$ мкм, который авторы работы [5] относят к частицам углеродной пыли, может быть обеспечен частицами радиусом около 0.7 мкм (рисунок 2).

Наши расчёты согласуются с утверждением, данным в [6], что внешние части пылевого облака или диска около звезды G29-38 могут состоять из силикатов. По нашим расчётам до расстояний около $50 R_{\text{star}}$ могут проникать только наиболее крупные частицы радиусами 10-100 мкм, силикатные частицы субмикронных размеров испаряются за пределами зоны $300 R_{\text{star}}$. Поскольку все рассмотренные нами частицы, находящиеся на круговых орбитах, радиусами от 0.01 до 100 мкм подвержены действию эффекта Пойнтинга-Робертсона, то они постепенно в течение нескольких лет выпадают на звезду. В этом случае для поддержания пылевого облака требуется источник, подпитывающий пылью окрестности звезды. Как минимум это может быть диск обломков, как аналог пояса астероидов в Солнечной системе, порождающий зодиакальную пыль. Сам по себе факт существования БК, сохранивших остатки планетной системы, удивителен и говорит о том, что в жизни звезды период потери массы после сброса оболочки заканчивается и наступает время «собирать камни», накопившиеся в межзвёздной среде на пограничных территориях между звёздами и в своеобразных облаках Оорта.

Работа выполнена при поддержке гранта № AP08956243 Министерства Образования и Науки Республики Казахстан.

Л.И. Шестакова¹, А.И. Кенжебекова²

¹В.Г.Фесенков атындағы астрофизикалық институт, Алматы, Қазақстан

²әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

e-mail: shest1952@mail.ru, akm_74_08@mail.ru

G29-38 АҚ ЕРГЕЖЕЙЛІ ЖҰЛДЫЗДЫҢ АЙНАЛАСЫНДАҒЫ ТОЗАНДЫ БӨЛШЕКТЕРДІҢ СУБЛИМАЦИЯЛАНУЫ

Аннотация. G29-38 ақ ергежейлі жұлдыздың айналасындағы сублимация аймағында силикат және графит тозанды бөлшектерінің температуралық тепе-теңдігі мен орбиталық эволюциясы есептелді. Сублимация (булану) қарқыны жұлдызға дейінгі қашықтыққа, материал параметрлеріне тәуелді радиустары 0.01-ден 100 мкм-ге дейінгі аралықтағы тозанды бөлшектердің қыздыру температурасы арқылы анықталады. Тозанды бөлшектің динамикасына радиация қысымы және Пойнтинг-Робертсон тежеу эффектісінің әсері ескерілді. Есептеулерде бөлшектердің шығу көзі дөңгелек орбиталармен қозғалып жүрген денелер деп болжанады.

Біздің есептеулеріміз тозанды бөлшектердің материалына байланысты жұлдыздан белгілі бір қашықтықта сублимация аймағының айқын шекарасын құра алатындығын көрсетті. Егер G29-38-ге параметрлері жақын жұлдыздың жанында силикат бөлшектері басым болса, онда сублимация аймағының ішкі шекарасы радиусы $s > 5$ мкм болатын үлкен тозанды бөлшектер үшін шамамен $45R_{\text{star}} \approx 0.6R_{\text{sun}}$ қашықтықта пайда болады. Радиусы $s < 0.1$ мкм кішкентай силикат бөлшектері тез буланатындықтан, жұлдызға $300R_{\text{star}} \approx 4R_{\text{sun}}$ жақын қашықтықтан жақындай алмайды. Егер графит-карбон бөлшектері басым болса, онда сублимация аймағының шекарасы радиусы $s > 0.2$ мкм бөлшектер үшін шамамен $12.5 R_{\text{star}} \approx 0.16 R_{\text{sun}}$ қашықтықта болуы мүмкін. Радиусы $s < 0.1$ мкм болатын карбон бөлшектері $0.6 R_{\text{sun}}$ қашықтығынан тыс буланып кетеді. Егер Rearch (2009) мәліметтері бойынша тозанды бөлшектің температурасы $T = 950\text{K}$ болса, онда байқалатын тозанды

бұлттың (дискінің) бөлігі жұлдыздан шамамен $1R_{\text{sun}}$ қашықтыққа сәйкес келеді, онда радиусы $s > 5$ мкм карбон немесе радиусы $s > 0.5$ мкм ірі силикат бөлшектері ғана өмір сүре алады.

