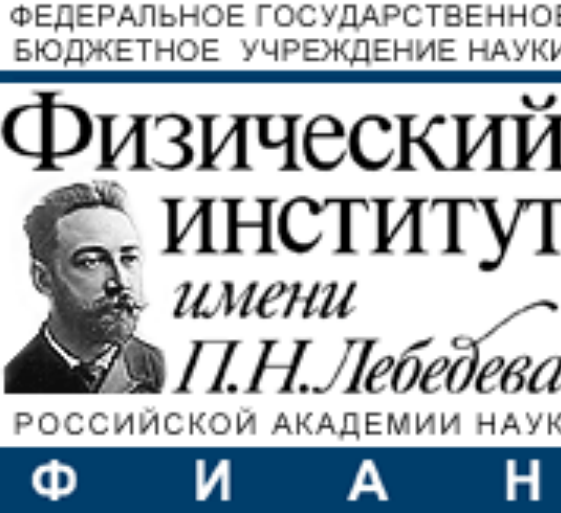


Вычисление ускоряющего потенциала и профиля плотности плазмы в магнитосфере ортогональных пульсаров

А. Ю. Истомин^{1, 2}, Ф. А. Князев^{1, 2}, В. С. Бескин^{2, 1}

¹МФТИ, ²ФИАН

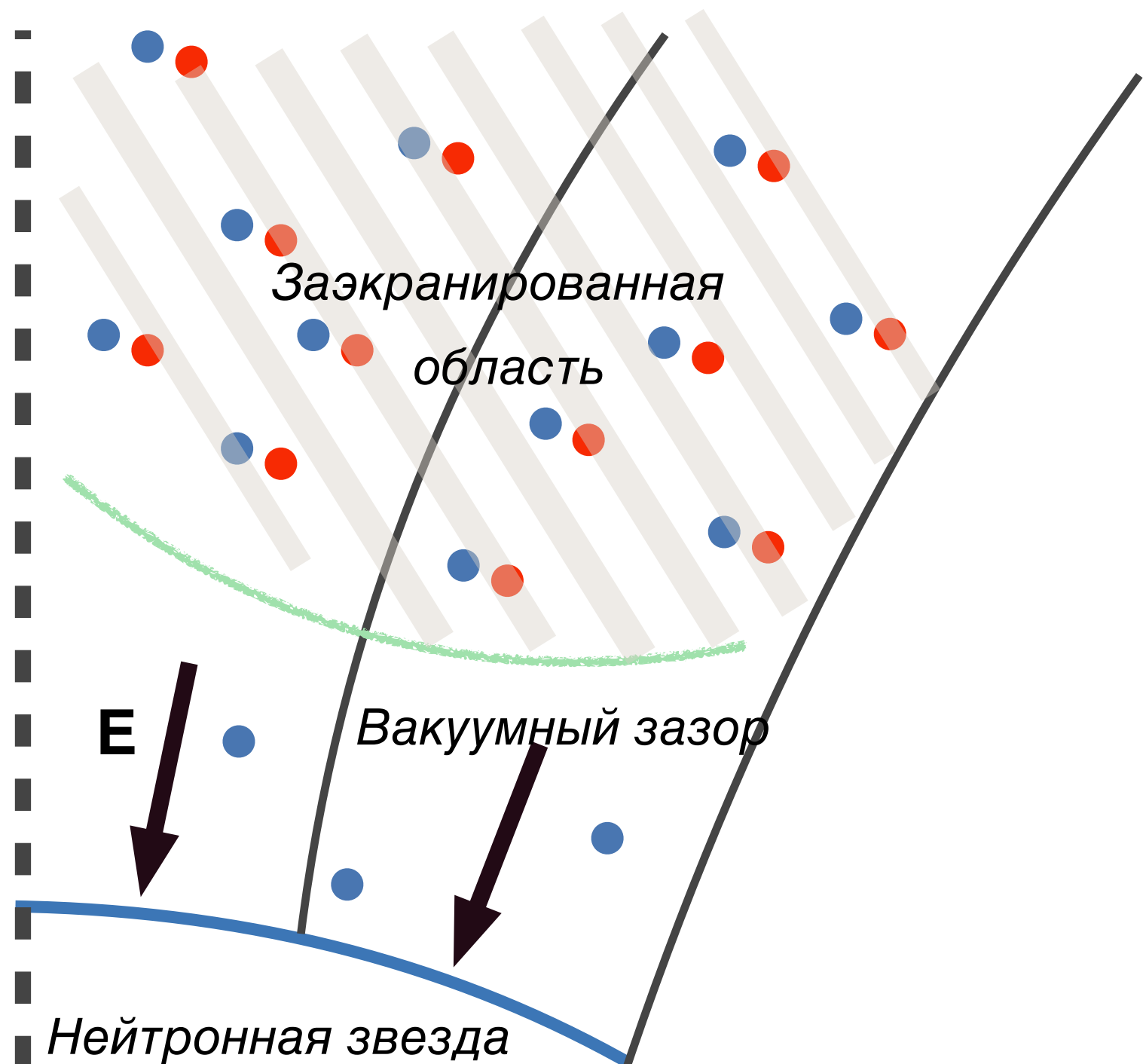


Введение

Корректный анализ средних профилей интенсивности и поляризации радиопульсаров невозможен без учета эффектов распространения излучения в магнитосфере [3, 4], что требует вычисления пространственного распределения вторичной плазмы. Для этого, в свою очередь, необходимо знать ускоряющий потенциал в области над полярной шапкой, и в частности его поперечную структуру. Таким образом одномерные аналитические модели становятся неприменимыми для данной задачи, и появляется необходимость в существенно трехмерном рассмотрении.

Вакуумный зазор

Хотя классическая модель вакуумного зазора [1] и служит хорошей отправной точкой, традиционная постановка задачи содержит существенную неопределенность: длины свободных пробегов фотонов, а следовательно и геометрия вакуумного зазора определяются потенциалом, для вычисления которого, в свою очередь, необходимо знать высоту зазора.



В данной работе предлагается способ корректного решения данной задачи, не предполагающий малость высоты зазора и осесимметричность потенциала. Последнее делает метод применимым для рассмотрения ортогональных пульсаров.

Вычисление ускоряющего потенциала

При заданной геометрии зазора, потенциал определяется из уравнения Пуассона:

$$\frac{1}{r_m} \frac{\partial}{\partial r_m} \left(r_m \frac{\partial \psi}{\partial r_m} \right) + \frac{1}{r_m^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi_m^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -2K_\psi \frac{\Omega B_0 R_0^2}{c} \left(\cos \chi - \frac{3}{2} \frac{r_m}{R} \sin \chi \sin \varphi_m \right).$$

Граничными условиями будут являться следующие выражения:

$$\begin{aligned} \psi(r_m, \varphi_m, z=0) &= 0 \\ \psi(r_m=1, \varphi_m, z) &= 0 \\ \frac{\partial \psi(r_m, \varphi_m, z)}{\partial z} \Big|_{z=H_{RS}[\psi]} &= 0 \end{aligned}$$

Высота зазора

Для определения высоты зазора при фиксированном потенциале производилась минимизация суммы длин пробегов первичного электрона и фотона:

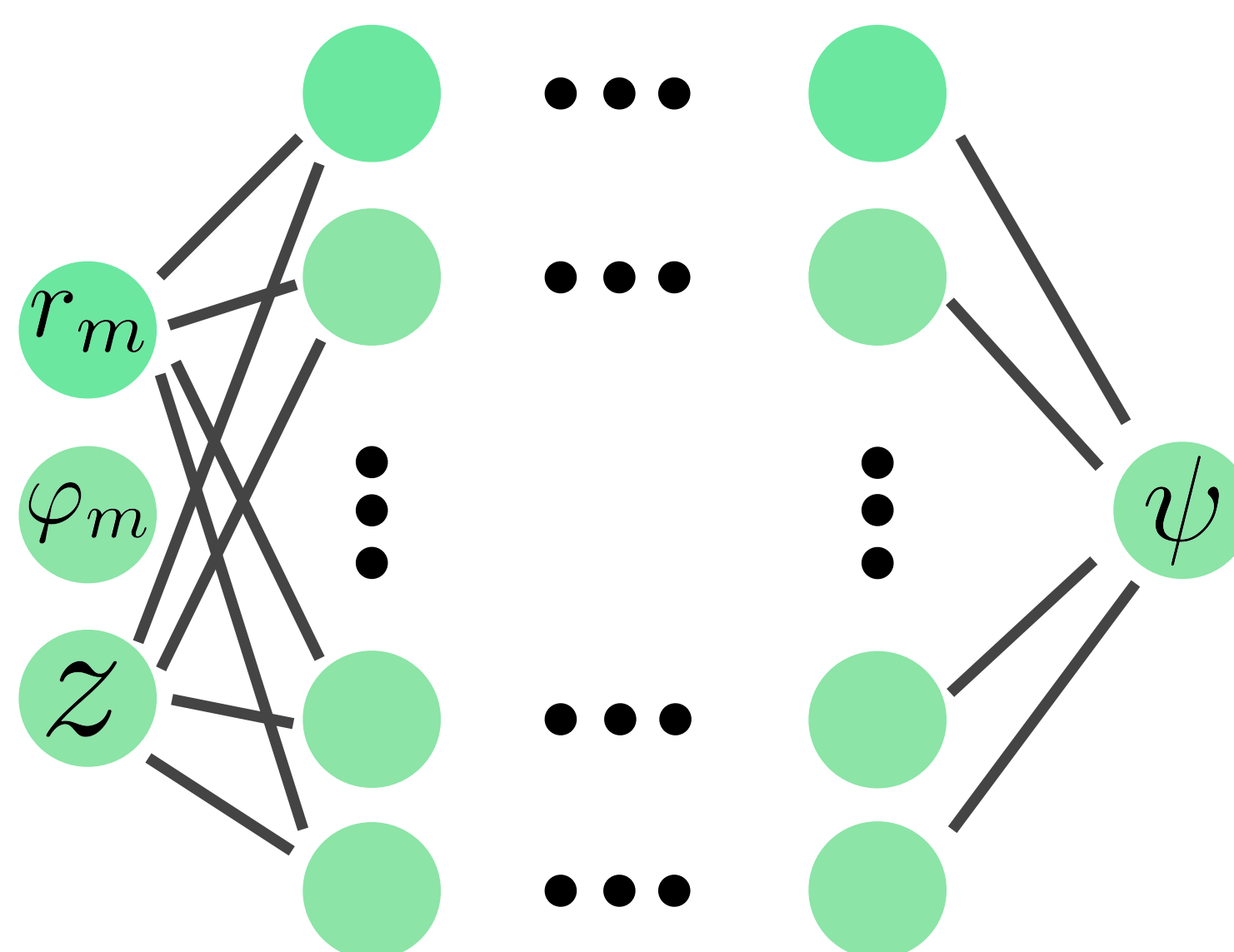
$$H_{RS}(r_m, \phi_m) = \min(l_e + l_\gamma(l_e))$$

Таким образом, для нахождения самосогласованного решения была построена следующая итеративная процедура:

$$\begin{aligned} H_{RS}^{(i)} &\rightarrow \psi^{(i)} \\ H_{RS}^{(i+1)} &= w H_{RS}[\psi^{(i)}] + (1-w) H_{RS}^{(i)} \end{aligned}$$

Physic Informed Neural Networks (PINN)

Численное решение соответствующего уравнения Пуассона осложнено нетривиальной и изменяющейся геометрией трехмерной вычислительной области. В связи с этим, для его решения использовался метод Physics Informed Neural Network (PINN), заключающийся в моделировании искомого решения нейронной сетью.



