

FTAMP 29.27.03, 29.27.47

<https://doi.org/10.26577/JPEOS.2024.v26-i2-a3>**А.И. Кенжебекова*** , **С.К. Коданова** 

ЭТФФЗИ, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы қ., Қазақстан

*e-mail: kenzhebekova.A@kaznu.kz

ТЫҒЫЗ ПЛАЗМАДА СУТЕГІ-КРЕМНИЙ ЖӘНЕ СУТЕГІ-ГРАФИТ ҚОСПАЛАРЫ ҮШІН ДИФФУЗИЯ КОЭФФИЦИЕНТІН ЗЕРТТЕУ

Тығыз сутегі бойынша ыстық тығыз материя мен инерциялық ұстап тұратын термоядролық синтез бойынша жүргізілген теориялық және эксперименттік зерттеулер қазіргі күнде өте маңызды болып табылады. Сондай-ақ, бұл алып планеталардың ішкі динамикасын, жұлдыздар маңындағы заттың аккрециясын, радиациялық қысымның әсерін және олардың ішкі құрылымындағы конвекция және диффузия процестері мен спектрлік эволюциясын тереңірек түсінуге мүмкіндік береді. Тығыз ортадағы жылу тасымалдау және диффузия процестерін зерттеуде металлдық сутегі негізгі рөл атқарады. Ол ғылым мен техникада асқын өткізгіш ретінде маңызды практикалық қолданыстарға ие бола алады. Бұл жұмыста тығыз сутекті плазмада өтетін диффузия процесі зерттеледі. Дебай потенциалы негізінде тығыз плазма үшін плазманың идеалды емес параметрінің әр түрлі мәндері үшін диффузия коэффициенттері Чепман-Энског әдісімен сутекті плазмадағы кремний және көміртекті материалдары үшін бағаланды. Дебай потенциалы негізінде алынған нәтижелер молекулалық динамика, AA-TCP (average-atom, two-component plasma model) модельдерімен салыстырғанда $\Gamma < 1$ әлсіз байланыс шегінде жақсы сәйкестік табады.

Түйін сөздер: диффузия коэффициенті, сутегі-кремний, сутегі-графит, Чепман-Энског әдісі

A.I. Kenzhebekova*, S.K. Kodanova

Research Institute of Experimental and Theoretical Physics,

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: kenzhebekova.A@kaznu.kz

Study of the diffusion coefficient for hydrogen-silicon and hydrogen-graphite mixtures in dense plasma

Research in the field of hot dense matter and inertial confinement of nuclear fusion is gaining increasing importance in modern science. It also allows for a deeper understanding of the internal dynamics of giant planets, accretion of matter near stars, the influence of radiation pressure, including convection and diffusion processes in their internal structure, and spectral evolution. Metallic hydrogen plays a key role in studying heat transfer and diffusion processes in dense environments. It has significant practical applications, potentially being used as a superconductor in science and technology. This work investigates diffusion processes in dense hydrogen plasma. Using the Debye potential model, diffusion coefficients were calculated for different values of the plasma non-ideality parameter using the Chapman-Enskog method. Special attention was given to the interaction of plasma with materials based on silicon and graphite. The results obtained using the Debye potential show good agreement with molecular dynamics models and AA-TCP (average-atom two-component plasma) models in the regime of weak interactions, where $\Gamma < 1$. This confirms the reliability of the method and its applicability for analyzing weakly bound systems.

Key words: diffusion coefficient, hydrogen-silicon, hydrogen-graphite, Chapman-Enskog method.

