



Девятая ежегодная конференция
Физика плазмы в Солнечной системе

10-14 февраля 2014, ИКИ РАН

Научные программы Президиума РАН №22 и ОФН РАН №15

ДИНАМИКА ЗАРЯДКИ ПРОВОДЯЩЕЙ СФЕРЫ В СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ ВО ВНЕШНЕМ ПОЛЕ

В.С. Грач, М.А. Гарасёв

Институт прикладной физики РАН,
г. Нижний Новгород

Предпосылки:

Пылевая плазма (плазма, содержащая крупные заряженные частицы субмикронного и микронного размера) широко распространена в космосе, различных областях атмосферы Земли, изучается в лабораторных условиях.

Особенности пылевой плазмы:

Заряд пылевых частиц – динамическая переменная задачи.

Зарядка пылевых частиц представляет собой дополнительный нестационарный процесс, который может существенно влиять на все процессы, происходящие в пылевой плазме.

История вопроса:

Взаимодействие объекта и окружающей его плазмы:

зондовая диагностика (*О.В. Козлов, 1969.*)

спутники в околоземном пространстве (*Альперт Я.Л., Гуревич А.В., Питаевский Л.П. 1963.*)

зарядка крупных частиц в различных плазмopodobных средах (исследования пылевой плазмы, как в лабораторных условиях, так и в оболочках Земли)

В.Н.Цытович, 1997;

В.Е.Фортов, А.Г. Храпак, И.Т. Якубов, 2004;

А.В. Гапонов-Грехов, Д.И. Иудин, В.Ю. Трахтенгерц, 2005;

Sorokin A. E., 2008;

В большинстве работ рассматриваются:

тепловое движение заряженных плазменных частиц и/или относительное движение пылевой частицы и окружающей плазмы (если присутствует электрическое поле или поток нейтрального газа)

Как правило, процессами рекомбинации и эффектами пространственного заряда пренебрегают.

История вопроса:

Процессы рекомбинации и эффекты пространственного заряда впервые учитывались в работе

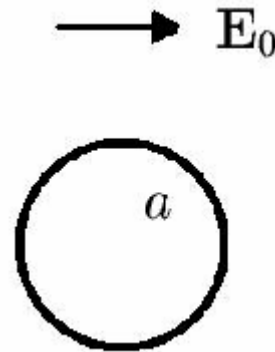
[Грач В.С., Семенов В.Е., Трахтенгерц В.Ю., 2009], где в ряде приближений рассматривался стационарный режим зарядки при условии отсутствия диффузии и достаточно сильного внешнего поля (дрейфовые длины много больше радиуса частицы).

Цели работы:

1. Учесть наличие диффузии.
2. Исследовать временную динамику процессов зарядки при наличии диффузии.

Постановка задачи:

Идеально проводящая
неподвижная сфера в
однородной плазме
(сторонние источники
ионизации):



Два сорта ионов в плазме:

$$q_+ = e > 0,$$

$$q_- = -e$$

Ионизационное равновесие: двухчастичная рекомбинация.

Система уравнений:

$$\begin{aligned}
 e\mathbf{E} - \frac{\nabla p_+}{N_+} - m_+\nu_+V_+ &= 0; & \mathbf{E} &- \text{ напряженность} \\
 \frac{\partial N_+}{\partial t} + \text{div}(N_+V_+) &= J - \alpha N_+N_-; & & \text{самосогласованного электрического} \\
 p_+ &= N_+T_+; & & \text{поля,} \\
 -e\mathbf{E} - \frac{\nabla p_-}{N_-} - m_-\nu_-V_- &= 0; & N_{+,-} &- \text{ концентрация положительных и} \\
 \frac{\partial N_-}{\partial t} + \text{div}(N_-V_-) &= J - \alpha N_+N_-; & & \text{отрицательных ионов плазмы,} \\
 p_- &= N_-T_-; & m_{+,-}, \nu_{+,-} &- \text{ их массы и частоты} \\
 \frac{\partial Q_d}{\partial t} &= I_+ - I_-; & & \text{столкновений с нейтральными} \\
 \text{div}\mathbf{E} &= 4\pi\rho = 4\pi e(N_+ - N_-); & & \text{частицами,} \\
 \text{rot}\mathbf{E} &= 0. & J &- \text{ интенсивность стороннего} \\
 & & & \text{источника ионизации,} \\
 & & \alpha &- \text{ коэффициент рекомбинации,} \\
 & & & \text{температура системы,} \\
 & & & \text{потoki ионов на сферу}
 \end{aligned}$$

Граничные условия:

нет эмиссии ионов с поверхности сферы: $N_+(r = a) = N_-(r = a) = 0$;

поверхность сферы эквипотенциальна: $\Phi(r = a) = \text{const}$;

невозмущенная плазма на бесконечности: $N_+(r = \infty) = N_-(r = \infty) = N_0 = \sqrt{\frac{J}{\alpha}}$;
 $\mathbf{E}(r = \infty) = \mathbf{E}_0$.

