

Контрастные структуры для магнитных полей в периферийных областях галактики

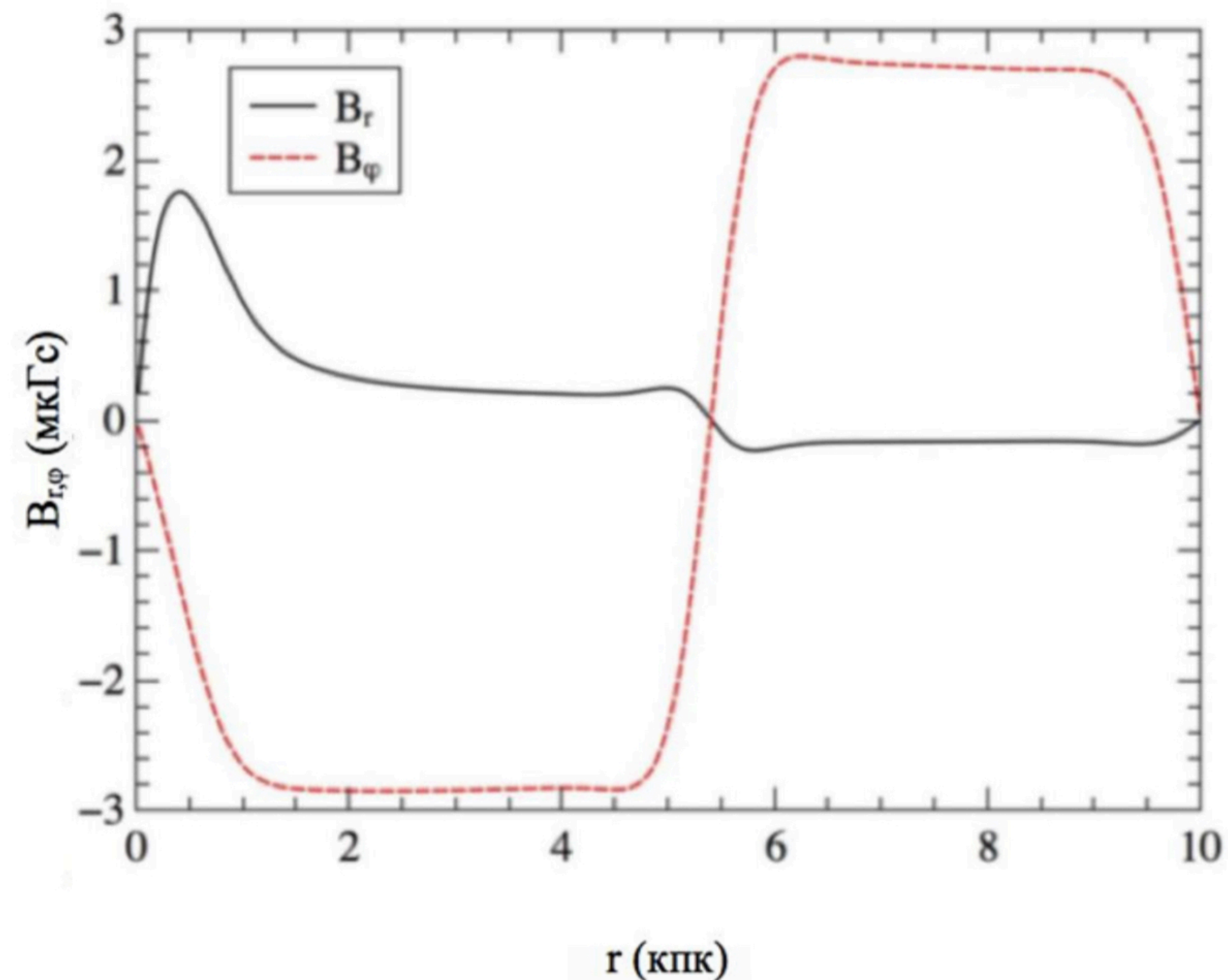
Хасаева Т. Т., Михайлов Е. А.

