

МРНТИ 29.27.00

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2021.v78.i3.02>

М.К. Исанова^{1,2*} , С.К. Коданова^{1,2} ,
Н.Х. Бастыкова^{1,2} , А.И. Кенжебекова^{1,2} 

¹Институт прикладных наук и информационных технологий, Казахстан, г. Алматы

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: issanova@physics.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОНА НА ИОНЕ В ПЛАЗМЕ ИНЕРЦИОННОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В данной работе изучались процессы рассеяния электрона на ионе в плазме инерционного термоядерного синтеза в магнитном поле. Предложенная модель для исследования процессов рассеяния между заряженными частицами основана на решении уравнения движения в центральном поле с учетом внешнего магнитного поля, а также кулоновского логарифма, который определяется с помощью угла рассеяния при парном столкновении. Были исследованы столкновения между электроном и ионом, которые взаимодействуют посредством потенциала Юкава. Также был вычислен кулоновский логарифм в плотной плазме в магнитном поле. Проведено исследование влияние учета магнитного поля на углы рассеяния, сечение рассеяния и кулоновский логарифм. Из полученных результатов установлено, что учет магнитного поля привел к немонотонному изменению угла рассеяния и уменьшению сечения рассеяния при слабых взаимодействиях частиц. Также выявлено, что при больших значениях параметра взаимодействия β магнитное поле не влияет на значение кулоновского логарифма. Таким образом, полученные результаты позволяют изучить влияние учета магнитного поля на процессы рассеяния электрона на ионе в приближении парных столкновений во внешнем постоянном магнитном поле в плотной плазме.

Ключевые слова: плотная плазма, инерционный термоядерный синтез, магнитное поле, процесс рассеяния, кулоновский логарифм.

M.K. Issanova^{1,2*}, S.K. Kodanova^{1,2}, N.Kh. Bastykova^{1,2}, A.I. Kenzhebekova^{1,2}

¹Institute of Applied Sciences and Information Technologies, Kazakhstan, Almaty

²Al-Farabi Kazakh National university, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: issanova@physics.kz

Investigation of the scattering of electrons by ions in the plasma of inertial confinement fusion in a magnetic field

In this paper, the processes of electron-ion scattering in the plasma of inertial confinement fusion in a magnetic field were studied. The proposed model for studying the processes of scattering between charged particles is based on solving the equation of motion in a central field taking into account the external magnetic field, as well as the Coulomb logarithm, which is determined using the scattering angle in a pair collision. Collisions between an electron and an ion that interact via the Yukawa potential were investigated. Also, the Coulomb logarithm in a dense plasma in a magnetic field was calculated. The effect of taking into account the magnetic field on the scattering angles, the scattering cross-section and the Coulomb logarithm are studied. From the results obtained, it is established that taking into account the magnetic field led to a non-monotonic change in the scattering angle and a decrease in the scattering cross-section for weak particle interactions. It is also revealed that for large values of the interaction parameter β , the magnetic field does not affect the value of the Coulomb logarithm. Thus, the obtained results allow us to study the effect of taking into account the magnetic field on the processes of electron scattering on an ion in the approximation of pair collisions in an external constant magnetic field in a dense plasma.

Key words: Dense plasma, inertial confinement fusion, magnetic field, scattering process, Coulomb logarithm.

М.К. Исанова^{1,2*}, С.К. Коданова^{1,2}, Н.Х. Бастыкова^{1,2}, А.И. Кенжебекова^{1,2}

¹Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты, Қазақстан, Алматы қ.

