



Scientific-Coordination Workshop on

# Non-Ideal Plasma Physics

December 16-17, 2020, Moscow, Russia

## АВТОМОДЕЛЬНОСТЬ НЕЛИНЕЙНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ В ВЫСОКО-АСИММЕТРИЧНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ

Мартынова Инна Александровна,  
Иосилевский Игорь Львович

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

Москва, 16-17 декабря 2020



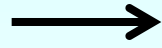
# Содержание

- 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  $R_z$

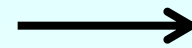
**Модель:** двухкомпонентная  $(+Z, -1)$  и  $(-Z, +1)$  электронейтральная равновесная система классических макроионов конечных размеров и точечных микроионов,  $Z \gg 1$

# Ограниченность области применимости линеаризованного (дебаевского) потенциала

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



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

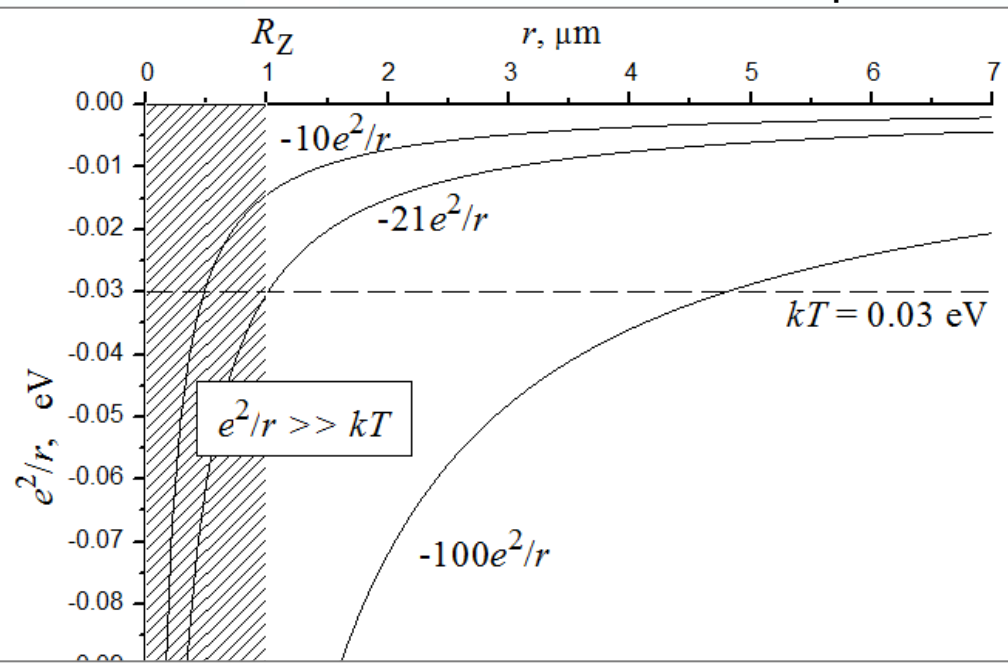


$$\varphi(r) = \frac{Ze}{r} \exp(-r/r_D)$$

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

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*

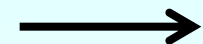
Martynova, Iosilevskiy 2016 *Contrib. Plasma Phys.*

# Ограниченность области применимости линеаризованного (дебаевского) потенциала

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



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

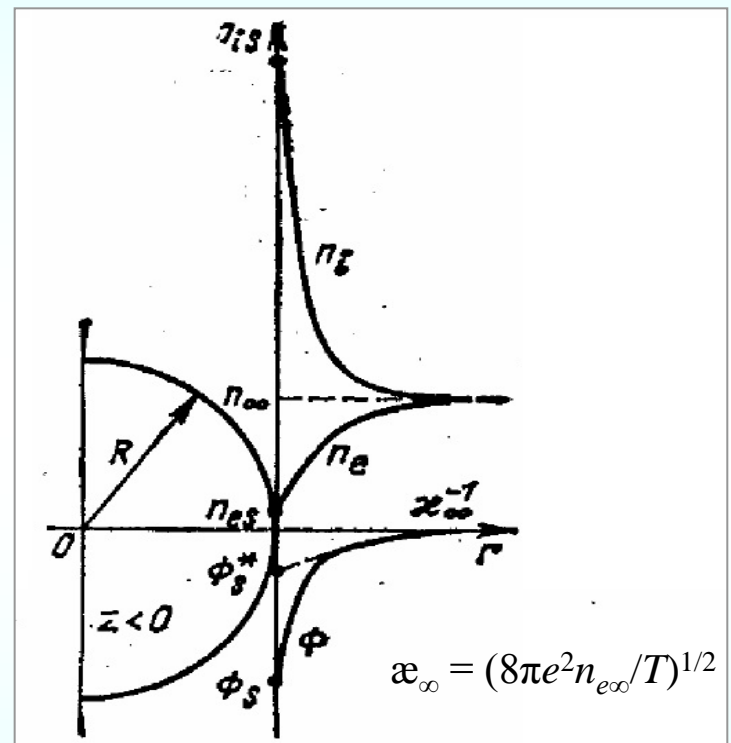
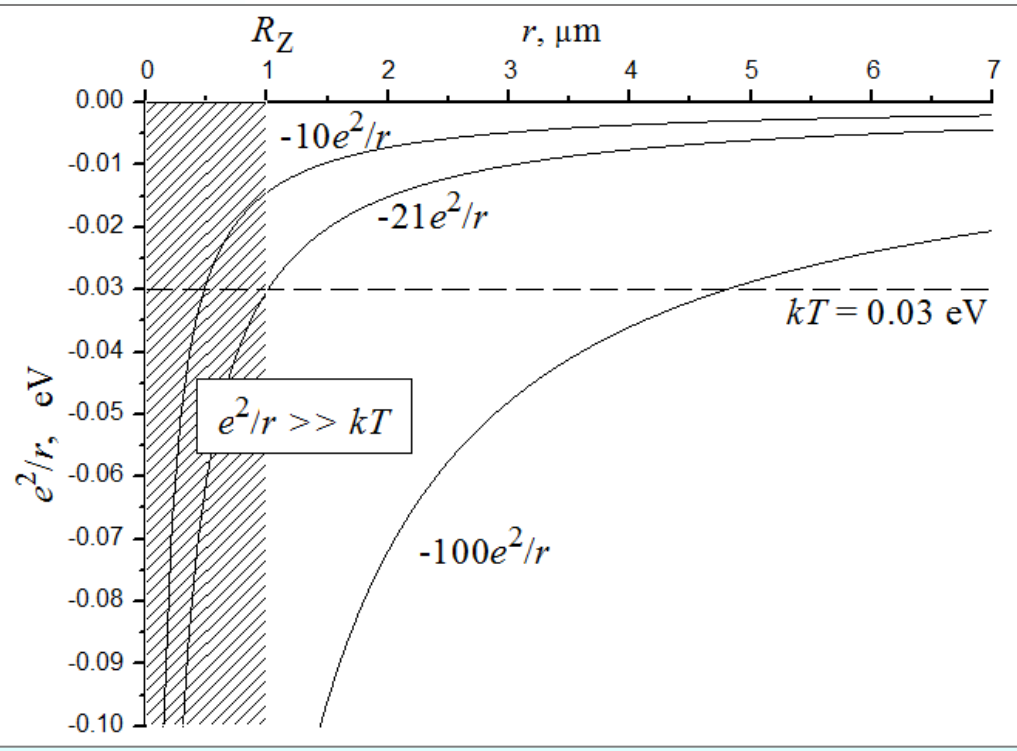