Преимущества:

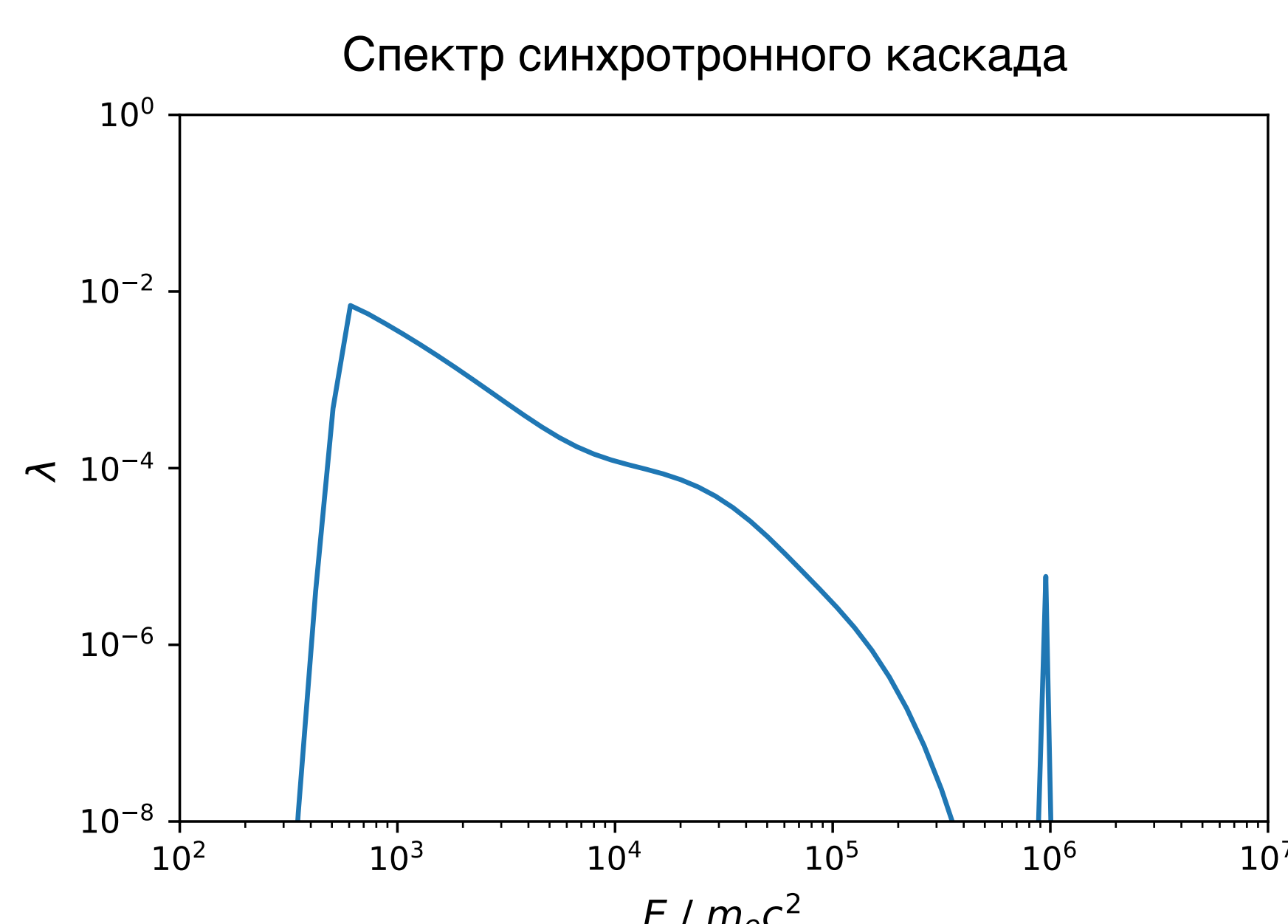
- Гибкость в выборе граничных условий и общих требований к решению
- Отсутствие расчетной сетки

Недостатки:

- Медленная сходимость
- Ограниченная точность

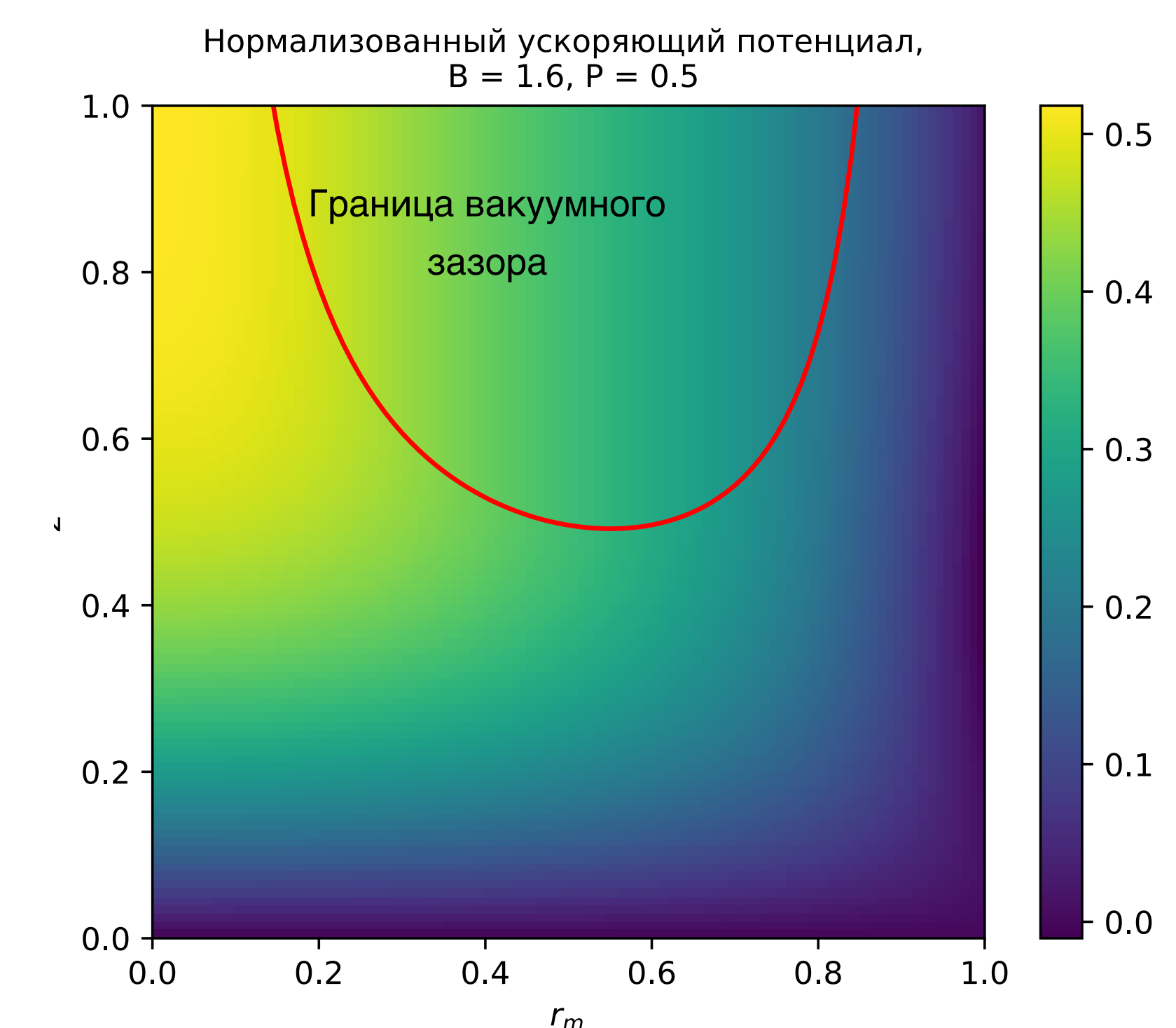
Вычисление множественности плазмы

Для вычисления профилей плотности рассматривались изгибное излучение первичных частиц приводящее к запуску синхротронного каскада рождения вторичных пар. Для его анализа использовался подход, аналогичный работе [2], в котором, однако, учитывалась зависимость всех параметров от положения на полярной шапке.

