

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

N E W S

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 Hemando, 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.

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

ISSN 1991-346X

Volume 3, Number 337 (2021), 33 – 39

<https://doi.org/10.32014/2020.2518-1726.44>

УДК 53.072+533.9:51-73

МРНТИ 29.27.45; 29.27.07

К.Н. Джумагулова^{1,2}, М.М. Сейсембаева^{1,2}, Е.О. Шаленов^{1,2}¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан;²Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,

Алматы, Казахстан.

E-mail: dzhumagulova.karlygash@gmail.com

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УБЕГАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ
ЭФФЕКТИВНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА**

Аннотация. Высокоэнергичные электроны появляются в плазме, например, в термоядерных устройствах, солнечных вспышках, лазерной плазме, энергетических разрядах, связанных с грозами. Одним из важных механизмов появления таких надтепловых электронов является убегание электронов. Убегающие электроны играют положительную роль в случае кильватерного ускорения, инерциального термоядерного синтеза (ICF) быстрого зажигания и т.д., однако могут представлять собой большую проблему, а именно неконтролируемость, что ведет, например, к повреждению стенок термоядерной установки. Поэтому понимание механизма и знание динамики убегающих электронов необходимо для разработки методов управления этими частицами.

В этой работе было исследовано явление убегания электронов в плотной квазиклассической плазме на основе эффективного потенциала взаимодействия, который учитывает динамическое экранирование и квантово-механический эффект дифракции. Используя метод фазовых функций, были вычислены транспортные сечения рассеяния электронов на ионах и других электронах, на их основе определена длина свободного пробега электронов при различных значениях параметров плотности и связи. Также было исследовано внешнее электрическое поле (поле Дрейсера), при воздействии которого электроны могут переходить в режим непрерывного убегания в максимуме значения силы трения. Показано, что с увеличением плотности и уменьшением температуры плазмы поле Дрейсера увеличивается.

Ключевые слова: убегание электронов, плотная квазиклассическая плазма, длина свободного пробега, поле Дрейсера, эффективный потенциал взаимодействия.

Введение. Явление убегания электронов привлекает к себе огромное внимание во многих областях физики плазмы. В астрофизике роль высокоэнергичных электронов в гамма-всплеске во время сверхновой [1] хорошо известна. Также энергичные электроны могут появляться в результате ускорения электронов во время солнечной вспышки [2]. В атмосферных условиях убегающие электроны наблюдаются в электрических разрядах, связанных с грозами, где в результате могут вызвать электрический пробой [3-5]. Также установлено, что электроны с энергией \geq МэВ могут вызвать серьезные проблемы в энергетических установках, например, присутствие убегающих электронов в плазме термоядерных реакторов, а именно в токамаке, при определенных обстоятельствах является одним из основных препятствий на пути к реализации производства термоядерной энергии [6-7]. Нужно отметить, что эти быстрые электроны лежат в основе многих исследований в современной лазерной физике [8-9]. Это связано с тем, что при взаимодействии

лазерного излучения релятивистской интенсивности с плазмой большая часть энергии уходит на ускорение электронов.

В целом явление убегания электронов можно описать следующим образом: электроны плазмы во внешнем электрическом поле могут перейти в состояние непрерывного ускорения. Это связано с падением силы трения, действующей на ускоряющийся в объемной плазме электрон, обратно пропорционально квадрату его скорости. У быстрых электронов эффект ускорения электрического поля может превышать эффект затухания, который обусловлен кулоновскими столкновениями в фоновой плазме. В этом случае группа электронов будет ускоряться, и первичные убегающие электроны начинают накапливаться при скоростях, близких к скорости света. Итак, динамика убегающих электронов определяется конкуренцией двух факторов: ускоряющего электрического поля и преимущественно кулоновских столкновений с заряженными частицами. Энергия, которую электроны теряют при упругом столкновении, зависит от энергии взаимодействия частиц, так называемого потенциала взаимодействия частиц. Явление убегания электронов в плазме было предсказано Джованелли [10], численные расчеты этого эффекта впервые проведены в [11].