А.И. Кенжебекова*, С.К. Коданова

НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

*e-mail: kenzhebekova.A@kaznu.kz

Исследование коэффициента диффузии смесей водород-кремний и водород графит в плотной плазме

Исследования в области горячей плотной материи и инерциального удержания термоядерного синтеза приобретают всё большее значение в современной науке. А также позволяет глубже понять внутреннюю динамику гигантских планет, аккрецию вещества вблизи звёзд, влияние радиационного давления, включая процессы конвекции и диффузии в их внутренней структуре и спектральную эволюцию. Ключевую роль в изучении процессов теплопереноса и диффузии в плотной среде играет металлический водород. Оно имеет важного практического применения, который может быть использован как сверхпроводник в науке и технике. В данной работе исследуются процессы диффузии в плотной плазме водорода. С использованием модели потенциала Дебая были рассчитаны коэффициенты диффузии для различных значений параметра неидеальности плазмы методом Чепмена-Энскога. Особое внимание уделялось взаимодействию плазмы с материалами на основе кремния и углерода. Результаты, полученные на основе потенциала Дебая, демонстрируют хорошее совпадение с моделями молекулярной динамики и AA-TSP (среднеатомной двухкомпонентной плазмы) в области слабых взаимодействий, где $\Gamma < 1$. Это подтверждает достоверность методики и её применимость для анализа слабосвязанных систем.

Ключевые слова: коэффициент диффузии, водород-кремний, водород-графит, метод Чепмена-Энскога.

Кіріспе

Соңғы жылдары сутегінің жоғары қысым мен температурадағы күйін қарастыруға зерттеушілердің үлкен назары аударылуда. Сутегі – әлемдегі ең көп таралған элемент және біздің Күн жүйесіндегі Юпитер мен Сатурнның негізгі бөлігін құрайды, сонымен қатар әртүрлі экзопланеталардың негізгі құрамдас бөлігі болып табылады [1]. Тығыз сутегінің қасиеттерін зерттеу Юпитер, Сатурн сияқты газ алыптарында және Күн жүйесінен тыс әртүрлі экзопланеталарда қандай процестер болуы мүмкін екенін сенімді бағалауға әкеледі [2-4]. Соңғы жылдары әлемдік ғылыми қоғамдастық фазалық диаграммадағы «плазмалық фазалық ауысу» (PPT) деп аталатын сутегідегі ауысуларға қызығушылық танытты [5-7]. Егер мұндай ауысу жеткілікті жоғары температурада болса, онда алып планеталардың ішінде өткізгіш ядроны оқшаулағыш мантиядан бөлетін бет болуы мүмкін. Соңғы жұмыс [8] сутегінің фазалық ауысулар тізбегі арқылы өтетінін болжайды, яғни. сутегі төмен тығыздықтағы молекулалық кристалдан жоғары тығыздықтағы атомдық кристалға айналады, содан кейін температура жоғарылағанда ол алдымен балқиды, содан кейін плазмалық күйге айналады.

Тығыз сутегі бойынша ыстық тығыз материя мен инерциялық ұстап тұратын термоядролық синтез бойынша жүргізілген теориялық және

эксперименттік зерттеулер қазіргі күнде өте маңызды. Ливермор зертханасында [9] жоғары қысым мен температура жағдайында алынған металлдық сутегі Юпитер мен Сатурн сияқты алып планеталардың ішкі құрылымындағы зат күйін модельдеуге мүмкіндік берді. Сонымен қатар, металлдық сутегі тығыз ортада жылу тасымалдау және диффузия процестерін зерттеуде негізгі материал болып табылады, бұл алып планеталардың ішкі динамикасын жақсырақ түсінуге ықпал етеді.

Тығыз сутегін зерттеуде тығыздық функционалының теориясы (DFT) және кванттық Монте-Карло әдісі (QMC) сияқты заманауи есептеу әдістері қолданылады [10,11]. Бұл әдістер термодинамикалық, оптикалық және тасымалдау қасиеттерін, соның ішінде массалық және электрондық диффузия процестерін зерттеуге мүмкіндік береді. Мұндай тәсілдер қысым мен температураның үлкен диапазонында күй теңдеулерін құруға және оларды ИТС пен планеталық физикаға қолдануға көмектеседі.

Зерттеулерде экрандалған потенциалдар мен алмасу-корреляция әсерлеріне ерекше көңіл бөлінеді, олар тығыз плазмадағы күрделі өзара әрекеттесулерді есепке алады. Мұндай модельдерді қолдану жоғары қысым мен температура кезінде жылуөткізгіштік, электрөткізгіштік және диффузия сияқты құбылыстарды түсіндіруге мүмкіндік береді. Тығыз сутегі бойынша эксперименттік және теориялық мәліметтер ыстық

тығыз материядағы күрделі процестерді, соның ішінде массалық және электрондық диффузия әсерлерін модельдеу әдістерін дамытуға елеулі үлес қосуда.

