



АВТОМОДЕЛЬНОСТЬ НЕЛИНЕЙНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ В ВЫСОКО-АСИММЕТРИЧНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ

Мартынова Инна Александровна*,
Иосилевский Игорь Львович

**martina1204@yandex.ru*

Объединенный институт высоких температур РАН
Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет)

Эльбрус, 2021



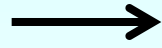
Содержание

- Предпосылки работы
- Эффективный заряд макроиона Z^* и деление всех микроионов на свободные и связанные
- Автомодельные кривые зависимости эффективного заряда $Z^*(Z, kT, n_z, R_z)$
 - от исходного заряда макроиона Z ,
 - от температуры системы kT ,
 - от концентрации макроионов n_z ,
 - от радиуса макроиона R_z

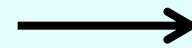
Модель: двухкомпонентная $(+Z, -1)$ и $(-Z, +1)$ электронейтральная равновесная система классических макроионов конечных размеров и точечных микроионов, $Z \gg 1$

Ограниченность области применимости линеаризованного (дебаевского) потенциала

$$\Delta\varphi(r) = -4\pi en(r)$$



$$\frac{Ze^2}{rkT} \ll 1$$

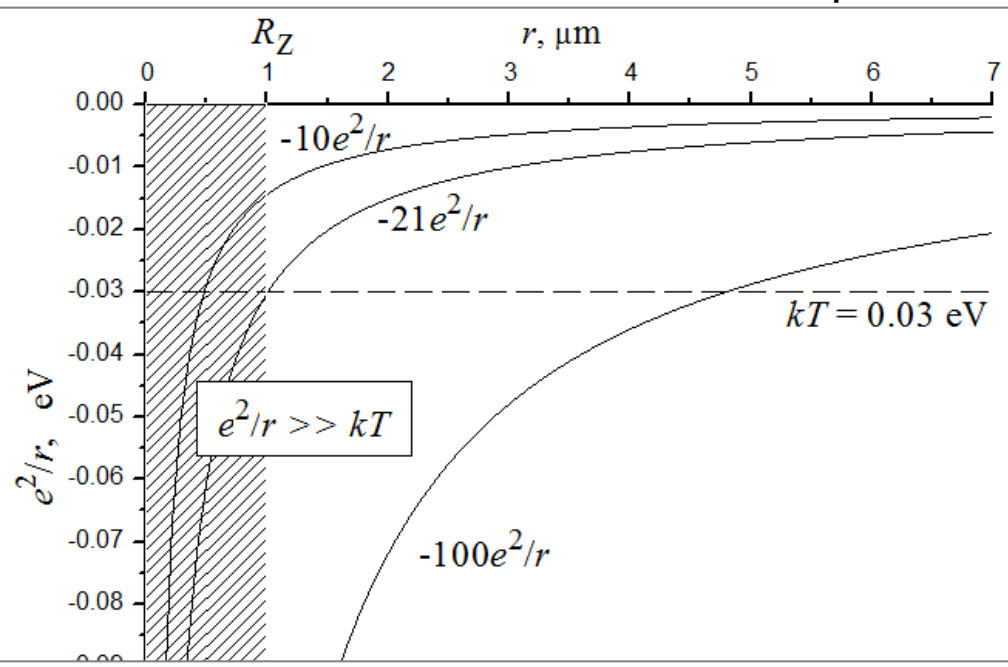


$$\varphi(r) = \frac{Ze}{r} \exp(-r/r_D)$$

$$r = R_Z \sim 1 \text{ мкм}, \quad kT \equiv kT_i = 0,03 \text{ эВ}$$

радиус макроиона

температура
микроионов



при $Z = 10$

$$\frac{Ze^2}{R_Z kT} \approx 0,45 < 1$$

при $Z = 21$

$$\frac{Ze^2}{R_Z kT} \approx 1$$

при $Z = 100$

$$\frac{Ze^2}{R_Z kT} \approx 4,5 > 1$$

при $Z = 1000$

$$\frac{Ze^2}{R_Z kT} \approx 45 \gg 1$$

Hamaguchi, Farouki, Dubin 1997 *Phys. Rev. E*

Diehl, Barbosa, Levin, 2001 *EPL*

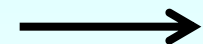
Martynova, Iosilevskiy 2016 *Contrib. Plasma Phys.*

Ограниченность области применимости линеаризованного (дебаевского) потенциала

$$\Delta\varphi(r) = -4\pi en(r)$$



$$\frac{Ze^2}{rkT} \ll 1$$

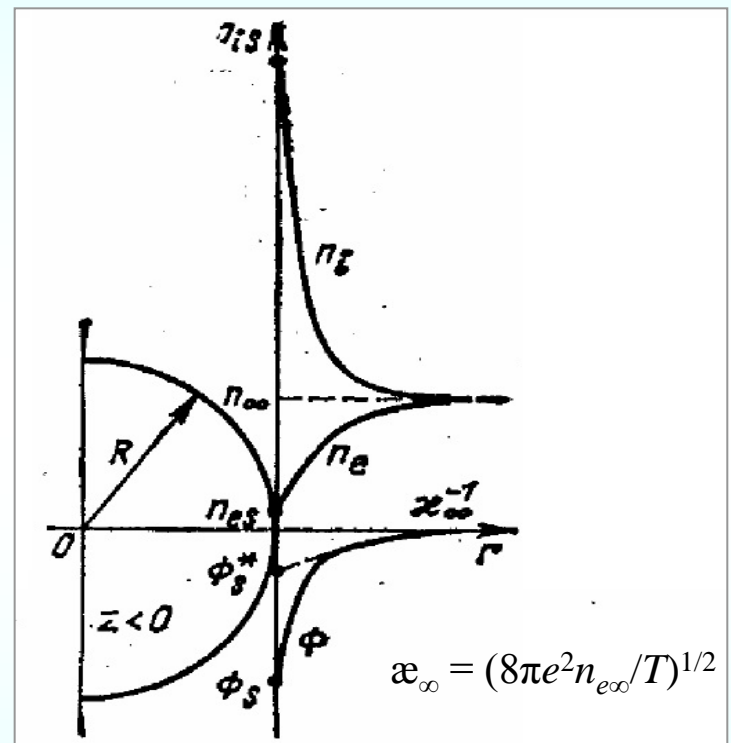
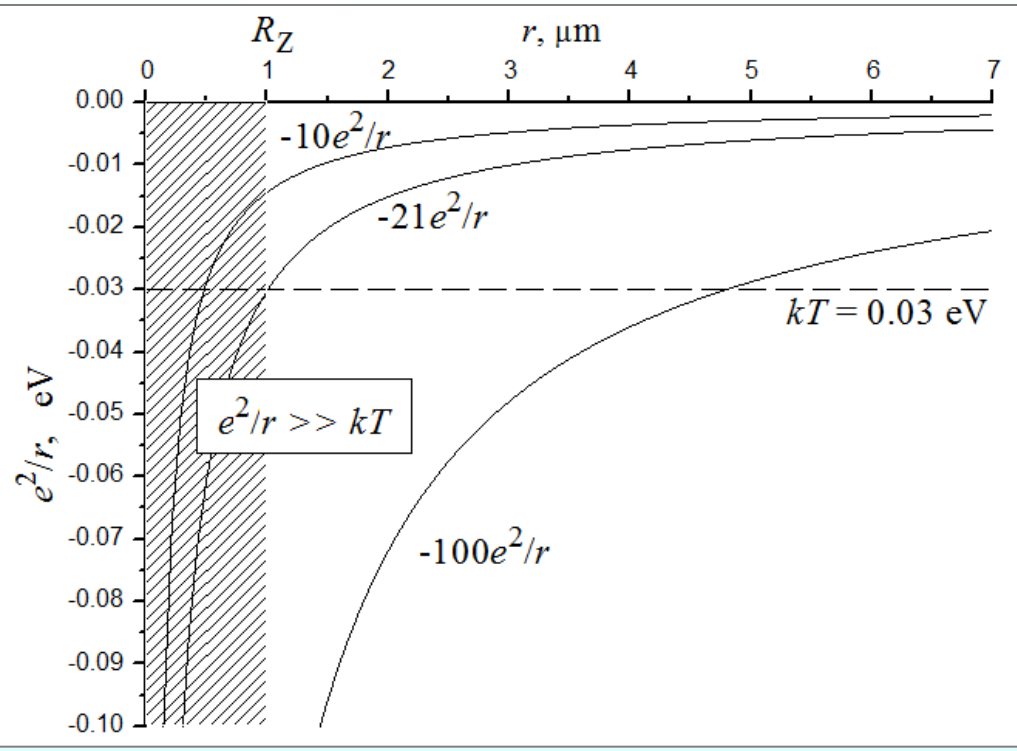