$$\varphi(r) = \frac{Ze}{r} \exp(-r/r_D)$$

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

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

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

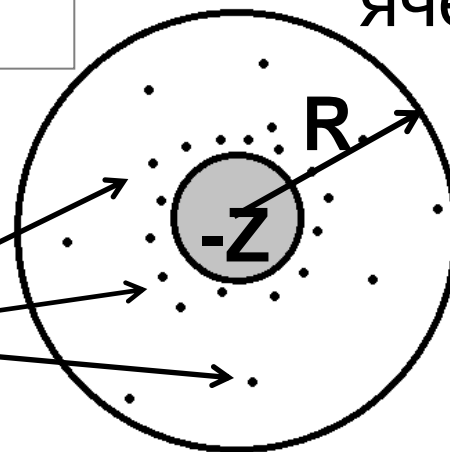
условие электронейтральности

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

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

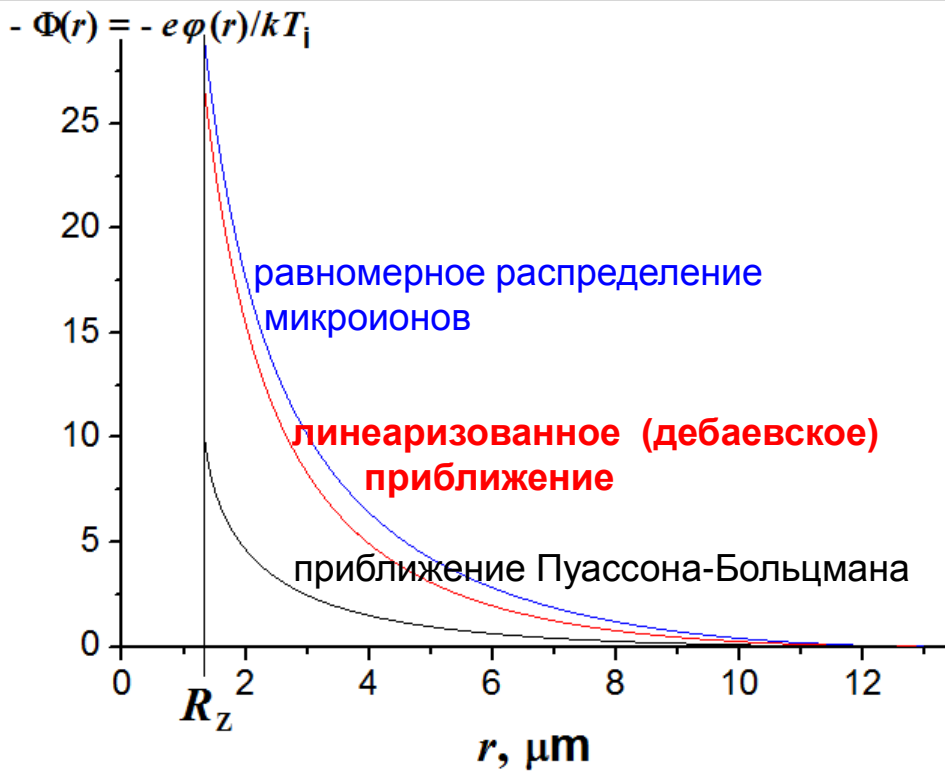
ячейка

Положительные  
микроионы +1

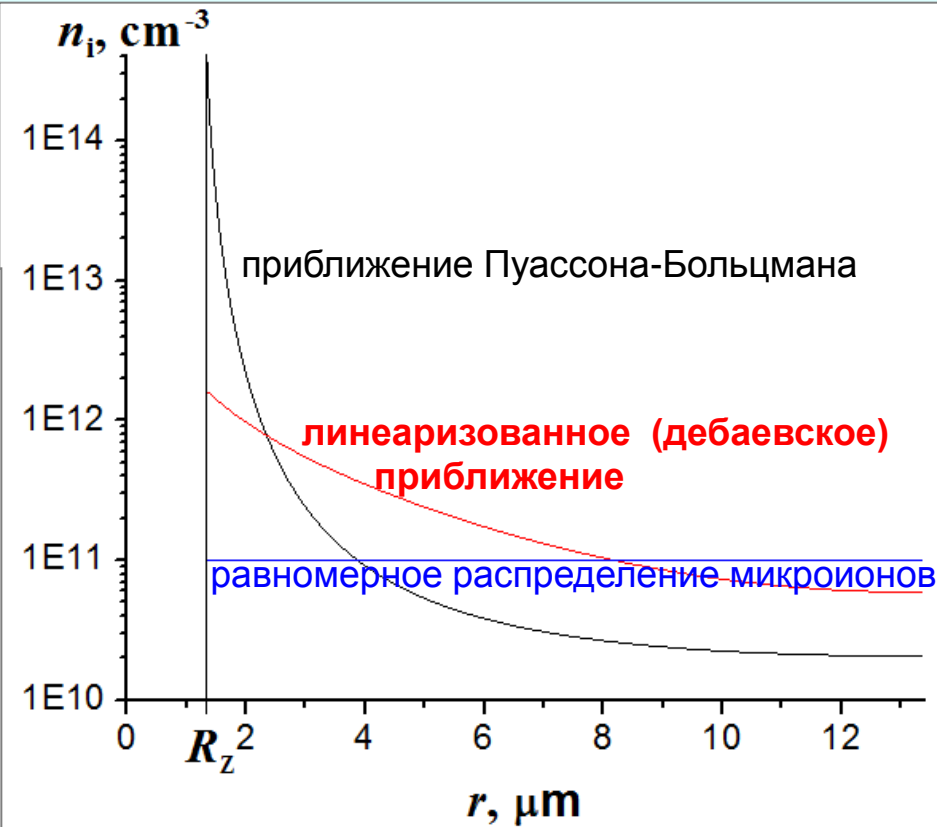


$n_{i0}$  – плотность микроионов на границе ячейки  
 $q(r)$  – полный заряд внутри сферы радиуса  $r$