Ақ ергежейлі жұлдыздар айналасында өтетін аккреция, радиациялық қысым және конвективті аймағында өтетін диффузия процестері оның спектрлік эволюциясын зерттеуде негізгі мәселелер болып табылады [12-14]. Сондықтан осындай маңызды практикалық физикалық қолданбалар үшін диффузия коэффициенттерін есептеу өзектілігін жоғалтқан жоқ [15,16].

Диффузия Грин-Кубо қатынасына негізделген әр түрлі жуықтауларда, молекулалық динамика әдісімен, гипертізбекті жуықтау және эффективті потенциалдар теориясы әдістерімен зерттелді [13,17]. Сонымен қатар, кулондық плазма үшін диффузия коэффициенттерін есептеу сиретілген газдардың классикалық теориясына негізделген Чепмен-Энског жуықтауына сәйкес Raquette теориясы бойынша жүзеге асты [18-21].

Сутегі-кремний және сутегі-графит қоспалары үшін диффузия коэффициентін есептеу

Ион-иондық өзара әсерлесу үшін диффузия коэффициентін есептеу үшін эффективті потенциал келесі формуламен есептеледі:

$$\Phi_{ij}(r) = \frac{Z_i Z_j e^2}{r_{ij}} e^{-k_s r_{ij}}, \quad (1)$$

мұндағы eZ – ион заряды, k_s – экрандалу параметрі [11].

Сутектің H қоспада алатын үлесін x_1 деп алсақ, екінші элементтің үлесі x_2 деп белгіленеді. Онда 2-ші элементтің шекті мөлшерінің диффузия жылдамдығы келесі формуламен анықталады:

$$v_{diff} = D_{12} \left(-\frac{\partial \ln x_2}{\partial r} + \frac{m_0 g}{k_B T} \left(\frac{Z_2 A_1}{Z_1} - A_2 \right) + \frac{\partial \ln P_i}{\partial r} \left(\frac{Z_2}{Z_1} - 1 \right) + \alpha_T \frac{\partial \ln T}{\partial r} \right), \quad (2)$$

мұндағы D_{12} – өзара диффузия коэффициенті, $P_i = P_1 + P_2$ – иондық қысым, α_T – жылулық диффузия коэффициенті [13], A және Z – әрбір

элементтің сәйкесінше массасы мен заряды, m_0 – массалық атомдық бірлік. Диффузия себептерін (2) теңдеудегі сәйкес қосылғыштар арқылы, яғни концентрация мен ортадағы қысым градиенті және температура градиенті сипаттап береді.

i және j сортты бөлшектер арасындағы диффузия коэффициенті Чепмен-Каулингтің бірінші жуықтауы бойынша анықталады [11]:

$$D_{ij} = \frac{3}{16} \frac{k_B T}{m_{ij} n \Omega_{ij}^{(1,1)}}, \quad (3)$$

мұндағы $m_{ij} = m_i m_j / (m_i + m_j)$ – i және j сортты бөлшектер үшін келтірілген масса, n – иондар тығыздығы, $\Omega_{ij}^{(1,1)}$ – соқтығысу интегралы. Соқтығысу интегралы келесі формула бойынша анықталады:

$$\Omega_{ij}^{(l,r)} = \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi m_{ij}}} \int_0^\infty e^{-g^2} g^{2r+3} Q_{ij}^{T(l)}(g) dg, \quad (4)$$

мұндағы

$$Q_{ij}^{T(l)}(g) = 2\pi \int_0^\infty (1 - \cos^l \chi_{ij}(b, g)) b db. \quad (5)$$

(4) өрнектегі g шамасы өлшемсіз болып табылады және ол бөлшектердің салыстырмалы жылдамдығымен $v = \sqrt{2k_B T / m_{ij}}$ келесі түрде байланысқан:

$$g = \left(\frac{m_{ij}}{2k_B T} \right)^{1/2} v. \quad (6)$$

Шашырау бұрышын анықтау формуласы:

$$\chi_{ij} = \pi - 2b \int_{r_0}^\infty \frac{dr / r^2}{\sqrt{1 - \frac{2\Phi_{ij}}{m_{ij} v^2} - \frac{b^2}{r^2}}}, \quad (7)$$

мұндағы b – нысана параметрі, r_0 – ең қысқа арақашықтық.