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: issanova@physics.kz

Магнит өрісіндегі инерциялық термоядролық синтез плазмасында электронның ионда шашырау процесін зерттеу

Бұл жұмыста магнит өрісіндегі инерциялық термоядролық синтездің плазмасындағы иондағы электронның шашырау процестері зерттелді. Юкава потенциалы арқылы өзара әрекеттесетін электрон мен ион арасындағы қақтығыстар зерттелді. Сондай-ақ, магнит өрісіндегі тығыз плазмадағы кулондық логарифм есептелді. Магнит өрісін есепке алудың шашырау бұрыштарына, шашырау қимасына және кулондық логарифмге әсері зерттелді. Алынған нәтижелерден магнит өрісін есепке алу шашырау бұрышының монотонды емес өзгеруіне және бөлшектердің әлсіз өзара әрекеттесуі кезінде шашырау қимасының төмендеуіне әкелгені анықталды. Сондай-ақ, өзара әрекеттесу параметрінің β үлкен мәндерінде магнит өрісі Кулон логарифмінің мәніне әсер етпейтіні анықталды. Осылайша, алынған нәтижелер тығыз плазмадағы сыртқы тұрақты магнит өрісінде қосарланған соқтығысулар жақындаған кезде иондағы электронның шашырау процестеріне магнит өрісін есепке алудың әсерін зерттеуге мүмкіндік беретіні анықталды. Бұл жұмыста біздің алынған нәтижелер инерциялық термоядролық синтездің тығыз плазмасындағы соқтығысу процесінде магнит өрісін ескерудің әсері туралы пайдалы ақпарат береді. Бұл білім инерциялық термоядролық синтездің ең маңызды технологиялық мәселесін шешу үшін қажет болып табылады: оңтайлы мақсатты конструкция мен жүргізуші сипаттамаларын анықтау үшін.

Түйін сөздер: тығыз плазма, инерциялық термоядролық синтез, магнит өрісі, шашырау процесі, кулондық логарифм.

Введение

Особое место среди работ, посвященных различным аспектам проблем управляемого термоядерного синтеза, занимают исследования в области инерционного термоядерного синтеза (ИТС). Исследования последних лет показали, что энергетически намного выгоднее, если процесс сжатия мишени (дейтерий-тритиевой таблетки) происходит в достаточно сильном магнитном поле. Таким образом, для успешной реализации ИТС необходимо понимание физических свойств плотной плазмы в сильном внешнем магнитном поле. Определение оптимальной конструкции мишени и характеристик драйвера являются важнейшими задачами энергетики будущего – инерционного термоядерного синтеза.

Исследования, проведенные мировыми учеными в области инерционного термоядерного синтеза, являются одним из возможных решений, основанных на развитии и использовании альтернативных источников энергии в будущем [1-2]. Поэтому передовые технологии, основанные на использовании плазмы, в которых идет реакция синтеза, и инерционное удержание за счет магнитных полей и мощных источников нагрева, таких как лазеры и пучки тяжелых

ионов, необходимы в отраслях энергетической промышленности.

Потеря энергии ионных пучков и процессы связанные с ними в магнитном поле является актуальной проблемой при реализации идеи управляемого термоядерного синтеза. Поскольку магнитное поле в известных термоядерных устройствах увеличивается, согласно [3-5], то парные столкновения заряженных частиц в магнитном поле могут влиять на нагрев и удержание плазмы. Поэтому необходимо изучать влияние магнитного поля на рассеяния частиц.

Существуют несколько подходов изучения столкновительных характеристик в магнитном поле. В работах [6] были проведены исследования кулоновского столкновения в намагниченной плазме. В результате выявлено, что магнитное поле приводит к замедлению переноса скорости в поперечном направлении, а в продольном направлении к возрастанию переноса скорости. В работе [7] для описания столкновительных процессов в термоядерных установках получена аналитическая формула Резерфорда в зависимости от магнитного поля (слабого), которая утверждает, что с увеличением магнитного поля уменьшается угол рассеяния электрона. В случае внешнего магнитного поля электронно-ионное рассеяние обусловлено суперпози-

цией циклотронного движения электронов и кулоновского столкновения без магнитного поля. Влияние циклотронного движения на угол рассеяния становится сильнее с увеличением магнитного поля. Были предложены методы исследования угла рассеяния в магнитном поле численными методами [8-11].