$$\varphi(r) = \frac{Ze}{r} \exp(-r/r_D)$$

$$r = R_Z \sim 1 \text{ мкм}, \quad kT \equiv kT_i = 0,03 \text{ эВ}$$

радиус макроиона

температура
микроионов



Распределения частиц плазмы
и электростатического потенциала
в окрестности отрицательно
заряженной частицы $R\lambda_{\infty} \gg 1$

* Жуховицкий Д.И., Храпак А.Г., Якубов И.Т.
Физика плазмы 11 / Под ред. Смирнова Б.М.
М.: Энергоиздат, 1984

Приближение Пуассона-Больцмана в средней сферической электронейтральной ячейке Вигнера-Зейтца

$$\Delta\varphi = -4\pi en_{i0} \exp\left(-\frac{e\varphi}{kT_i}\right), \quad n_{i0} = n_i(R)$$

уравнение Пуассона - Больцмана

$$4\pi r^2 E(r) = 4\pi q(r)$$

теорема Гаусса

$$Ze = \int_{R_z}^R n_{i0} e 4\pi r^2 dr$$

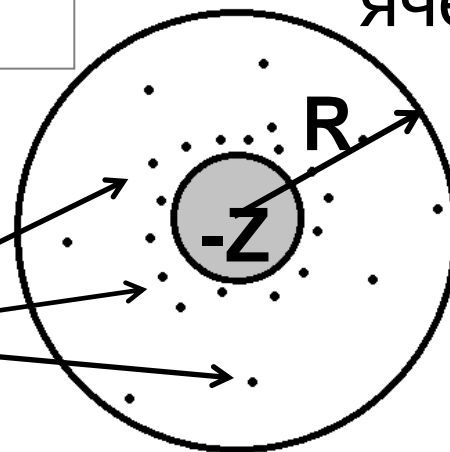
условие электронейтральности

$$\left\{ \begin{array}{l} E(x) = \frac{\delta^2}{3x^2} \left[1 - \left(\int_{x_z}^x x_1^2 e^{-\Phi(x_1)} dx_1 \right) / \left(\int_{x_z}^1 x_1^2 e^{-\Phi(x_1)} dx_1 \right) \right], \quad \delta^2 = \frac{3Ze^2}{kT_i R} \\ \frac{d\Phi(x)}{dx} = -E(x) \\ \Phi(1) = 0, \quad x \in [0,1] \end{array} \right.$$

$$x = \frac{1}{R} r, \quad \Phi = \frac{e}{kT_i} \varphi, \quad E = \frac{eR}{kT_i} E$$

