

Научно-координационная сессия
«Исследования неидеальной плазмы»

23-24.11.11

**Ультрахолодная
неравновесная плазма в
однородном магнитном поле**

Бронин С.Я., Бобров А.А., Зеленер Б.Б., Зеленер Б.В.

Манькин Э.А., Хихлуха Д.Р.

ОИВТ РАН, НИЯУ МИФИ, РНЦ «Курчатовский
институт»

Работы по исследованию плазмы в сильном магнитном поле

1. T.M.O'Neil Phys. of Fluids, 26, 2128, 1983, "Collision operator for a strongly magnetized pure electron plasma"
2. T.M.O'Neil, P.G.Hiorth, Phys. of Fluids, 28, 3241, 1985, "Collisional dynamics of a strongly magnetized pure electron plasma"
3. A.W.Hyatt, C.F.Driscoll, J.H. Malmberg Phys.Rev.Let.,59,2975,1987, "Measurement of the Anisotropic Temperature Relaxation Rate in a Pure Electron Plasma"
4. J.B.Delos, S.K.Knudson, D.W. Noid, Phys.Rev.A, 30,1208,1984, "Trajectories of an atomic electron in a magnetic field"
5. M.E.Glinsky, T.M.O'Neil Phys. of Fluids, B 3, 1279, 1991, "
6. F. Robisheaux, J.D.Hanson, Phys.Rev.A, 69,010701,2004, "Three body recombination for protons moving in a strong magnetic field"
7. С.А. Корягин, ЖЭТФ, 117, 853, 2000, «Интеграл электрон-ионных столкновений в сильном магнитном поле»

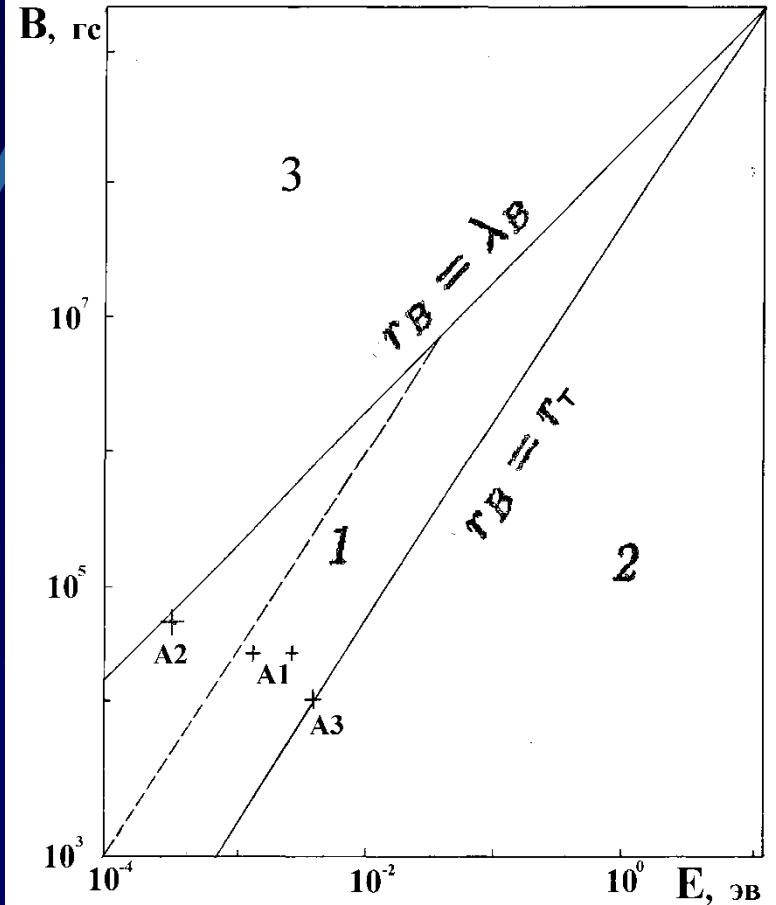
Диаграмма «индукция магнитного поля – энергия электрона»

$$r_D = \left[\frac{k_b T_e}{4\pi n_e e^2} \right]^{1/2} \quad r_T = \frac{e^2}{2E}$$

$$r_B = \left[\frac{2E}{m_e \omega_B^2} \right]^{1/2} \quad \omega_B = \frac{eB}{m_e c}$$

$$\lambda_B = \hbar / \sqrt{2\pi m \hbar \omega_B}$$

$$B_{cr} = e^3 m_e^2 c / \hbar^3 = 2,35 \cdot 10^9 \text{ Гс}$$



Формула Томсона

Простейшая модель, которая позволяет оценить коэффициент рекомбинации, была предложена Томсоном. В случае столкновения электрон-электрон-ион коэффициент рекомбинации можно определить следующим образом. Рекомбинирующие частицы должны сблизиться на расстояние, при котором их потенциальная энергия порядка кинетической. Это расстояние для электрона и иона - r_T . Кроме того, r_T также минимальное расстояние при столкновении между электронами. Из условия $N_D \gg 1$ следует, что

$$r_T \ll r_D$$

При этом число частиц в сфере радиуса r_T много меньше 1, что позволяет пользоваться приближением парных столкновений в случае прицельных параметров меньше r_T .