Масштабы задачи и основные параметры:

a – геометрический (радиус сферы),

$\lambda_D^2 = T/(4\pi e^2 N_0)$ – дебаевский радиус окружающей плазмы,

$$l_0 = E_0/(4\pi e N_0) = V_+^{\text{dr}}/(4\pi\sigma_+) = V_-^{\text{dr}}/(4\pi\sigma_-)$$

– электродинамический,

$L_{+,-} = \mu_{+,-} E_0/(\alpha N_0) = V_{+,-}^{\text{dr}}/(\alpha N_0)$ – ионизационные масштабы.

$a \ll l_0$ – сильное внешнее поле

$l_0/L_{+,-} \ll 1$ – слабая рекомбинация

$l_0/L_{+,-} \gg 1$ – сильная рекомбинация

$al_0 \gg \lambda_D$ – слабая диффузия

$al_0 \sim \lambda_D$ – сильная диффузия

Задача:

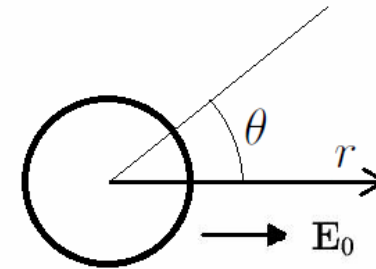
$$\frac{\partial n_+}{\partial \tilde{t}} - \frac{1}{K_+} \operatorname{div}(n_+ \nabla \Phi + K_D^{-2} \nabla n_+) = 1 - n_+ n_-;$$

$$\frac{\partial n_-}{\partial \tilde{t}} - \frac{1}{K_-} \operatorname{div}(-n_- \nabla \Phi + K_D^{-2} \nabla n_-) = 1 - n_+ n_-;$$

$$\Delta \tilde{\Phi} = -(n_+ - n_-);$$

$$\frac{\partial \tilde{Q}_d}{\partial \tilde{t}} = \tilde{I}_+ - \tilde{I}_-.$$

$$K_{+,-} = \frac{l_0}{L_{+,-}} = \frac{\alpha}{4\pi e \mu_{+,-}}, \quad K_D^2 = \frac{l_0^2}{\lambda_D^2} = \frac{E_0^2}{4\pi N_0 T}.$$



Потенциал (создан пространственным зарядом, зарядом сферы, внешним полем):

$$\tilde{\Phi} = \tilde{\Phi}_* + \tilde{\Phi}_Q + \tilde{\Phi}_{E_0} = \tilde{\Phi}_* + \frac{\tilde{Q}_d}{4\pi \tilde{r}} + \left(\frac{(a/l_0)^3}{\tilde{r}^3} - 1 \right) \tilde{r} \cos \theta$$

Потоки ионов:

$$\tilde{I}_+ = -2\pi (a/l_0)^2 \int_0^\pi n_+ V_a^+ \chi(-V_a^+) \sin \theta d\theta;$$

$$\tilde{I}_- = 2\pi (a/l_0)^2 \int_0^\pi n_- V_a^- \chi(-V_a^-) \sin \theta d\theta.$$

$$V_a^+ = \frac{1}{K_+} \left(-\frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \tilde{r}} - \frac{1}{K_D^2} \frac{\partial n_+}{\partial \tilde{r}} \right) \Big|_{\tilde{r}=a/l_0}, \quad \chi - \text{единичная функция}$$

$$V_a^- = \frac{1}{K_-} \left(\frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \tilde{r}} - \frac{1}{K_D^2} \frac{\partial n_-}{\partial \tilde{r}} \right) \Big|_{\tilde{r}=a/l_0}.$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0} = 0, \quad \frac{\partial n_+}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0} = 0, \quad \frac{\partial n_-}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0} = 0;$$

$$\tilde{\Phi}_*(r = a) = \text{const};$$

$$\tilde{\Phi}_*(r = \infty) = 0;$$

$$n_+(r = a) = n_-(r = a) = 0;$$

$$n_+(r = \infty) = n_-(r = \infty) = 1.$$

Начальные условия (невозмущенная плазма):

$$n_+(\tilde{r} > a, \theta) = n_-(\tilde{r} > a, \theta) = 1, \quad \tilde{Q}_d = 0.$$

Динамика распределения пространственного заряда и электрического поля и заряда на сфере:

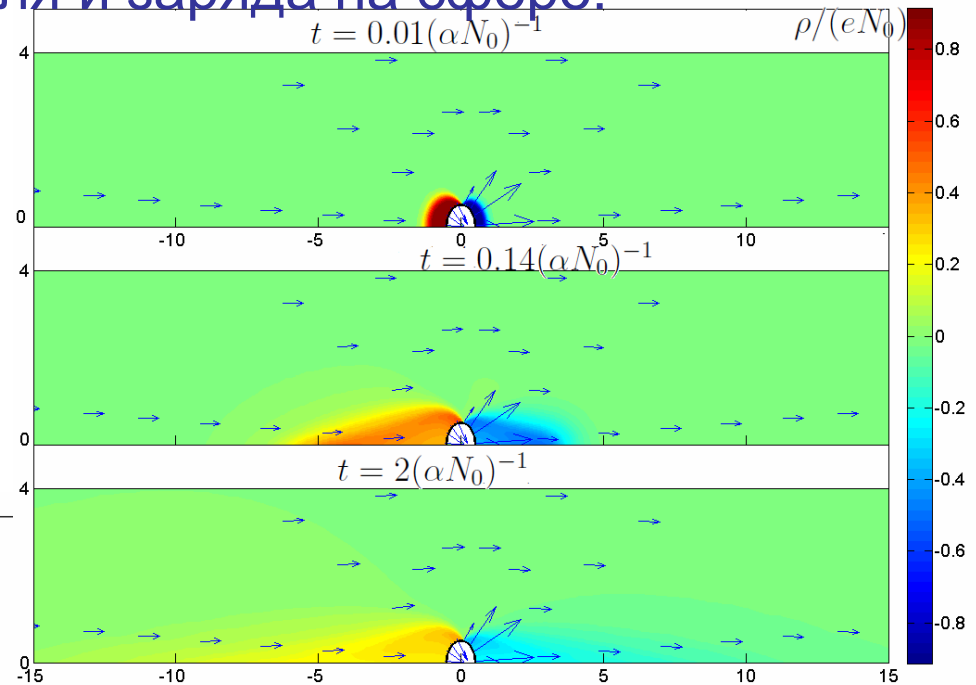
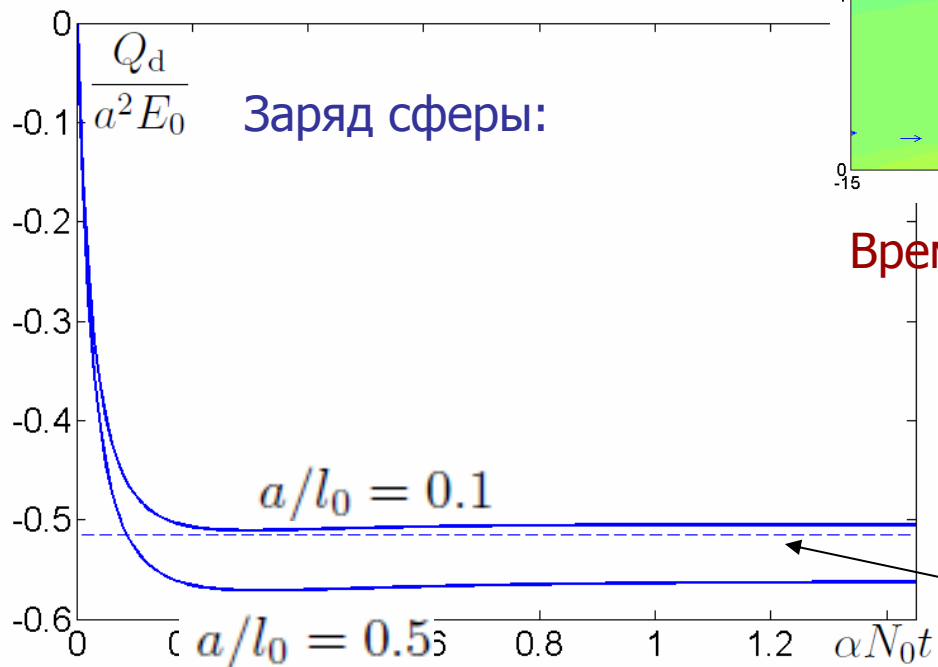
Параметры:

$$K_- = 0.02, K_+ = 0.04$$

(слабая рекомбинация)