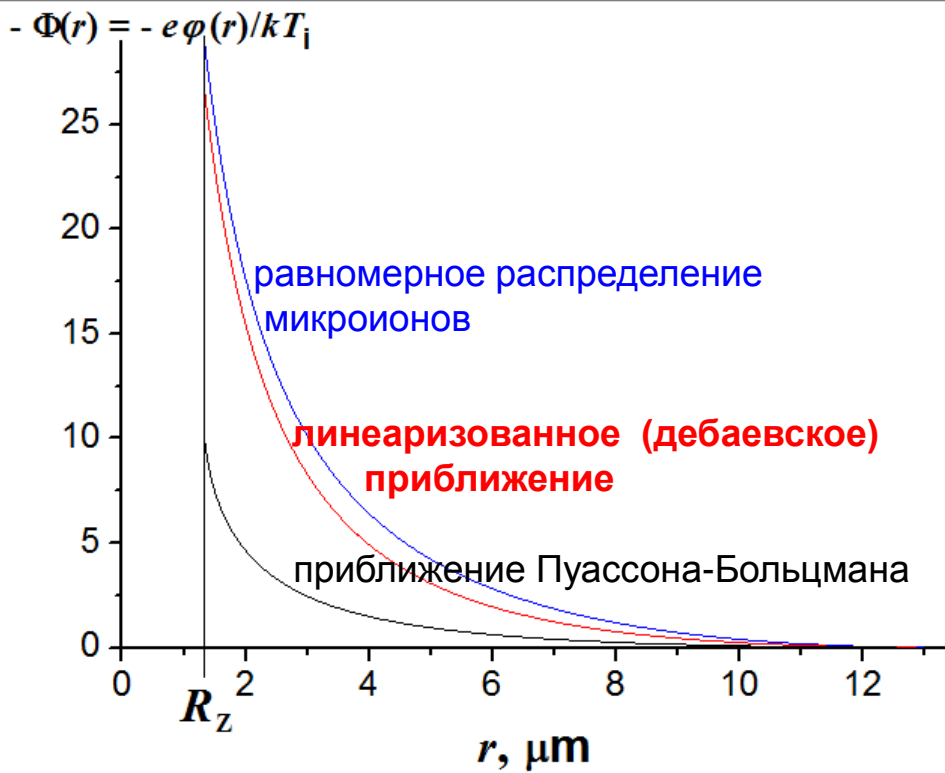
ячейка

Положительные
микроионы +1

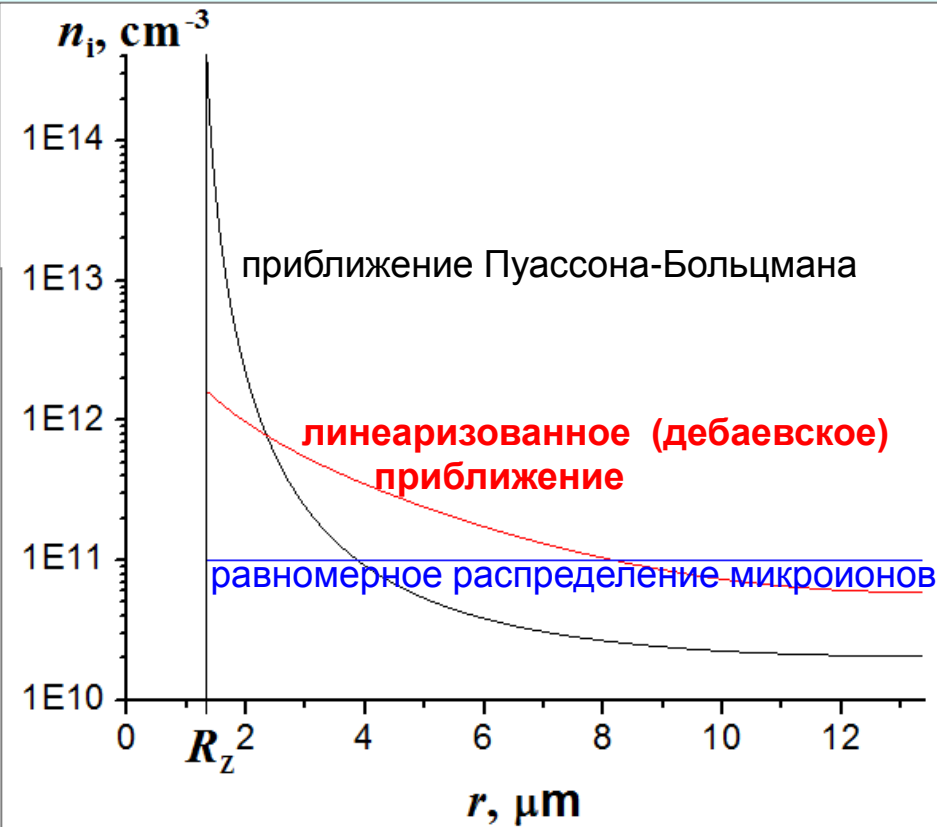


n_{i0} – плотность микроионов на границе ячейки
 $q(r)$ – полный заряд внутри сферы радиуса r

Средний самосогласованный потенциал, создаваемый нелинейным экранированием макроиона и окружающими его микроионами



Распределение микроионов



$Z = 1000$ – заряд макроиона

$kT_i = 0.03$ eV – температура микроионов

$n_Z = 10^8$ cm^{-3} – плотность макроионов

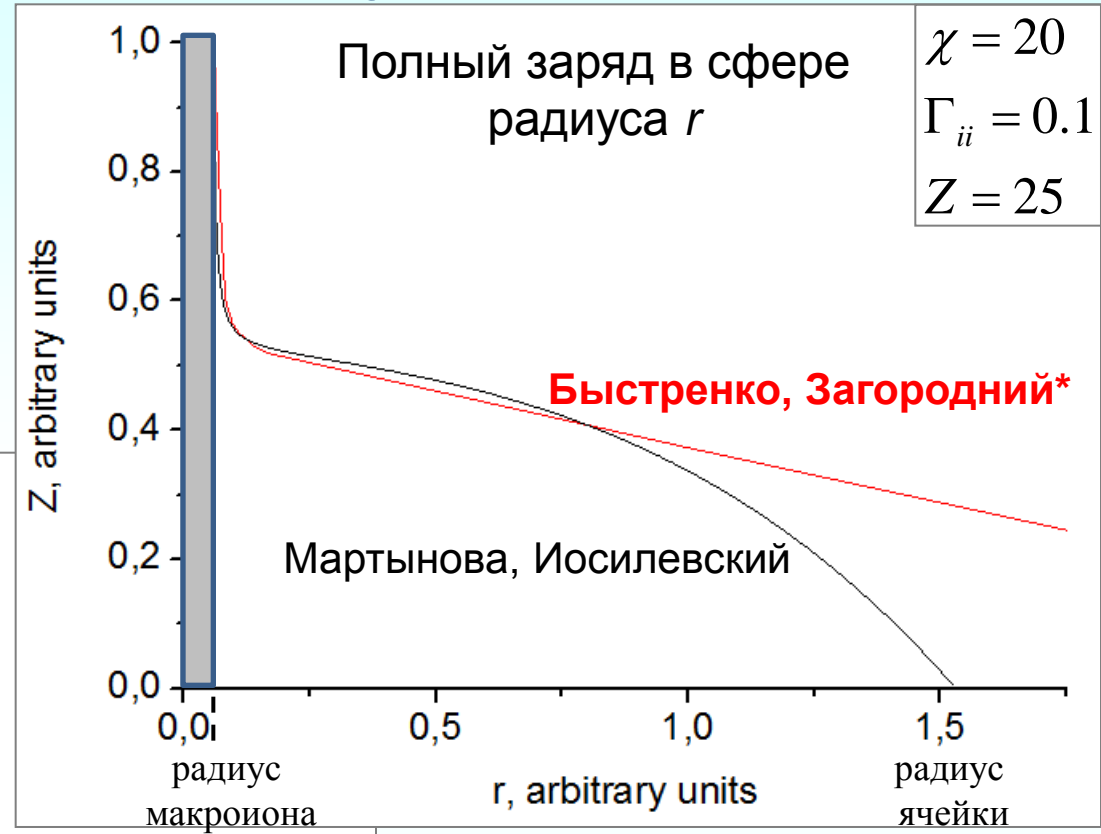
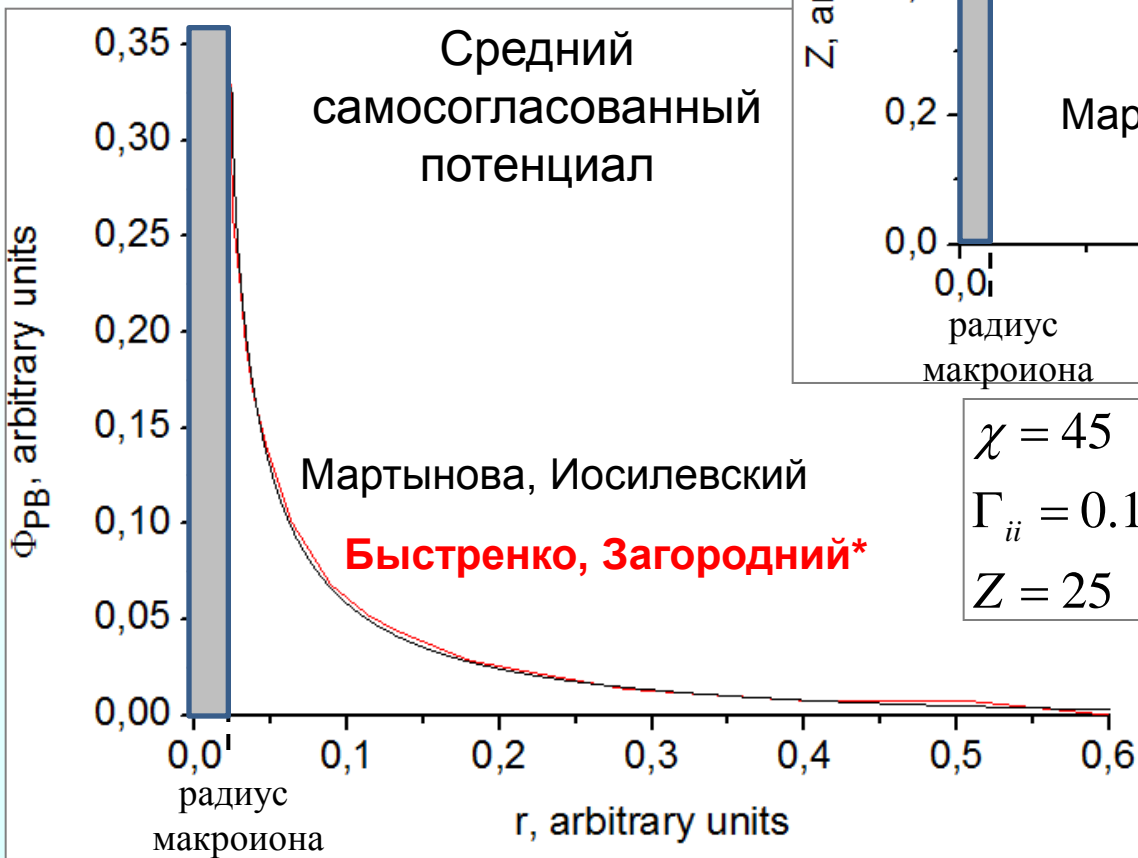
$R = 13.4$ μm – радиус ячейки