Данная работа направлена на исследование процессов рассеяния плотной неравновесной плазмы во внешнем магнитном поле. Было исследовано классическое электрон-ионное рассеяние, вычислен кулоновский логарифм в плотной плазме в магнитном поле.

Метод исследования

Теоретическая модель

В данной работе были исследованы процессы рассеяния заряженных частиц плотной плазмы в присутствии однородного магнитного поля.

Мы рассматриваем парное столкновение между двумя частицами с массой $\mu = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$, взаимодействующими через потенциал взаимодействия Юкавы $U(r) = -(U_0 / r) \exp(-r / \lambda)$, $U_0 > 0$ [7].

Уравнение Ньютона во внешнем магнитном поле:

$$-e\vec{E} - e\vec{v} \times \vec{B} = m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \quad (1)$$

где $E = e / 4\pi\epsilon_0 r^2$ и \vec{B} – напряженность электрического и магнитного поля, соответственно. В полярной координате \vec{e}_r , \vec{e}_ψ – единичные векторы, т.е. уравнение (8) можно записать таким образом:

$$\begin{aligned} \left(-\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} + er \frac{d\psi}{dt} B \right) \vec{e}_r - e \frac{dr}{dt} B \vec{e}_\psi = \\ m \left[\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\psi}{dt} \right)^2 \right] \vec{e}_r + \\ + m \left[2 \frac{dr}{dt} \frac{d\psi}{dt} + r \frac{d^2 \psi}{dt^2} \right] \vec{e}_\psi \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда уравнение (2) можно записать в направлениях \vec{e}_r , \vec{e}_ψ , соответственно

$$-\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} + er \frac{d\psi}{dt} B = m \left[\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\psi}{dt} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$-e \frac{dr}{dt} B = m \left[2 \frac{dr}{dt} \frac{d\psi}{dt} + r \frac{d^2 \psi}{dt^2} \right] \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (4) по времени t , получим следующее:

$$r^2 \left(\frac{d\psi}{dt} + \frac{eB}{2m} \right) = C_1 \quad (5)$$

где C_1 – постоянная. Из начального условия:

$$r_0^2 \frac{d\psi_0}{dt} = v_0 b,$$

будем иметь,

$$C_1 = r_0^2 \left(\frac{d\psi_0}{dt} + \frac{eB}{2m} \right) = v_0 b + \frac{eB r_0^2}{2m},$$

тогда (5) в следующем виде:

$$\frac{d\psi}{dt} = -\frac{eB}{2m} + \frac{1}{r^2} \left(v_0 b + \frac{eB r_0^2}{2m} \right) \quad (6)$$

Поскольку сила Лоренца не вносит вклада в энергетический обмен, то закон сохранения энергии

$$\frac{1}{2} m v_0^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0} = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad (7)$$

где

$$v = \sqrt{\left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + r^2 \left(\frac{d\psi}{dt} \right)^2}. \quad (8)$$

Учитывая уравнения (7) в (8), имеем следующий вид

$$\begin{aligned} m v_0^2 - \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0} + \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \\ = m \left[\left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + r^2 \left(\frac{d\psi}{dt} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Выражение $\frac{dr}{dt}$ определяется как,

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 = v_0^2 - \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 mr_0} + \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 mr} - r^2 \left(\frac{d\psi}{dt}\right)^2 \quad (10)$$

После подстановки (6) в (10), уравнение (10) преобразуется в следующий вид:

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 = v_0^2 - \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 mr_0} + \frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 mr} - r^2 \left[-\frac{eB}{2m} + \frac{1}{r^2} \left(v_0 b + \frac{eBr_0^2}{2m} \right) \right]^2 \quad (11)$$

