



# Расчёты коэффициентов поглощения фотонов на основе модели ионизационного равновесия плазмы

А.А. Овечкин, П.А. Лобода, Е.Ю. Акулинина, М.Е. Березовская,  
В.В. Попова, А.С. Королёв, С.В. Кольчугин

*Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-Исследовательский  
Институт Технической Физики им. акад. Е.И. Забабахина*

Отдельные сорта ионов с различным числом связанных электронов  $Q$

Уравнения ионизационного равновесия для относительных концентраций  $c_Q$ :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{c_Q}{c_{Q-1}} &= \frac{U_Q}{U_{Q-1}} \exp(-\beta \Delta \tilde{\mu}_Q), \quad \beta = 1/T \\ \sum_Q c_Q (Z - Q) &= \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 \beta^{3/2}} I_{1/2}(\beta \mu_e) \end{aligned} \right.$$



Волновые функции электронов, химический потенциал, электронная плотность, ионный состав, энергии и вероятности радиационных переходов, ...



- Термодинамические функции (энергия, давление, ...)
- Коэффициенты поглощения фотонов
- Переносные коэффициенты

Уравнения самосогласованного поля для иона с наиболее вероятными при заданных  $\rho$  и  $T$  числами заполнения электронных оболочек

$$\left( -ic(\vec{\alpha}\nabla) + c^2(B-1) + V(r) \right) \psi_\nu(\vec{r}) = \varepsilon_\nu \psi_\nu(\vec{r})$$

$$n_e(r) = \sum_\nu \frac{1}{1 + \exp(\beta(\varepsilon_\nu - \mu_e))} |\psi_\nu(\vec{r})|^2$$

$$\nabla^2 V_c(r) = 4\pi(Z\delta(\vec{r}) - n_e(r))$$

### Волновые функции электронов



- Для изолированных ионов
- Учитывается зависимость от сорта иона
- Учитывается зависимость от  $\rho$  и  $T$
- Для каждого  $\rho$  и  $T$  только один набор волновых функций, отвечающий наиболее вероятному сорту иона

### Кулоновское взаимодействие

- Не учитывается влияние кулоновского взаимодействия на волновые функции электронов
- Средняя энергия кулоновского взаимодействия с учётом поступательного движения ионов и электронов
- Учитывается влияние кулоновского взаимодействия на волновые функции электронов
- Поступательное движение ионов при решении уравнений самосогласованного поля не учитывается

# Модель ионизационного равновесия CP-SC

P.A. Loboda, V.V. Popova, A.A. Shadrin. *Contrib. Plasma Phys.* **49**, 738 – 747 (2009)

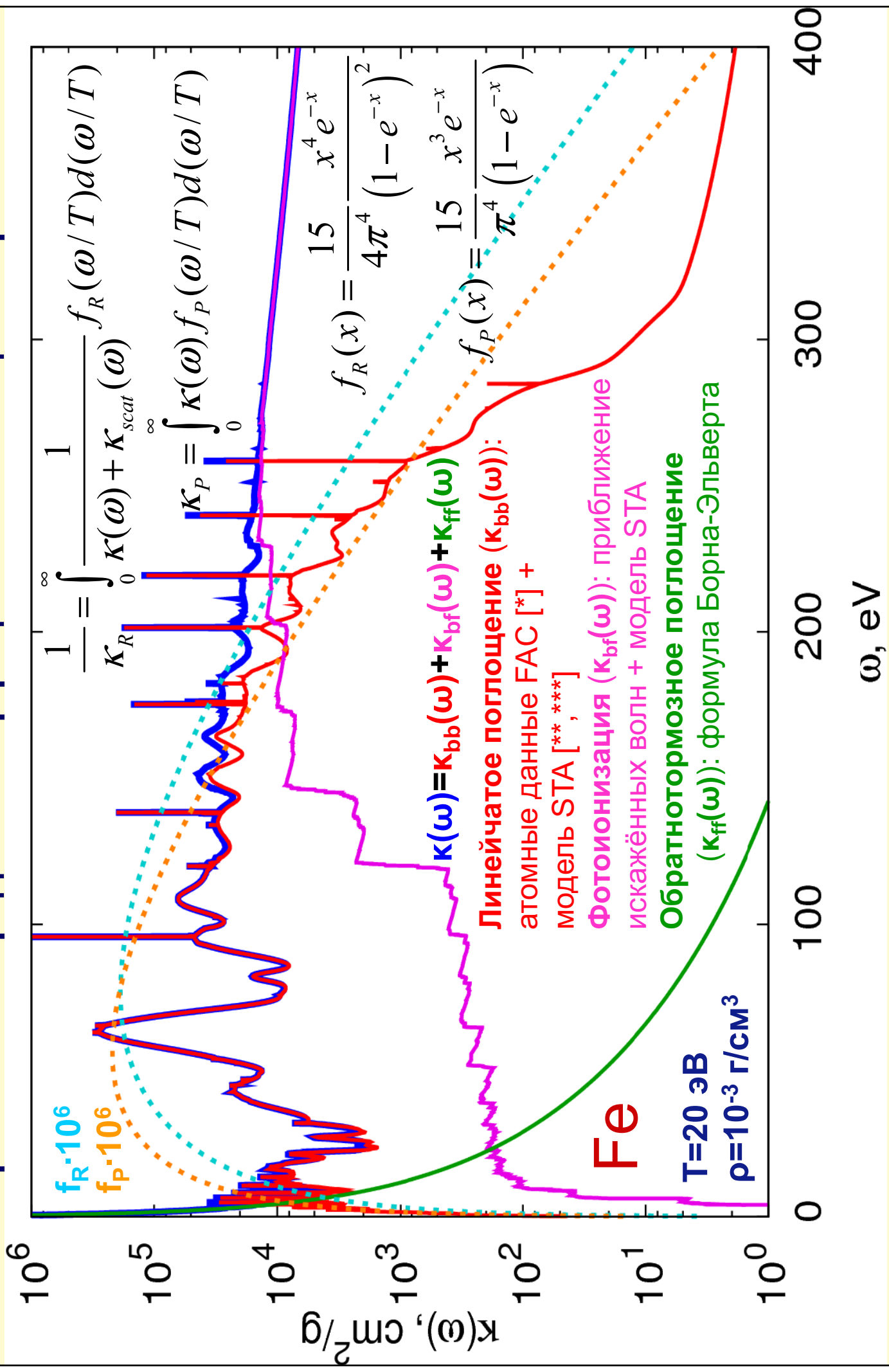
- Аппроксимации результатов расчётов энергии кулоновского взаимодействия методом Монте-Карло и в гиперцепном приближении [\*], обобщённые на случай неполной ионизации
- Учёт вырождения электронов
- Суперконфигурационное приближение [\*\*] для статсумм ионов  $U_\rho$   Полнота учёта возбуждённых состояний
- Учёт вероятностей существования одноэлектронных состояний в плазменном микрополе [\*\*\*]  «Обрезание» статсумм

\* G. Chabrier, A.Y. Potekhin. *Phys. Rev. E* **58**, 4941 – 4949 (1998)

\*\* A. Bar-Shalom, J. Oreg, W.H. Goldstein, D. Shvarts, A. Zigler. *Phys. Rev. A* **40**, 3183 – 3193 (1989)

\*\*\* D.G. Hummer, D. Mihalas. *Astrophys. J.* **331**, 794 (1988)