Непрерывным условием тройной рекомбинации является возможность передачи энергии, выделяющейся при рекомбинации, третьей частице. Для этого последняя должна находиться в объеме порядка $n_e r_T^3$. Скорость рекомбинации будет пропорциональна частоте передачи энергии от слабосвязанного электрона к свободному. Эта частота определяется величиной $\delta \langle v \sigma \rangle$, где δ - коэффициент упругих потерь, σ - сечение взаимодействия между электронами. Для столкновения электрон-ион-электрон приближенно $\delta \sim 1$, $\sigma \sim e^4 / T_e^2$, $\bar{v}_e \sim \sqrt{T_e / m_e}$. Поэтому

$$\delta \langle v \sigma \rangle \sim \frac{e^4}{\sqrt{m_e} T_e^{3/2}}$$

$$v_{ee} \sim \frac{e^4}{\sqrt{m_e} T_e^{3/2}} L_e$$

$$\delta \langle v \sigma \rangle \sim \frac{e^4}{\sqrt{m_e} T_e^{3/2}} \Lambda_e$$

$$\alpha = \frac{4\pi\sqrt{2\pi}}{9} \cdot \frac{e^{10} \Lambda_e}{\sqrt{m_e T_e^{9/2}}}$$

Гуревич-Питаевский

$$\alpha = 17,2 \bar{v}_e r_T^5$$

Мансбах-Кек

$$\bar{v}_e = \sqrt{2T_e / m_e}$$

Электронная частота столкновений в сильном магнитном поле

В работе Т.М. О'Neil (Phys.Fluids, 26, 2128, 1983) был выведен интеграл столкновений для газа электронов в парном приближении в однородном магнитном поле. В приближении $r_B \ll r_T$ при помощи уравнений БГКИ для функции распределения был получен интеграл столкновений. Затем функция распределения в интеграле столкновений была разложена в ряд Тейлора по степеням изменения энергии для степеней свободы электрона поперек магнитного поля. В результате была получена частота столкновений

$$\nu_{ee} \sim n_e \bar{v}_e r_T^2 (r_B / r_T)^2$$

Коэффициент рекомбинации в сильном магнитном поле

$$\alpha_B = 17,2 \bar{v}_e r_T^5 (r_B / r_T)^2$$

$$\alpha_B \sim T_e^{-3/2} \quad \alpha_B \sim B^{-2}$$

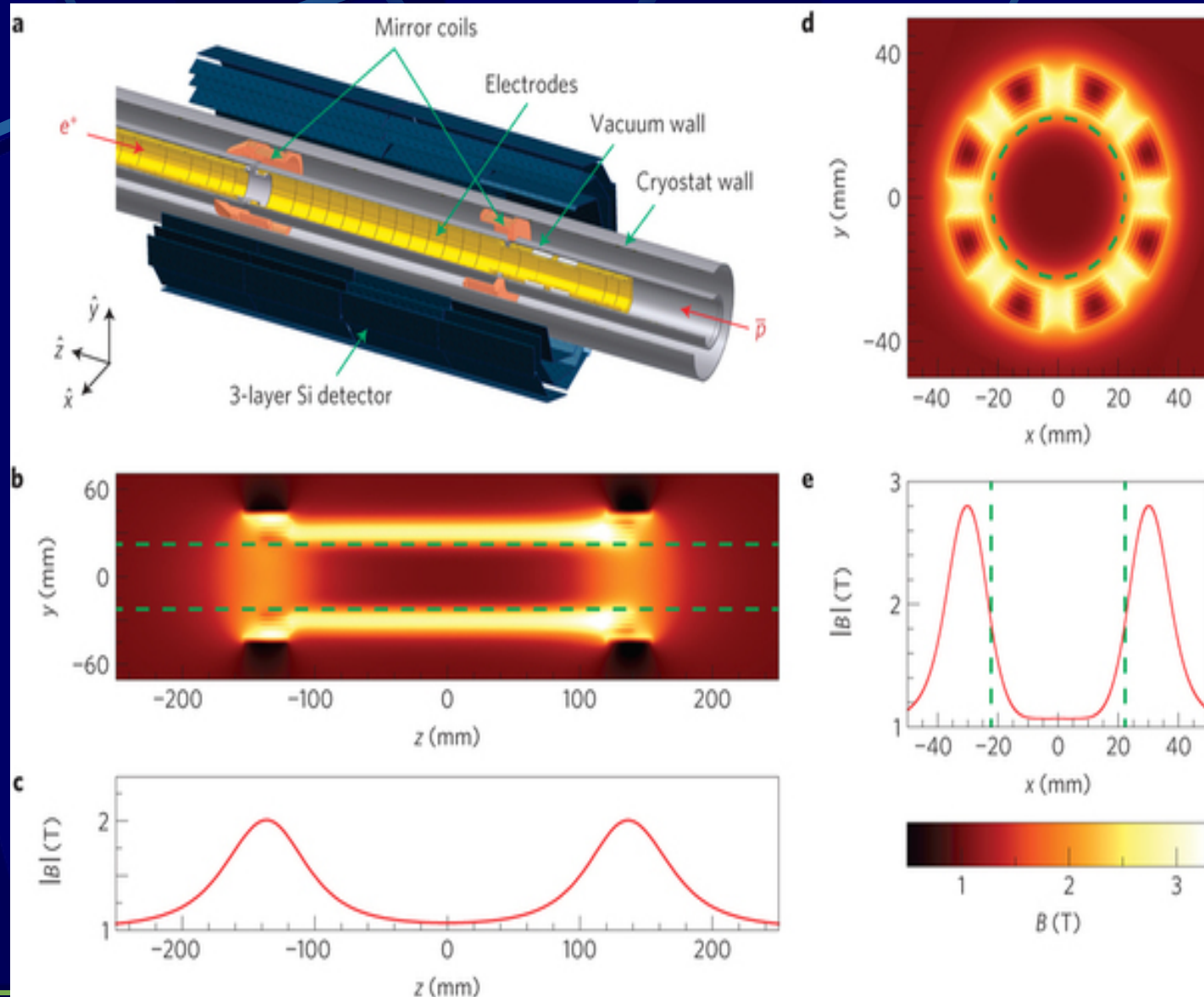
The ATHENA Collaboration
2002

The ATRAP Collaboration
2004

The ALPHA Collaboration
2011

G. B. Andresen, M. D. Ashkezari,
M. Baquero-Ruiz, W. Bertsche,
P. D. Bowe, E. Butler,
C. L. Cesar, M. Charlton,
A. Deller, S. Eriksson,
J. Fajans, T. Friesen,
M. C. Fujiwara, D. R. Gill,
A. Gutierrez, J. S. Hangst,
W. N. Hardy, R. S. Hayano,
M. E. Hayden, A. J. Humphries,
R. Hydomako, S. Jonsell,
S. L. Kemp, L. Kurchaninov,
N. Madsen, S. Menary,
P. Nolan, K. Olchanski,
A. Olin, P. Pusa,
C. Ø. Rasmussen, F. Robicheaux,
E. Sarid, D. M. Silveira,
C. So, J. W. Storey,
R. I. Thompson, D. P. van der Werf,
J. S. Wurtele & Y. Yamazaki