Динамо среднего поля

- В Млечном Пути и ряде других галактик присутствует магнитное поле порядка 1 мкГс (А. А. Рузмайкин, Д. Д. Соколов, А.М. Шукуров, 1988)
- Его рост и эволюция описываются в рамках модели динамо среднего поля
- Механизм динамо базируется на двух явлениях: альфа-эффект и дифференциальное вращение галактики
- Рост поля ограничен турбулентной диффузией, действующей им в противовес альфа-эффекту и дифференциальному вращению

Инверсии магнитных полей

- В Млечном Пути также присутствует резкая смена направления силовых линий магнитного поля по мере удаления от центра галактики
- Такое явление носит название инверсий магнитного поля
- Данный феномен хорошо описывается в рамках модели динамо с контрастными структурами (Нефедов Н. Н., Божевольнов Ю. В., Пыркин В. А., 2011)



(Mikhailov, E., Khasaeva, T., 2019)

Постановка задачи

- Особый интерес вызывает вопрос о возможности формирования инверсий в периферийных областях галактики
- Условия для возникновения инверсий в галактических дисках на данный момент также не установлены
- Ранее вопрос наличия магнитного поля в периферийных областях был исследован в работе (Mikhailov, E., Kasparova, A., Moss, D. et al., 2014)

Основные уравнения

- Галактический диск в рамках данной задачи будем считать ПЛОСКИМ
- Данное упрощение носит название планарного приближения
- Основные уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial B_r}{\partial t} = -\frac{\alpha(r, B)}{h} B_\phi - \eta \frac{\pi^2}{4h^2} B_r + \Omega \frac{\partial B_r}{\partial \phi} + \eta \Delta_{r\phi} B_r ,$$

$$\frac{\partial B_\phi}{\partial t} = -r \frac{d\Omega}{dr} B_r - \eta \frac{\pi^2}{4h^2} B_\phi + \Omega \frac{\partial B_\phi}{\partial \phi} + \eta \Delta_{r\phi} B_\phi ,$$

Особенности симметрии

- Ранее было установлено, что характерное время возникновения осесимметричной контрастной структуры много меньше характерного времени ее перемещения (Михайлов Е.А., Хасаева Т.Т., Тепляков И.О., 2021)