Комбинируя (16) и (11), мы получаем дифференциальную форму уравнения траектории

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\omega}{2v_0} + \frac{b}{r^2} - \frac{\omega r_0^2}{2v_0 r^2} \quad (12)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2b_0}{r_0} - \frac{2b_0}{r} - r^2 \left(\frac{\omega}{2v_0} + \frac{b}{r^2} - \frac{\omega r_0^2}{2v_0 r^2} \right)^2}}$$

где ω определяется как

$$\omega = -\frac{eB}{m}$$

Кулоновский логарифм определяется с помощью угла рассеяния при парном кулоновском столкновении. Вводя центр масс в процесс столкновения, кулоновский логарифм записывается в виде [12-14]:

$$\Lambda_{ei} = \frac{1}{b_{\perp}^2} \int_0^{\infty} \sin^2 \left(\frac{\chi(\rho)}{2} \right) \rho d\rho, \quad (13)$$

здесь $b_{\perp} = Z_{ion} e^2 / (2E_C)$, $E_C = \frac{1}{2} \mu_{ei} v^2$ – энергия центра масс сталкивающихся частиц, v –

относительная скорость рассеянной пробной частицы [12-14].

Результаты и обсуждения

Исследования последних лет указывают на необходимость применения магнитного поля для улучшения эффективности передачи энергии от лазера к мишени инерционного термоядерного синтеза, и необходимость проведения исследований свойств плотной плазмы в магнитном поле. Во-первых, за счет магнитного поля, эффективность передачи энергии от лазера к мишени увеличивается в несколько раз (до семи) если приложенное магнитное поле больше сотни Тесла [15]. Во-вторых, при прямом сжатии таблетки лазерами, достаточно сильное внешнее магнитное поле позволяет лазерному излучению проникать в центральную область мишени [16]. В-третьих, внешнее магнитное поле позволяет уменьшить потери энергии за счет уменьшения утечки нагретых частиц плазмы в направлении перпендикулярном силовым линиям магнитного поля [17].

На рисунках 1-3 показаны углы рассеяния в зависимости от прицельного параметра для параметра взаимодействия $\beta = 0.01$, $\beta = 1$ и $\beta = 20$ при различных значениях внешнего магнитного поля. Следовательно, усиление магнитного поля приводит к уменьшению угла рассеяния при малых значениях прицельного параметра. Однако, при больших значениях прицельного параметра наблюдается увеличение угла рассеяния при больших значениях магнитного поля. Как видно из рисунка 4, уменьшение угла рассеяния отразилось в сечении рассеяния при слабом взаимодействии, когда $\beta < 1$.

На рисунке 5 приведены значения кулоновского логарифма в зависимости от параметра взаимодействия β при различных значениях внешнего магнитного поля. Из рисунков видно, что при низких параметрах взаимодействия β значение кулоновского логарифма без учета магнитного поля больше, чем при значениях магнитного поля $B = 1 \div 3 T$. Тогда как, при больших значениях параметра взаимодействия β магнитное поле не влияет на значение кулоновского логарифма. Этот результат может быть объяснен тем, что увеличение магнитного поля приводит к уменьшению угла рассеяния при малых значениях прицельного параметра.