$$K_D \gg 100 \quad (\text{нет диффузии})$$

$$\mu_- / \mu_+ = 2 \quad (\text{близкие подвижности})$$



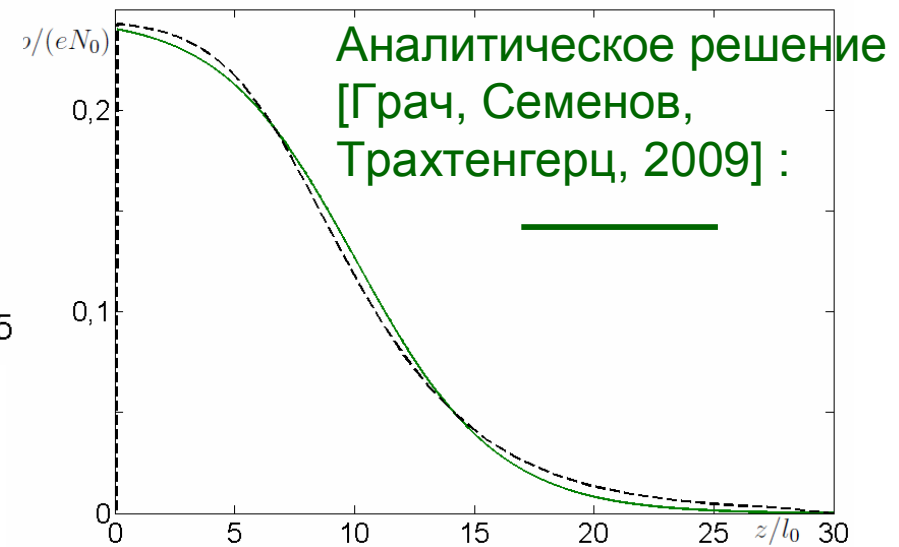
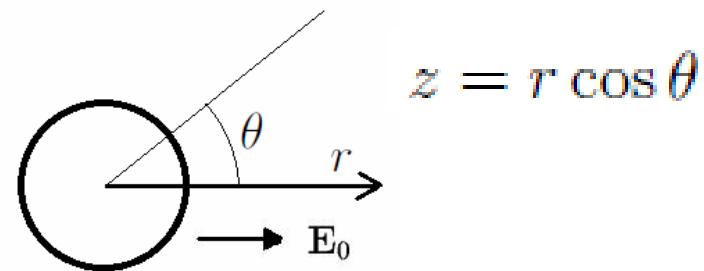
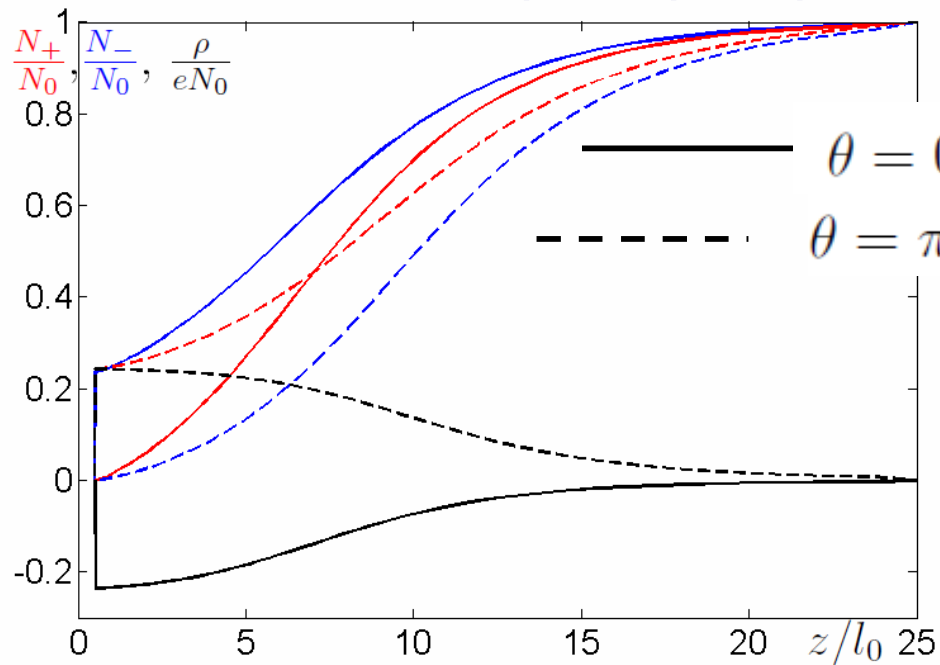
Время установления: $\tau \approx 0.5(\alpha N_0)^{-1}$

$$\frac{Q_d}{a^2 E_0} = \begin{cases} -0.56, & a/l_0 = 0.5; \\ -0.505, & a/l_0 = 0.1. \end{cases}$$

$$\frac{Q_d^{\text{an}}}{a^2 E_0} = -0.51$$

(аналитическое решение)

Стационарное распределение (на оси системы):



Распределение концентраций на оси системы и продольные масштабы возмущений слабо зависят от радиуса сферы.

$$l_{||} = 10l_0$$

Параметры:

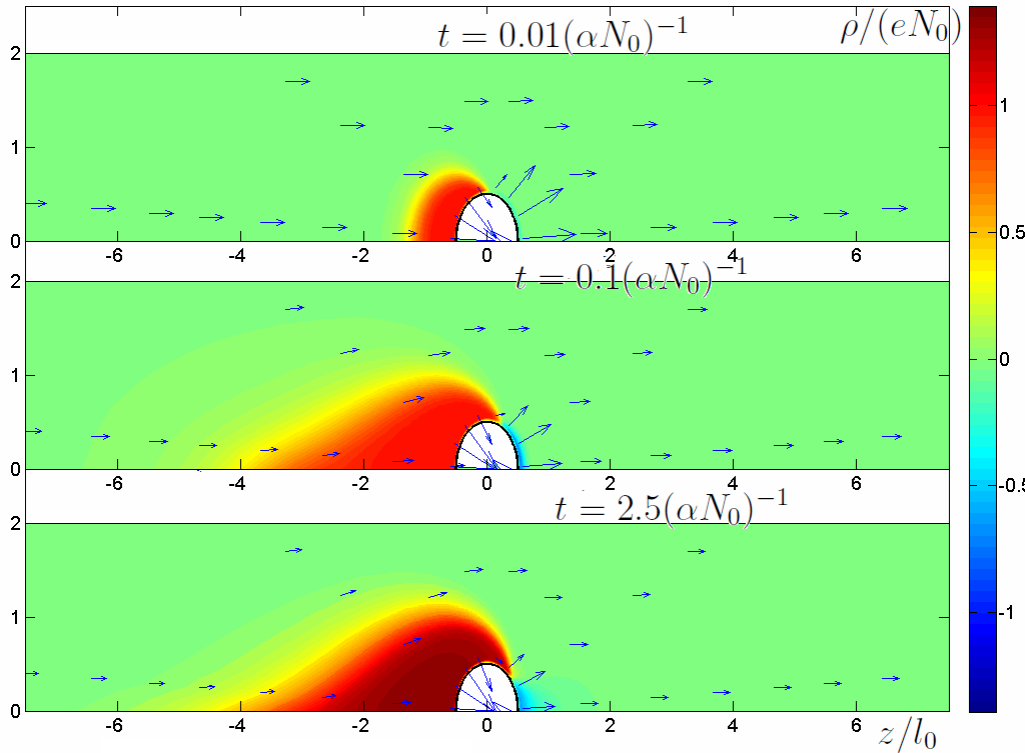
$$K_- = 0.02, K_+ = 0.04$$

(слабая рекомбинация)

$$K_D \gg 100 \quad (\text{нет диффузии})$$

$$\mu_-/\mu_+ = 2 \quad (\text{близкие подвижности})$$

Сильно различающиеся подвижности ($\mu_-/\mu_+ = 100$):



Параметры:

$$K_- = 0.02, \quad K_+ = 2$$

(средняя рекомбинация)

$$K_D \gg 100 \quad (\text{нет диффузии})$$

$$a/l_0 = 0.5$$

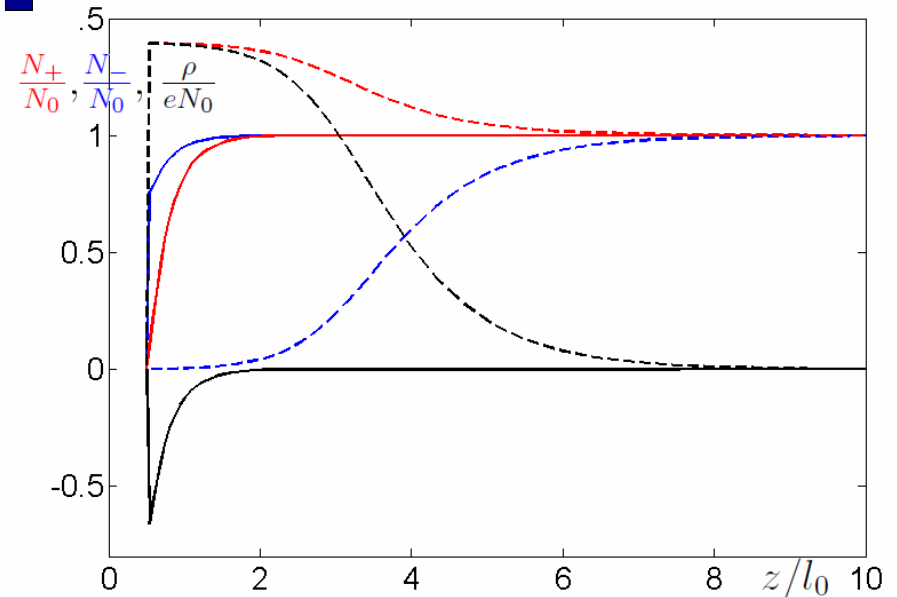
Заряд сферы и поперечный масштаб возмущения увеличиваются с μ_-/μ_+

$$\frac{Q_d}{a^2 E_0} = -2.55 \quad l_{\perp} \approx 3a$$

$$l_{\parallel} \approx \begin{cases} 4l_0 = 8a, & z > 0; \\ 0.5l_0 = a, & z < 0. \end{cases}$$

$$\tau \approx (\alpha N_0)^{-1}$$

Время установления увеличивается с рекомбинацией.



Слабая диффузия ($K_D = 5$):