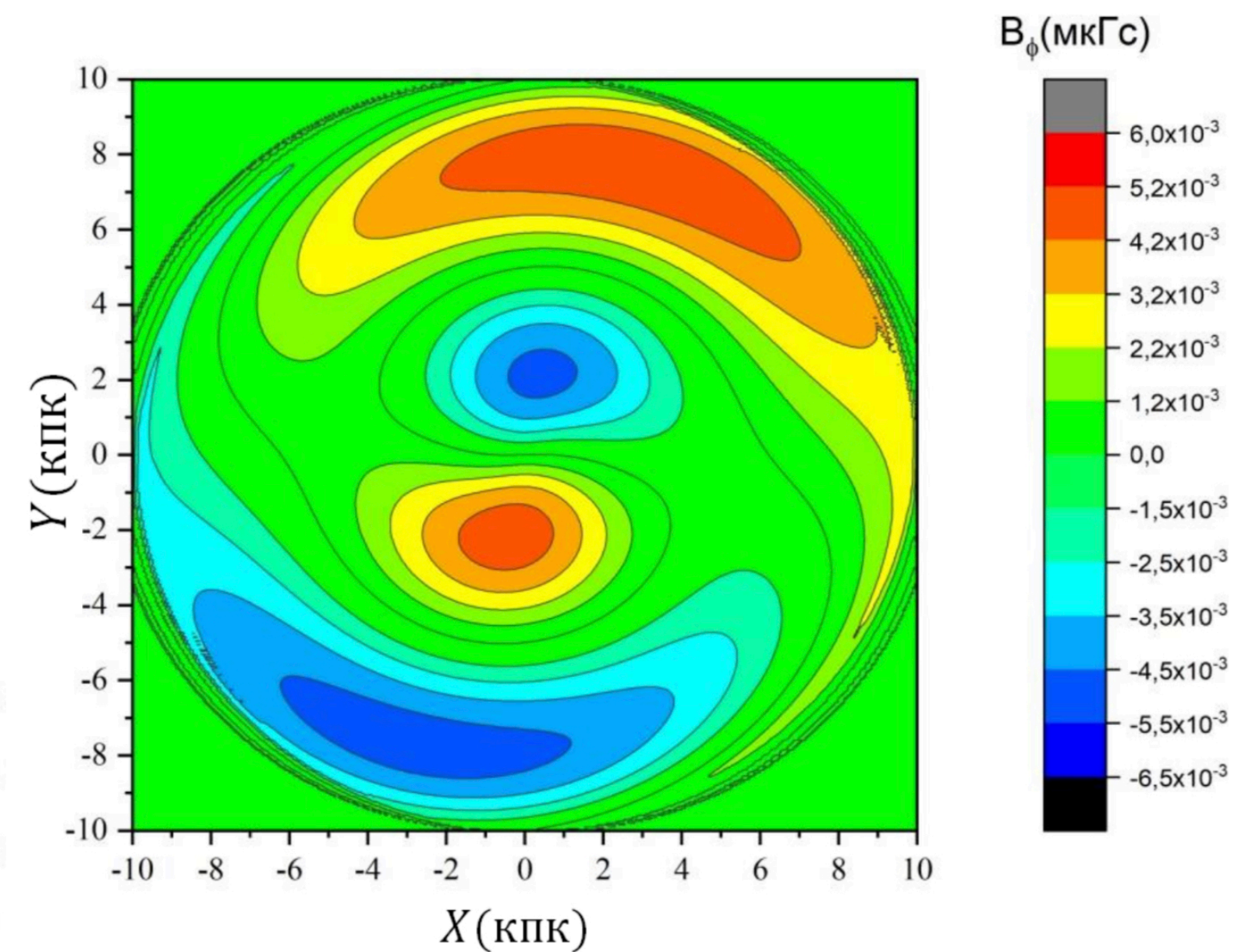
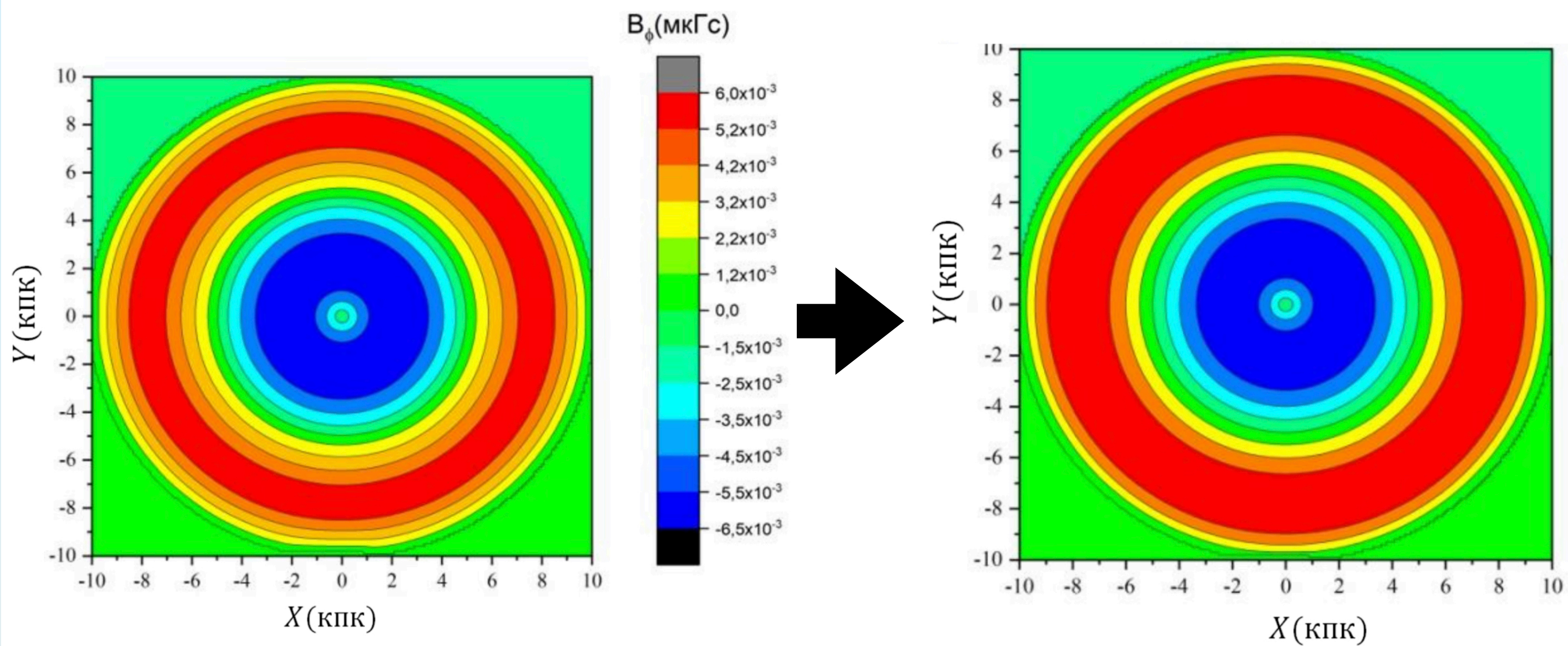
$$\frac{1}{\gamma} \ll \frac{r^*}{\frac{dr^*}{dt}}$$