# Спектральные и средние коэффициенты поглощения фотонов

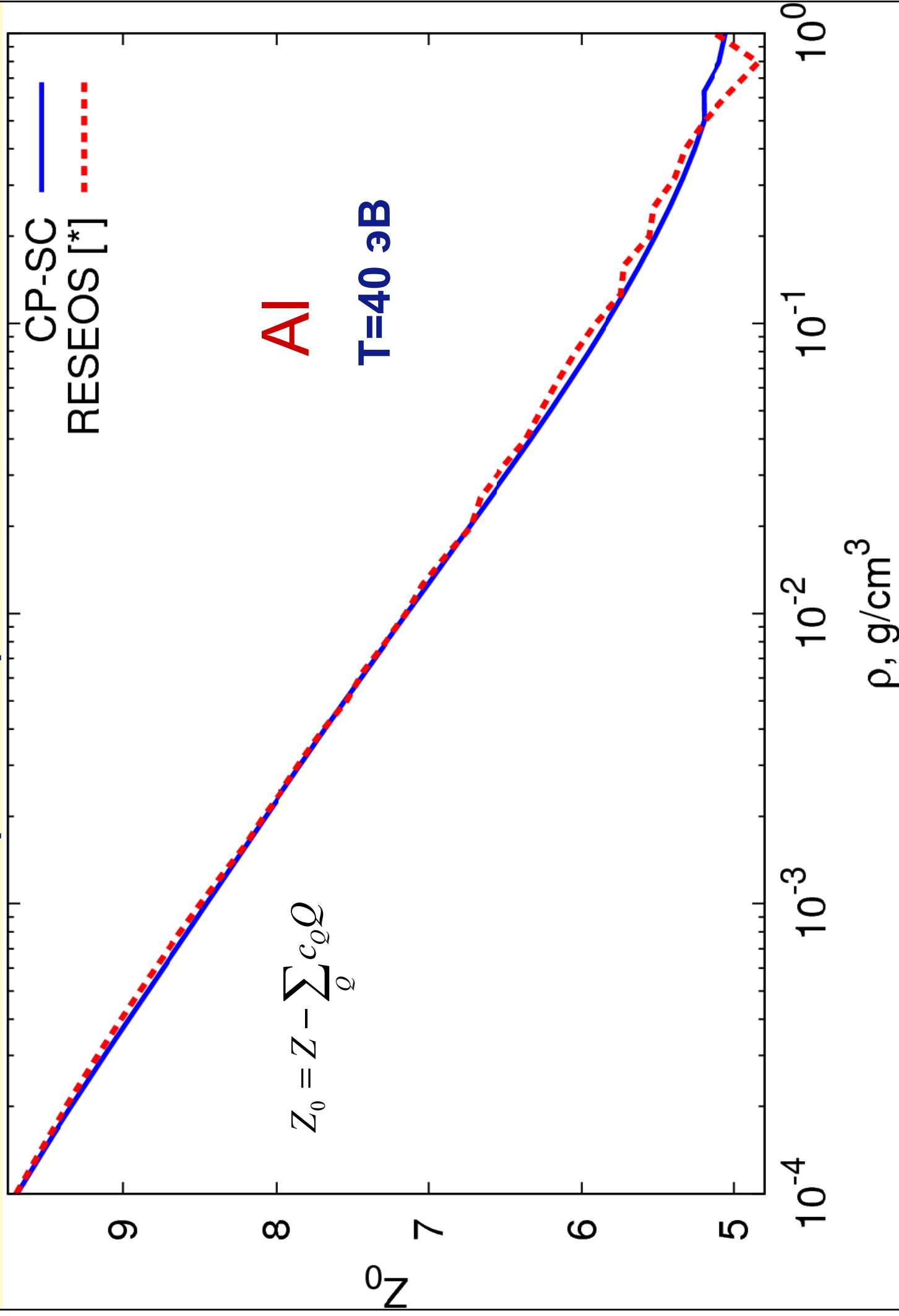


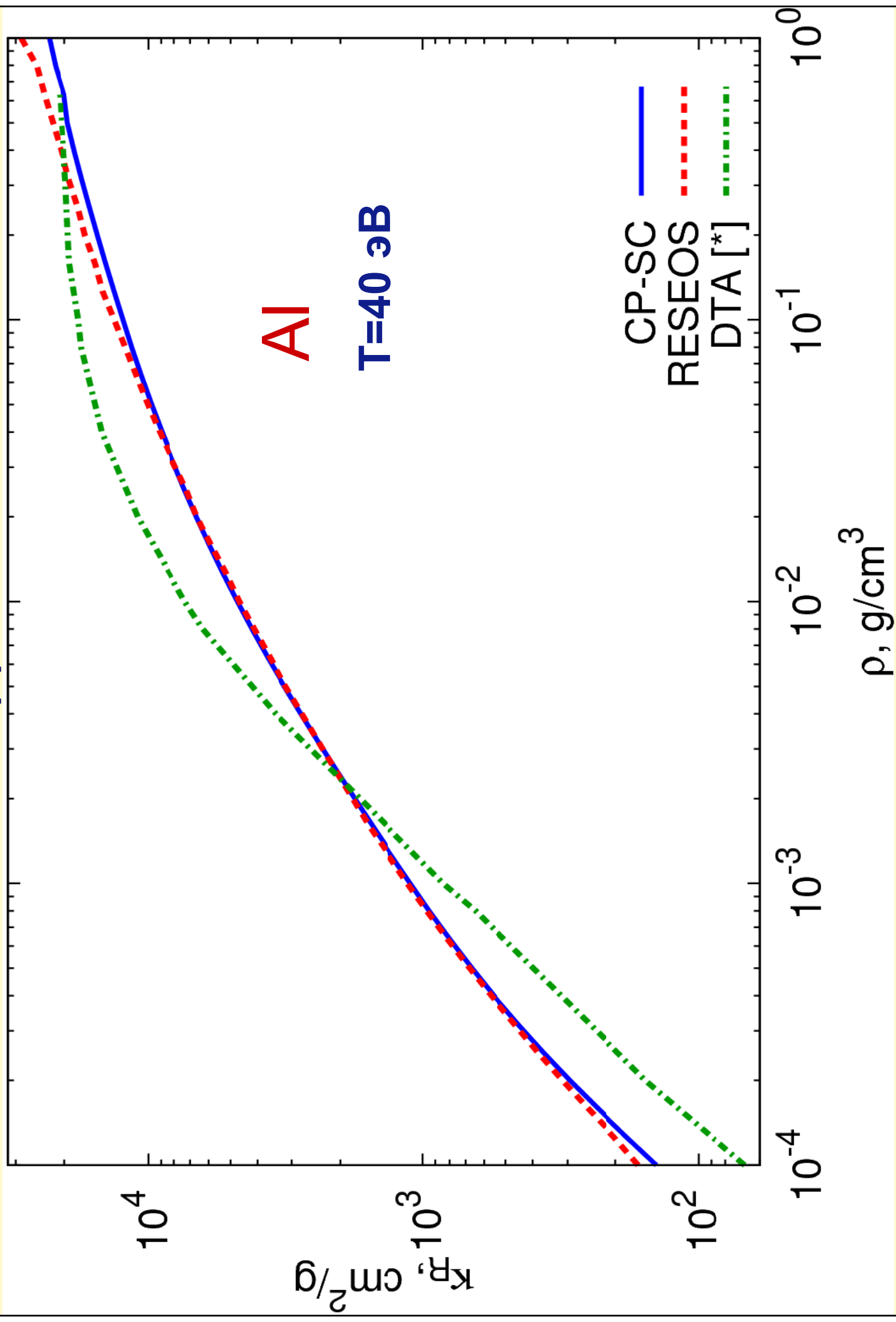
\* M.F. Gu. *Astrophys. J.* **582**, 1241-1250 (2003)

\*\* A. Bar-Shalom, J. Oreg, W.H. Goldstein, D. Shvarts, A. Zigler. *Phys. Rev. A* **40**, 3183 – 3193 (1989)