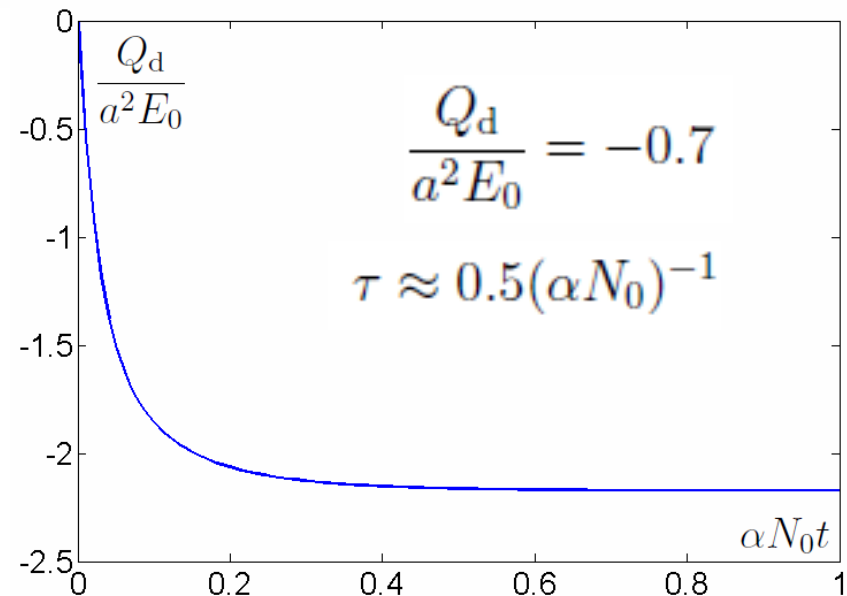
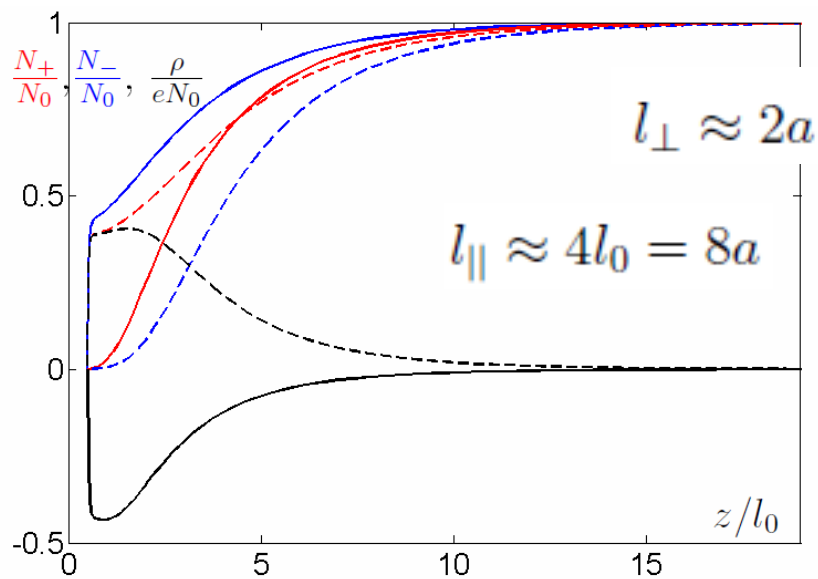
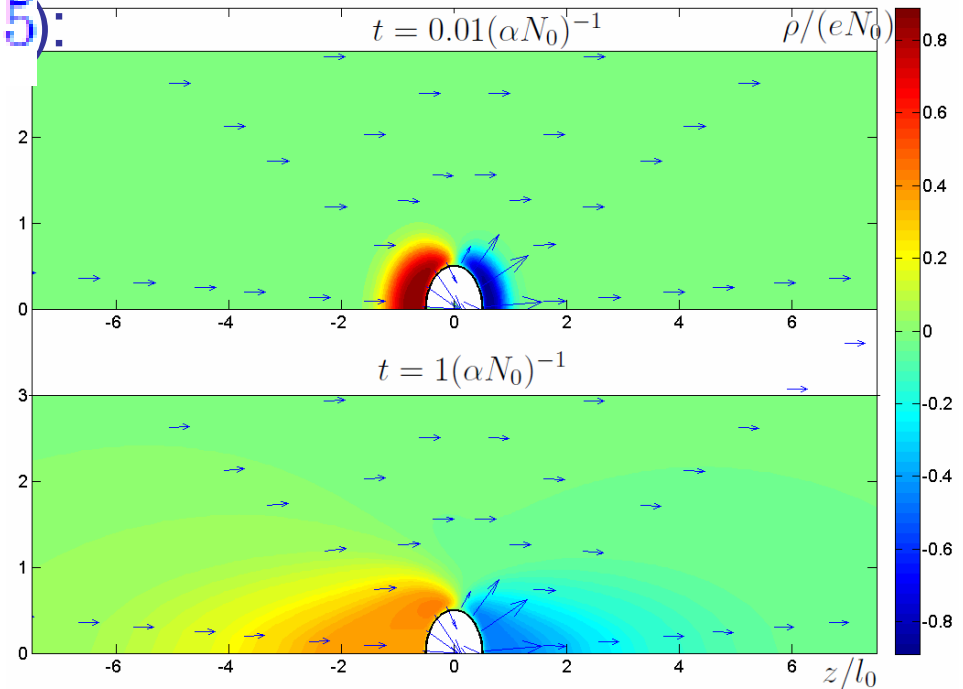
$K_- = 0.02, K_+ = 0.04$
(слабая рекомбинация)