Түйін сөздер: ақ ергежейлі, тозаңды дискі, сублимация (булану), тозаңды бөлшектер динамикасы.

L.I. Shestakova¹, A.I. Kenzhebekova²

¹Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

e-mail: shest1952@mail.ru, akm_74_08@mail.ru

SUBLIMATION OF DUST PARTICLES NEAR THE WHITE DWARF G29-38

Abstract. The temperature balance and orbital evolution of silicate and graphite dust particles in the sublimation region near the white dwarf G29-38 are calculated. The rate of sublimation (evaporation) is set by the heating temperature of the dust particles, depending on the distance to the star, the material parameters and the radii of the dust particles in the range from 0.01 to 100 microns. The influence of radiation pressure and the Poynting-Robertson braking effect on the dust dynamics was taken into account. The calculations assume that the particles break off from the parent bodies moving in circular orbits.

Our calculations have shown that the granules can form a sharp boundary of the sublimation region at a certain distance from the star, depending on the particle material. If silicate particles predominate near a star with parameters close to G29-38, then the inner boundary of the sublimation zone for large granules with radii $s > 5$ mkm is formed at a distance of about $45 R_{\text{star}} \approx 0.6 R_{\text{sun}}$. Small silicate particles with radii $s < 0.1$ mkm cannot approach the star at a distance closer than $300R_{\text{star}} \approx 4 R_{\text{sun}}$ due to rapid evaporation. If graphite-carbon particles predominate, then the boundary of the sublimation zone for particles with radii $s > 0.2$ mkm is possible at a distance of about $12.5 R_{\text{star}} \approx 0.16 R_{\text{sun}}$. Carbon particles with radii $s < 0.1$ mkm evaporate beyond a distance of $0.6 R_{\text{sun}}$. If, according to Reach (2009), the dust temperature is $T = 950\text{K}$, then the observed part of the dust cloud (disk) corresponds to a distance from the star of about $1R_{\text{sun}}$, where only large silicate particles with radii $s > 5$ microns or carbon particles with radii $s > 0.5$ microns can exist.

Key words: white dwarf, debris disk, sublimation (evaporation), dynamics of dust grains.

Information about authors:

Shestakova Lyubov Illarionovna, candidate of physico-mathematical science, Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan; shest1952@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2223-5332>

Kenzhebekova Akmaral Igilikyzy, PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; akm_74_08@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0223-0216>

REFERENCES

- [1] Veras D. (2016) Post-main-sequence planetary system evolution, R. Soc. Open sci. 3: 150571. <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.150571>
- [2] Xu S., Jura M., Koester D., Klein B., Zuckerman B. (2014) Elemental Compositions of Two Extrasolar Rocky Planetesimals, The Astrophysical Journal, 783: 79-95. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/783/2/79>
- [3] Jura M., Xu S. (2013) Extrasolar refractory-dominated planetesimals: an assessment, The Astronomical Journal, 145:30 -37. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/145/2/30>
- [4] Jura M., Young E.D. (2014) Extrasolar cosmochemistry, Annu. Rev. Earth Planet Sci., 42:45–67. doi:10.1146/annurev-earth-060313-054740.
- [5] Reach W.T., Kuchner M.J., von Hippel T. et al. (2005) The Dust Cloud around the White Dwarf G29-38, The Astrophysical Journal, 635: L161-164.