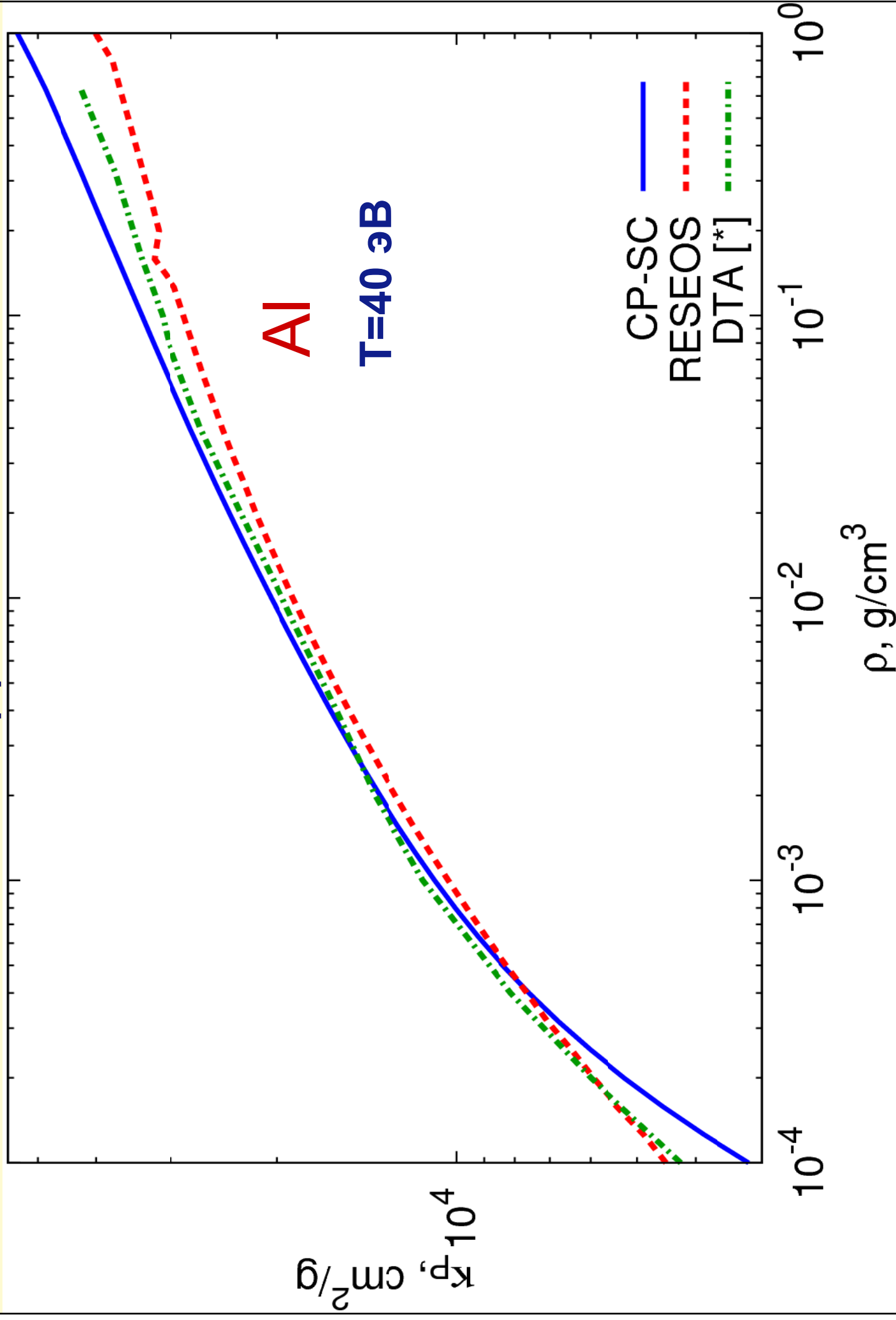
\*\*\* A. Bar-Shalom, J. Oreg, W.H. Goldstein. *Phys. Rev. E* **51**, 4882 – 4890 (1995)