Существуют два основных механизма генерации убегающих электронов, которые называются генерацией Дрейсера [11,12] и лавинной генерацией [13,14]. В первом случае изначально тепловые электроны ускоряются за счет постепенной диффузии в импульсном пространстве, пока не достигнут скорости, при которой они начинают убегать. Генерация Дрейсера является примером первичного механизма, поскольку она генерирует ускорение без необходимости в существовании ранее ускоренных частиц. Как только появляются несколько убегающих частиц, один из них передает большую часть своего импульса тепловому электрону. В результате этого действия возникают вторичные убегающие электроны и так далее. Эта схема приводит к экспоненциальному росту убегающих частиц, в других источниках, этот процесс называется «лавиной».

Основная часть. Описание взаимодействия частиц является одной из основных проблем при исследовании физических свойств плазмы. Как известно, выбор потенциала взаимодействия играет существенную роль для получения более точных данных, определяющих эти свойства. Существует ряд космических объектов, температура которых превышает миллионы градусов. Если плотность заряженных частиц возрастает, постепенно возрастает роль взаимодействия частиц друг с другом. Такую высокотемпературную плотную плазму называют квазиклассической плазмой. Для ее описания требуется применять эффективные модели взаимодействия частиц, учитывающие наиболее важные эффекты в подобной плазме. В работе [15] авторами работы был получен эффективный потенциал взаимодействия типа “электрон-заряд”, учитывающий такие важные эффекты, как коллективное экранирование и квантово-механический эффект дифракции:

$$\Phi_{\alpha\beta}(r) = \frac{Z_{\alpha}Z_{\beta}e^2}{\sqrt{1-4\lambda_{\alpha\beta}^2/r_D^2}} \left(\frac{e^{-Br}}{r} - \frac{e^{-Ar}}{r} \right), \quad (1)$$

$$\text{где } A^2 = \frac{1}{2\lambda_{\alpha\beta}^2} \left(1 + \sqrt{1-4\lambda_{\alpha\beta}^2/r_D^2} \right), \quad B^2 = \frac{1}{2\lambda_{\alpha\beta}^2} \left(1 - \sqrt{1-4\lambda_{\alpha\beta}^2/r_D^2} \right);$$

здесь $Z_{\alpha}e$, $Z_{\beta}e$ – электрические заряды частиц сорта α и β ; $\lambda_{\alpha\beta} = h/\sqrt{2\pi\mu_{\alpha\beta}k_B T}$ – тепловая длина волны Де-Бройля; $\mu_{\alpha\beta} = m_{\alpha}m_{\beta}/(m_{\alpha} + m_{\beta})$ – приведенная масса частиц сорта α и β

взаимодействующих частиц, $r_D = \left(k_B T / \left(4\pi e^2 \sum_j n_j Z_j^2 \right) \right)^{1/2}$ – радиус Дебая.

Если скорости частиц превышают тепловую, то такие быстрые частицы при движении не успевают поляризовать окружающую плазму и экранировка их зарядов ослабевает. Такая экранировка, зависящая от скоростей взаимодействующих частиц, получила название динамической экранировки и в настоящее время широко используется при исследовании свойств плотной плазмы. В работе [16] предложен способ учета динамической экранировки. Он сводится к замене

статического радиуса Дебая на некоторый эффективный, учитывающий динамическую экранировку:

$$r_o = r_D \left(1 + \frac{v^2}{v_{Th}^2} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где v – относительная скорость сталкивающихся частиц, v_{Th} – тепловая скорость частиц системы.

Модифицированная динамическая версия потенциала (1) с учетом относительной скорости сталкивающихся частиц была получена в работе [17]. Было показано, что в этой модели взаимодействия используется длина экранирования (2), которая теперь зависит от относительной скорости сталкивающихся частиц и может стремиться к бесконечности при высоких скоростях. Это означает, что при исследовании явления убегания электронов принципиально важно учитывать динамическую экранировку с длиной экранирования не равной Дебаевской длине.