- В не осесимметричном случае, эти величины имеют один порядок:

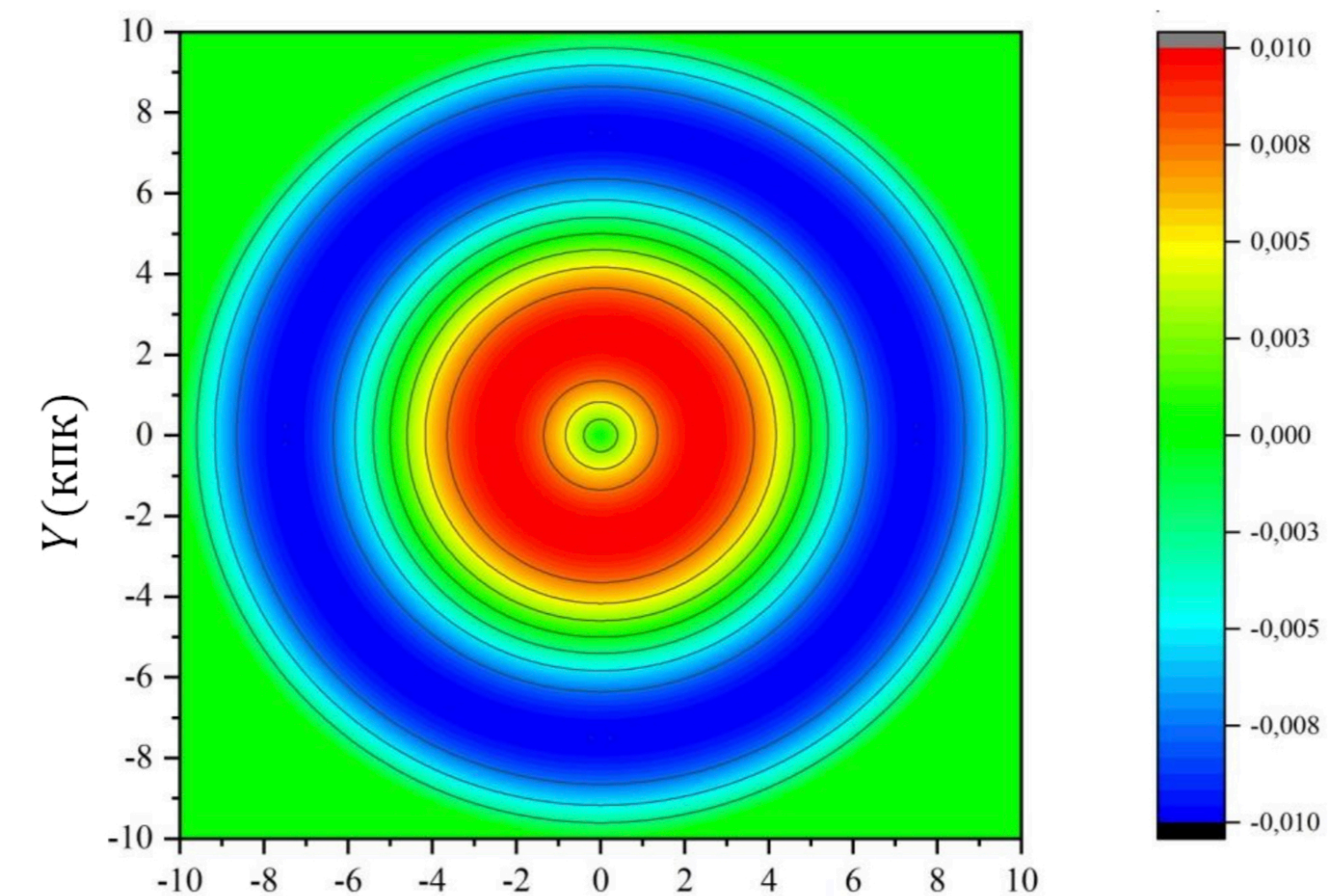
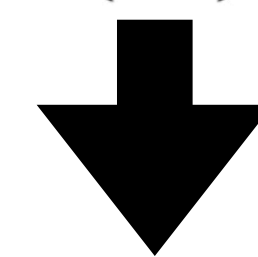
$$\frac{1}{\gamma} \sim \frac{1}{\Omega}$$