$R_Z = 0.1R$ – радиус макроиона

Сравнение результатов

$$\chi = \frac{Ze^2}{kT_i R_Z}$$

$$\Gamma_{ii} = \frac{e^2}{kT_i} (4\pi n_i)^{1/3}$$



$$\chi = 20$$

$$\Gamma_{ii} = 0.1$$

$$Z = 25$$

$$\chi = 45$$

$$\Gamma_{ii} = 0.1$$

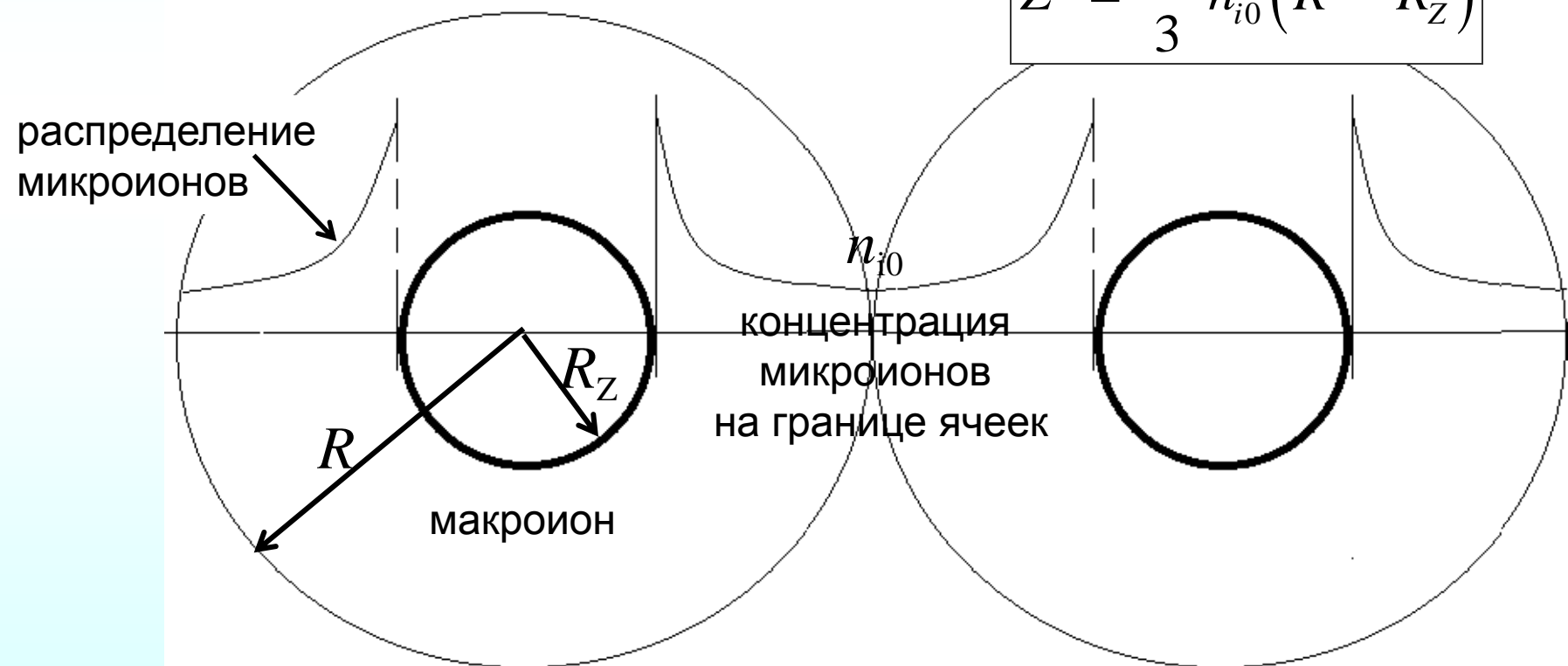
$$Z = 25$$

*Bystrenko O., Zagorodny A.
1999 *Phys. Lett. A* **255**

Определение эффективного заряда Z^* и деление микроионов на свободные и связанные

- 1) Деление микроионов на свободные и связанные по знаку полной энергии [Szichman H. et al., 1997, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*]
- 2) Свободные микроионы (n штук) в зоне, где выполняется условие линеаризации $\Rightarrow Z^* = Z - n$ [Diehl, Barbosa, Levin, 2001, *EPL*]
- 3) Свободные микроионы с концентрацией, равной концентрации микроионов на границе ячейки, $Z^* = Z - n \Rightarrow$