Для удобства описания свойств неидеальной плазмы удобно пользоваться параметрами, характеризующими её состояние при определенных плотностях и температурах. Одним из параметров, характеризующих состояние системы, является параметр связи и параметр плотности:

$$\Gamma = \frac{Z_\alpha Z_\beta e^2}{a k_B T}, \quad (3)$$

$$r_s = \frac{a}{a_B}, \quad (4)$$

Здесь $a = (3 / (4\pi n))^{1/3}$ – среднее расстояние между частицами, $a_B = \frac{h^2}{m_e e^2}$ – радиус Бора $n = n_e + n_i$ –

концентрация электронов и ионов; T – температура плазмы; k_B – постоянная Больцмана.

Для исследования рассеяния частиц существуют несколько квантово-механических методов. Одним из этих методов является метод фазовых функций [18], который был использован в данной работе для нахождения фазовых сдвигов с помощью решения уравнения Калоджеро.

Следует отметить, что в работе исследуемая среда рассматривалась как полностью ионизованная плазма, соответственно взаимодействующими частицами считались электроны и ионы. Полная частота столкновений электрона определяется как сумма частот столкновений электрона с ионами и другими электронами [19]:

$$v_e(v) = v_{ee}(v) + v_{ei}(v) \quad (5)$$

Для вычисления отдельных частот электрон-электронных и электрон-ионных столкновений необходимо знать транспортные сечения рассеяния частиц, где и используются фазовые сдвиги.

$$v_{e\beta}(v) = n_\beta \sigma_{e\beta}^{tr}(v) v_e. \quad (6)$$

В случае взаимодействия электрона с электроном при вычислении транспортного сечения учитывался обменный эффект.

Величина, обратная частотам столкновений электронов, дает среднее время между столкновениями. С их помощью можно определить длину свободного пробега электронов между столкновениями с другими ионами или электронами:

$$\lambda_{e\beta} = v_e \tau_{e\beta} = \frac{1}{n_\beta \sigma_{e\beta}^{tr}(v)}, \quad (7)$$

здесь, $\tau_{e\beta} = (v_{e\beta})^{-1}$ – среднее время между столкновениями электрона с частицей сорта β .

Известно, что если электроны получают больше энергии от поля на своей длине свободного пробега, чем теряют при упругих столкновениях, то они начинают убегать во внешнем электрическом поле.

Несомненно, для полноценного исследования явления убегания электронов, необходимо определить силу трения, действующую на электроны со стороны среды. Она складывается из

вкладов в рассеяние электронов на ионах, электронах. Сила трения может быть определена непосредственно с помощью частот столкновений и записывается следующим выражением:

$$\vec{F}_{e\beta}^I(\nu) = -\mu_{e\beta} \nu_{e\beta}^I(\nu) \vec{\nu} \quad (8)$$

Как и в случае с частотой столкновений, полная сила трения находится как сумма сил трения, действующих на электрон при электрон-электронных и электрон-ионных столкновениях:

$$F_e(\nu) = F_{ee}(\nu) + F_{ei}(\nu) = (\mu_{ee} \nu_{ee}(\nu) + \mu_{ei} \nu_{ei}(\nu)) \nu. \quad (9)$$

Зависимость силы трения от скорости электрона имеет максимум на значении скорости, приблизительно равной тепловой скорости. После прохождения максимума сила трения начинает падать с ростом скорости, т.е. теперь чем больше скорость, тем меньшее значение электрического поля необходимо для ускорения, в этом диапазоне скоростей возможно непрерывное ускорение электронов. Первичное ускорение, запускающее режим непрерывного ускорения электронов, достигается с помощью внешнего электрического поля E . Его достаточное для этой цели минимальное значение (критическое поле) для электрона со скоростью, соответствующей максимуму силы трения, получило название поля Дрейсера E_D , и находится следующим образом:

$$E_D = F_e^{\max} / e, \quad (10)$$

так как это поле способно уравновесить максимальное значение силы трения.