- Таким образом, в результате эволюции магнитное поле сформируется в некоторую осесимметричную структуру

Особенности симметрии



X (кпк)



X (кпк)

(Михайлов Е.А., Хасаева Т.Т., Тепляков И.О., 2021)

Магнитное поле во внешних областях

- Изначально формирование магнитного поля вдоль оси z происходит благодаря такому явлению, как Батарея Бирмана
- В дальнейшем в пределах мелких доменов турбулентные потоки «разворачивают» векторы магнитной индукции в случайных направлениях
- Таким образом, величина и направление такого поля будут случайными
- В дальнейшем из такого случайного мелкомасштабного поля будет генерироваться крупномасштабное

Декартовы координаты

- Запишем систему уравнений в декартовых координатах

$$\frac{\partial B_x}{\partial t} = \frac{\alpha_0}{h \cdot \sqrt{1 + \frac{x^2 + y^2}{r_0^2}}} (yB_x - xB_y) \left(1 - \frac{B^2}{B_0^2}\right) - \frac{\partial \Omega}{\partial y} yB_y - \Omega B_y - \Omega y \frac{\partial B_y}{\partial y} - \frac{\partial \Omega}{\partial y} xB_x -$$
$$-\Omega x \frac{\partial B_x}{\partial y} - B_x(x, y, 0) \frac{\pi^2 \eta}{4h^2} + \eta \Delta_{xy} B_x ,$$