$$Z^* = \frac{4\pi}{3} n_{i0} (R^3 - R_Z^3)$$



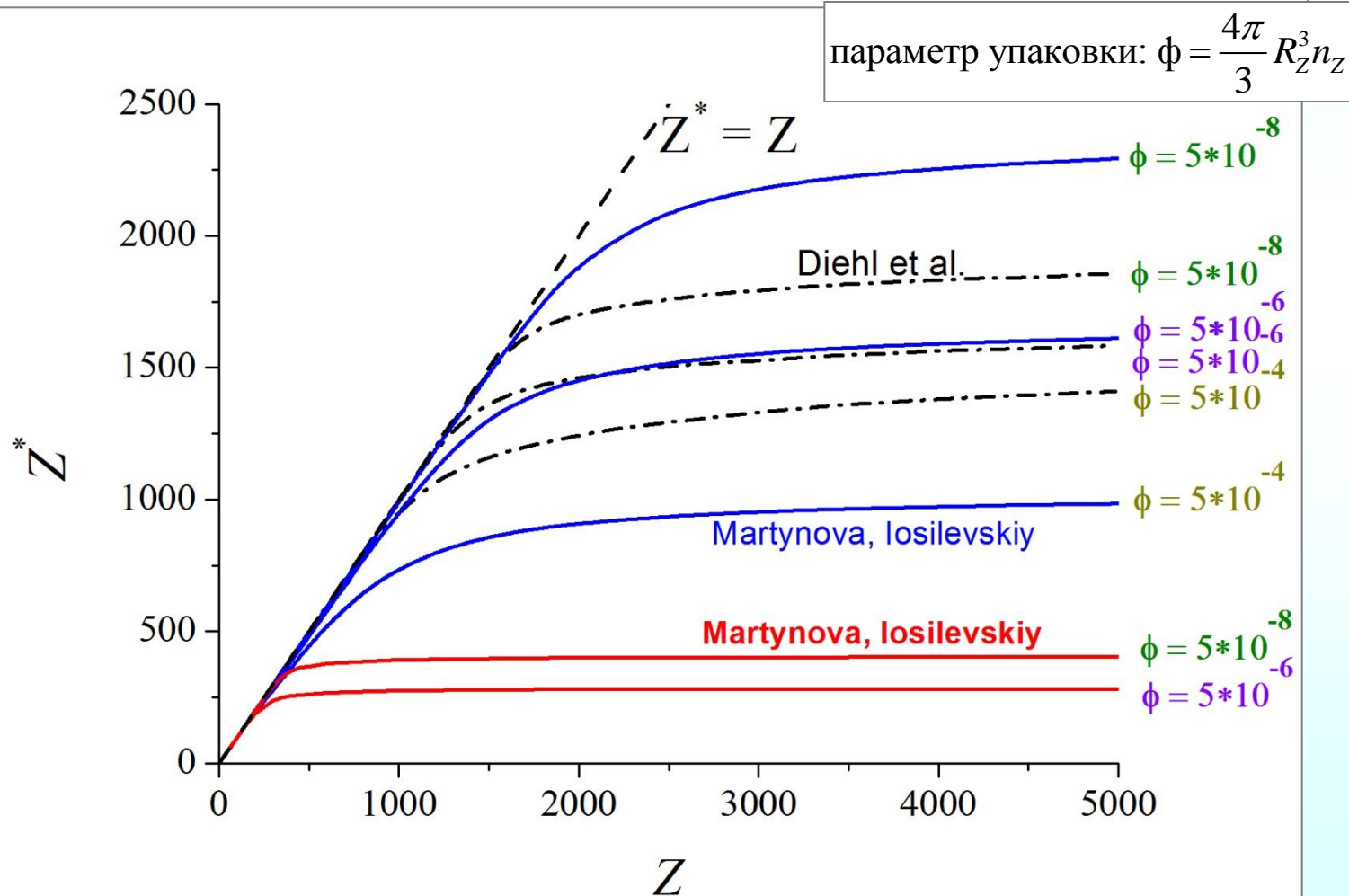
две соседние электронейтральные ячейки Вигнера-Зейтца

Сравнение зависимостей эффективного заряда макроиона Z^* от исходного Z при различных определениях Z^*

2 ветви изменения зависимости $Z^*(Z)$ – линейное экранирование и насыщение

[Diehl et al. EPL 2001]: радиус макроиона $R_Z = 0.1$ мкм, $kT = 0.026$ эВ

[Martynova, Iosilevskiy, CPP 2020]: $R_Z = 1$ мкм (red), $R_Z = 1$ мкм (blue), $kT = 0.03$ эВ

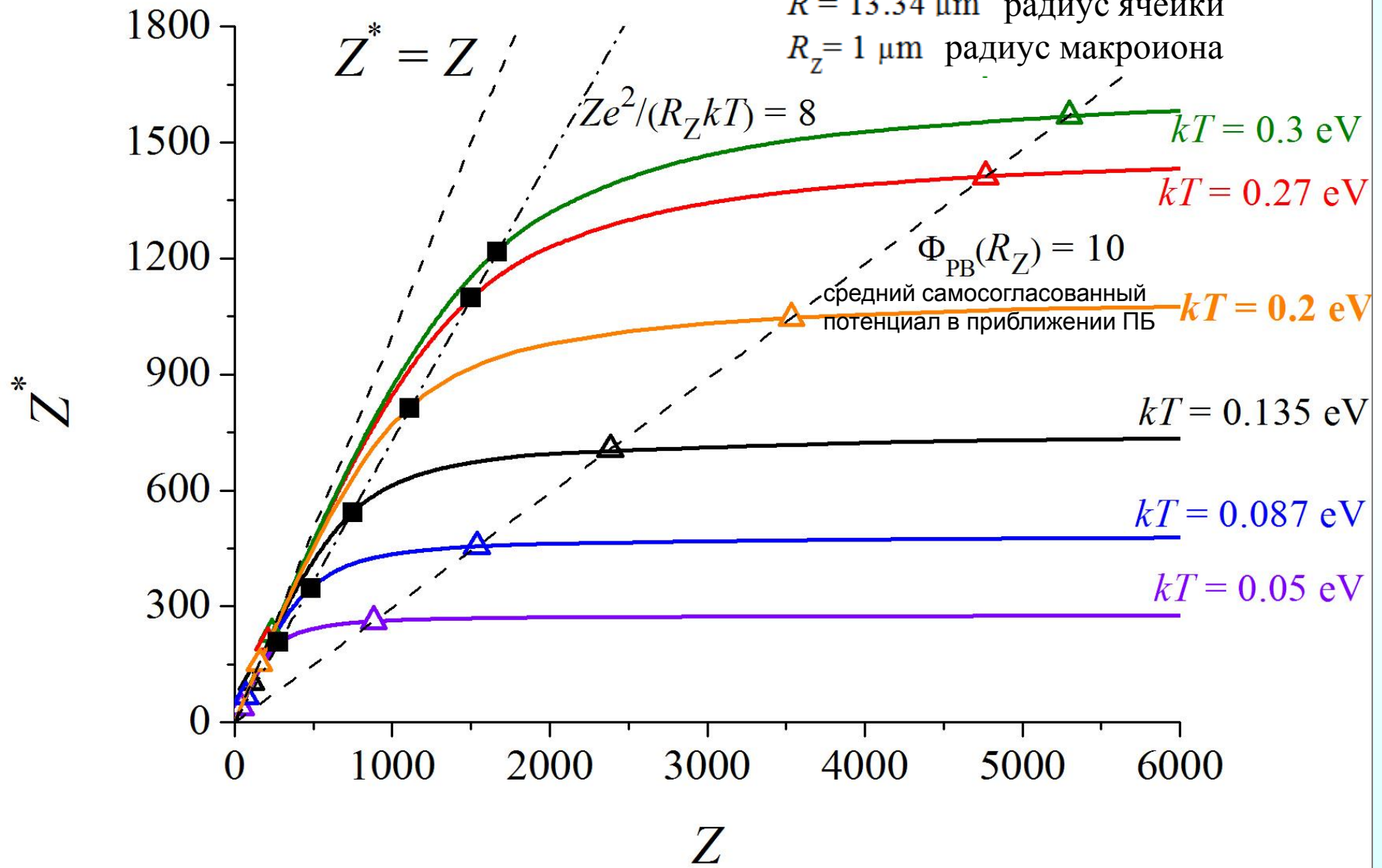


Зависимость эффективного заряда макроиона Z^* от исходного Z для различных температур с учетом нелинейного экранирования