Результаты. В этой части представлены результаты вычислений по исследованию явления убегания электронов. На рисунке 1 показаны зависимости длины свободного пробега электрона в единицах радиуса Бора от его энергии при значении параметра связи $\Gamma=1$ и для разных значений параметра плотности $r_s=2$ и $r_s=4$ (рисунок 1а), а также для значения $r_s=4$ и разных $\Gamma=1$ и $\Gamma=2$ (рисунок 1б). На рисунках синие кривые соответствуют данным, полученным для случая взаимодействия электрона с электронами, а красные кривые соответствуют электрон-ионному взаимодействию. Из рисунков видно, что зависимости длины свободного пробега от энергии ведут себя немонотонно из-за особенностей столкновительных характеристик, т.е. сечений рассеяния. При больших скоростях, длина свободного пробега электрона увеличивается, так как при высоких скоростях электрон не успевает взаимодействовать с плазменными частицами. Также можно заметить, что в более плотной плазме длина свободного пробега электрона меньше чем в разреженной плазме, так как на него действует большее число препятствий. Вторая картинка показывает, что с ростом параметра связи длина свободного пробега также увеличивается. Это можно объяснить тем, что при больших значениях параметра связи увеличивается экранировка взаимодействия между частицами, а значит, уменьшается сечение рассеяния.

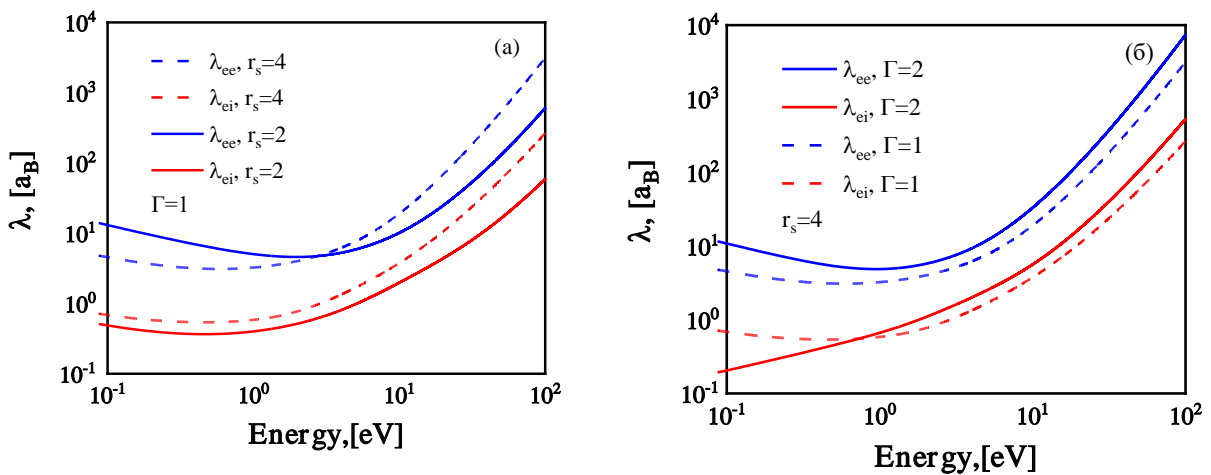


Рисунок 1. Длина свободного пробега электрона как функция от его энергий при разных значениях параметров связи и плотности.

На рисунке 2а представлено приведенное критическое электрическое поле Дрейсера (10) как функция от параметра связи при фиксированном значении $r_s=4$ и на рисунке 2б как функция от параметра плотности при фиксированном $\Gamma=1$. Зависимости показывают, что с увеличением плотности и уменьшением температуры необходимы более высокие значения критического поля Дрейсера для убегания электронов.