- [6] Reach W.T., Lisse C., von Hippel T., Mullally F. (2009) The dust cloud around the white dwarf g 29-38. II. Spectrum from 5 to 40 μm and mid-infrared photometric variability, *The Astrophysical Journal*, 693:697–712. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/693/1/697>
- [7] Redfield S., Farihi J., Cauley P.W. et al. (2017) Spectroscopic Evolution of Disintegrating Planetesimals: Minute to Month Variability in the Circumstellar Gas Associated with WD 1145+017, *The Astrophysical Journal*, 839:42-53. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa68a0>
- [8] Gaia Data Release 2 (DR2) <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr2>
- [9] Hollands M.A., Tremblay P.E., Gansicke B.T. et al. (2021) Alkali metals in white dwarf atmospheres as tracers of ancient planetary crusts, *Nature Astronomy*, 25. <https://doi:10.1038/s41550-020-01296-7>
- [10] von Hippel T., Kuchner M.J., Kilic M. et al. (2007) The new class of dusty daz white dwarfs , *The Astrophysical Journal*, 662:544–551. <https://doi:10.1086/518108>
- [11] Shestakova L.I., Demchenko B.I. (2016) Results of Observations of the dust distribution in the F-corona of the Sun, *Solar System Research*, 50:143 – 160. <http://doi:10.1134/S0038094616020040>
- [12] Shestakova L.I., Demchenko B.I. (2018) Orbital Evolution of Dust Particles in the Sublimation Zone near the Sun, *Solar System Research*, 52:153–167. <https://doi:10.1134/S0038094618010082>
- [13] Shestakova L.I., Demchenko B.I., Serebryanskiy A.V. (2019) On the orbital evolution of dust grains in the sublimation region around WD1145+017, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487:3935–3945. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz1598>
- [14] Boren C.F., Hafmen D.R. (1983) *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. John Wiley & Sons Inc., USA. ISBN: 978047129340
- [15] Matsumura M., Seki M. (1985) Polarization Efficiency and Phase Function, Calculated on the Basis of the Mie Theory, *The Science Reports of the Tohoku University, Eighth Series*, 6: 11-48. <https://ui.adsabs.harvard.edu/#abs/1985SRToh...6...11M/abstract>
- [16] Lamy P.L. (1978) Optical properties of silicates in the far ultraviolet, *Icarus*, 34: 68-75. [https://doi:10.1016/0019-1035\(78\)90126-4](https://doi:10.1016/0019-1035(78)90126-4)
- [17] Pollack J.B., Toon O.B., Khare B.N. (1973) Optical properties of some terrestrial rocks and glasses, *Icarus*, 19: 372-389. [https://doi:10.1016/0019-1035\(73\)90115-2](https://doi:10.1016/0019-1035(73)90115-2)
- [18] Draine B.T. (1985) Tabulated optical properties of graphite and silicate grains, *Ap.J.S*, 57:587-594. <https://doi:10.1086/191016>
- [19] Lamy P.L. (1974b) Interaction of interplanetary dust grains with the solar radiation field, *Astron. Astrophys.* 35: 197-207. <https://ui.adsabs.harvard.edu/#abs/1974A&A...35..197L/abstract>
- [20] Lamy P.L. (1974a) The Dynamics of Circum-solar Dust Grains, *Astron. Astrophys.*, 33: 191-194. <https://ui.adsabs.harvard.edu/#abs/1974A&A...33..191L/abstract>
- [21] Mukai T., Yamamoto T. (1979) A Model of the Circumsolar Dust Cloud, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 31: 585-596. <https://ui.adsabs.harvard.edu/#abs/1979PASJ...31..585M/abstract>
- [22] Kobayashi H., Kimura H., Watanabe S. et al. (2011) Sublimation temperature of circumstellar dust particles and its importance for dust ring formation, *Earth, Planets and Space*, 63: 1067-1075. <https://doi:10.5047/eps.2011.03.012>
- [23] Shestakova L.I., Demchenko B.I. (2013) Orbital Evolution of Dust Particles in the field of sublimation near solar-type stars, *News of NAS RK, Series of physical and mathematical, [Izvestija NAN RK, serija fizicheskaja i matematicheskaja]*, 5:77-87. <http://physics-mathematics.kz/index.php/en/chive> ISSN 1991-346X (in Russ.)

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Veras D. (2016) Post-main-sequence planetary system evolution, *R. Soc. Open sci.* 3: 150571. <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.150571>