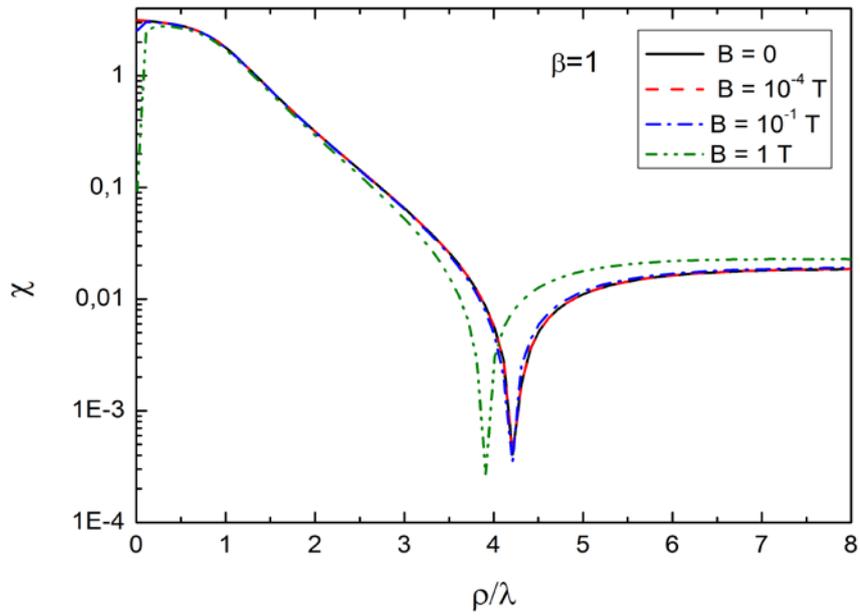


Рисунок 1 – Углы рассеяния в зависимости от прицельного параметра для параметра взаимодействия $\beta = 1$ при различных значениях внешнего магнитного поля

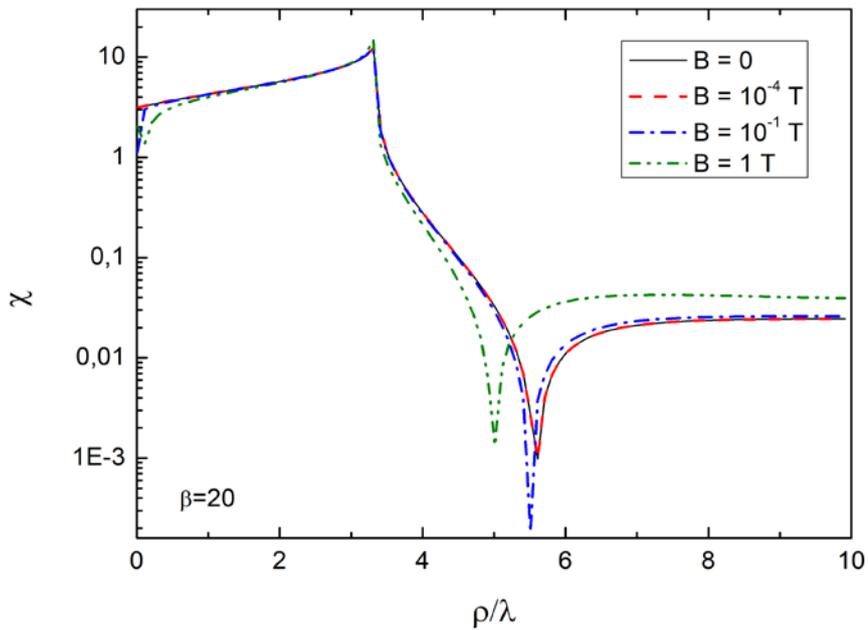


Рисунок 2 – Углы рассеяния в зависимости от прицельного параметра для параметра взаимодействия $\beta = 20$ при различных значениях внешнего магнитного поля