(2) формуладан диффузия жылдамдығының әрбір элементтің зарядына тәуелділігін байқауға

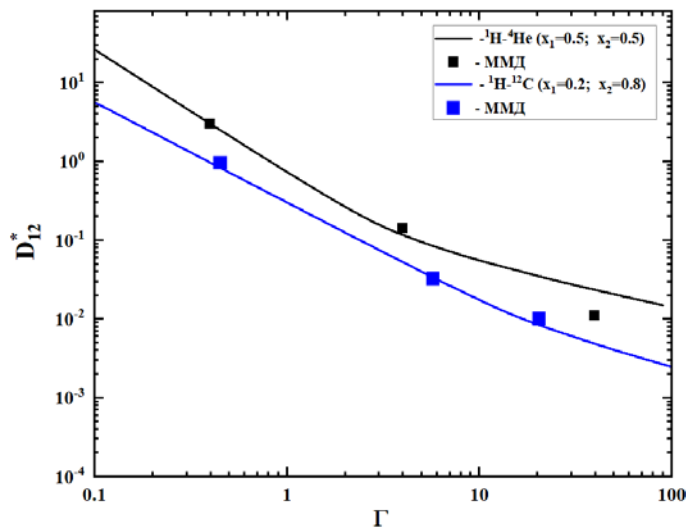
болады, сондықтан диффузия коэффициенті әрбір ион үшін жеке есептеледі, дегенмен берілген элемент үшін орташа диффузия коэффициенті осы элементтің орташа иондық зарядымен анықталады [11]. 1 және 2 элементтерден құралған бинарлық қоспадағы өзара диффузия коэффициентінің өлшемсіз түрі келесі түрде анықталады:

$$D_{12}^* = \frac{D_{12}}{\omega_p a^2} = \frac{\pi^{3/2}}{2\sqrt{6}\Gamma} \sqrt{\frac{\bar{A}(A_1 + A_2)}{\bar{Z}^2 A_1 A_2}} \frac{1}{\Omega_{12}^{(1,1)}}, \quad (8)$$

мұндағы $\omega_p = (4\pi e^2 \bar{Z}^2 n / \bar{A} m_0)^{1/2}$ – иондардың плазмалық жиілігі, $a = (4\pi n / 3)^{-1/3}$ – ұяшық көлемі, $\Gamma = \frac{e^2}{ak_B T}$ – байланыс параметрі.

Диффузия коэффициентін есептеу нәтижелері

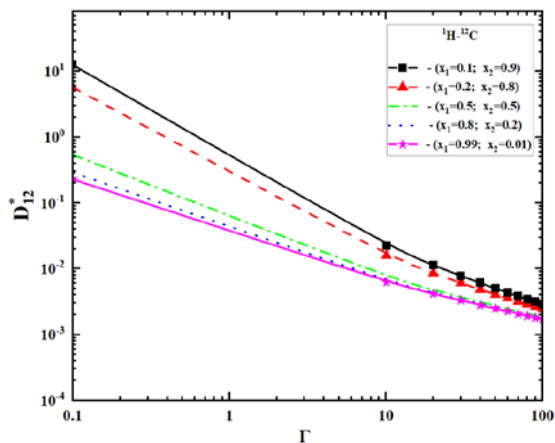
Әр түрлі x_1 мәндеріндегі диффузия коэффициенті сутегі-гелий $^1H - ^4He$ жағдайында да есептелді. Осыған сәйкес, 2-суретте $^1H - ^{12}C$ және $^1H - ^4He$ қоспалары үшін әр түрлі x_1 мәндеріндегі диффузия коэффициентінің D_{12}^* байланыс параметріне тәуелділігі көрсетілген. Raquette теориясымен есептелген нәтижелер $^1H - ^4He$ қоспасы үшін тұтас қара сызыққа сәйкес келеді, тұтас көк сызық $^1H - ^{12}C$ қоспасына сәйкес келеді. Сәйкес түстегі квадрат белгілер молекулалық динамика әдісімен есептелген нәтижелерді береді. Бұл әдістермен есептелген нәтижелер арасындағы айырмашылықты өзара әсерлесу потенциалының байланыс параметрінің үлкен мәндерінде байқауға болады (1-сурет).