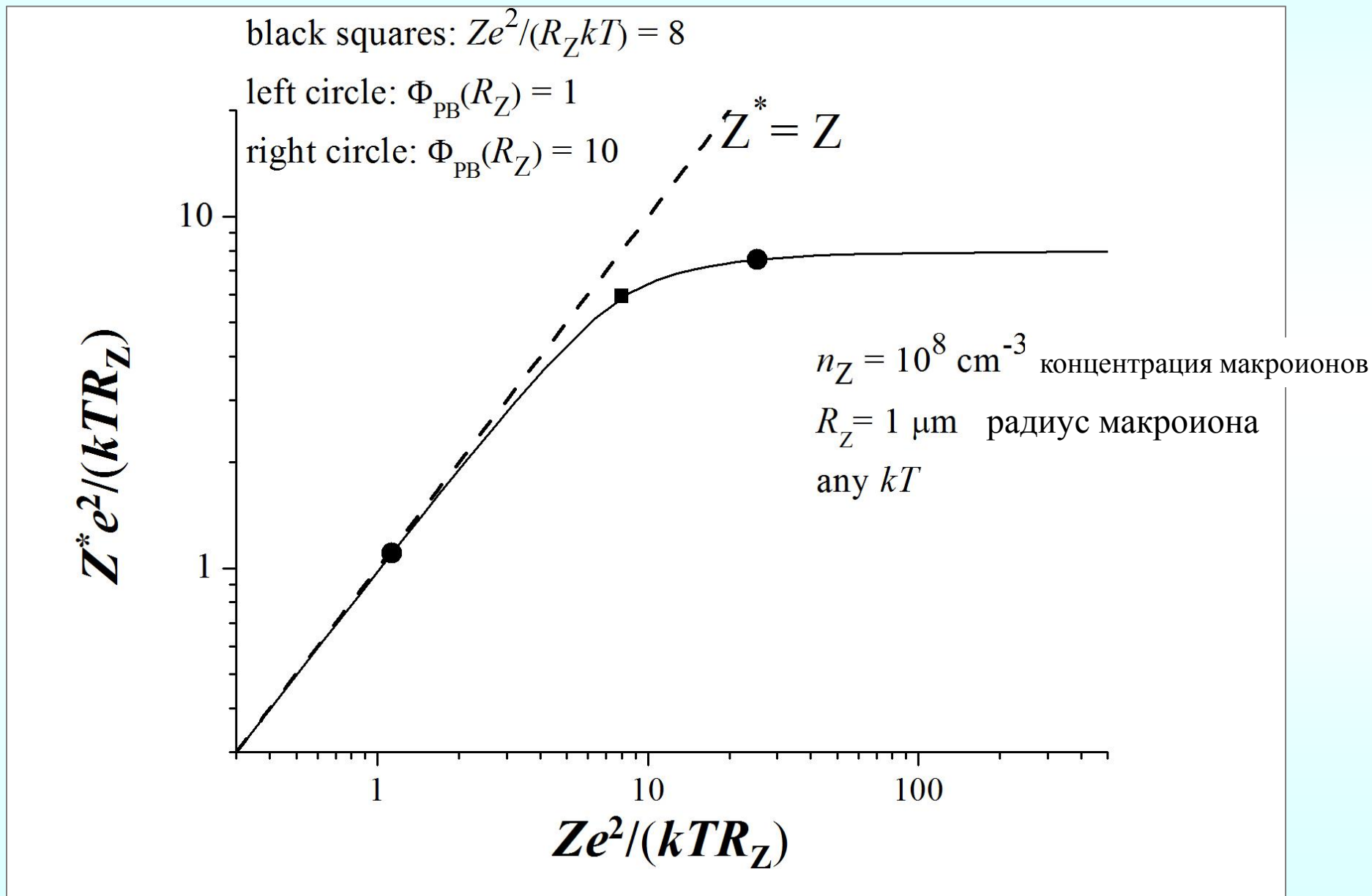
$n_Z = 10^8 \text{ cm}^{-3}$ концентрация макроионов

$R = 13.34 \text{ }\mu\text{m}$ радиус ячейки

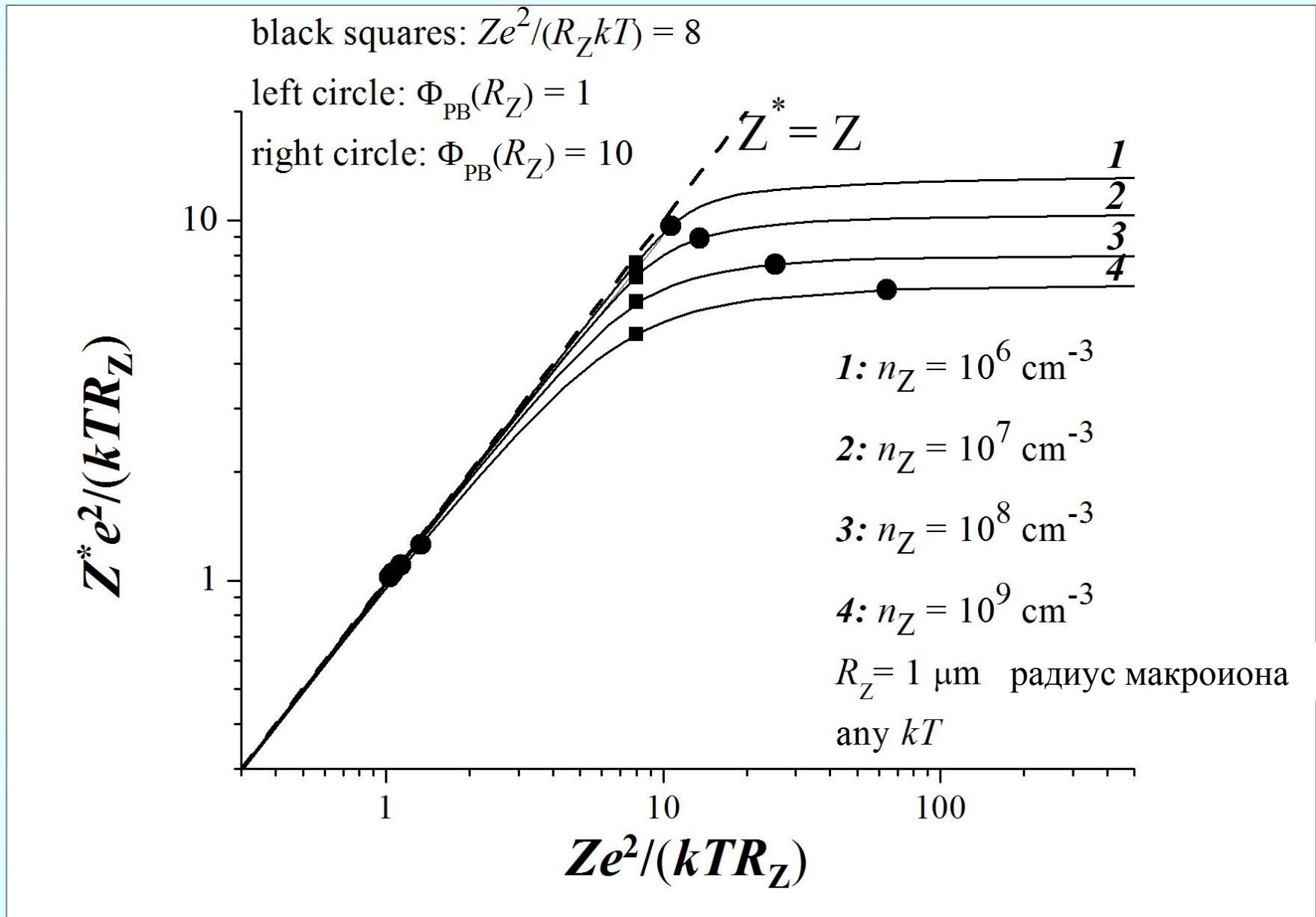
$R_Z = 1 \text{ }\mu\text{m}$ радиус макроиона



