

## МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛИЖНЕПОЛЬНОГО РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ДИПОЛЕЙ

✉ Д. В. Шершнёв, М. А. Юркин

*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

✉ d.shershnev0@gmail.com

Теплообмен между близко расположенными частицами многократно усиливается за счет вклада затухающих мод поверхностных волн, которые не учитывает классическая модель абсолютно черного тела [1]. Этот эффект имеет множество применений для управления температурой в замкнутых системах бесконтактным способом [2]. Поэтому он активно изучается с использованием разнообразных численных методов, включая метод дискретных диполей (МДД). Существуют несколько реализаций МДД для моделирования ближнепольного радиационного теплопереноса (БРТП), но в каждой из них [3, 4] используются разные численные схемы, которые связаны между собой неочевидным образом. Таким образом, основная цель данной работы — это реализовать моделирование БРТП с помощью МДД в известном программном пакете с открытым кодом ADDA [5], а также установить взаимосвязь между разными численными схемами.

Задача работы состояла в том, чтобы применить МДД, который уже реализован в ADDA, к общей задаче радиационного теплообмена между двумя частицами произвольной формы. В данной модели частицы представляются в виде конечного набора диполей, которые могут взаимодействовать друг с другом и с падающим электрическим полем. Физически теплообмен между частицами можно объяснить с помощью тепловых флуктуационных токов  $\mathbf{J}^{(n)}$  (источников электрического поля), случайно возникающих внутри частиц, которые связаны с локальной температурой источников  $T$  через флуктуационно-диссипационную теорему

$$\langle \mathbf{J}^{(n)}(\mathbf{r}, \omega) \otimes \mathbf{J}^{(n)*}(\mathbf{r}', \omega') \rangle = \frac{4\omega\epsilon_0 \operatorname{Im}\epsilon(\mathbf{r}, \omega)}{\pi} \theta(\omega, T) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \delta(\omega - \omega') \bar{\mathbf{I}}, \quad (1)$$

где знак  $\otimes$  — означает тензорное произведение,  $\langle \rangle$  — усреднение по ансамблю;  $\operatorname{Im}\epsilon(\mathbf{r})$  — мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости;  $\theta(\omega, T) = \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega/(k_B T)} - 1}$  — средняя энергия электромагнитного состояния (распределение Бозе — Эйнштейна);  $\hbar$  — приведенная постоянная Планка;  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Основной характеристикой БРТП между частицей «А» и «В» является величина спектральной проводимости  $G_{A,B}$ , которая выражается через двойной интеграл (по объемам обеих частиц  $V_A$  и  $V_B$ ) от квадрата нормы Фробениуса тензора Грина  $\bar{\mathbf{G}}^s$

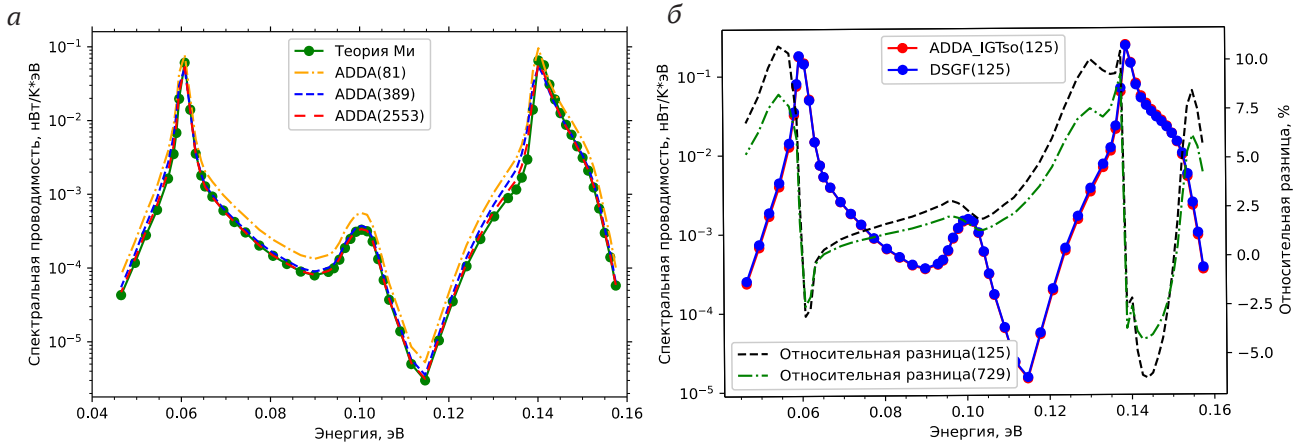
$$G_{A,B}(\omega, T) \stackrel{def}{=} \frac{\partial \theta(\omega, T)}{\partial T} \mathcal{F}_{A \rightarrow B}, \quad (2)$$