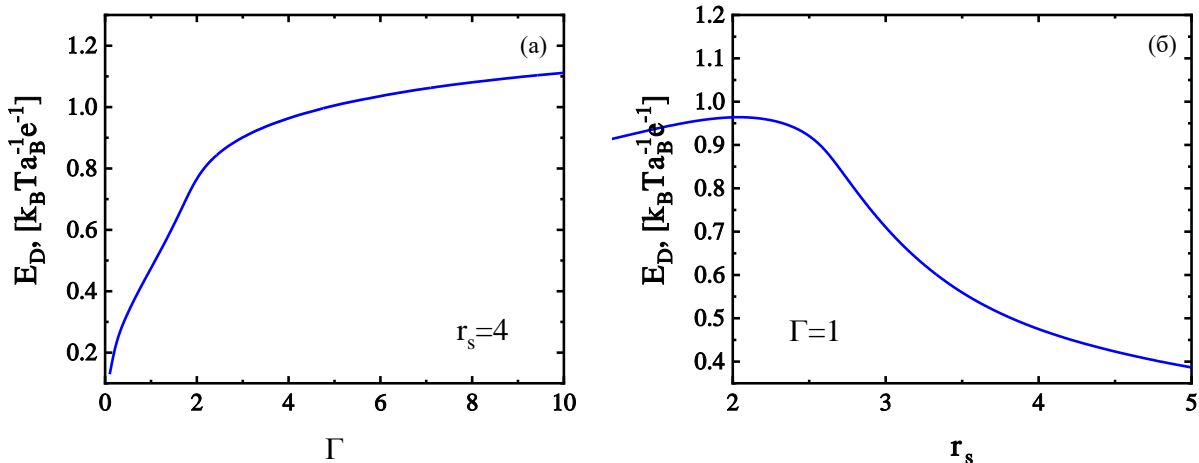


Рисунок 2. Электрическое поле как функция от параметра связи (а) и параметра плотности (б).

Заключение. На основе эффективного потенциала взаимодействия, учитывающего эффект динамической экранировки на больших расстояниях и эффект дифракции на малых расстояниях, были оценены длины свободного пробега электрона и критическое значение внешнего электрического поля, которое приводит электроны в режим убегания при максимальном значении силы трения. В вычислениях был использован метод фазовых функций. Результаты исследования показали, что в менее плотной и холодной плазме увеличивается длина свободного пробега. Также с увеличением параметра связи и с уменьшением параметра плотности требуется большее значение поля Дрейсера, так как на электрон при этом действует большая сила трения при взаимодействии с заряженными плазменными частицами.

Благодарность: работа была выполнена в рамках гранта AP08855972 Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Қ.Н. Жұмағұлова^{1,2}, М.М. Сейсембаева^{1,2}, Е.О. Шаленов^{1,2}

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан;

²Эксперименттік және теориялық физика ғылыми зерттеу институты, Алматы, Қазақстан.

E-mail: dzhumagulova.karlygash@gmail.com

ДИНАМИКАЛЫҚ ПОТЕНЦИАЛ НЕГІЗІНДЕ ЭЛЕКТРОНДАРДЫҢ ЗЫМЫРАУ ПРОЦЕСІН ТИІМДІ ЗЕРТТЕУ

Аннотация. Жоғары энергетикалық электрондар плазмада, мысалы термоядролық қондырғыларда, күннің жарқырауында, лазерлік плазмада, найзағай әсерінен туындайтын электрлік разрядтарда кездеседі. Мұндай супертермальды электрондардың пайда болуының маңызды механизмдерінің бірі - бұл электрондардың зымырауы. Зымырайтын электрондар кильватер үдетілуде, инерциялық термоядролық синтезде (ICF) тез жануы кезінде және т.б. жағдайында оң рөл атқарады. Дегенмен, шапшаң электрондардың басқарылмайтындығынан олар термоядролық қондырғылардың қабырғаларының зақымдануы сияқты үлкен мәселелерді тудыруы мүмкін.

Сондықтан мұндай бөлшектерді басқару әдістерін жасақтау мақсатында зымырайтын электрондардың механизмін және динамикасын терең зерттеп түсіну қажет.