Единая автомодельная зависимость эффективного заряда Z^* от исходного Z для различных температур kT при фиксированной концентрации макроионов n_Z



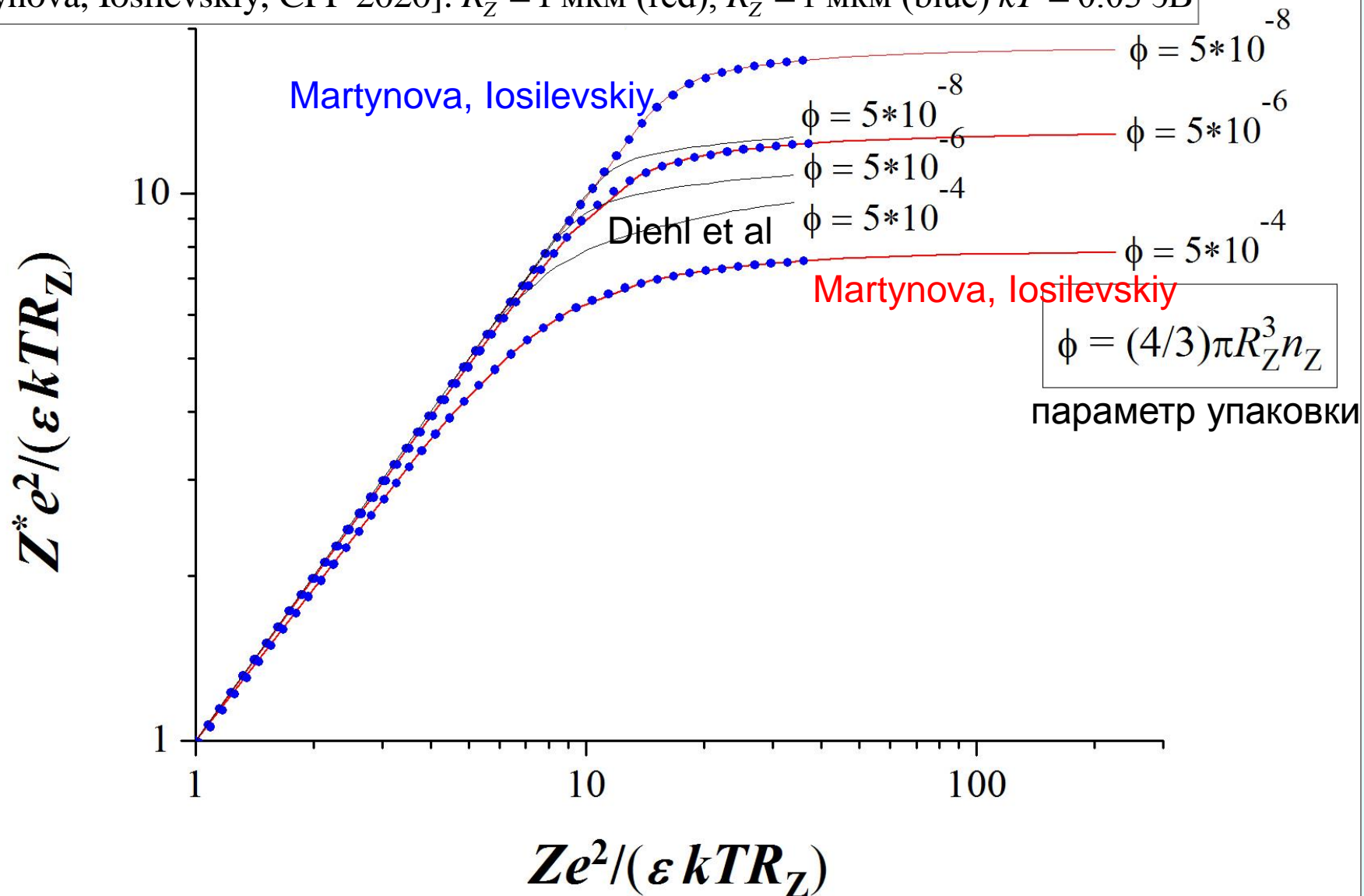
**Автомодельные зависимости эффективного заряда Z^* от исходного Z
 для различных температур kT
 при фиксированных концентрациях макроионов n_Z**



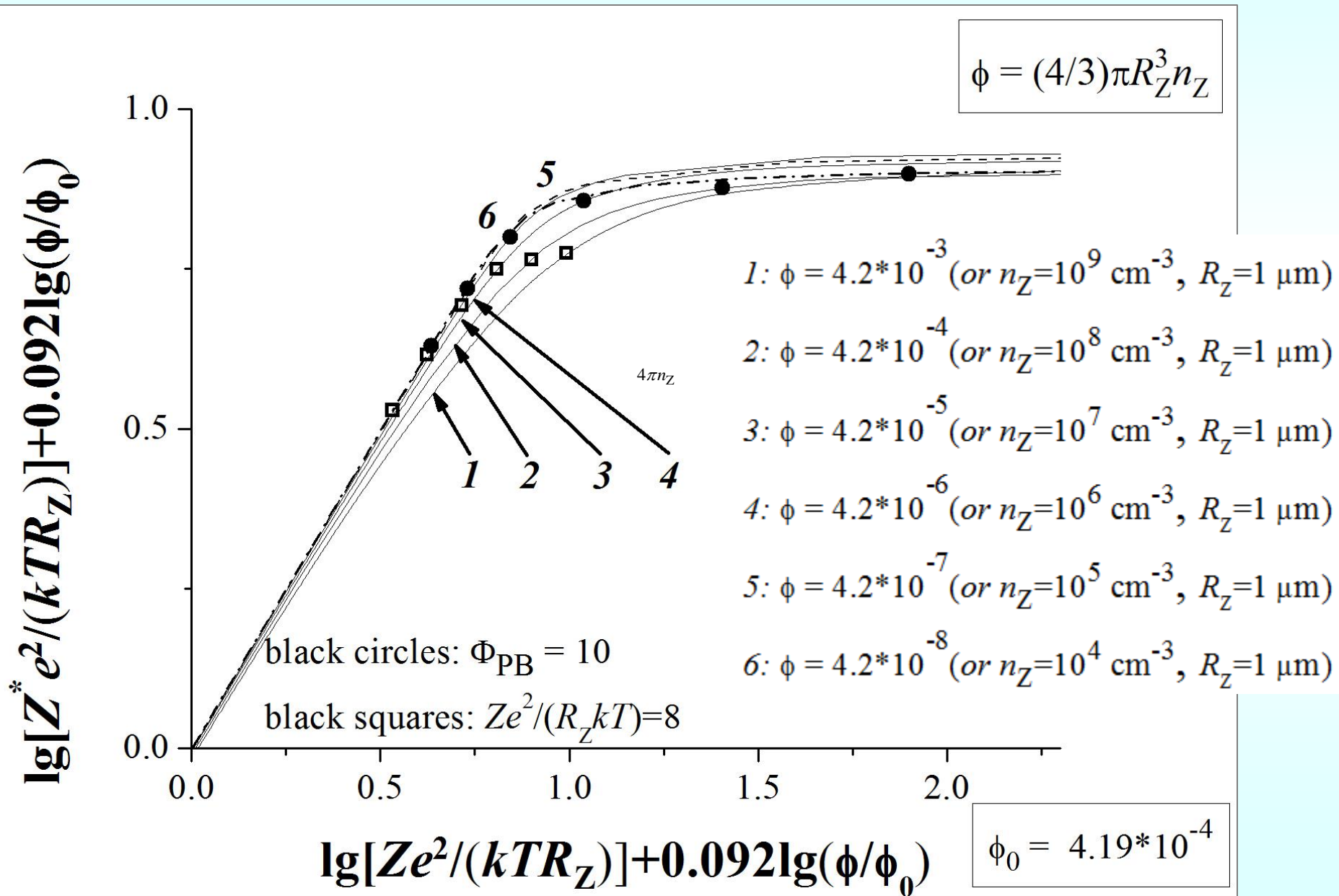
Автомодельные зависимости эффективного заряда макроиона Z^* от исходного заряда Z для различных параметров упаковки ϕ