# Средние заряды ионов



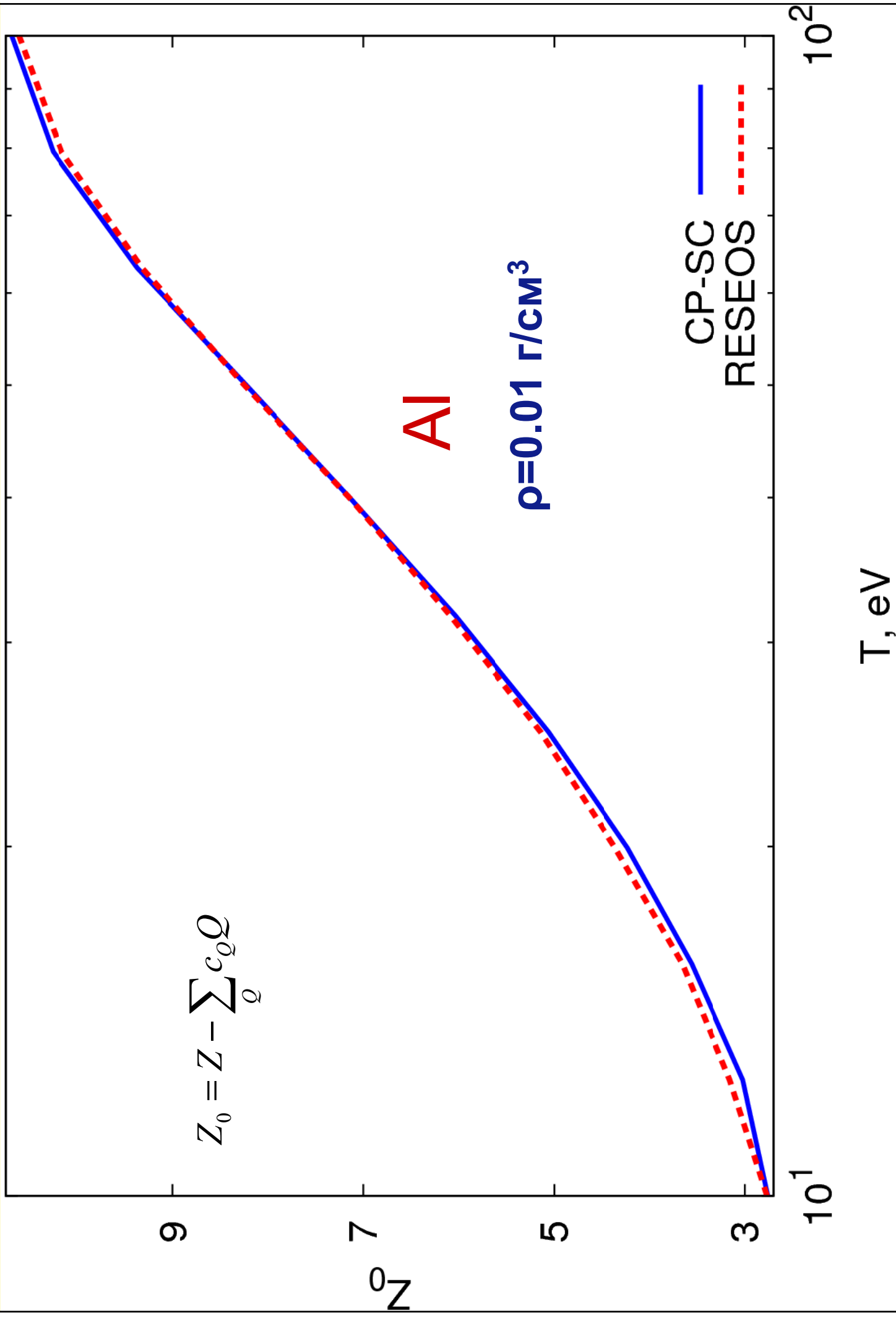


# Планковские коэффициенты поглощения

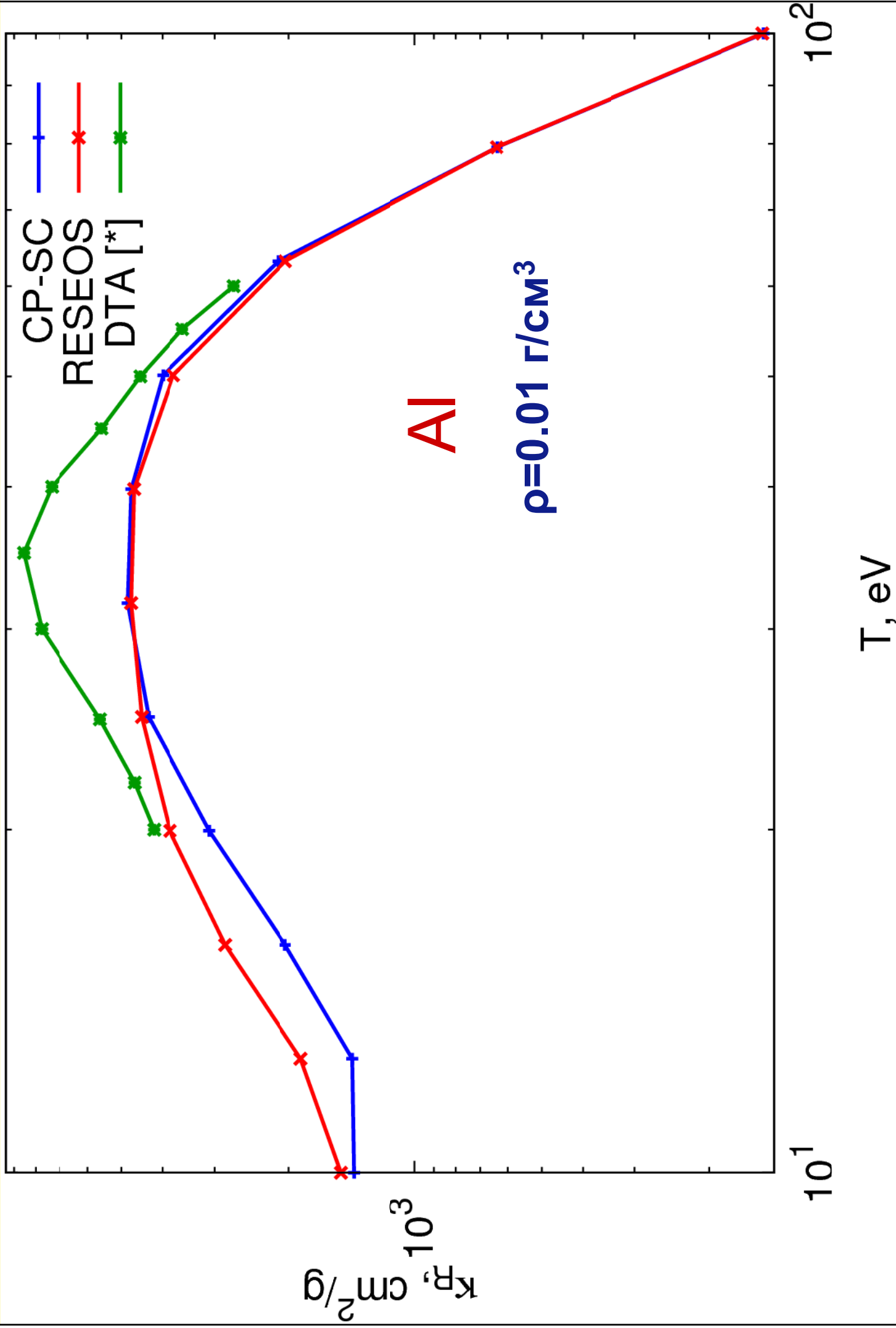




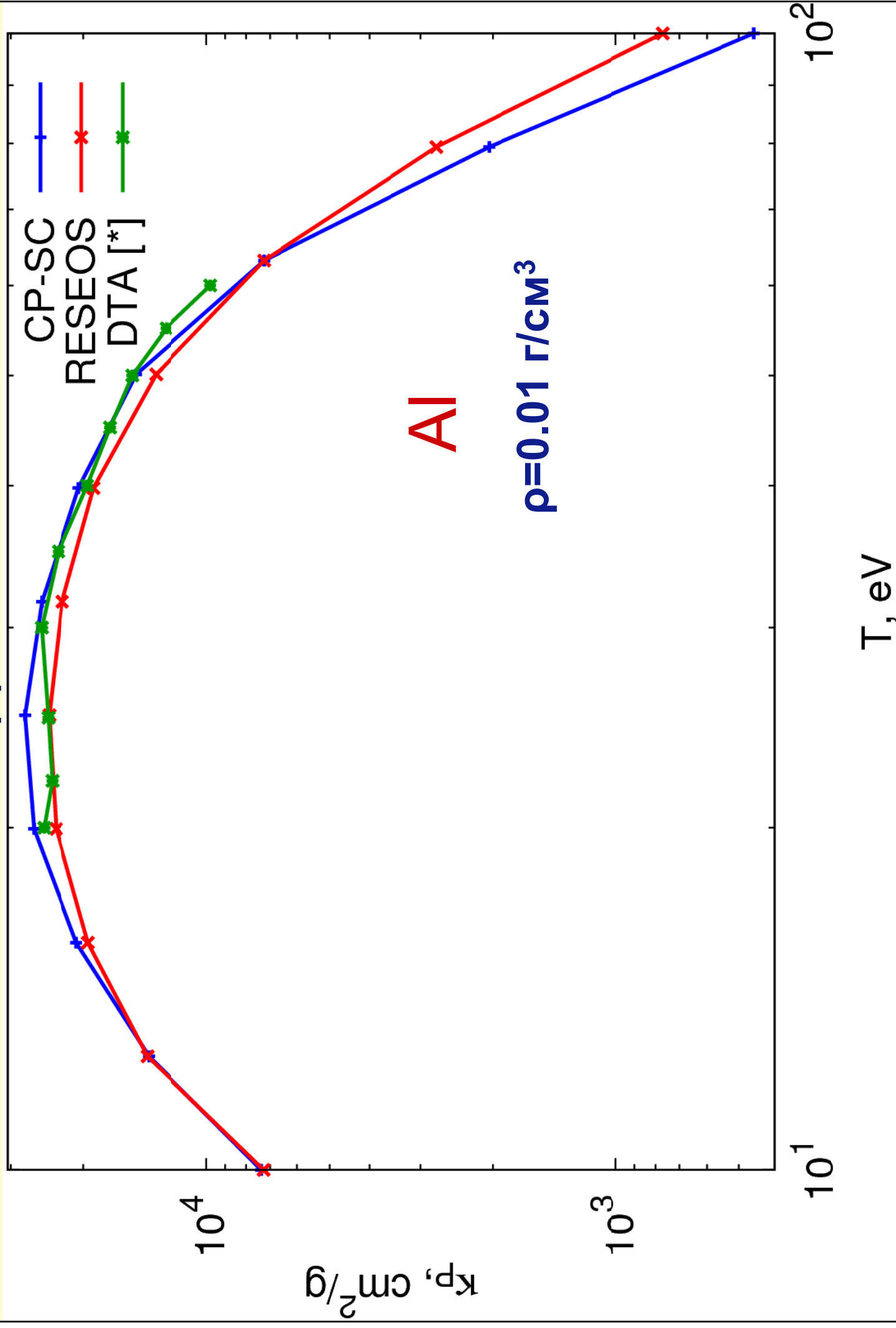