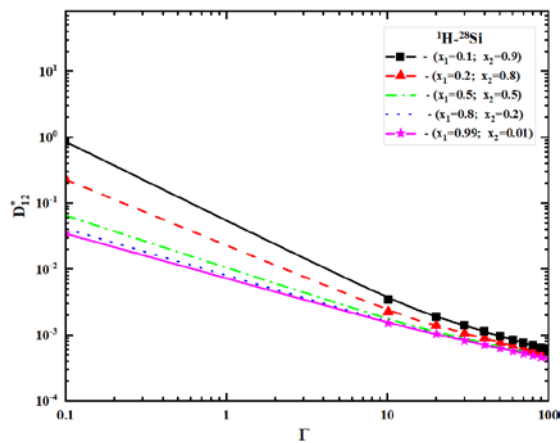
1-сурет – $^1H - ^4He$ ($x_1 = 0.5$) және $^1H - ^{12}C$ ($x_1 = 0.2$) қоспасы үшін өзара диффузия коэффициенттері және оны МД әдісімен алынған мәліметтермен салыстыру

2 және 3-суреттерде кулондық логарифм негізінде $^1H - ^{12}C$ және $^1H - ^{28}Si$ қоспалары үшін әр түрлі x_1 мәндерінде есептелген диффузия коэффициенттерінің Γ байланыс параметріне тәуелділігі көрсетілген.

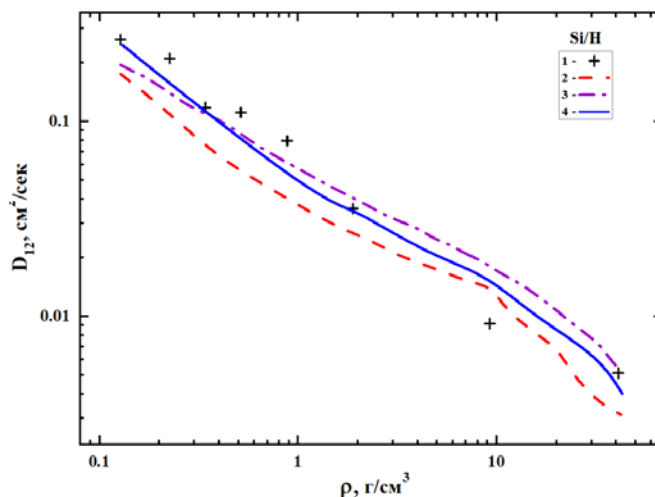
2-элементтің үлесі жоғары болған сайын $\Gamma < 1$ кіші мәндері аймағында диффузия коэффициенті жоғары мәндерге ие болады және бұл аймақта металл иондарының конвекциялық аймаққа гравитациялық енуі күшті байқалады.



2-сурет – ${}^1\text{H} - {}^{12}\text{C}$ қоспасы үшін әртүрлі x_1 мәндерінде диффузия коэффициентінің байланыс параметріне тәуелділігі



3-сурет – ${}^1\text{H} - {}^{28}\text{Si}$ қоспасы үшін әр түрлі x_1 мәндерінде диффузия коэффициентінің байланыс параметріне тәуелділігі



1 – «+» белгісімен МД әдісімен [13], 2 – қызыл үзік сызықтармен АА-ТСР моделімен [13], 3 – күлгін үзік сызық – Raquette моделімен [18], 4 – көк сызық – осы жұмыс бойынша есептелген нәтижелер
4-сурет – Сутегі плазмадағы Si элементінің өзара диффузия коэффициентінің тығыздыққа тәуелділігі

Екі жағдайда да Γ төмен мәндерінде жүйенің диффузиясы жоғары, өйткені бөлшектер арасындағы әлсіз әрекеттесу жиі соқтығысулардың салдарынан кинетикалық энергияның тиімді берілуін қамтамасыз етеді. Бірақ Γ өскен сайын бөлшектер арасындағы өзара әсерлесу күшейеді, бұл олардың қозғалғыштығын төмендетеді және энергияның тікелей берілуін қиындатып, диффузия коэффициентінің төмендеуіне әкеледі. Осылайша диффузияның төменгі температура кезінде графиттің сутекті плазмада кремниймен салыстырғанда жылдам жүретінін байқауға болады.