$$\mu_- / \mu_+ = 2$$

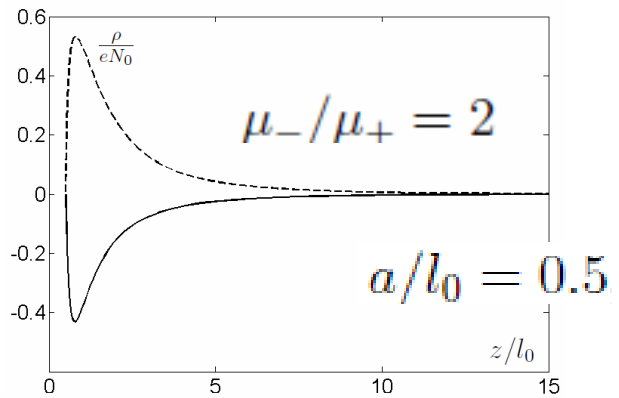
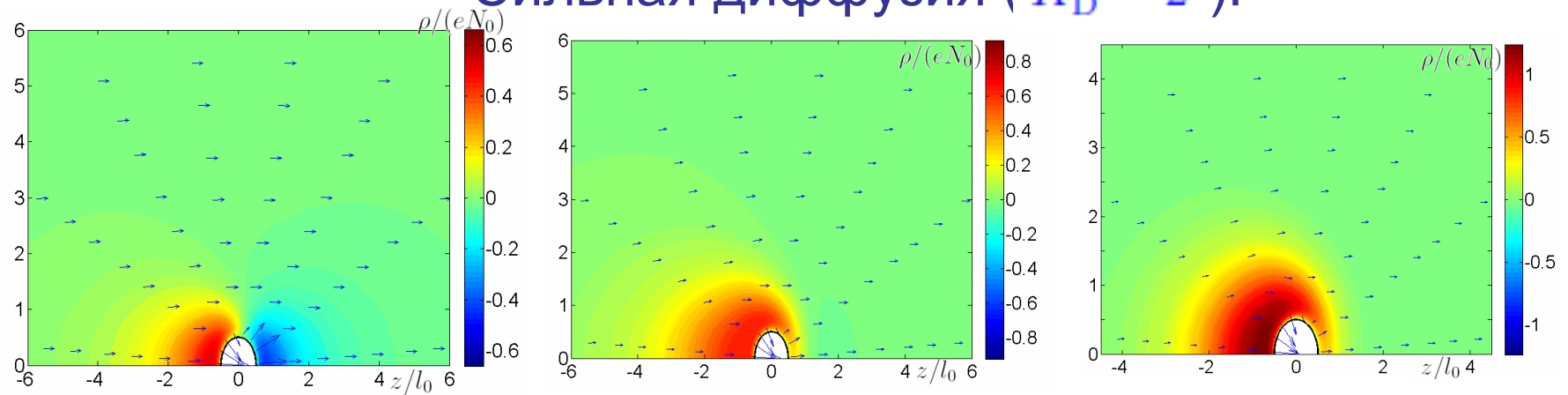
(близкие подвижности)

$$a/l_0 = 0.5,$$

При росте диффузии заряд
увеличивается, продольный
масштаб уменьшается



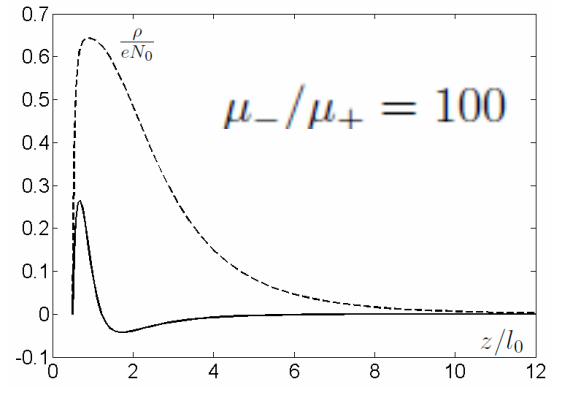
Сильная диффузия ($K_D = 2$):



$K_- = 0.02, \quad K_+ = 0.04$
 $Q_d/a^2 E_0 = -0.94$

$$l_{\perp} \approx 2a$$

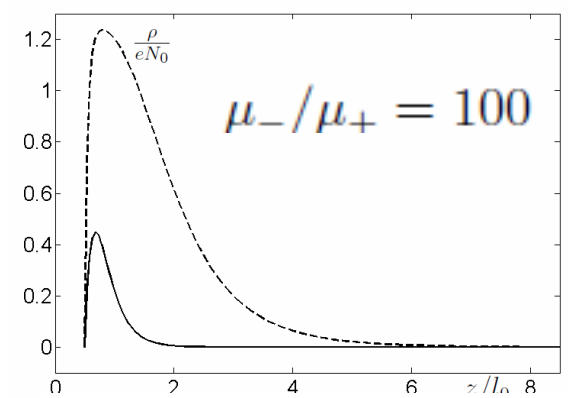
$$l_{\parallel} \approx \begin{cases} 4a, & z > 0; \\ 4a, & z < 0. \end{cases}$$