# Средние заряды ионов



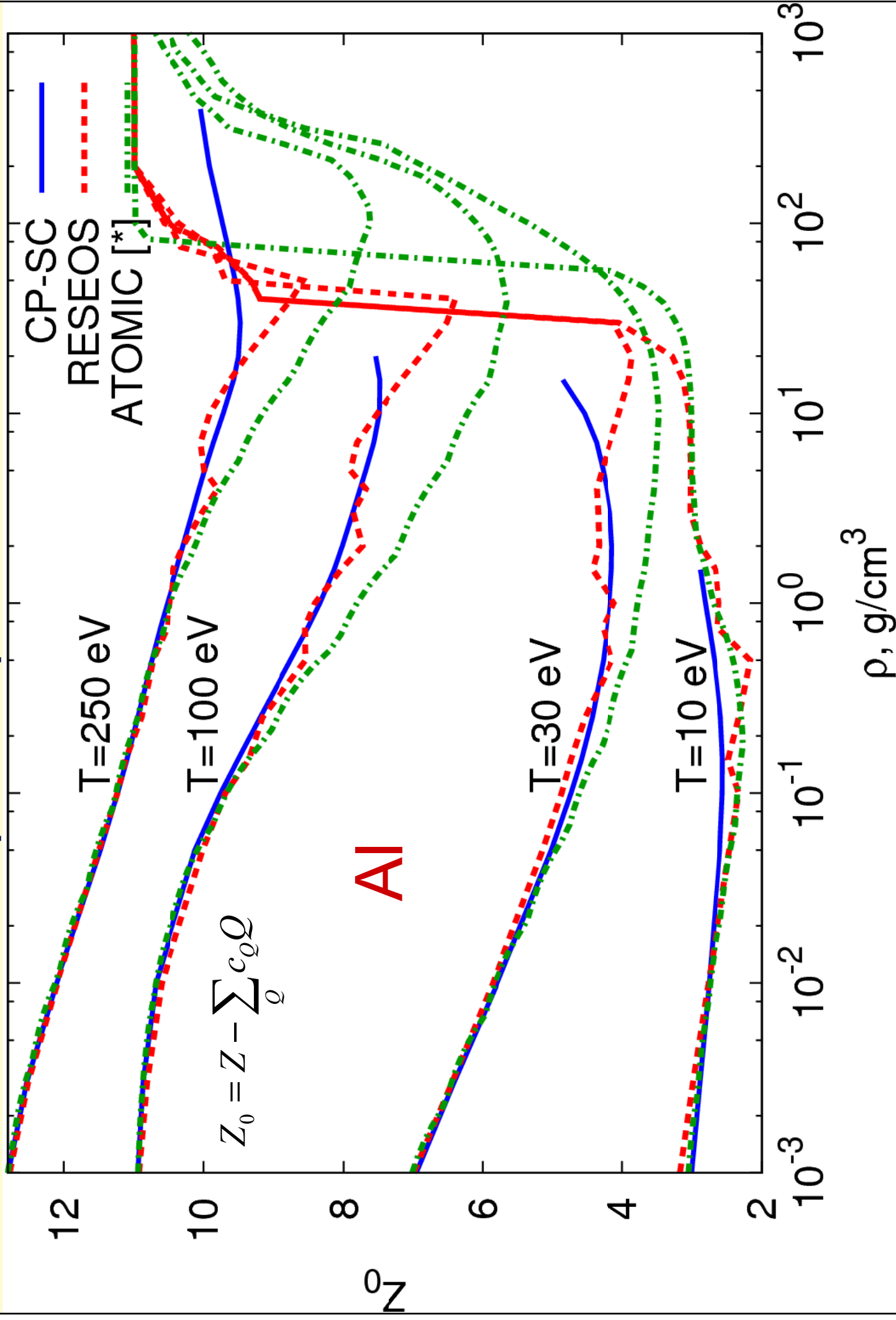
# Росселандовы коэффициенты поглощения

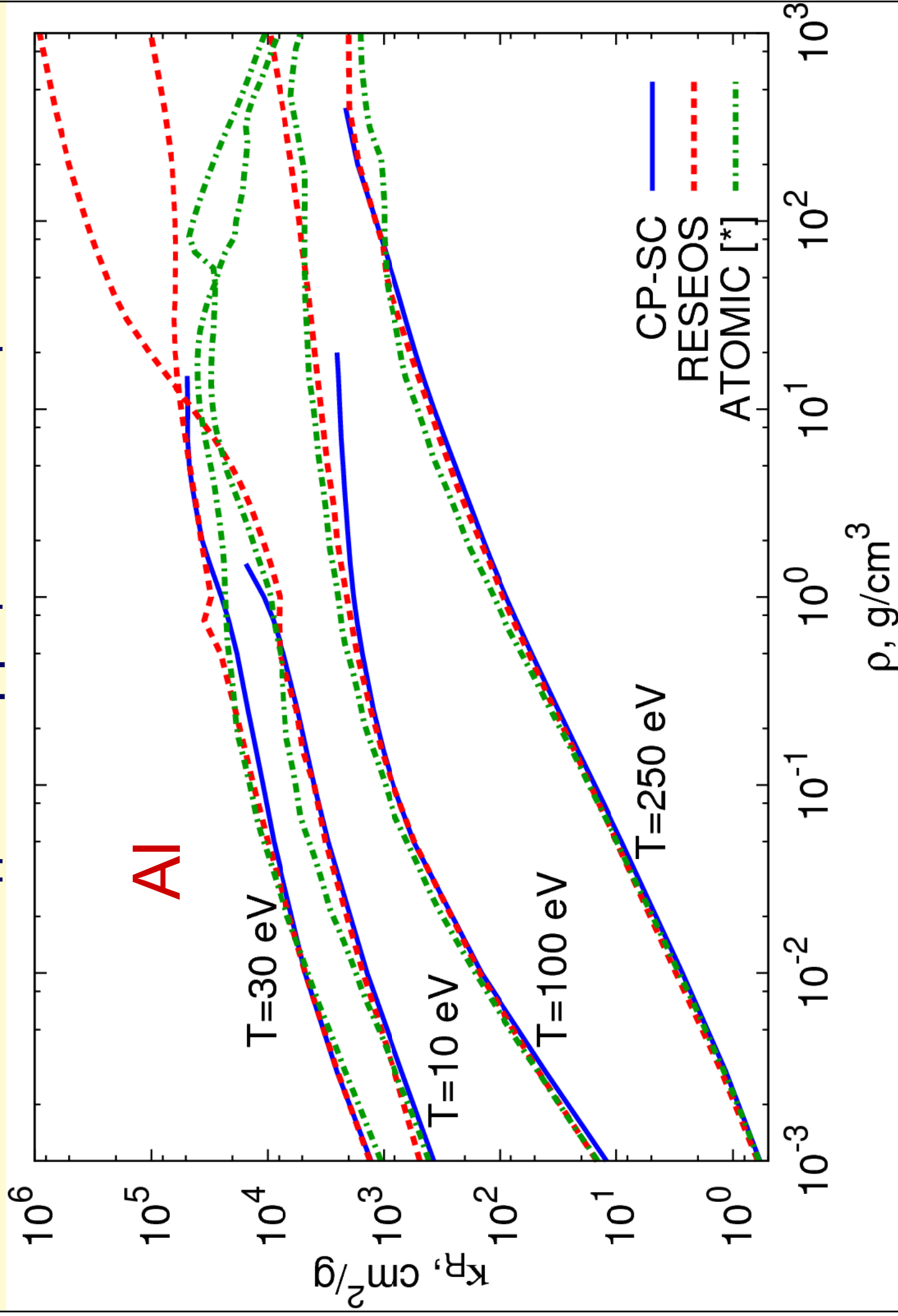


# Планковские коэффициенты поглощения