АНТИВОДОРОД



Параметры антиводородной плазмы

A1: $B=3 \times 10^4 \text{ Гс}$; $T_{e1} = 15 \text{ К}$, $T_{e2} = 30 \text{ К}$,

A2 : $B=5.4 \times 10^4 \text{ Гс}$; $T_e = 4 \text{ К}$

A3 : $B=10^4 \text{ Гс}$; $T_e = 40-52 \text{ К}$; $T_p = 100 \text{ К}$

$N_e \sim 1,5 \times 10^6$; $N_p \sim 3 \times 10^4$

Сравнение с экспериментом

1. A1: $N_H(15K)/N_H(30K)=2,8$; эксп. - 2,6

$$T = 15K; r_T = 5.6 \cdot 10^{-5} \text{ см}; r_B = 4.0 \cdot 10^{-6} \text{ см}; \alpha_B = 1,0 \cdot 10^{-16} \text{ см}^6 / \text{сек};$$

2. A1-A2: $N_H(4K)/N_H(15-18K)=2,25-4$; эксп. - 4,0

3. A2: $\Delta N_{\overline{H}} = n_e^2 n_p \alpha_B \Delta t \Delta V = 1,3$; эксп. - 1,0

$$n_e = 1,15 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}; n_p = 0,59 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}; T_e = 4K; B = 5,4T; \Delta V = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3$$

$$\Delta t = 0,02 \text{ сек} \quad r_T = 2.1 \cdot 10^{-4} \text{ см}; r_B = 1.2 \cdot 10^{-6} \text{ см}; \alpha_B = 2,3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^6 / \text{сек};$$

4. A3: $\Delta N_{\overline{H}} = n_e^2 n_p \alpha_B \Delta t \Delta V = (5,2 - 8,1) \times 10^3$; эксп. - 6×10^3

$$N_e = 10^6; N_p = 1,5 \cdot 10^4; T_e = (40 - 54)K; T_p = 100K; B = 1T; \Delta V = 2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3 \quad \Delta t = 1 \text{ сек}$$

$$r_B \cong r_T \cong 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}$$

$$\alpha_B = 2,2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^6 / \text{сек}$$

Метод молекулярной динамики

Модель плазмы

- Однородное магнитное поле $B=500-50000\text{Гс}$
- Двухкомпонентная водородоподобная плазма – электроны и протоны. $N_e=N_i$.
- Потенциал взаимодействия одноименных зарядов – закон Кулона
- Потенциал взаимодействия разноименных зарядов – закон Кулона, скорректированный на малых расстояниях. При $r < a_0$, $U = e^2/a_0$
- Рассматриваемая область температур электронов $T_e = 1-50\text{К}$ и плотностей $n_e = 10^8-10^{12}\text{ см}^{-3}$
- Метод молекулярной динамики. Периодические граничные условия

Уравнения движения и алгоритм расчета

Система диф. уравнений движения под действием магнитного поля и суммарной кулоновской силы для частицы с зарядом и массой (в покомпонентной декартовой форме

$$\ddot{x} = \omega_H \dot{y} + \frac{\Phi_x}{m}$$

$$\ddot{y} = -\omega_H \dot{x} + \frac{\Phi_y}{m}$$

$$\ddot{z} = \frac{\Phi_z}{m}$$

$$\omega_H = \frac{eH}{mc}$$

$$\Phi_i$$

- проекция суммарной кулоновской силы на соответствующую ось

алгоритм reverse RESPA (построен на основе скоростного алгоритма Верле)