$K_- = 0.002, \quad K_+ = 0.2$
 $Q_d/a^2 E_0 = -5.2$

$$l_{\perp} \approx 3a$$

$$l_{\parallel} \approx \begin{cases} 4a, & z > 0; \\ a, & z < 0. \end{cases}$$

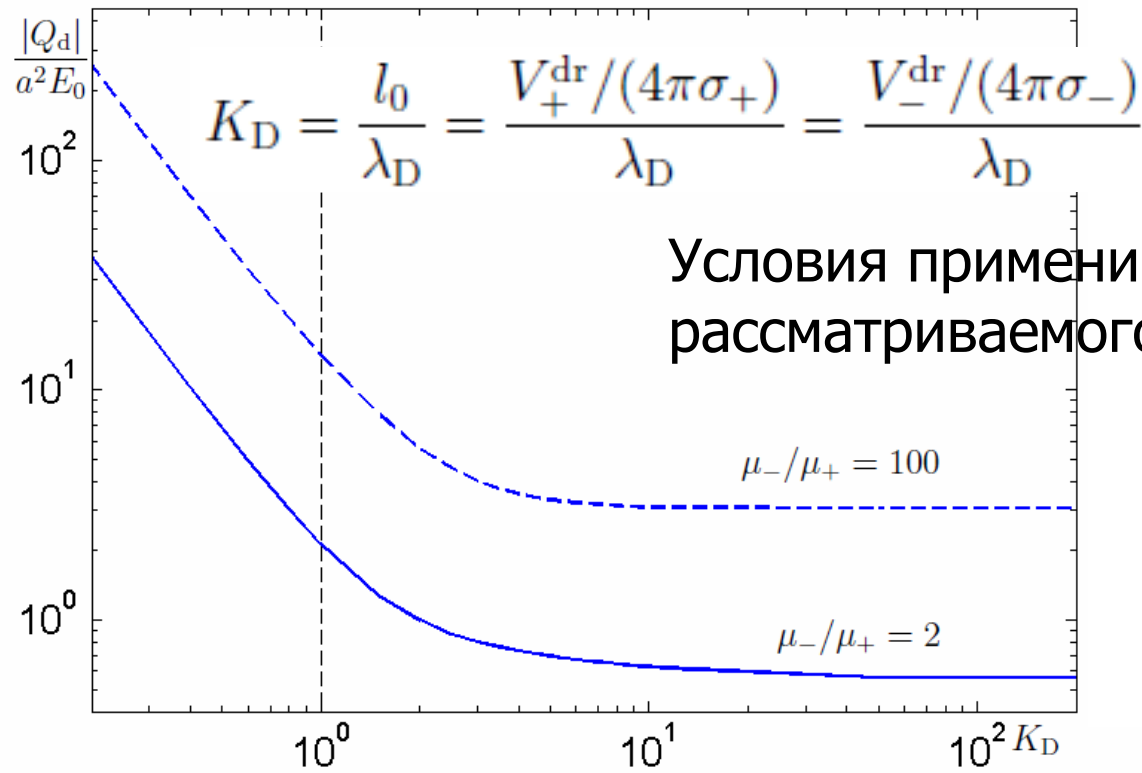


$K_- = 0.02, \quad K_+ = 2$
 $Q_d/a^2 E_0 = -5.0$

$$l_{\perp} \approx 3a$$

$$l_{\parallel} \approx \begin{cases} 4a, & z > 0; \\ a, & z < 0. \end{cases}$$

Заряд сферы в зависимости от параметра диффузии:



Условия применимости рассматриваемого подхода:

$$V_{+,-}^{\text{dr}} > V_{+,-}^{\text{T}}$$



$$K_D^{\text{min}} = \min \left\{ \frac{\nu_+}{\omega_{p+}}, \frac{\nu_-}{\omega_{p-}} \right\} < \sim 1$$

Частица с радиусом 500 нм в плазме в поле с напряженностью $E_0 = 1 \text{ В/м}$ приобретает заряд 10-200 e .

РЕЗУЛЬТАТЫ:

1. При зарядке проводящей сферы в слабоионизованной столкновительной плазме существует стационарный режим. Время выхода на стационарный режим определяется временем установления рекомбинационного равновесия.
2. В предельном случае сильного внешнего поля и отсутствия диффузии результаты согласуются с полученными ранее в приближенном аналитическом рассмотрении.
3. Стационарное абсолютное значение заряда пропорционально $a^2 E_0$. Заряд увеличивается с ростом отношения подвижностей ионов плазмы и коэффициентом диффузии и убывает с ростом интенсивности рекомбинационных процессов.
4. Область возмущенных ионных концентраций в случае сильного внешнего поля вытянута вдоль поля, в случае слабого поля (сильной диффузии) сосредоточена вокруг сферы. Поперечный масштаб возмущенной области определяется радиусом сферы и отношением подвижностей; продольный масштаб определяется внешним полем, рекомбинацией и диффузией.