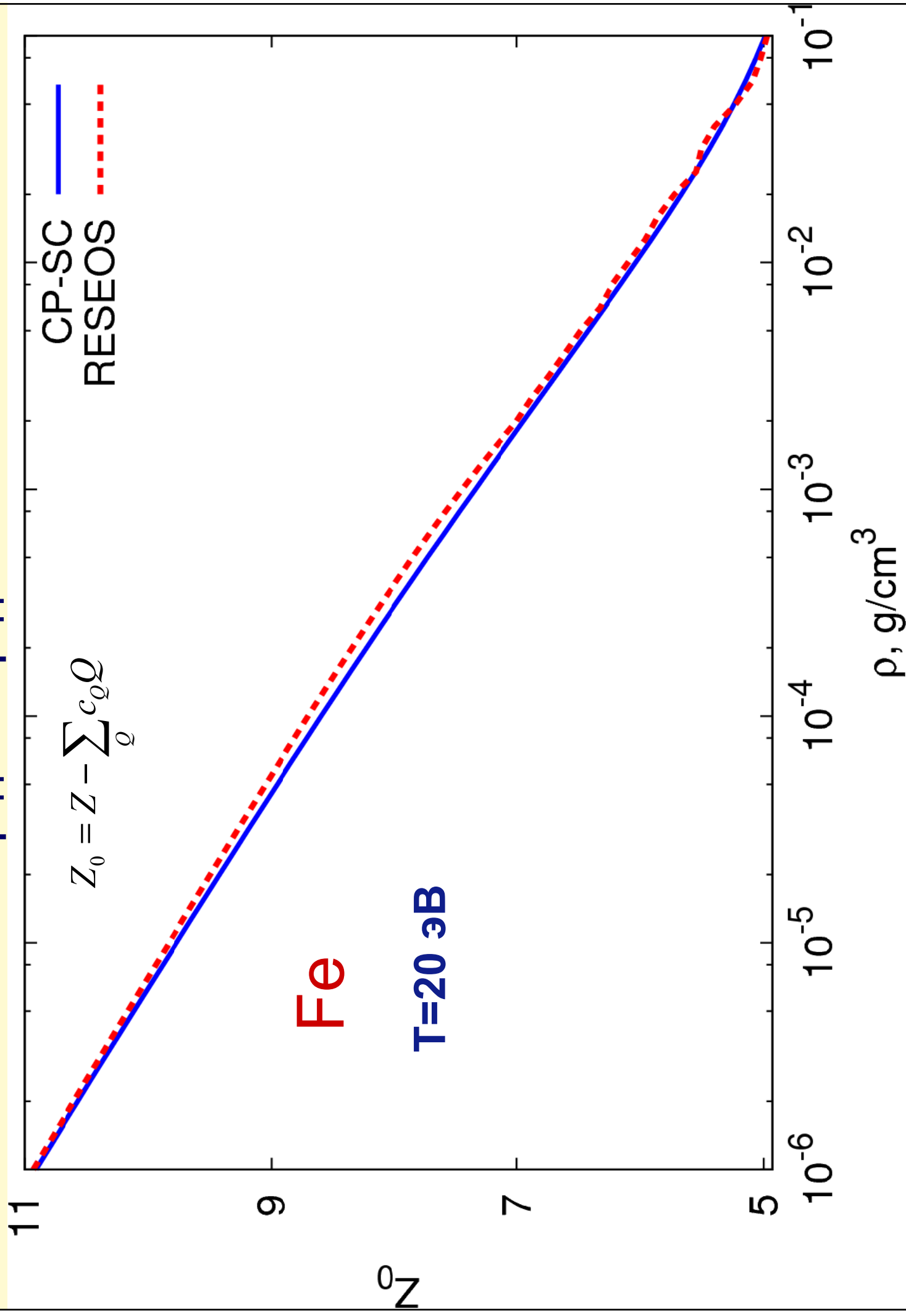


# Средние заряды ионов

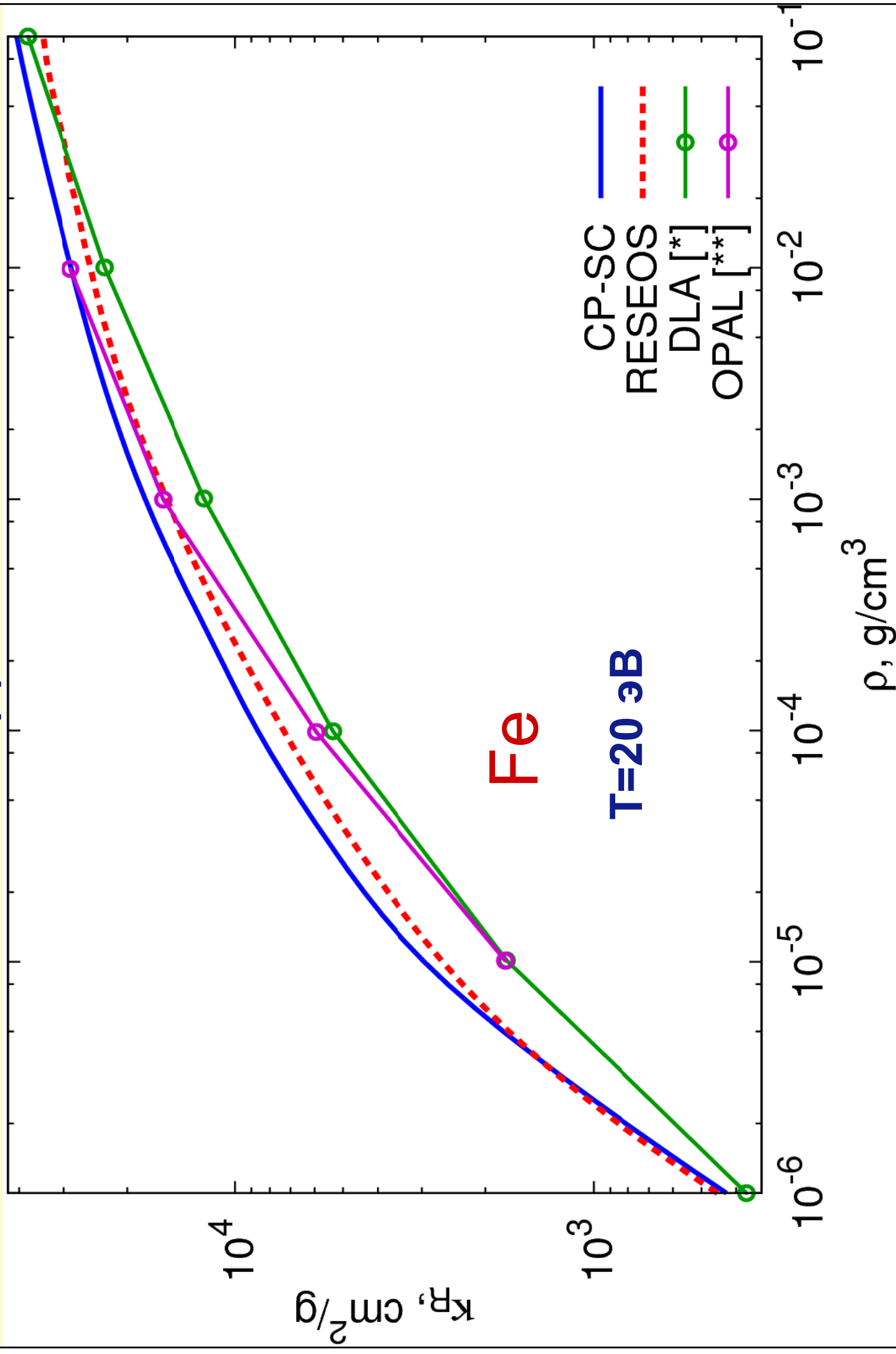




# Средние заряды ионов



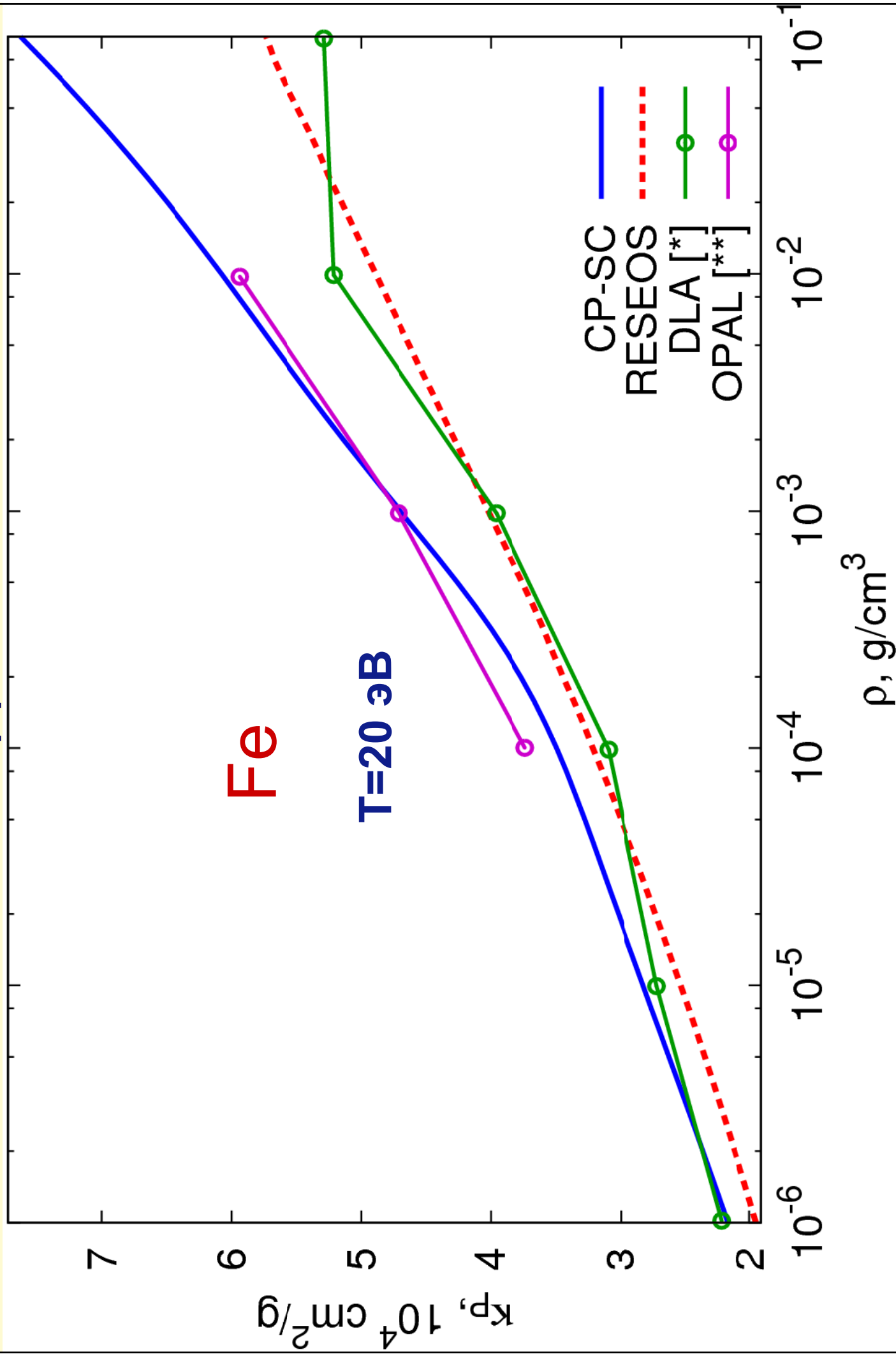
# Росселандовы коэффициенты поглощения



\* F. Jin, J. Zeng, T. Huang, Y. Ding, Z. Zheng, J. Yuan. *Astrophys. J.* 693, 597 - 609 (2009)

\*\* C.A. Iglesias, F.J. Rogers. *Astrophys. J.* 464, 943 - 953 (1996)