Функция распределения

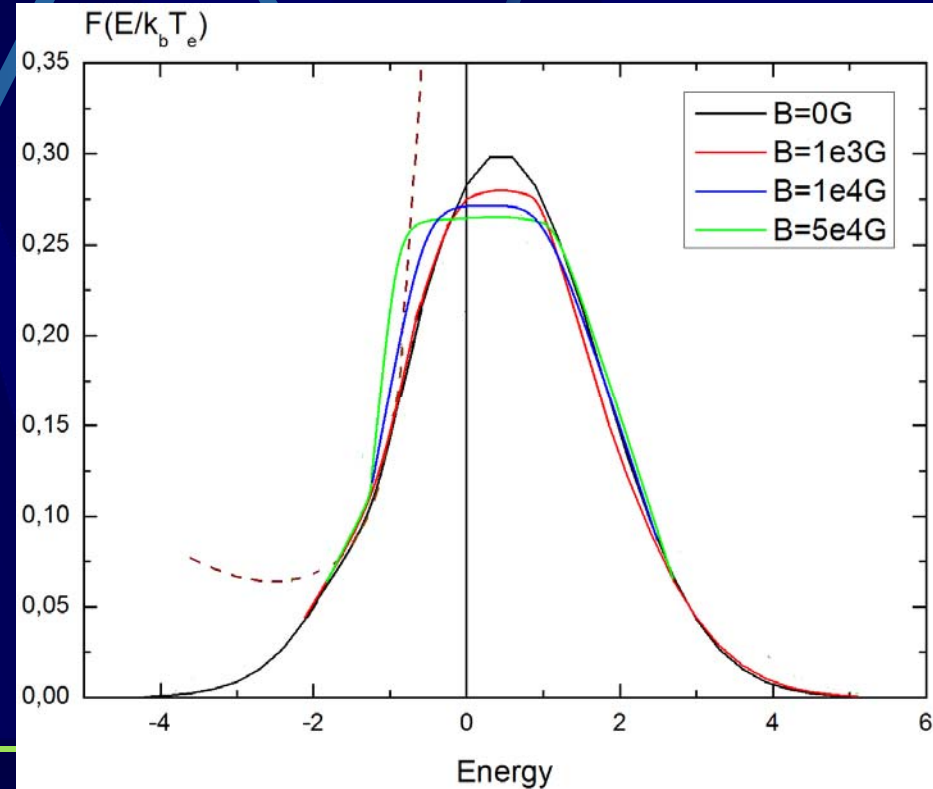
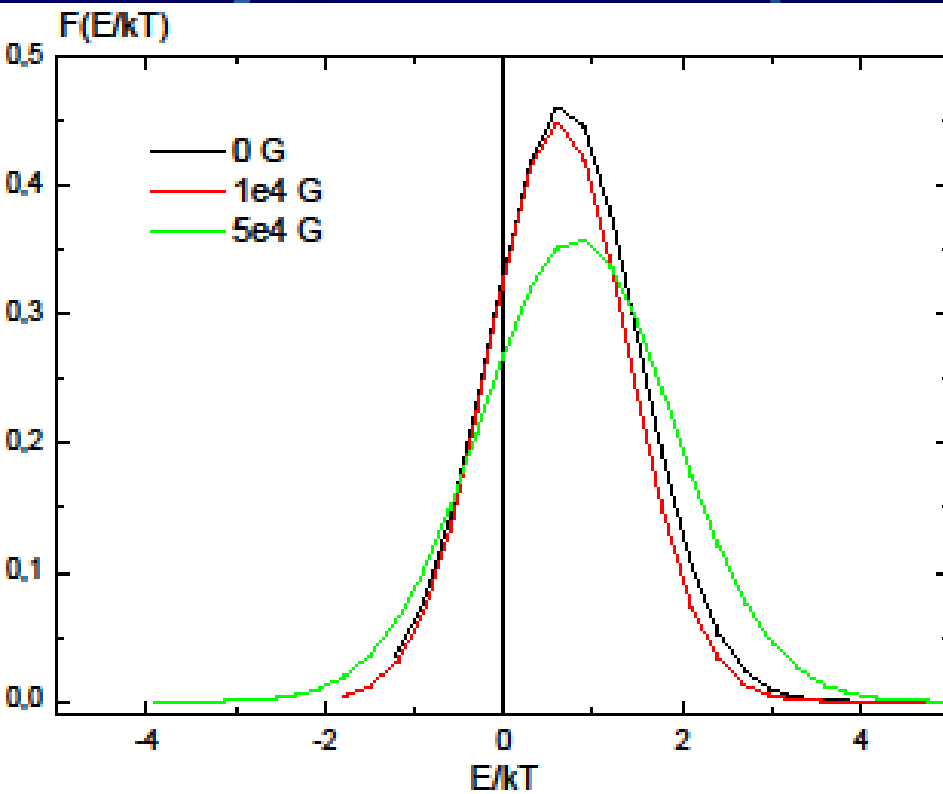
$$n_e = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