[Diehl et al. EPL 2001]: радиус макроиона $R_Z = 0.1$ мкм, $kT = 0.026$ эВ, $\varepsilon = 81$

[Martynova, Iosilevskiy, CPP 2020]: $R_Z = 1$ мкм (red), $R_Z = 1$ мкм (blue) $kT = 0.03$ эВ



Автомодельная зависимость эффективного заряда макроиона Z^* от исходного заряда Z , температуры kT , радиуса макроиона R_Z и концентрации макроионов n_Z



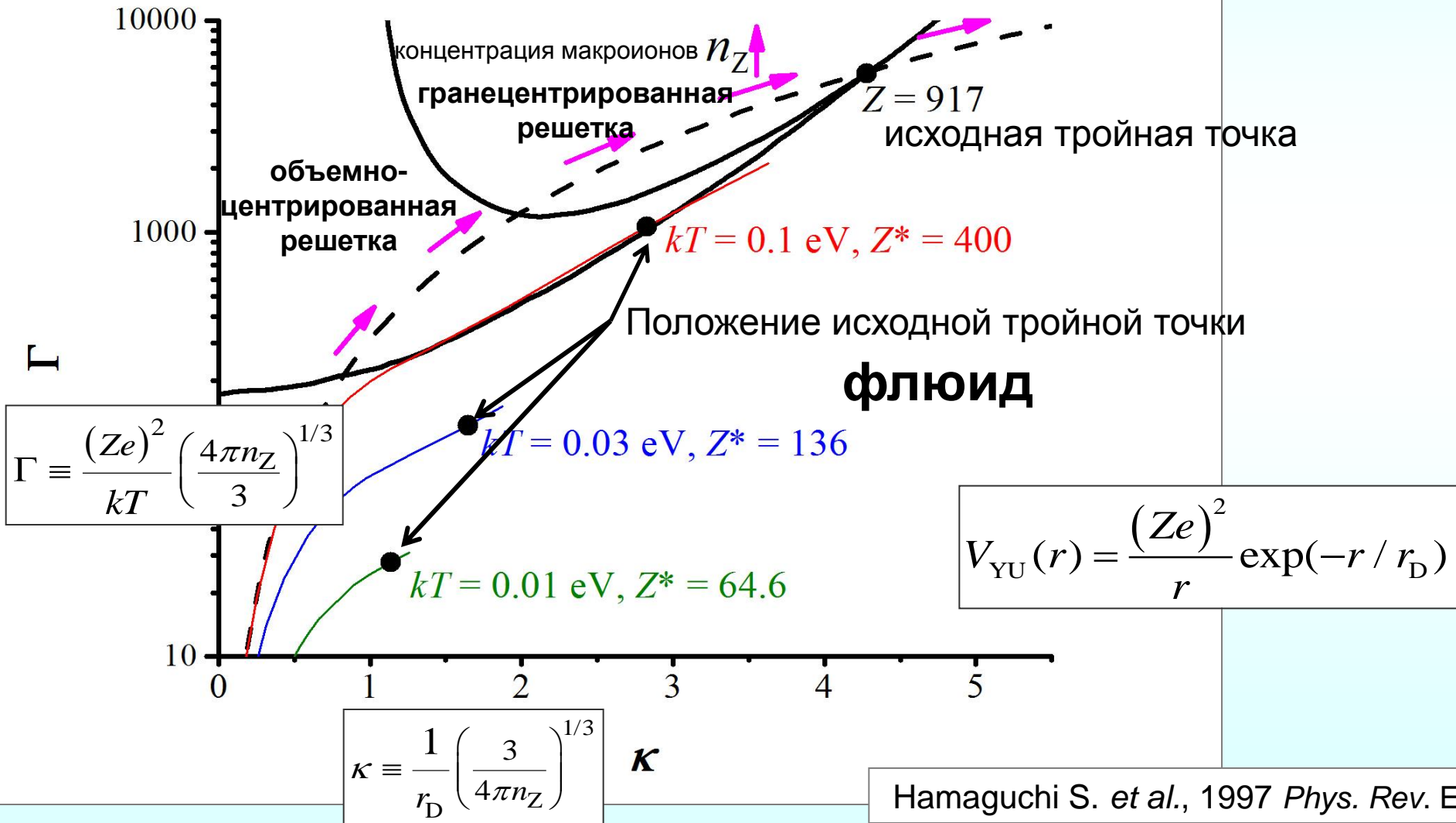
Уменьшение области достижимых значений в двухкомпонентной комплексной плазме

Фазовое состояние зависит от межчастичного взаимодействия макроионов на средних расстояниях, т.е. **определяется эффективным зарядом макроиона и свободными микроионами**



Уменьшение области достижимых значений в двухкомпонентной комплексной плазме

Фазовое состояние зависит от межчастичного взаимодействия макроионов на средних расстояниях, т.е. определяется эффективным зарядом макроиона и свободными микроионами



Выводы

С учетом нелинейного экранирования:

- 1) Продемонстрировано два режима изменения эффективного заряда макроиона Z^* в зависимости от исходного заряда Z
 - режима *слабого экранирования*, когда $Z^* \approx Z$,
 - и режима *сильного экранирования* («насыщения»), когда $Z^* \approx const$, с плавным, но отчетливым переходом между двумя режимами.
- 1) Обнаружена единая автомодельная зависимость эффективного заряда Z^* от исходного Z для различных температур системы и радиусов макроиона при фиксированных концентрациях макроионов
- 2) Выявлена автомодельность зависимости эффективного заряда Z^* от Z для различных температур системы, радиусов и концентрациях макроионов.