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



## Распределение микроионов



$Z = 1000$  – заряд макроиона

$kT_i = 0.03 \text{ eV}$  – температура микроионов

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

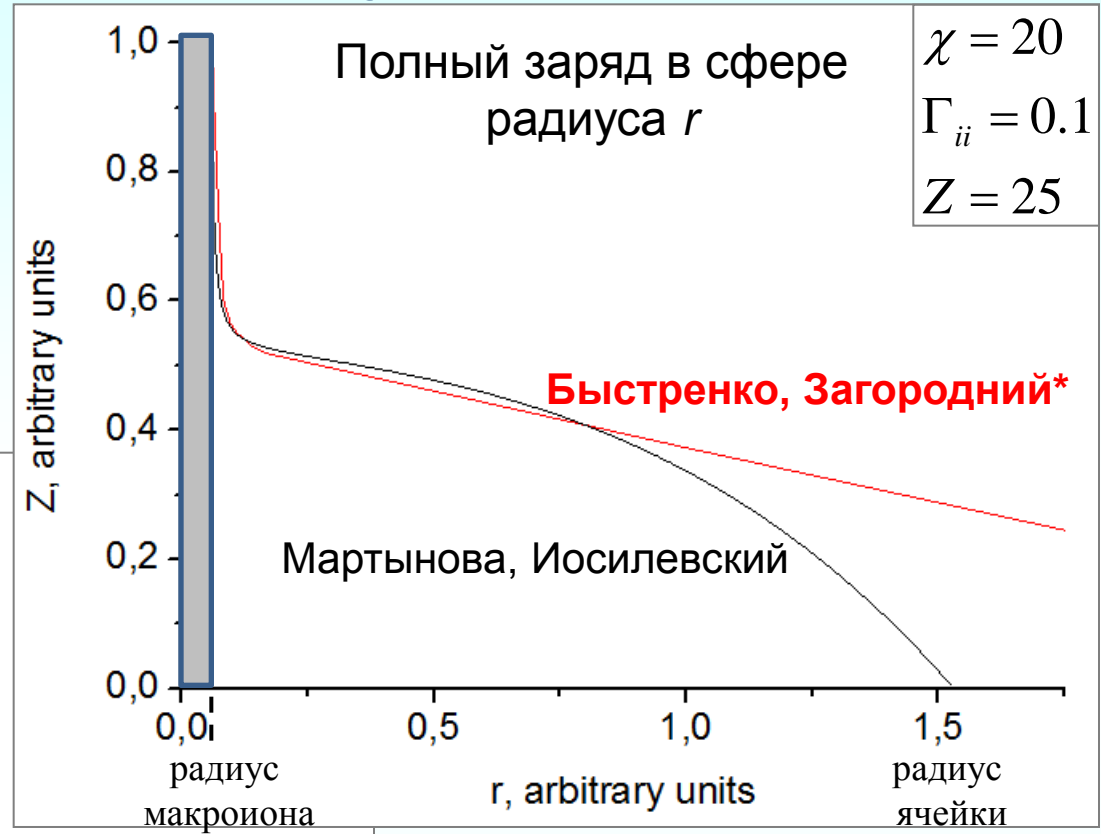
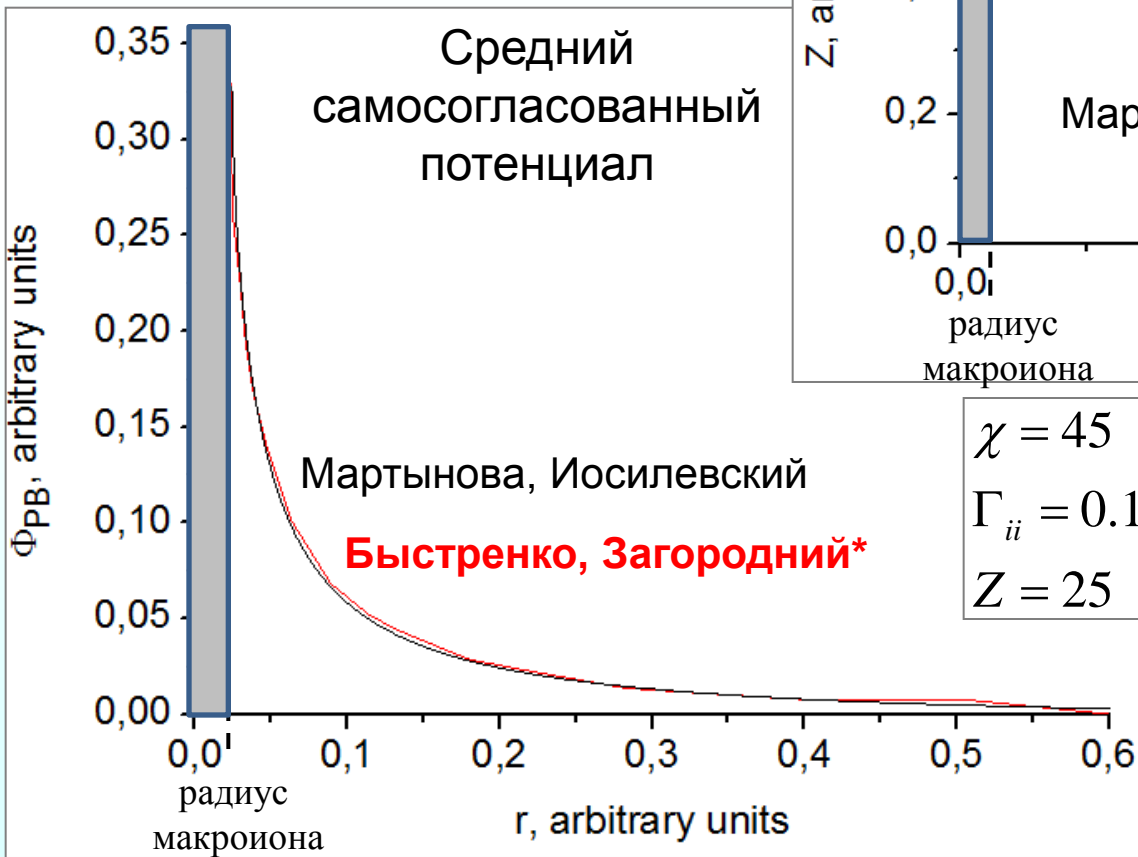
$R = 13.4 \mu\text{m}$  – радиус ячейки