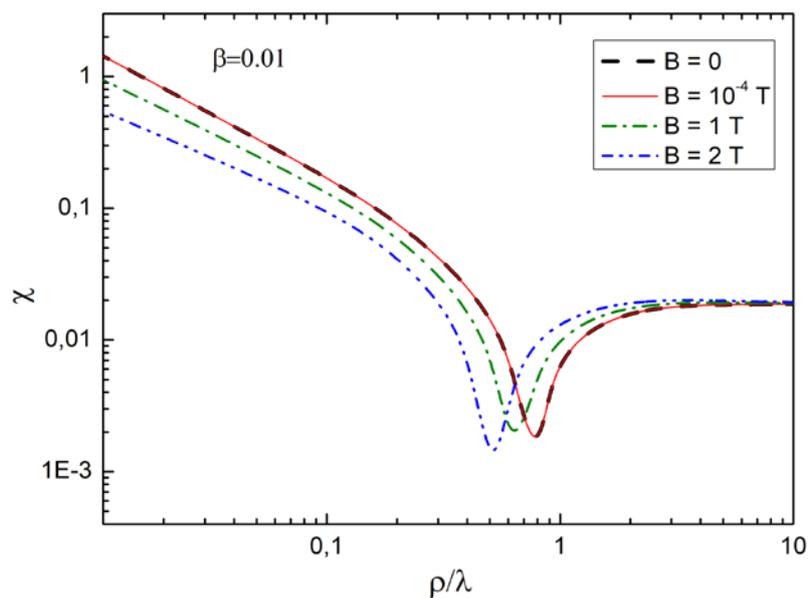


Рисунок 3 – Углы рассеяния в зависимости от прицельного параметра для параметра взаимодействия $\beta = 0.01$ при различных значениях внешнего магнитного поля

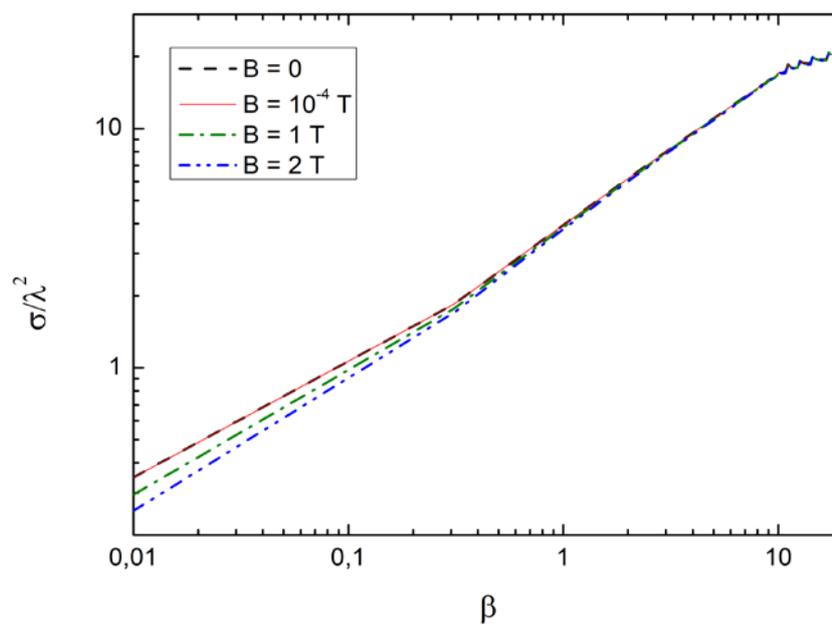


Рисунок 4 – Сечение рассеяния в зависимости от параметра взаимодействия β при различных значениях внешнего магнитного поля