# Планковские коэффициенты поглощения

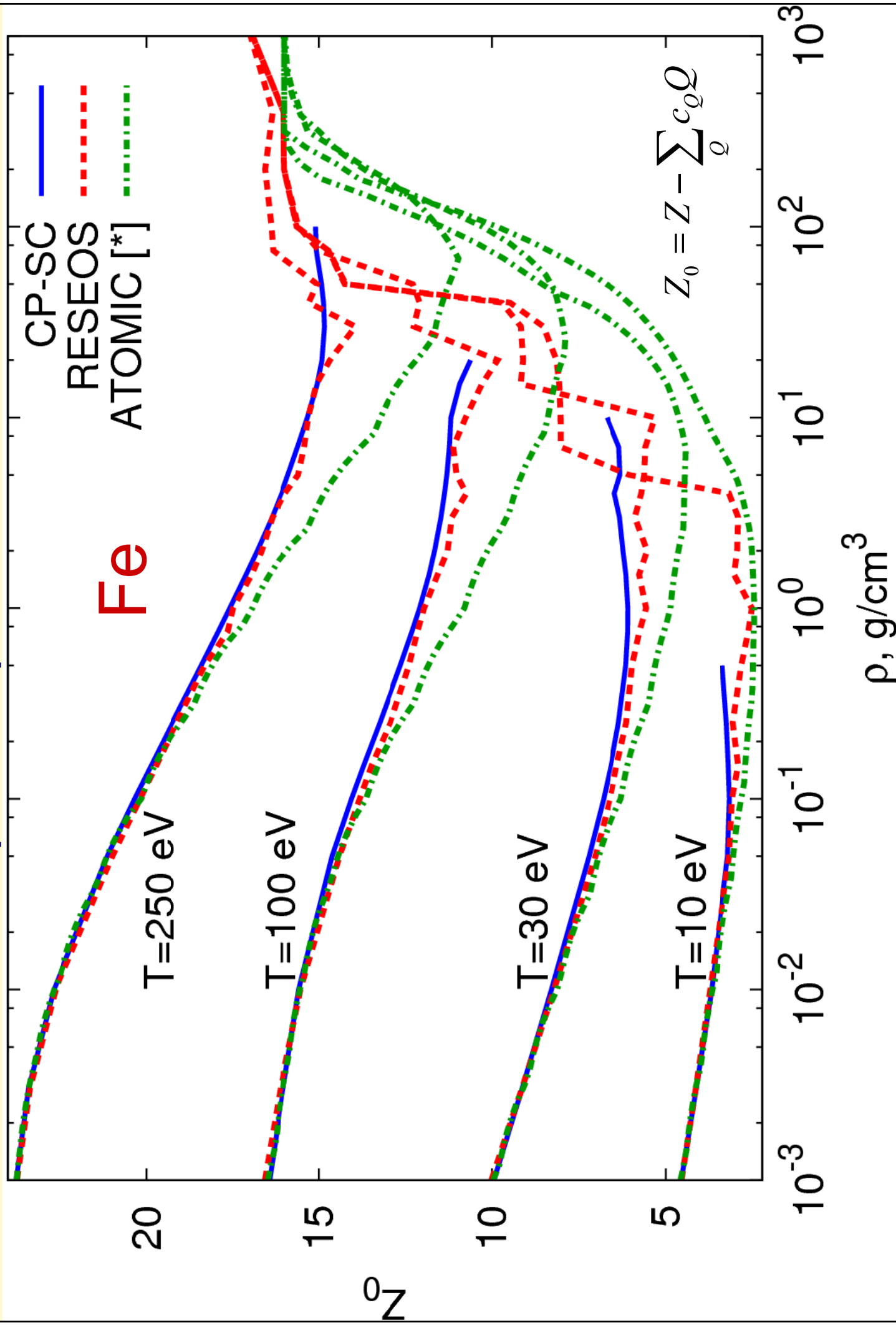


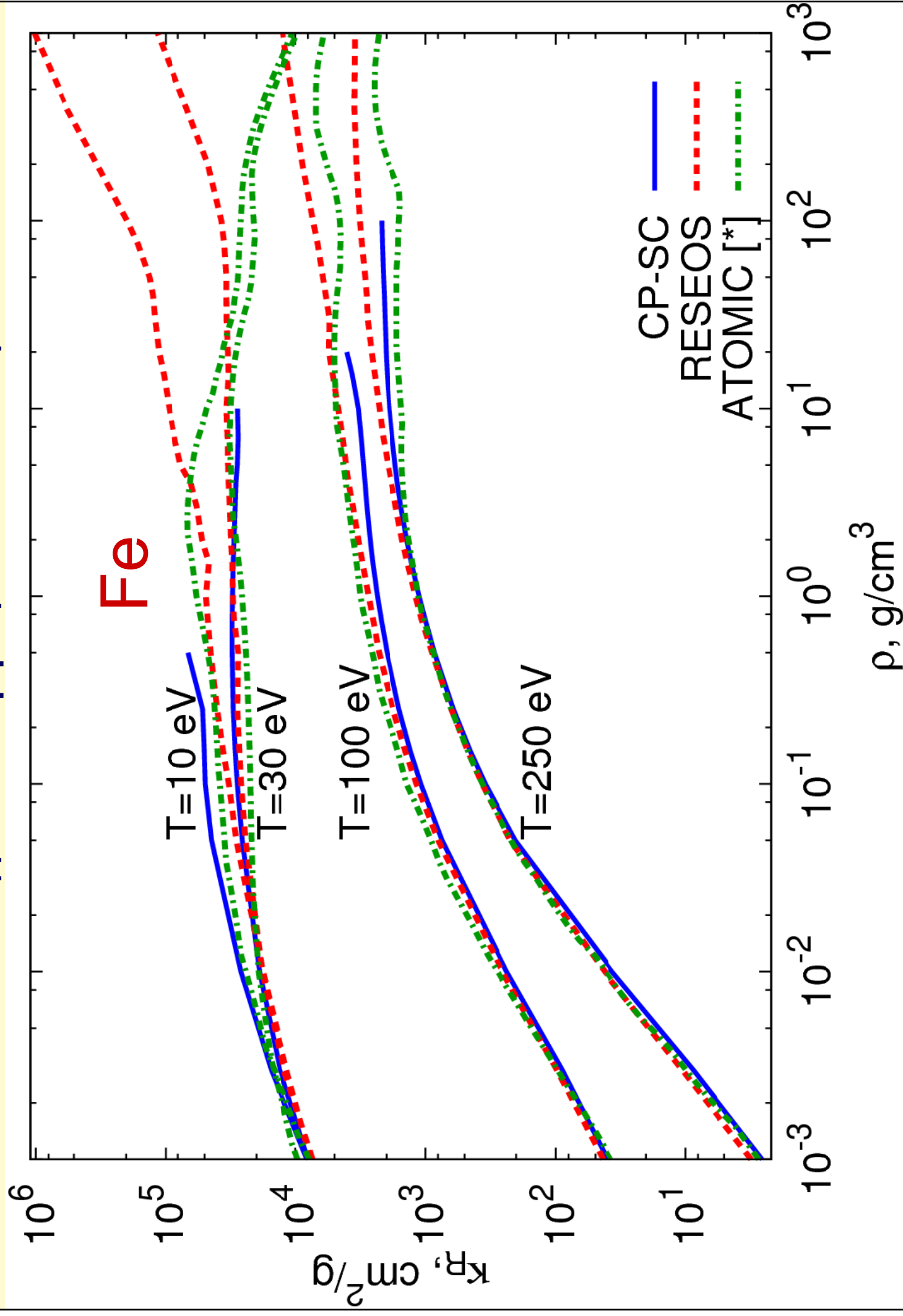
\* F. Jin, J. Zeng, T. Huang, Y. Ding, Z. Zheng, J. Yuan. *Astrophys. J.* 693, 597 - 609 (2009)

\*\* C.A. Iglesias, F.J. Rogers. *Astrophys. J.* 464, 943 - 953 (1996)

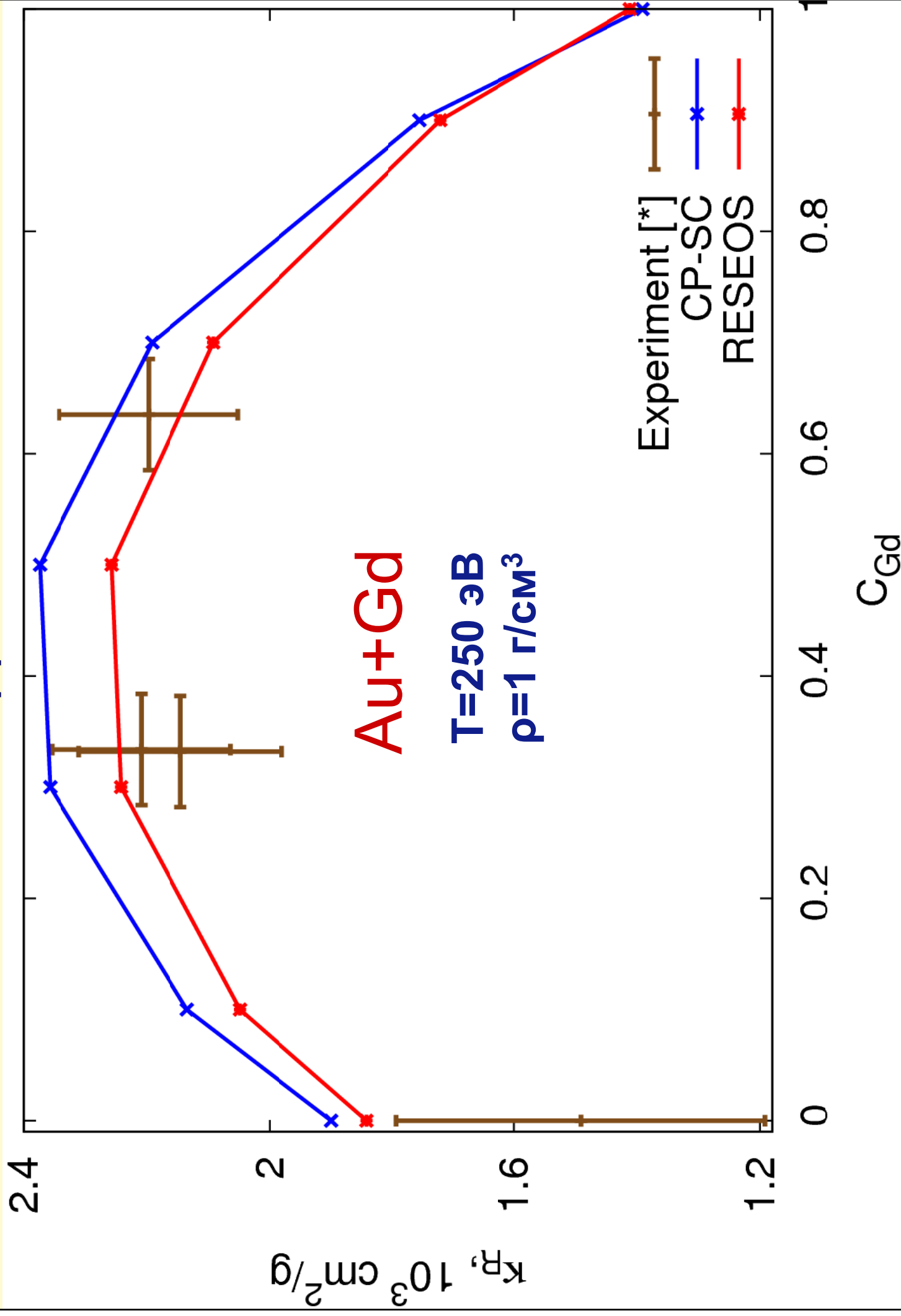


# Средние заряды ионов





# Росселандовы коэффициенты поглощения



## Выводы

1. Модель CP-SC может применяться для массовых расчётов коэффициентов поглощения фотонов.
2. В области применимости модели CP-SC коэффициенты поглощения фотонов, рассчитанные по этой модели, в целом хорошо согласуются с результатами модели RESEOS, что повышает надёжность моделирования оптических свойств плотной высокотемпературной плазмы.