$T_e = 29 \text{ K}$$

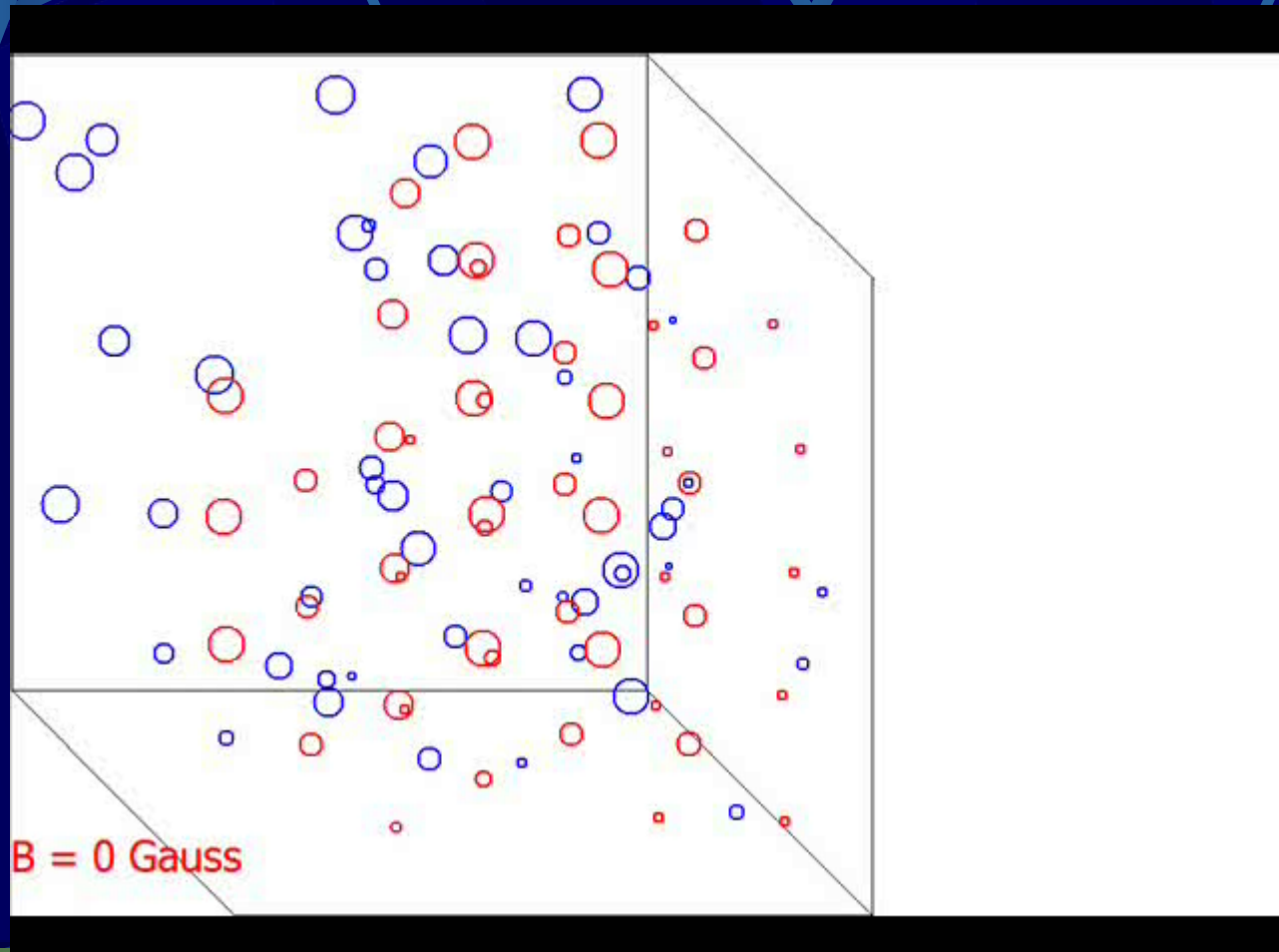
$$f(E_i) = \frac{\sum_{k=1}^s f_k(E_i)}{N_e s \Delta E_i}$$