Қорытынды

4-суретте диффузия коэффициентінің байланыс параметріне тәуелділігінің басқа авторлардың алған нәтижелерімен салыстыру көрсетілген, молекулалық динамика әдісі [13] (+ белгісімен), Raquette теориясымен (күлгін үзік сызықтармен) [18], АА-ТСР (қызыл үзік сызық) [13] есептелген. 5-суретте моделінің көмегімен Дебай потенциалы негізінде алынған нәтижелер басқа жұмыстармен салыстырғанда $\Gamma < 1$ әлсіз байланыс шегінде жақсы сәйкестік табады, бірақ $\Gamma \geq 1$ аймағында айырмашылық көп байқалады.

Ал $\Gamma \sim 1$ жағдайында айырмашылық кванттық эффектiлерге байланысты туындауы мүмкiн. Төменгi температураларда диффузия коэффициентi кемидi, бұл иондардың диффузиясы баяу жүретiнiн көрсетедi және ары қарай күштi байланысқан кулондық плазманың түзiлуiне алып келедi.

Бұл жұмыста сутегi плазмадағы диффузия коэффициенттерi есептелдi. $^1H - ^{12}C$ және $^1H - ^{28}Si$ қоспалары үшiн Дебай потенциалы негiзiнде тығыз плазма үшiн плазманың идеалды емес параметрiнiң әр түрлi мәндерi үшiн диффузия коэффициенттерi есептелдi. Бұл

диффузия коэффициенттерiн есептеу әдiсi тығыз плазмалық күйде болатын объектiлердегi, сонымен қатар кулондық плазманың иондары диффузиясын зерттеуде, тепе-теңсiз көпкомпоненттi иондық қоспалардағы диффузия коэффициентiн сипаттауда және ақ ергежейлi жұлдыздардағы аккреция жылдамдығын және экзопланеталық материалдардың химиялық құрамын зерттеуде қолданылуы мүмкiн.

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы ғылым және жоғары бiлiм министрлiгiнiң қолдауымен ИРН АР23488907 жобасы аясында жүзеге асырылды.