$R_Z = 0.1R$  – 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

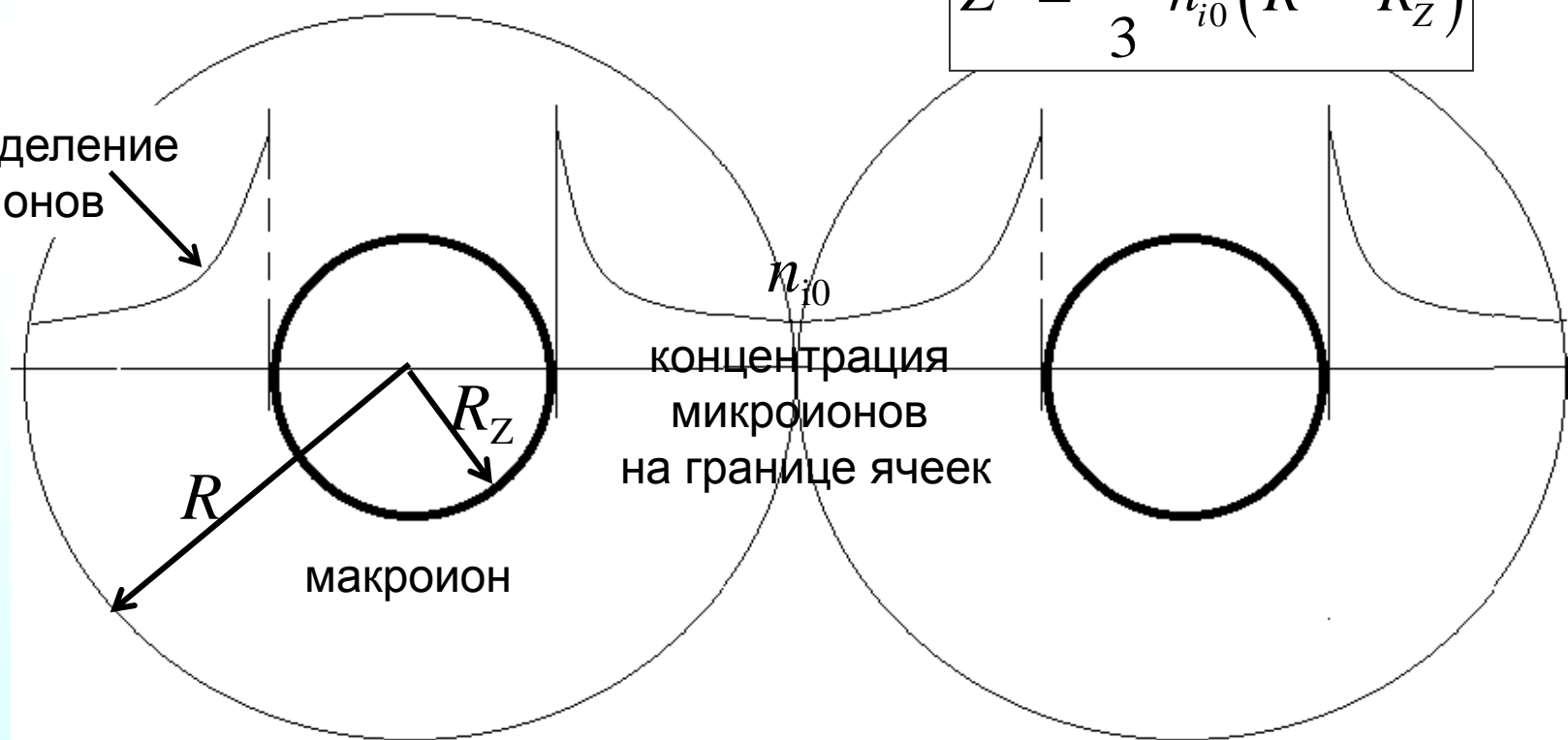
1) Деление микроионов на свободные и связанные по знаку полной энергии [Szichman H. et al., 1997, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* ]

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,  $Z^* = Z - n \Rightarrow$