- [2] Xu S., Jura M., Koester D., Klein B., Zuckerman B. (2014) Elemental Compositions of Two Extrasolar Rocky Planetesimals, *The Astrophysical Journal*, 783: 79-95. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/783/2/79>
- [3] Jura M., Xu S. (2013) Extrasolar refractory-dominated planetesimals: an assessment, *The Astronomical Journal*, 145:30 -37. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/145/2/30>
- [4] Jura M., Young E.D. (2014) Extrasolar cosmochemistry, *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 42:45–67. doi:10.1146/annurev-earth-060313-054740.
- [5] Reach W.T., Kuchner M.J., von Hippel T. et al. (2005) The Dust Cloud around the White Dwarf G29-38, *The Astrophysical Journal*, 635: L161-164.
- [6] Reach W.T., Lisse C., von Hippel T., Mullally F. (2009) The dust cloud around the white dwarf g 29-38. II. Spectrum from 5 to 40 μm and mid-infrared photometric variability, *The Astrophysical Journal*, 693:697–712. <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/693/1/697>
- [7] Redfield S., Farihi J., Cauley P.W. et al. (2017) Spectroscopic Evolution of Disintegrating Planetesimals: Minute to Month Variability in the Circumstellar Gas Associated with WD 1145+017, *The Astrophysical Journal*, 839:42-53. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa68a0>
- [8] Gaia Data Release 2 (DR2) <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr2>
- [9] Hollands M.A., Tremblay P.E., Gansicke B.T. et al. (2021) Alkali metals in white dwarf atmospheres as tracers of ancient planetary crusts, *Nature Astronomy*, 25. <https://doi:10.1038/s41550-020-01296-7>
- [10] von Hippel T., Kuchner M.J., Kilic M. et al. (2007) The new class of dusty daz white dwarfs , *The Astrophysical Journal*, 662:544–551. <https://doi:10.1086/518108>
- [11] Shestakova L.I., Demchenko B.I. (2016) Results of Observations of the dust distribution in the F-corona of the Sun, *Solar System Research*, 50:143 – 160. <http://doi:10.1134/S0038094616020040>
- [12] Shestakova L.I., Demchenko B.I. (2018) Orbital Evolution of Dust Particles in the Sublimation Zone near the Sun, *Solar System Research*, 52:153–167. <https://doi:10.1134/S0038094618010082>
- [13] Shestakova L.I., Demchenko B.I., Serebryanskiy A.V. (2019) On the orbital evolution of dust grains in the sublimation region around WD1145+017, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487:3935–3945. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz1598>
- [14] Boren C.F, Hafmen D.R. (1983) *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. John Wiley & Sons Inc., USA. ISBN: 978047129340
- [15] Matsumura M., Seki M. (1985) Polarization Efficiency and Phase Function, Calculated on the Basis of the Mie Theory, *The Science Reports of the Tohoku University, Eighth Series*, 6: 11-48. <https://ui.adsabs.harvard.edu/#abs/1985SRToh...6...11M/abstract>
- [16] Lamy P.L. (1978) Optical properties of silicates in the far ultraviolet, *Icarus*,34: 68-75. [https://doi:10.1016/0019-1035\(78\)90126-4](https://doi:10.1016/0019-1035(78)90126-4)
- [17] Pollack J.B., Toon O.B., Khare B.N. (1973) Optical properties of some terrestrial rocks and glasses, *Icarus*, 19: 372-389. [https://doi:10.1016/0019-1035\(73\)90115-2](https://doi:10.1016/0019-1035(73)90115-2)
- [18] Draine B.T. (1985) Tabulated optical properties of graphite and silicate grains, *Ap.J.S*, 57:587-594. <https://doi:10.1086/191016>
- [19] Lamy P.L. (1974b) Interaction of interplanetary dust grains with the solar radiation field, *Astron. Astrophys.* 35: 197-207. <https://ui.adsabs.harvard.edu/#abs/1974A&A....35..197L/abstract>
- [20] Lamy P.L. (1974a) The Dynamics of Circum-solar Dust Grains, *Astron. Astrophys.*,33: 191-194. <https://ui.adsabs.harvard.edu/#abs/1974A&A....33..191L/abstract>
- [21] Mukai T., Yamamoto T. (1979) A Model of the Circumsolar Dust Cloud, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 31: 585-596. <https://ui.adsabs.harvard.edu/#abs/1979PASJ...31..585M/abstract>
- [22] Kobayashi H., Kimura H., Watanabe S. et al. (2011) Sublimation temperature of circumstellar dust particles and its importance for dust ring formation, *Earth, Planets and Space*, 63: 1067-1075. <https://doi:10.5047/eps.2011.03.012>
- [23] Shestakova L.I, Demchenko B.I. (2013) Orbital Evolution of Dust Particles in the field of sublimation near solar-type stars, *News of NAS RK, Series of physical and mathematical, [Izvestija NAN RK, serija fisicheskaja i matematicheskaja]*,5:77-87. <http://physics-mathematics.kz/index.php/en/chive> ISSN 1991-346X (in Russ.)

**Publication Ethics and Publication Malpractice
in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

(Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайтах:

[www:nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)

<http://physics-mathematics.kz/index.php/en/archive>

ISSN 2518-1726 (Online), ISSN 1991-346X (Print)

Редакторы: *М.С. Ахметова, Р.Ж. Мрзабаева, Д.С. Аленов*
Верстка на компьютере *В.С. Зикирбаева*

Подписано в печать 12.06.2021.
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.
11 п.л. Тираж 300. Заказ 3.