Әдебиеттер

1. Baraffe I., Chabrier G., and Barman T. The physical properties of extra-solar planets, Reports on Progress in Physics. – 2010. - V.73. – P. 016901.
2. Saumon D. and Guillot T. Shock compression of deuterium and the interiors of Jupiter and Saturn, The Astrophysical Journal. – 2004. - V. 609. - P. 1170-1180.
3. Guillot T. and Showman A. P. Evolution of “51 Pegasus b-like” planets, Astronomy. Astrophysics. – 2002. - V. 385. - P. 156-165.
4. Nellis W. J. Dynamic compression of materials: metallization of fluid hydrogen at high pressures, Reports on Progress in Physics. – 2006. - V. 69. - P. 1479.
5. Burrows A., Hubbard W. B., Lunine J. I. and Liebert J. The theory of brown dwarfs and extrasolar giant planets, Reviews of Modern Physics. – 2001. – V. 73. – P. 719.
6. Redmer R., and B. Holst. Metal-to-Nonmetal Transitions. Springer Series in Materials Science (Springer, Berlin). – 2010. - Vol. 132. - P. 63.
7. McMahon J.M., Morales M.A., Pierleoni C. and Ceperley D.M. The properties of hydrogen and helium under extreme conditions // Reviews of Modern Physics. – 2012. - V. 84. – P. 1607.
8. Weir S.T., Mitchell A.C., Nellis W.J., Metallization of fluid molecular hydrogen at 140 GPa. Physical Review Letters. – 1996. – Vol. 76 (11). – P. 1860–1863.
9. Caplan M.E., Bauer E.B., Freeman I.F. Accurate diffusion coefficients for dense white dwarf plasma mixtures // Mon. Not. R. Astron. Soc. Lett. – 2022. – Vol. 513, № 11. – P. L52-L56.
10. Moldabekov ZA, Dornheim T, Bonitz M. Screening of a test charge in a free-electron gas at warm dense matter and dense non-ideal plasma conditions // Contributions to Plasma Physics. – 2022. –Vol.62. - e202000176.
11. Kodanova S.K., Ramazanov T.S. et al., Calculation of ion stopping in dense plasma by the Monte-Carlo method // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol.946 (1).
12. Saumon D., Blouin S., Tremblay P-E. Current challenges in the physics of white dwarf stars // Physics Reports. – Vol. 988. - 2022.– P. 1-63.
13. Heinonen R.A. et al. Diffusion Coefficients in the Envelopes of White Dwarfs // Astrophys. J. – 2020. – Vol. 896, № 1. – P.2.
14. Shestakova L.I., Kenzhebekova A.I., Serebryanskiy A.V. On survival of dust grains in the sublimation zone of cold white dwarfs // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2022. - Vol. 514, № 1. – P.997-1005.
15. Kodanova S. K., Issanova M. K., Omiraliyeva G.K., Ramazanov T.S. Investigation of the influence of single-particle oscillations on the transport properties of dense plasma // Contributions to Plasma Physics. – 2022. – V.62(10). – e202200018.
16. M. K. Issanova, S. K. Kodanova, T. S. Ramazanov, D. H. H. Hoffmann, Contrib. Plasma Physics 2016, 56(5), 425.
17. Stanton L.G., Murillo M.S. Ionic transport in high-energy-density matter // Phys. Rev. E. – 2016. – Vol. 93, № 4. – P. 1-23.
18. Paquette C. et al. Diffusion coefficients for stellar plasmas // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1986. – Vol. 61. – P. 177.
19. Chapman S., Cowling T.G. The Mathematical Theory of Uniform Gases. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1970. – P.448.
20. Pelletier C. et al. Carbon pollution in helium-rich white dwarf atmospheres Time-dependent calculations of the dredge-up process // Astrophys. J. – 1986. – Vol. 307. – P. 242.
21. Baalrud S.D., Daligault J. Modified Enskog kinetic theory for strongly coupled plasmas // Phys. Rev. E. - 2015. - Vol. 91. - № 6. - P. 063107.

Авторлар туралы мәлімет:

Кенжебекова Ақмарал Игілікқызы (корреспонденция авторы) – PhD, әл-Фараби ҚазҰУ плазма физикасы, нанотехнологиялар және компьютерлік физика кафедрасының аға оқытушысы (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.почта: kenzhebekova.a@kaznu.kz);

Коданова Сандугаш Кулмагамбетовна – әл-Фараби ҚазҰУ плазма физикасы, нанотехнологиялар және компьютерлік физика кафедрасының профессоры, физика-математика ғылымдарының кандидаты (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.почта: kodanova@physics.kz).

Сведения об авторах:

Кенжебекова Ақмарал Игілікқызы (корреспондентный автор) – PhD, ст. преподаватель кафедры физики плазмы, нанотехнологий и компьютерной физики КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы Казахстан, эл.почта: kenzhebekova.a@kaznu.kz);

Коданова Сандугаш Кулмагамбетовна – профессор кафедры физики плазмы, нанотехнологий и компьютерной физики КазНУ им. аль-Фараби, кандидат физико-математических наук (г. Алматы Казахстан, эл.почта: kodanova@physics.kz).

Information about authors:

Kenzhebekova Akmaral (corresponding author) – PhD, senior teacher of the Department of Plasma physics, nanotechnology and computer sciences of al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, email: kenzhebekova.a@kaznu.kz);

Kodanova Sandugash – Candidate of Physical and mathematical sciences, Professor of the Department of Plasma physics, nanotechnology and computer physics of al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, email: kodanova@physics.kz).

Басылымға 10 желтоқсан 2024 ж қабылданды