$$n_e = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$T_e = 8 \text{ K}$$



КИНО 13 К

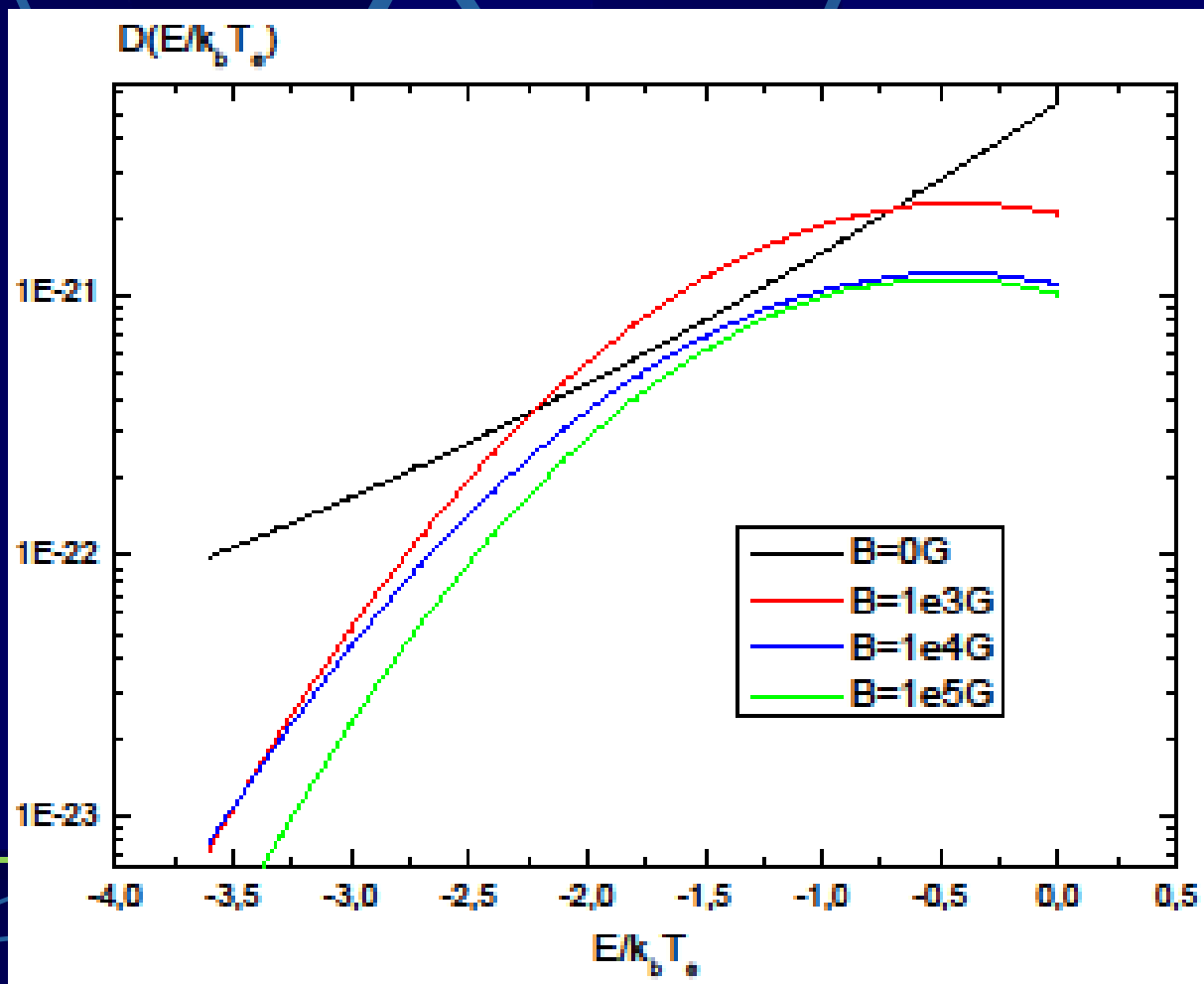


Коэффициент диффузии в пространстве энергий

$$n_e = 10^{10} \text{ см}^{-3}$$

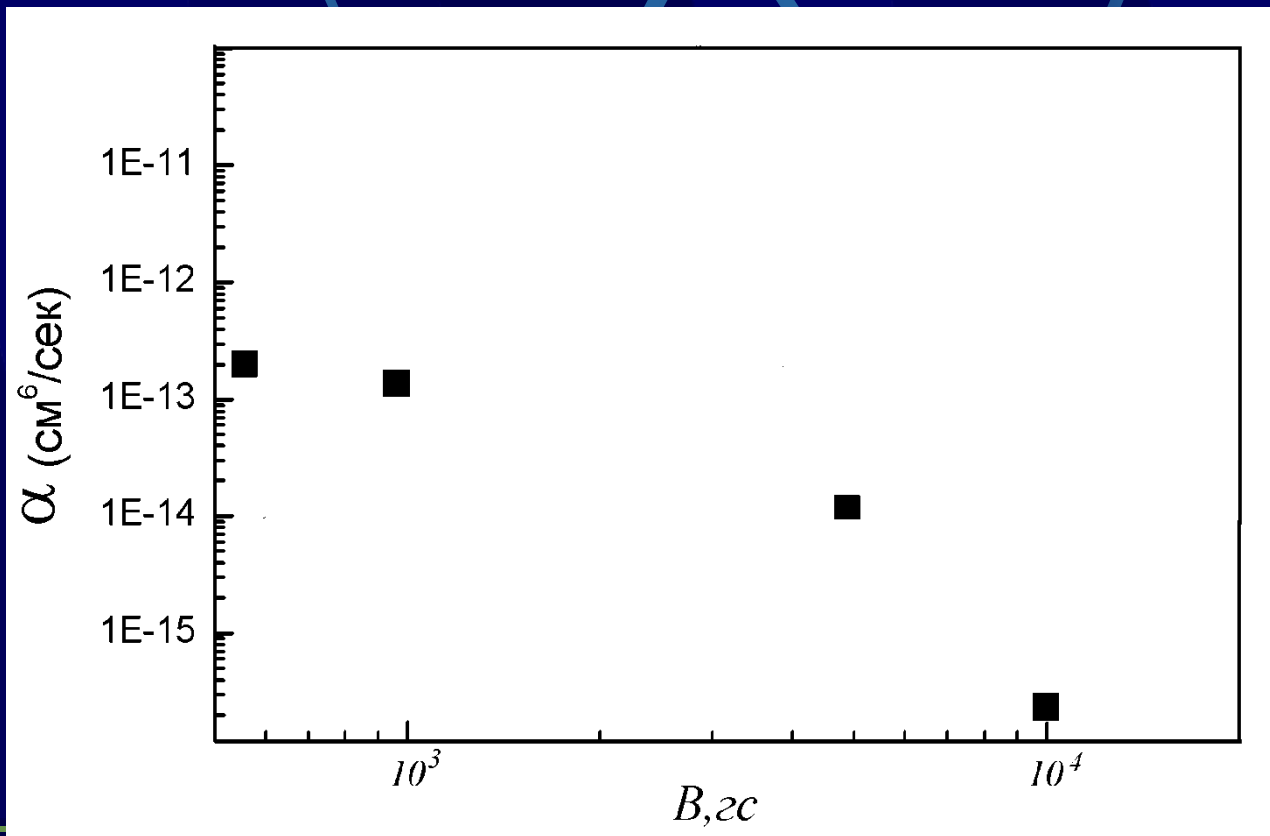
$$T_e = 8 \text{ K}$$

$$D(E_i) = \frac{\sum (E_i - E_j)^2 \omega(E_i, E_j)}{2\Delta n_i \Delta t}$$



Коэффициент рекомбинации в слабонеидеальной ультрахолодной плазме в магнитном поле