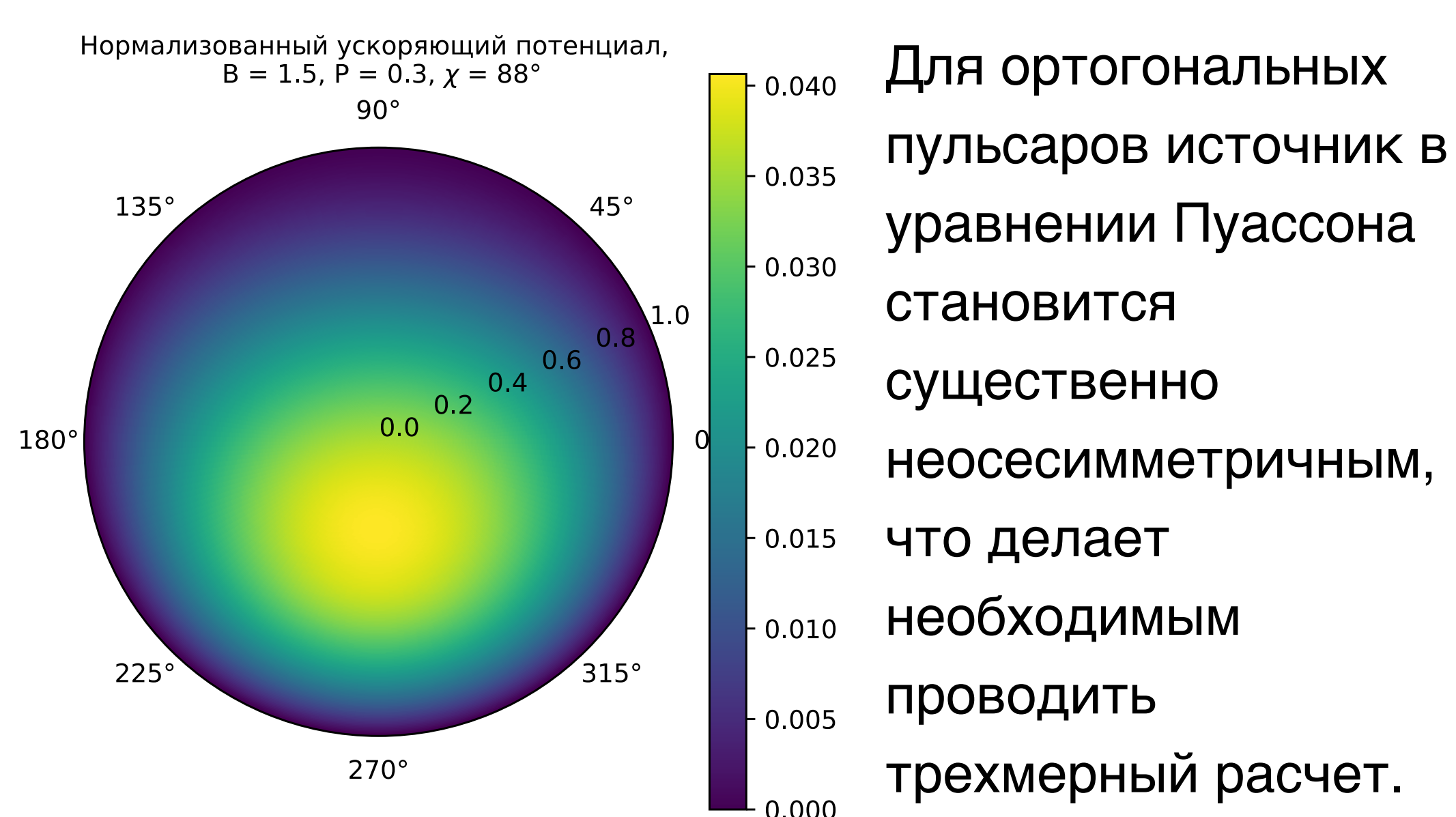


Результаты 2D

При углах наклона магнитной оси к оси вращения $\approx 85^\circ$ ускоряющий потенциал является эффективно осесимметричным. В данном случае задача становится двумерной, что значительно упрощает как её решение, так и анализ результатов.