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

распределение микроионов



две соседние электронейтральные ячейки Вигнера-Зейтца

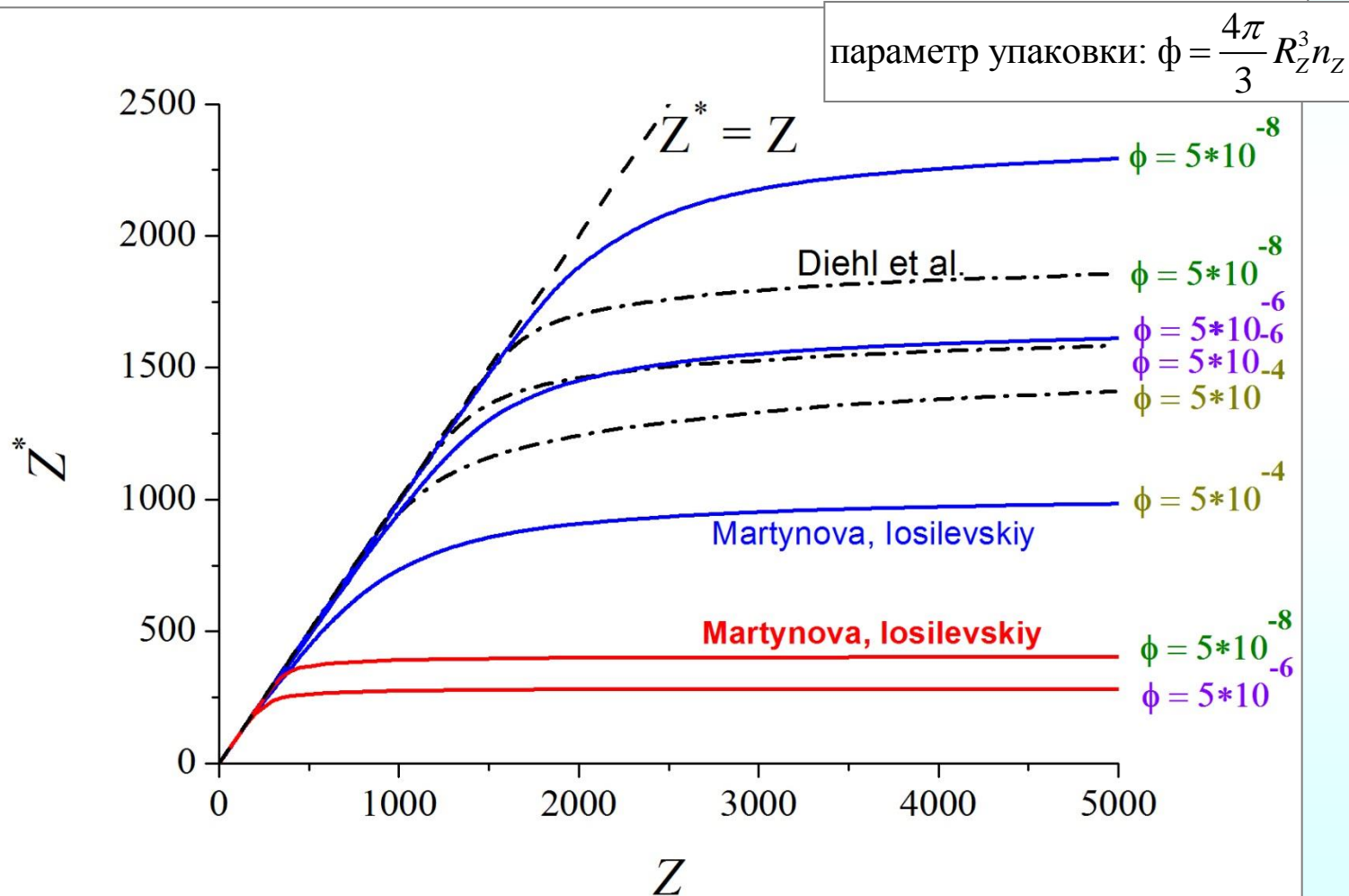


# Сравнение зависимостей эффективного заряда макроиона $Z^*$ от исходного $Z$ при различных определениях $Z^*$

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

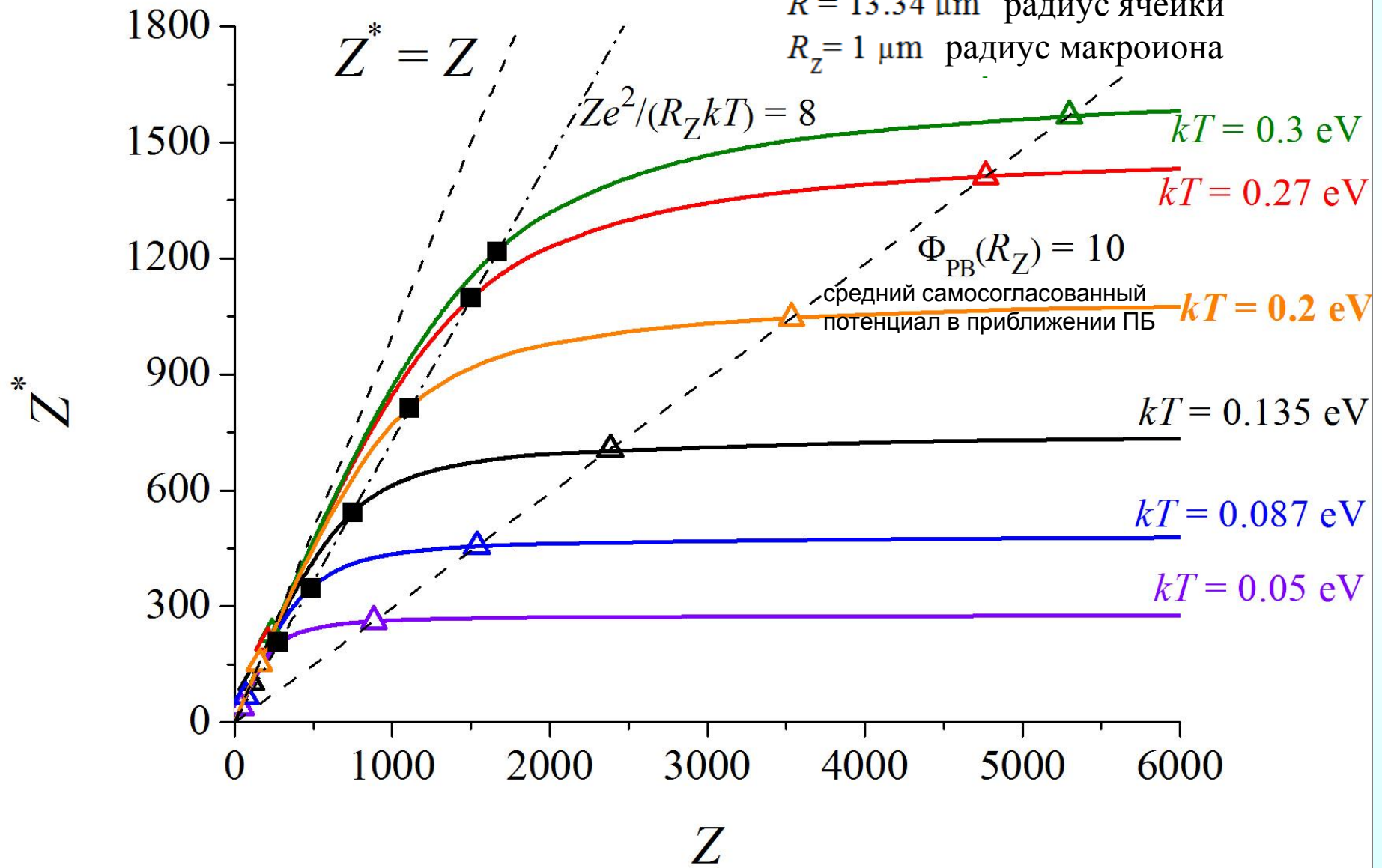


# Зависимость эффективного заряда макроиона $Z^*$ от исходного $Z$ для различных температур с учетом нелинейного экранирования

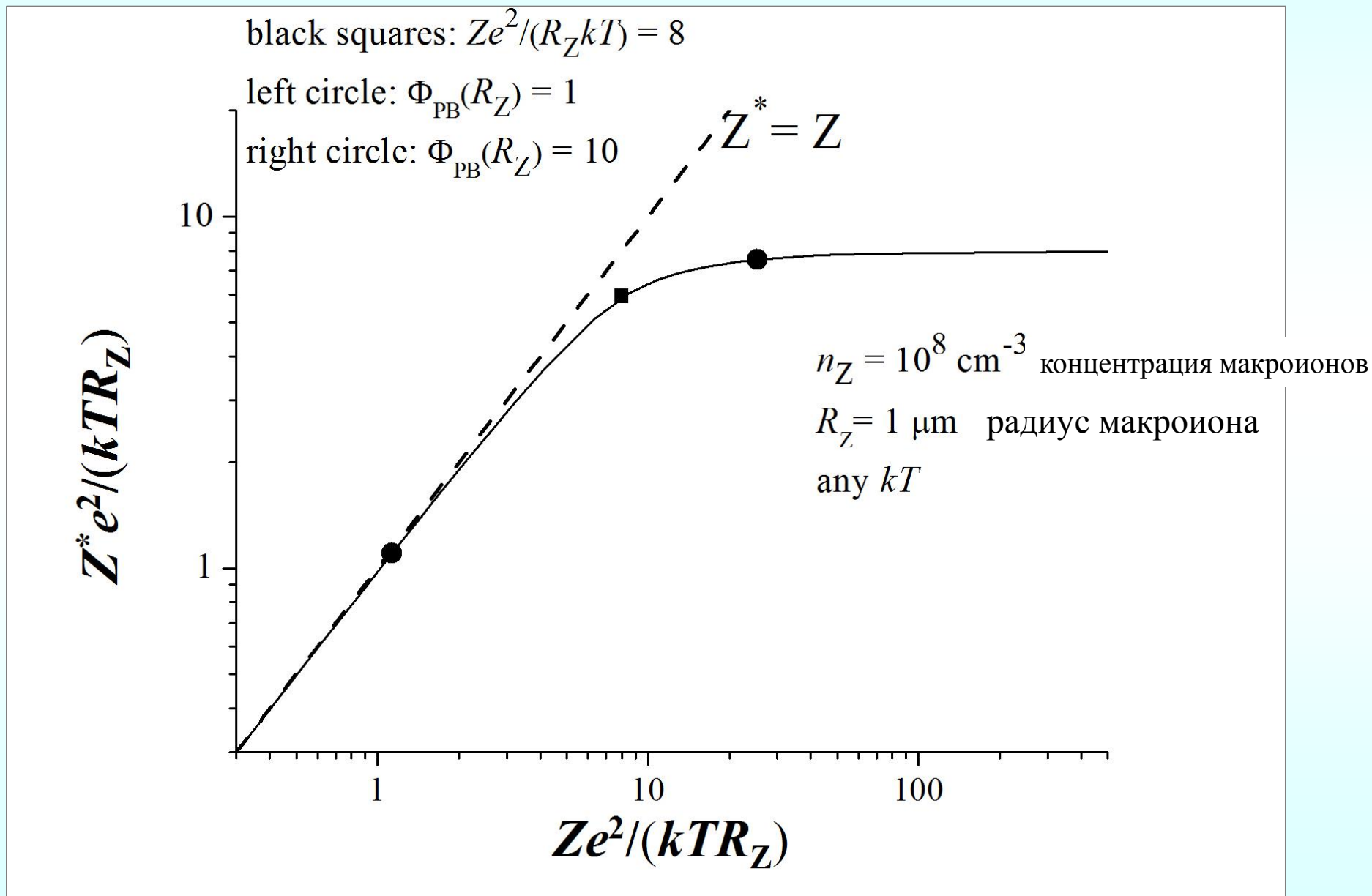
$n_Z = 10^8 \text{ cm}^{-3}$  концентрация макроионов