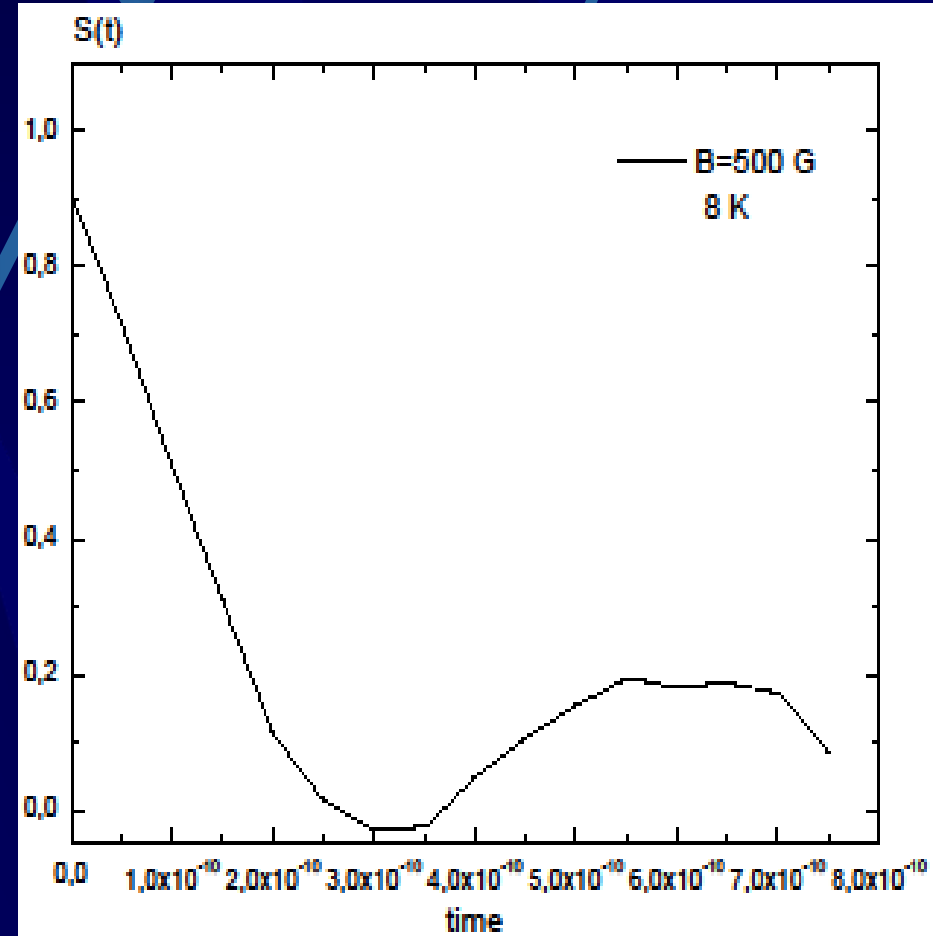
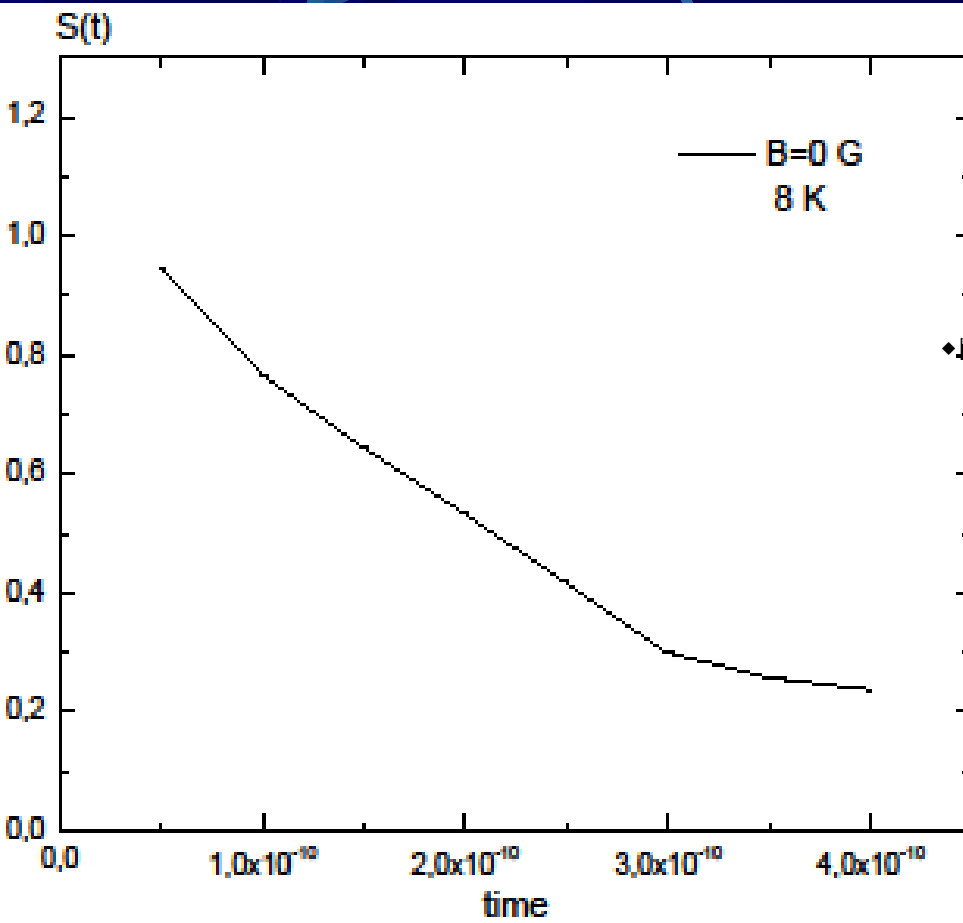
$T=8\text{K}$



Автокоррелятор скорости

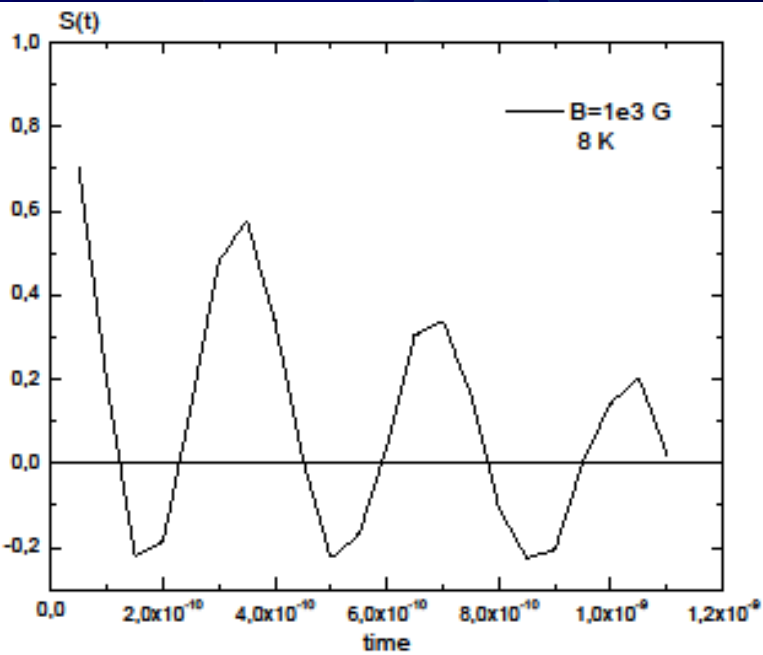
$$\frac{1}{N} \frac{\langle \vec{V}_i(0) \vec{V}_i(t) \rangle}{(\vec{V}_i(0))^2}$$

$$\tau = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} \frac{\langle \vec{V}_i(0) \vec{V}_i(t) \rangle}{(\vec{V}_i(0))^2} dt$$