Бұл жұмыста динамикалық экрандау және кванттық-механикалық дифракцияның әсерін ескеретін эффективті өзара әрекеттесу потенциалы негізде тығыз квазиклассикалық плазмада электрондардың зымырау құбылысы зерттелінді. Фазалық функциялар әдісін қолдана отырып, электрондардың иондарға және басқа электрондарға шашырауының тасымадау қималары есептелді, олардың негізінде тығыздық пен байланыс параметрлерінің әр түрлі мәндері үшін электрондардың еркін жүру жолы анықталды. Сонымен қатар сыртқы электр өрісі (Дрейсер өрісі) зерттелінді, бұл өрістің әсерінен электрондар үйкеліс күшінің максималды мәнінде үздіксіз зымырау режиміне өте алады. Плазма тығыздығы жоғарлауымен және плазма температурасының төмендеуімен Дрейсер өрісінің артатындығы көрсетілген.

Түйін сөздер: электронның зымырауы, тығыз квазиклассикалық плазма, еркін жүру жолы, Дрейсер өрісі, эффективті әсерлесу потенциалы.

K.N. Dzhumagulova¹⁻², M.M. Seisembayeva¹⁻², E.O. Shalenov¹⁻²

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

²Scientific Research Institute of Experimental and Theoretical Physics, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: dzhumagulova.karlygash@gmail.com

INVESTIGATION OF ELECTRON RUNAWAY PROCESS ON THE BASIS OF EFFECTIVE DYNAMIC POTENTIAL

Abstract. Highly energetic electrons may appear in plasma, for example, in thermonuclear devices, solar flares, laser plasma, energy discharges associated with thunderstorms. One of the important mechanisms for the appearance of such suprathreshold electrons is electron runaway phenomenon. Runaway electrons play a positive role in the case of wake acceleration, inertial confinement fusion (ICF) fast ignition, etc., however, can be a big problem, namely, uncontrollability, which leads, for example, to damage to the walls of a thermonuclear installation. Therefore, an understanding of the mechanism and knowledge of the dynamics of runaway electrons is necessary for the development of methods for controlling these particles.

In this work, the phenomenon of electron runaway in dense semiclassical plasma was investigated on the basis of the effective interaction potential, which takes into account dynamic screening and the quantum mechanical effect of diffraction. Using the method of phase functions, the transport cross sections for scattering of electrons by ions and other electrons were calculated, and on their basis the mean free path of electrons was determined for various values of the density and coupling parameters. An external electric field (Dreiser's field), under the influence of which electrons can go into the mode of continuous runaway at the maximum value of the friction force, was also investigated. It is shown that with an increase in the density and a decrease in the plasma temperature, the Dreiser's field increases.

Key words: electron runaway, dense semiclassical plasma, mean free path, Dreiser's field, effective interaction potential.

Information about authors:

Dzhumagulova K.N., Doctor of Physical-Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of NAS RK, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; Dzhumagulova.karlygash@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2937-4482>

Seisembayeva M.M., Senior Lecturer, doctoral student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; smm93.93@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3256-5957>

Shalenov E.O., Senior Lecturer, PhD, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; shalenov.erik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6469-6623>

ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Piran T., (2005) The physics of gamma-ray bursts. *Reviews of Modern Physics*. Vol. 76(4). P. 1143–1210. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.76.1143>
- [2] Mann G., (2015) Energetic electrons generated during solar flares. *Journal of Plasma Physics*. Vol. 81(06). P. 475810601. <https://doi.org/10.1017/s0022377815001166>
- [3] Huang D., Wang X., Zhou X., Jia H., (2015) Effects of thunderstorms electric field on the energy of cosmic ray electron. *Proceeding of 34th International Cosmic Ray Conference*. The Hague, Netherlands. P. 253. <https://doi.org/10.22323/1.236.0253>
- [4] Beloplotov D. B., Lomaev M. I., Sorokin D. A., Tarasenko V. F. (2019) Streamer breakdown with runaway electrons forming diffuse discharges in an inhomogeneous electric field. *Russian Physics Journal*, Vol. 62(7). P. 1171-1180. <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01832-7>
- [5] Dwyer J. R., Smith D. M., Hazelton B. J., Grefenstette B. W., Kelley N. A., Lowell A. W., Schaal M. M., Rassoul H. K. (2015) Positron clouds within thunderstorms. *Journal of Plasma Physics*. Vol. 81(4). P. 475810405. <https://doi.org/10.1017/S0022377815000549>
- [6] Boozer A. H., (2012) Theory of tokamak disruptions. *Physics of plasmas*. Vol. 19(5). P. 058101. <https://doi.org/10.1063/1.3703327>
- [7] Hollmann E. M., Aleynikov P. B., Fulop T., Humphreys D. A., Izzo V. A., Lehnen M., Lukash V. E., Papp G., Pautasso G., SaintLaurent F., Snipes J. A., (2015) Status of research toward the ITER disruption mitigation system. *Physics of Plasmas*. Vol 22(2), P. 021802. <https://doi.org/10.1063/1.4901251>
- [8] Schnell M., Sävert A., Uschmann I., Jansen O., Kaluza M. C., Spielmann C., (2015) Characterization and application of hard x-ray betatron radiation generated by relativistic electrons from a laser-wakefield accelerator. *Journal of Plasma Physics*. Vol. 81(4). P. 475810401. <https://doi.org/10.1017/S0022377815000379>
- [9] Rusby D. R., Wilson L. A., Gray R. J., Dance R. J., Butler N. M. H., MacLellan D. A., Scott G. G., Bagnoud V., Zielbauer B., McKenna P., Neely D., () Measurement of the angle, temperature and flux of fast electrons emitted from intense laser–solid interactions. *Journal of Plasma Physics*. Vol. 81(5). P. 475810505. <https://doi.org/10.1017/S0022377815000835>
- [10] Giovanelly R.G., (1949) XVII Electron energies resulting from an electric field in a highly ionized gas. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. Vol. 40(301). P. 206-214. <https://doi.org/10.1080/14786444908521719>
- [11] Dreicer H., (1959) Electron and ion runaway in a fully ionized gas I. *Physical Review*. Vol. 115(2), P. 238-249. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.115.238>
- [12] Dreicer H., (1960) Electron and ion runaway in a fully ionized gas II. *Physical Review*. Vol. 117(2), P. 329-342. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.117.329>
- [13] Rosenbluth M., Putvinski S., (1997) Theory for avalanche of runaway electrons in tokamaks. *Nuclear Fusion*. Vol. 37(10). P. 1355-1362. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/37/10/I03>
- [14] Jayakumar R., Fleischmann H., Zweben S., (1993) Collisional avalanche exponentiation of runaway electrons in electrified plasmas. *Physics Letters A*. Vol. 172(6). P. 447-451. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(93\)90237-T](https://doi.org/10.1016/0375-9601(93)90237-T)
- [15] Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., (2002) Effective screened potentials of strongly coupled semiclassical plasma. *Physics of Plasmas*. Vol. 9(9). P. 3758-3761. <https://doi.org/10.1063/1.1499497>
- [16] Kremp D., Röpke G., Schlanges M., (1984) Transport properties in dense plasmas. Akademie-Verlag, Berlin. ISBN: 978-3-0348-5431-3
- [17] Ramazanov T. S., Dzhumagulova K. N., Omarbakiyeva Y. A., (2005) Effective polarization interaction potential «charge–atom» for partially ionized dense plasma. *Physics of Plasmas*. Vol. 12(9). P. 092702(1-4). <https://doi.org/10.1063/1.2008213>
- [18] Dzhumagulova K. N., Shalenov E. O., Ramazanov T. S., Gabdullina G. L., (2015) Phase shifts and scattering cross sections of the particles of nonideal semiclassical plasmas based on the dynamic interaction potential. *Contributions to Plasma Physics*. Vol. 55(2-3). P. 230-235. <https://doi.org/10.1002/ctpp.201400078>
- [19] Jumagulova M.N., Seisembayeva M.M., Shalenov E.O., Kossymkyzy Zh., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N. (2020) Electron runaway in a dense semiclassical plasma. *High Energy Density Physics*. Vol. 36. P. 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.hedp.2020.100832>

**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.