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

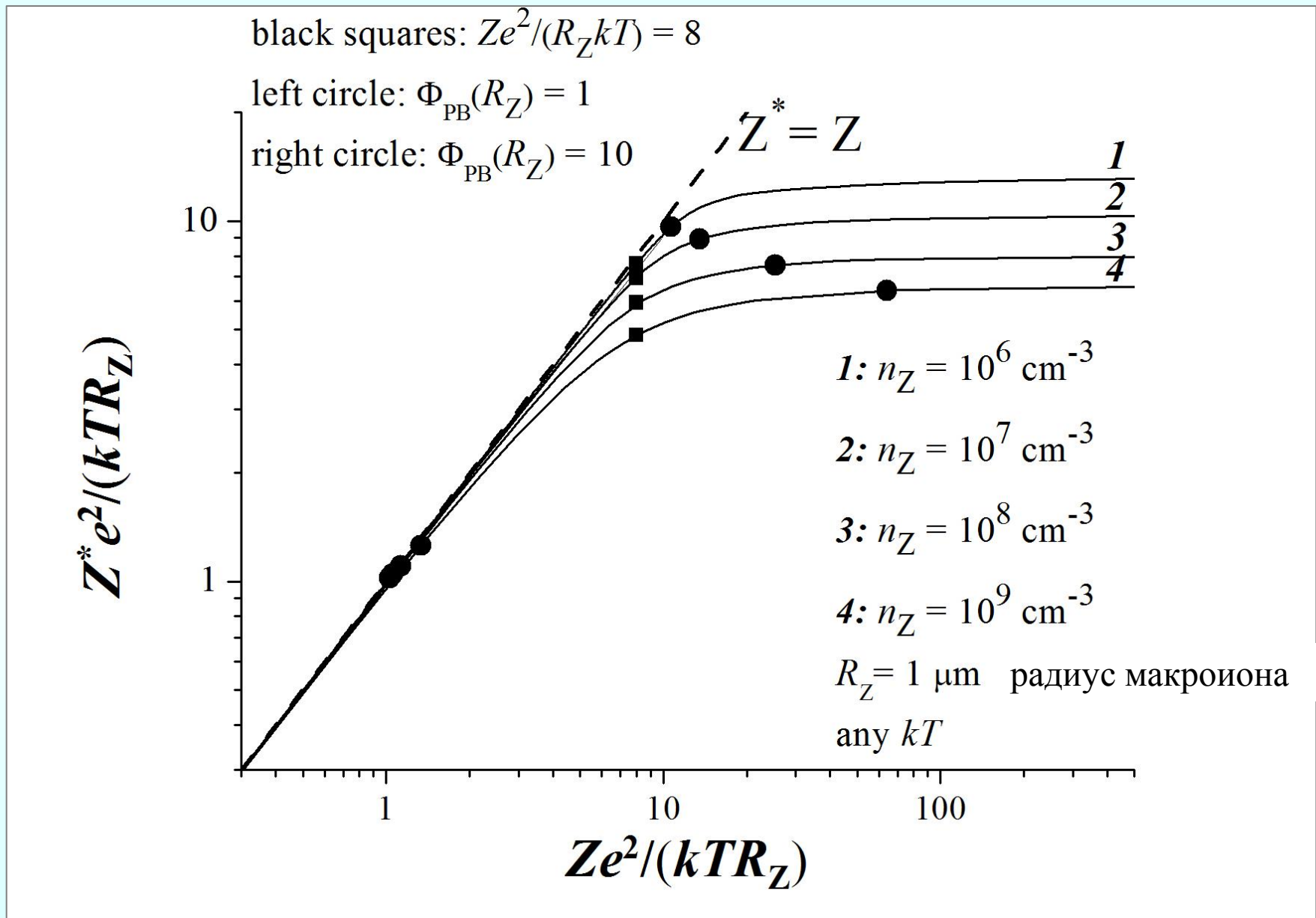
$R_Z = 1 \text{ }\mu\text{m}$  радиус макроиона



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



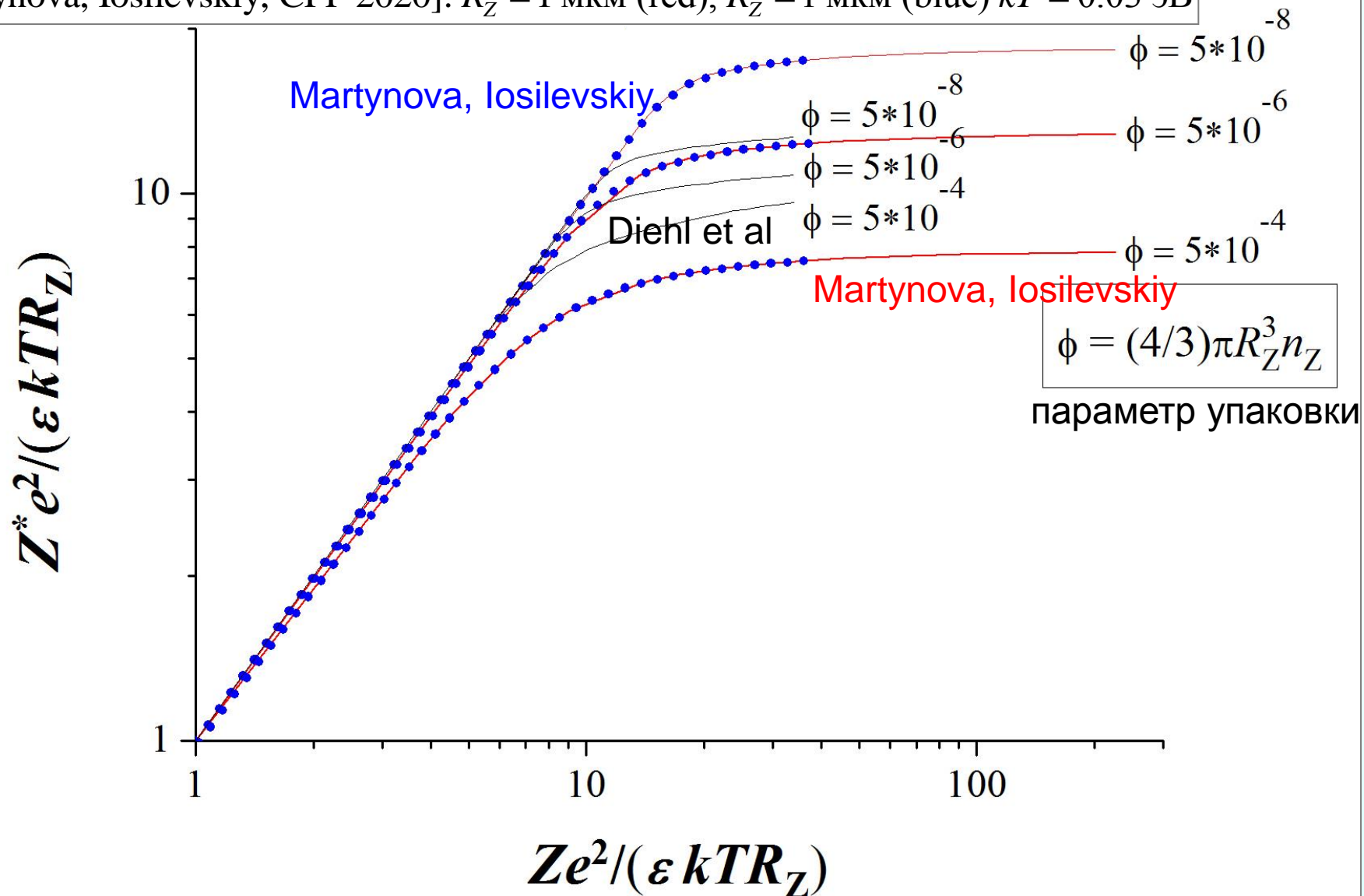
**Автомодельные зависимости эффективного заряда  $Z^*$  от исходного  $Z$   
 для различных температур  $kT$   
 при фиксированных концентрациях макроионов  $n_Z$**