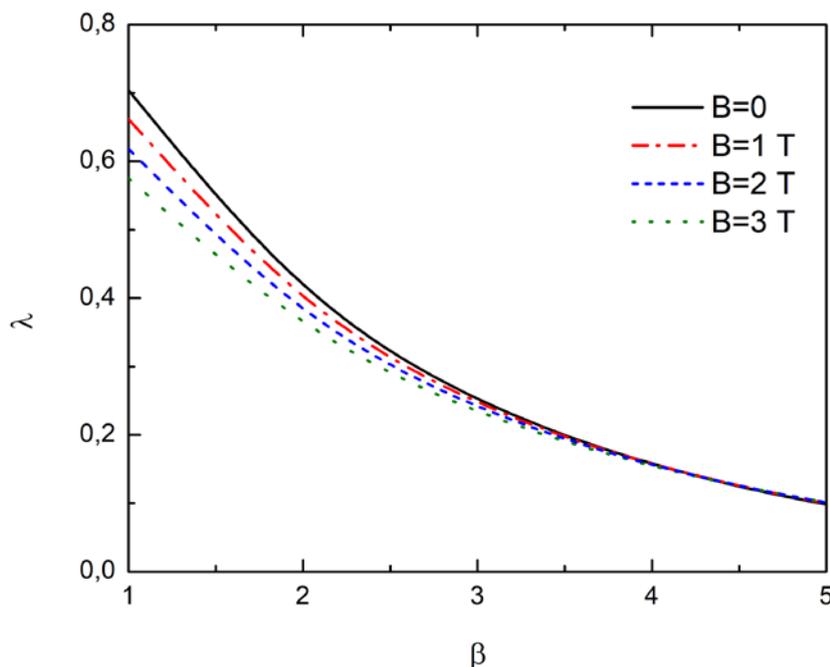


Рисунок 5 – Кулоновский логарифм в зависимости от параметра взаимодействия β при различных значениях внешнего магнитного поля

Заключение

В данной работе были исследованы процессы рассеяния электрона на ионе в плотной плазме инерционного термоядерного синтеза в магнитном поле. Из полученных результатов выявлено, что учет магнитного поля привел к немономонному изменению угла рассеяния и уменьшению сечения рассеяния при слабых взаимодействиях частиц. Также установлено, что при больших значениях параметра взаимодействия β магнитное поле не влияет на значение кулоновского логарифма.

Эти результаты дают полезную информацию о влиянии учета магнитного поля в процессах столкновении в плотной плазме инерционного термоядерного синтеза. Таким образом, для реализации идеи инерционного термо-

ядерного синтеза в присутствии магнитного поля, прежде всего, возникает потребность в надежном определении физических характеристик неизотермической плотной плазмы в магнитном поле. Эти знания необходимы и для решения важнейшей технологической задачи инерционного термоядерного синтеза: определение оптимальной конструкции мишени и характеристик драйвера.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках гранта AP09258792 «Транспортные, оптические и термодинамические свойства неизотермической плотной плазмы инерционного термоядерного синтеза в магнитном поле».

Литература

- 1 Hoffmann D.H.H. et al. Frontiers of dense plasma physics with intense ion and laser beams and accelerator technology // Phys. Scripta. – 2006. – Vol. 1. – P. 123.
- 2 Tahir N.A., Deutch C., Fortov V. et al. Proposal for the Study of Thermophysical Properties of High-Energy-Density Matter Using Current and Future Heavy-Ion Accelerator Facilities at GSI Darmstadt // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 96. – № 3. – P. 035001.
- 3 Goff J., Casper T., Murray S. Toroidal magnetic confinement and coil power supplies in ITER // IEEE 2011 Intern. Conf. on Electrical Machines and Systems, 20-23 Aug. 2011 – ID 12389799.