$$\mathcal{F}_{A \rightarrow B} = \frac{2}{\pi} k_0^4 \iint_{V_A, V_B} d^3 \mathbf{r} d^3 \mathbf{r}' \text{Im} \varepsilon(\mathbf{r}) \text{Im} \varepsilon(\mathbf{r}') \text{Tr} \left[ \bar{\mathbf{G}}^{s,H}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \bar{\mathbf{G}}^s(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \right],$$

где  $H$  — означает Эрмитово сопряжение,  $k_0 \stackrel{def}{=} \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$  — волновое число в вакууме.

Для вычисления этого интеграла методом трапеций был реализован скрипт на языке Python, который многократно запускает ADDA с источником внутри частицы. Общее число запусков ADDA для фиксированной частоты источника составляет  $3N_g^3$ , где  $N_g$  — число диполей, приходящихся на одно измерение (декартову координату).

Помимо обзора существующих методов моделирования БРТП в ходе работы было предложено два новых метода, которые ранее не применялись к БРТП. Один из них (ADDA IGT<sub>SO</sub>) показал самую быструю сходимость к точному решению (см. рисунок *a*), которое было получено с помощью теории Ми [6]. Также ADDA IGT<sub>SO</sub> хорошо согласуется с подходом DSGF [3] — относительная разница не более 10 % и уменьшается при увеличении числа диполей (см. рисунок *б*).



Сравнение моделирования БРТП для двух шаров с помощью метода ADDA IGT<sub>SO</sub> с точным решением (а) и с методом DSGF (б) для двух кубов; в скобках указано число диполей, приходящихся на одну частицу

Таким образом, был реализован надежный способ моделирования БРТП с использованием открытого ПО ADDA, который можно применять к частицам произвольной формы и размера. Все полученные результаты моделирования согласуются с литературой. В будущем этот код [7] будет перенесен в основную ветку ADDA и доступен любому желающему.

## Список литературы

1. Bimonte G., Emig T., Kardar M., Krüger M. Non-Equilibrium Fluctuational Quantum Electrodynamics: Heat Radiation, Heat Transfer, and Force // Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 2017. Vol. 8. P. 119.
2. Joulain K., Drevillon J., Ben-Abdallah P. Noncontact Heat Transfer between Two Metamaterials // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 81. P. 165119.
3. Walter L. P., Tervo E. J., Francoeur M. Near-Field Radiative Heat Transfer between Irregularly Shaped Dielectric Particles Modeled with the Discrete System Green's Function Method // Phys. Rev. B. 2022. Vol. 106. P. 195417.

4. Edalatpour S., Francoeur M. The Thermal Discrete Dipole Approximation (T-DDA) for near-Field Radiative Heat Transfer Simulations in Three-Dimensional Arbitrary Geometries // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2014. Vol. 133. P. 364.
5. Yurkin M. A., Hoekstra A.G. The Discrete-Dipole-Approximation Code ADDA: Capabilities and Known Limitations // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2011. Vol. 112. P. 2234.
6. Czapla B., Narayanaswamy A. Thermal Radiative Energy Exchange between a Closely-Spaced Linear Chain of Spheres and Its Environment // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2019. Vol. 227. P. 4.
7. Danil169/Applying-ADDA-to-NFRHT: Script to Simulate NFRHT between Two Particles of Arbitrary Shape and Size Using ADDA. URL: <https://github.com/Danil169/Applying-ADDA-to-NFRHT>.