$1,14 \times 10^{-10} - 7,16 \times 10^{-10}$

автокорреляторы

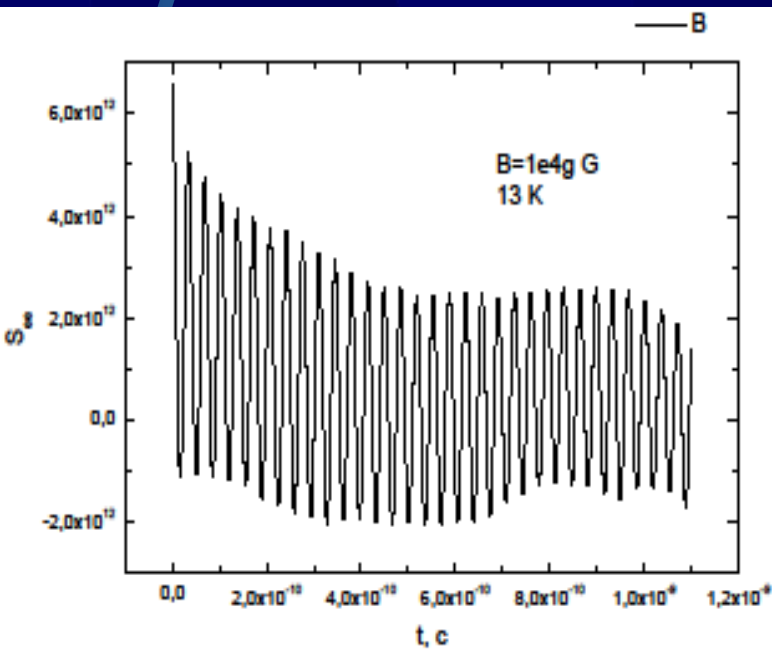
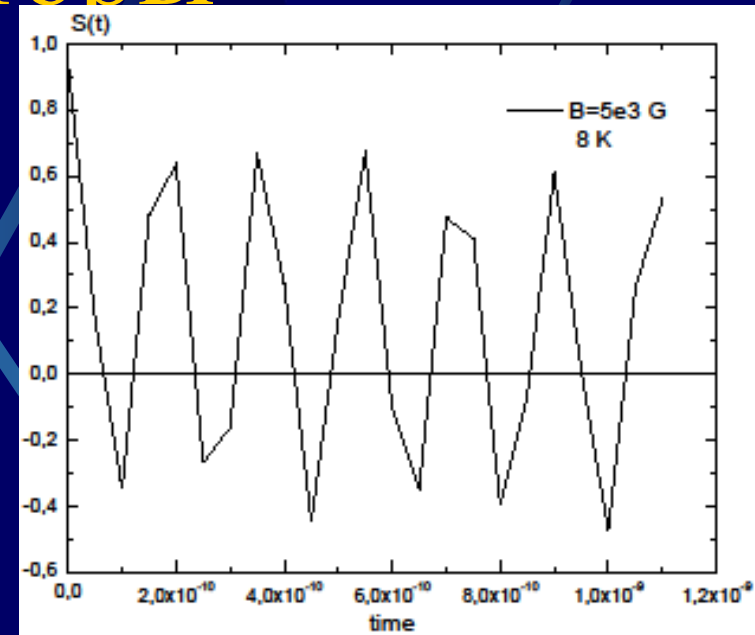


$1,14 \times 10^{-11} \text{ c} >$

$7,16 \times 10^{-11} \text{ c} >$

$< 5,7 \times 10^{-11} \text{ c}$

$< 3,6 \times 10^{-10} \text{ c}$

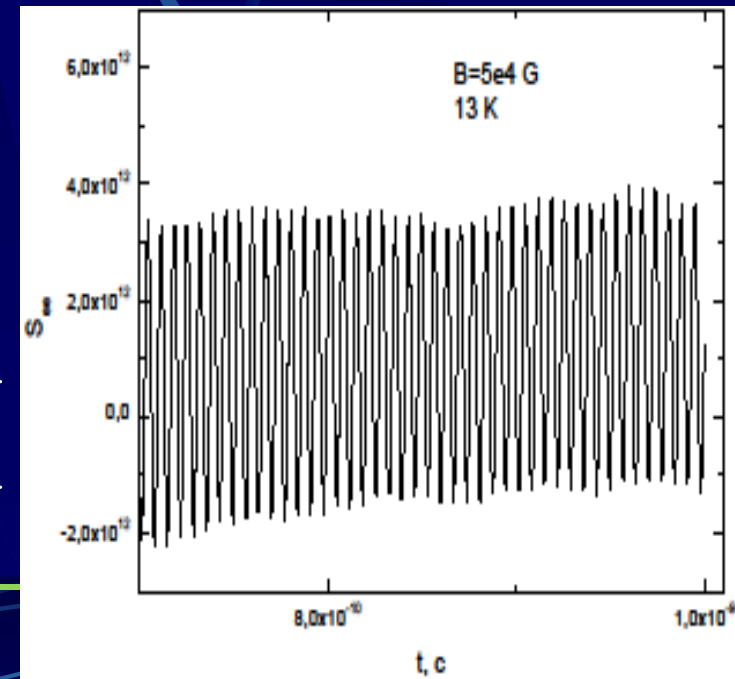


$< 5,7 \times 10^{-12} \text{ c}$

$< 3,6 \times 10^{-11} \text{ c}$

$1,14 \times 10^{-12} \text{ c} >$

$7,16 \times 10^{-12} \text{ c} >$



Выводы

- 1. Впервые предложена формула для коэффициента трехчастичной рекомбинации слабонеидеальной ультрахолодной плазмы в сильном магнитном поле.
- 2. Трехчастичная рекомбинация в сильном магнитном поле протекает значительно медленнее, чем без него. Коэффициент рекомбинации ниже на несколько порядков величины.
- 3. Рассчитаны методом молекулярной динамики функция распределения, коэффициент диффузии в энергетическом пространстве, автокорреляторы скорости электронов слабонеидеальной ультрахолодной плазмы в магнитном поле для разных значений индукции магнитного поля.
- 4. Рассчитан коэффициент столкновительной рекомбинации слабонеидеальной ультрахолодной плазмы в магнитном поле для разных значений индукции магнитного поля.

Спасибо за
внимание!