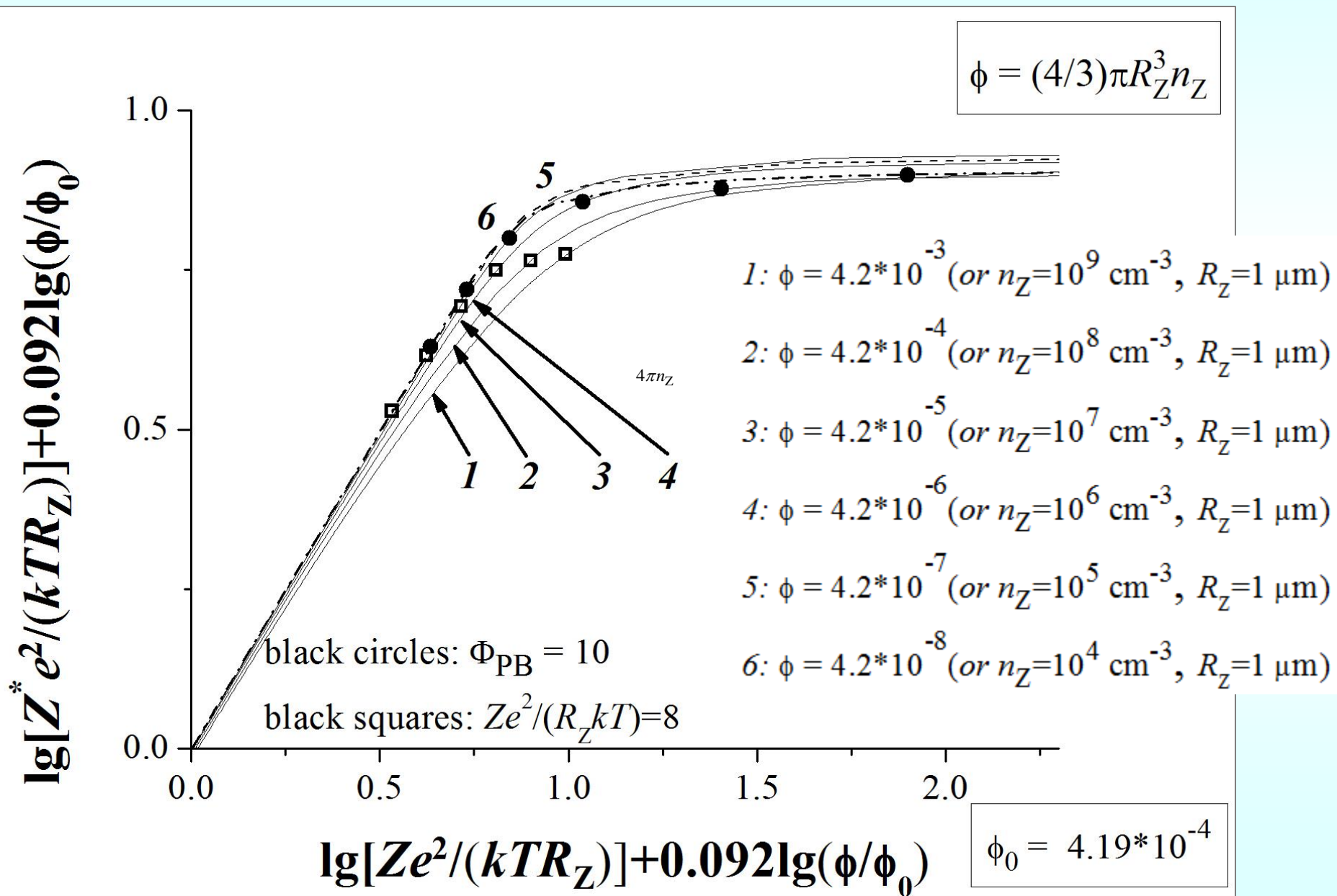
# Автомодельные зависимости эффективного заряда макроиона $Z^*$ от исходного заряда $Z$ для различных параметров упаковки $\phi$