- 4 Freidberg J.P., Mangiarotti F.J., Minervini J. Designing a tokamak fusion reactor – How does plasma physics fit in? // *Physics of Plasmas*. – 2015. – Vol. 22 (7). – P. 070901.
- 5 Hassanein A., Sizyuk V. Potential design problems for ITER fusion device // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11 (1). – P. 2069.
- 6 Toepffer C. Scattering of magnetized electrons by ions // *Phys. Rev. A*. – Vol. 66. – P. 160.
- 7 Jiang Ch., Li D. and Dong Ch. Magnetized Rutherford scattering angle for electron-ion collision in plasma // *arXiv:2101.05943*. – 14 p.
- 8 Nersisyan H., Zwicknagel G. Binary collisions of charged particles in a magnetic field // *Physical Review E*. – 2009. – Vol. 79. – ID 066405 (1-18).
- 9 Dong C., Ren H., Cai H., and Li D. Effects of magnetic field on anisotropic temperature relaxation // *Physics of Plasmas*. – 2013. – Vol. 20. – ID 032512.
- 10 Ramazanov T.S., Kodanova S.K., Bastykova N.Kh., Moldabekov Zh.A. Effect of dust particle polarization on scattering processes in complex plasmas // *Recent Contributions to Physics (Rec.Contr.Phys.)*. – 2015. – Vol. 53, no. 2. – P. 74-82.
- 11 Ramazanov, T.S. et al. Classical scattering of an ion influenced by polarization effect of dust particles // *Recent Contributions to Physics (Rec.Contr.Phys.)*. – 2018. – Vol. 65, no 2. – P.44-50.
- 12 Ordonez C.A., Molina M.I. Evaluation of the Coulomb logarithm using cutoff and screened Coulomb potentials // *Phys. Plasmas*. – 1994. – Vol. 1. – P. 2515.
- 13 Ramazanov T.S., Kodanova S.K. Coulomb logarithm of a nonideal plasma // *Phys. Plasmas*. – 2001. – Vol. 8. – P. 5049.
- 14 Issanova M.K., Kodanova S.K., Ramazanov T.S., Bastykova N.Kh., Moldabekov Zh.A., Meister C.-V. Classical scattering and stopping power in dense plasmas: the effect of diffraction and dynamic screening // *Laser and Particle Beams*. – 2016. – Vol. 34. – P. 457-466.
- 15 Wang W.-M. et.al. Magnetically Assisted Fast Ignition // *Phys. Rev. Lett.* – 2015. – Vol. 114. – P. 015001.
- 16 Laweet K.F.F. et.al. Direct measurement of kilo-tesla level magnetic field generated with laser-driven capacitor-coil target by proton deflectometry // *Appl. Phys. Lett.* – 2016. – Vol. – 108. – P. 091104.
- 17 Luan S.X. et. al. Laser Pulse Compression Using Magnetized Plasmas // *Phys. Rev E*. – 2016. – Vol. 94. – P. 053207.

References

- 1 D.H.H. Hoffmann et al., *Phys. Scripta*, 1, 123 (2006).
- 2 N.A. Tahir, C. Deutch, V. Fortov et al., *Phys. Rev. Lett.*, 96 (3), 035001 (2005).
- 3 J. Goff, T. Casper, S. Murray, *IEEE 2011 Intern. Conf. on Electrical Machines and Systems*, 20-23 Aug. 2011 (2011).
- 4 J.P. Freidberg, F.J. Mangiarotti, J. Minervini, *Phys. Plasmas*, 22 (7), 070901 (2015).
- 5 A. Hassanein, V. Sizyuk, *Sci. Rep.*, 11 (1), 2069 (2021).
- 6 C. Toepffer, *Phys. Rev. A*, 66, 160 (2002).
- 7 Ch. Jiang, D. Li and Ch. Dong, *arXiv: 2101.05943*.
- 8 H. Nersisyan, G. Zwicknagel, *Phys. Rev. E*, 79, 066405 (2009).
- 9 C. Dong, H. Ren, H. Cai, and D. Li. *Phys. Plasmas*, 20, 032512 (2013).
- 10 T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova, N.Kh. Bastykova, Zh.A. Moldabekov, *Rec. Contr. Phys.*, 53 (2), 74-82 (2015).
- 11 T.S. Ramazanov et al., *Rec. Contr. Phys.*, 65(2), 44-50 (2018).
- 12 C.A. Ordonez, M.I. Molina, *Phys. Plasmas*, 1, 2515 (1994).
- 13 T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova, *Phys. Plasmas*, 8, 5049 (2001).
- 14 M.K. Issanova, S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, N.Kh. Bastykova, Zh.A. Moldabekov, C.-V. Meister, *Laser. Part. Beams*, 34, 457-466 (2016).
- 15 W.-M. Wang et.al., *Phys. Rev. Lett.*, 114, 015001 (2015).
- 16 K.F.F. Laweet et al., *Appl. Phys. Lett.*, 108, 091104 (2016).
- 17 S.X. Luan et al., *Phys. Rev E.*, 94, 053207 (2016).