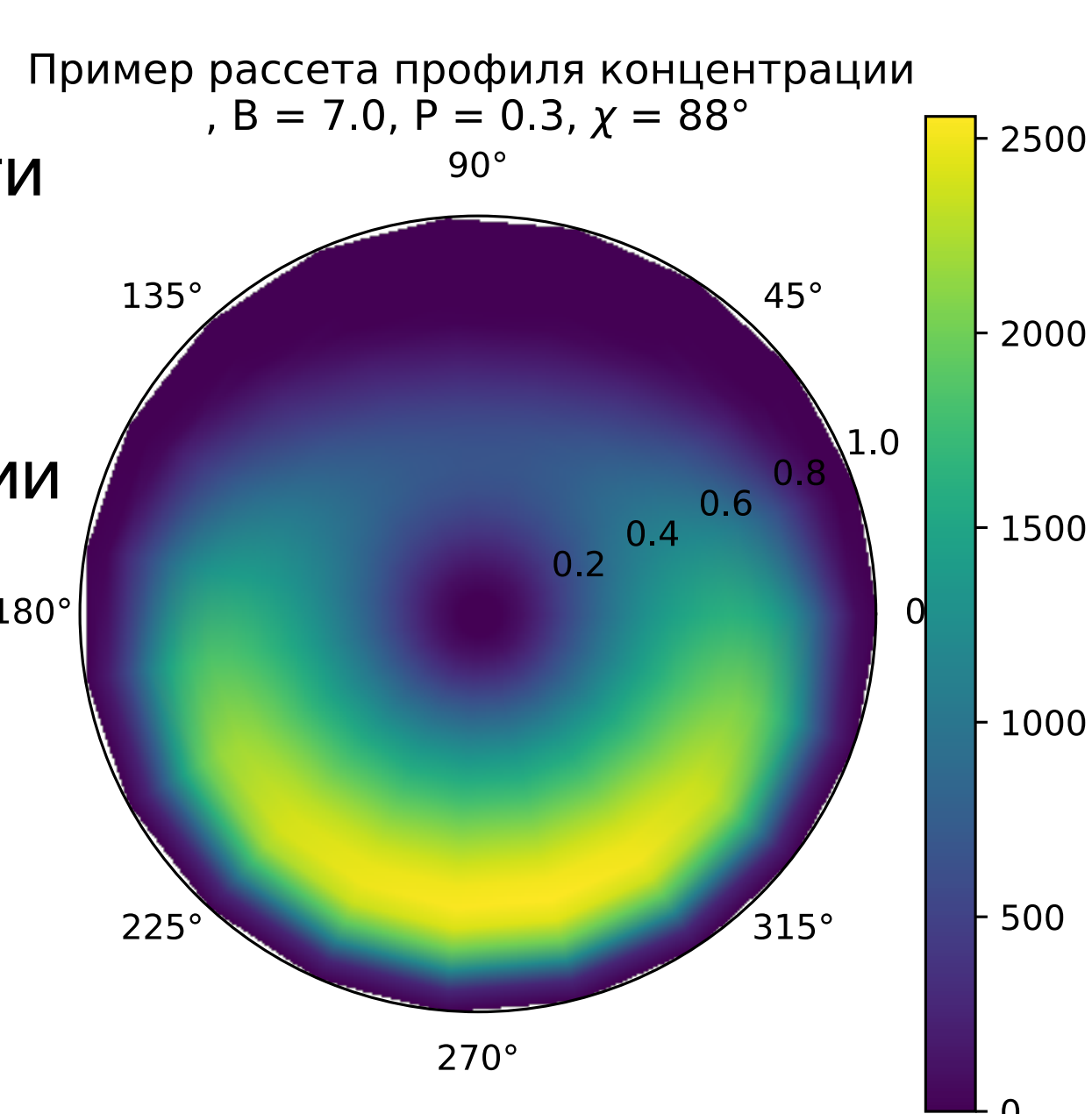


Результаты 3D



Для ортогональных пульсаров источник в уравнении Пуассона становится существенно неосесимметричным, что делает необходимым проводить трехмерный расчет.

Также стоит отметить, что вследствие малости гольдрайховской плотности для эффективной генерации частиц требуются магнитные поля, величина которых заметно превышает стандартные оценки.



Список литературы

- M. A. Ruderman, P. G. Sutherland, *ApJ*, 196, 51 (1975)
- J. A. Hibschan, J. Arons, *ApJ*, 560, 871 (2001)
- V. S. Beskin, A. A. Philippov, *MNRAS*, 425, 814 (2012)
- V. S. Beskin, A. Yu. Istomin, A. G. Mikhaylenko, *MNRAS*, 526,

Благодарности

Работа была выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект №24-22-00120.

А.Ю.Истомин, Ф.А.Князев,
В.С.Бескин, *Астроном. Журн.*