[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

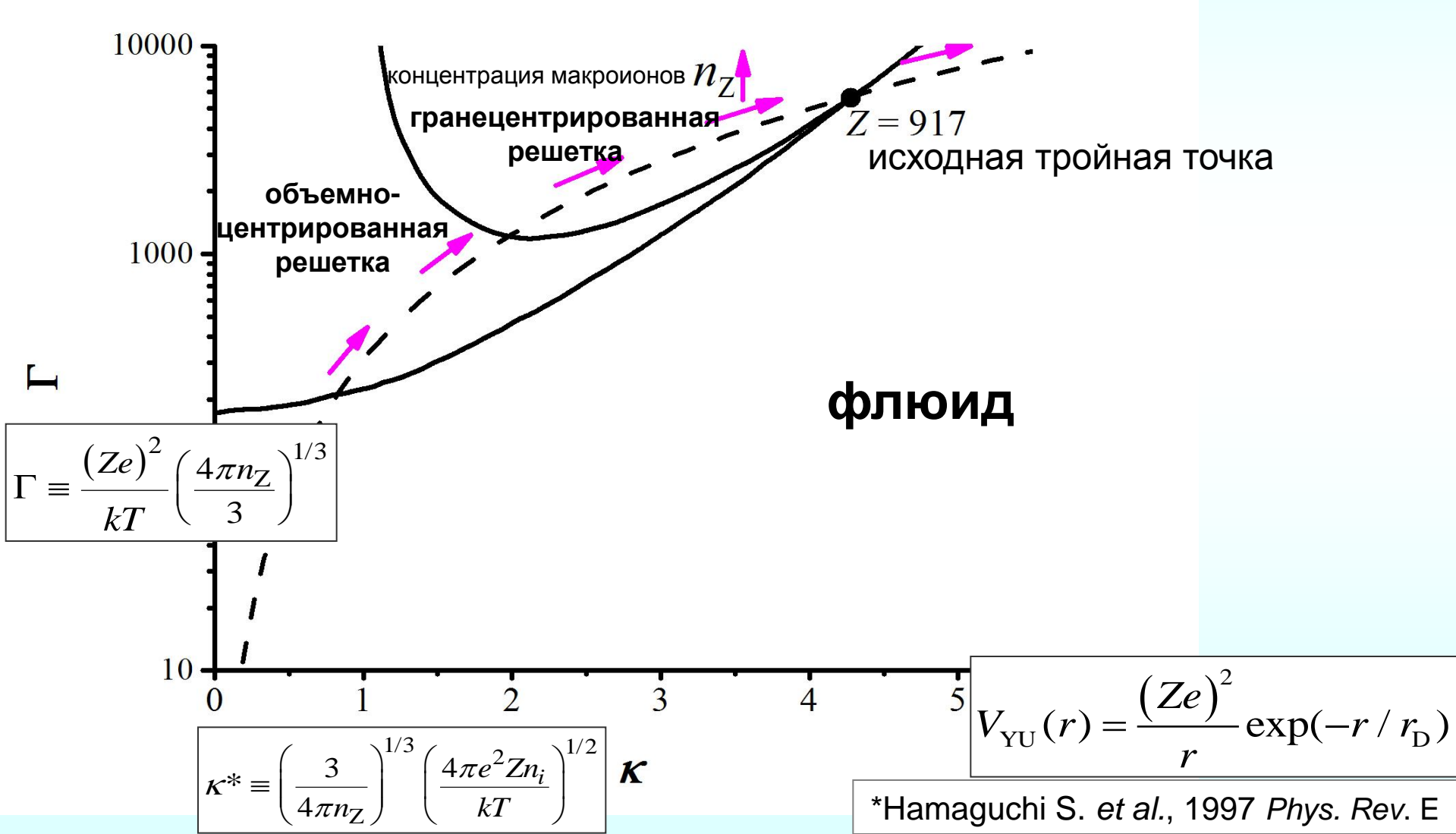


# Автомодельная зависимость эффективного заряда макроиона $Z^*$ от исходного заряда $Z$ , температуры $kT$ , радиуса макроиона $R_Z$ и концентрации макроионов $n_Z$



# Уменьшение области достижимых значений в двухкомпонентной комплексной плазме

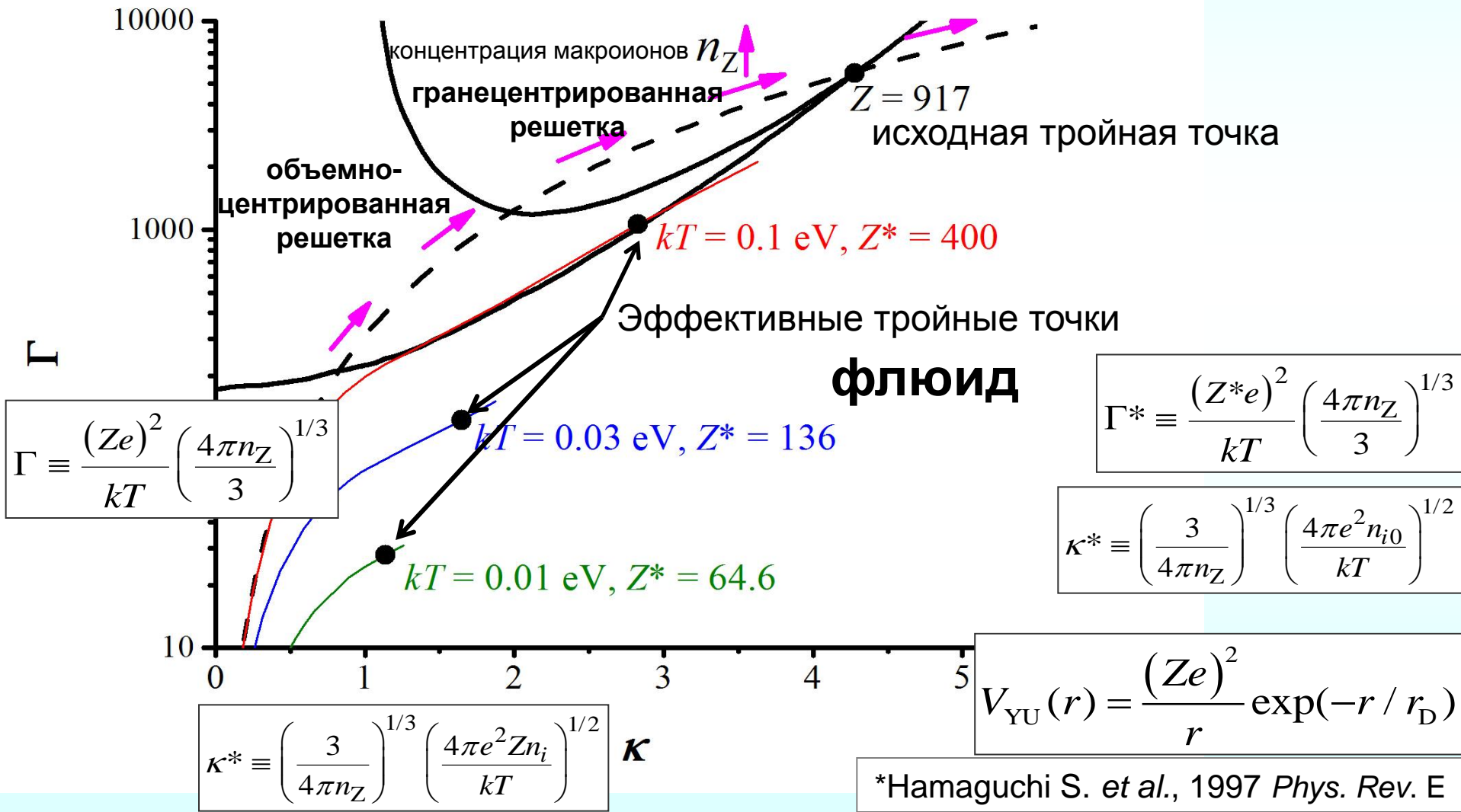
Фазовое состояние двухкомпонентной системы макроионов и микроионов зависит от эффективного межчастичного взаимодействия макроионов на средних расстояниях, т.е. **определяется эффективным зарядом** макроиона и **свободными** микроионами. Таким образом, для указанной системы общий вид фазовой диаграммы\* сохраняется, но в эффективных переменных  $\kappa^*$ - $\Gamma^*$ .



\*Hamaguchi S. et al., 1997 *Phys. Rev. E*

# Уменьшение области достижимых значений в двухкомпонентной комплексной плазме

Фазовое состояние двухкомпонентной системы макроионов и микроионов зависит от эффективного межчастичного взаимодействия макроионов на средних расстояниях, т.е. **определяется эффективным зарядом** макроиона и **свободными** микроионами. Таким образом, для указанной системы общий вид фазовой диаграммы\* сохраняется, но в эффективных переменных  $\kappa^*$ - $\Gamma^*$ .





# 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.