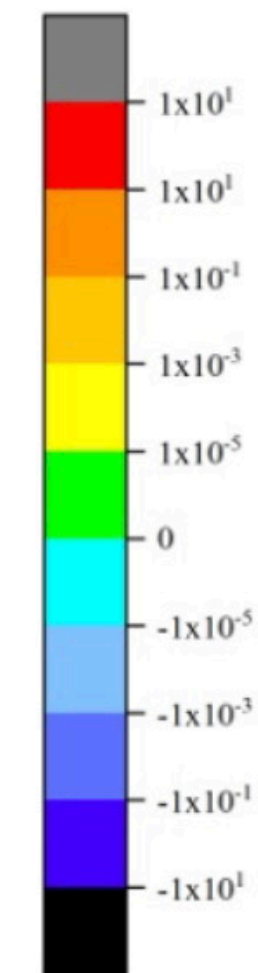
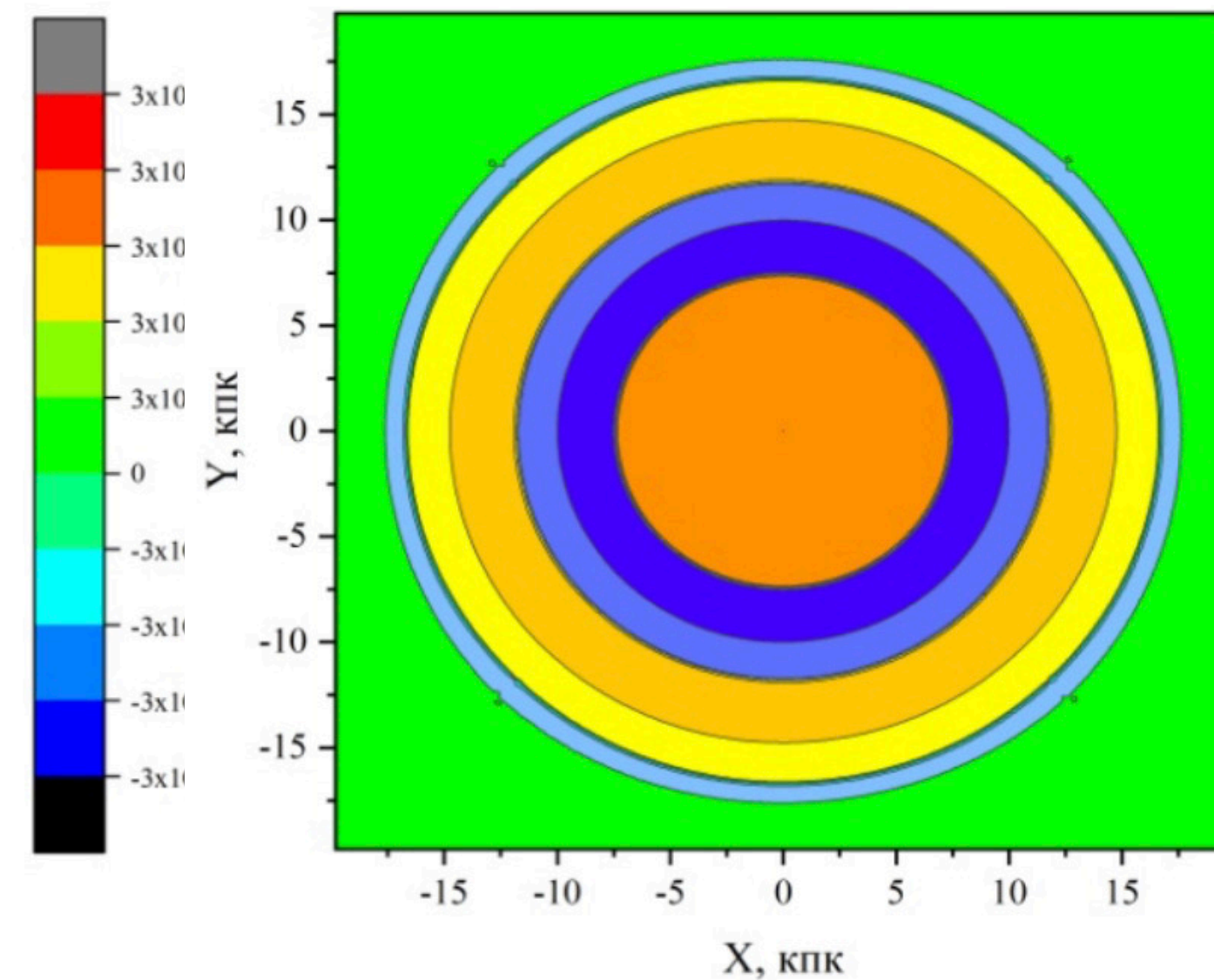
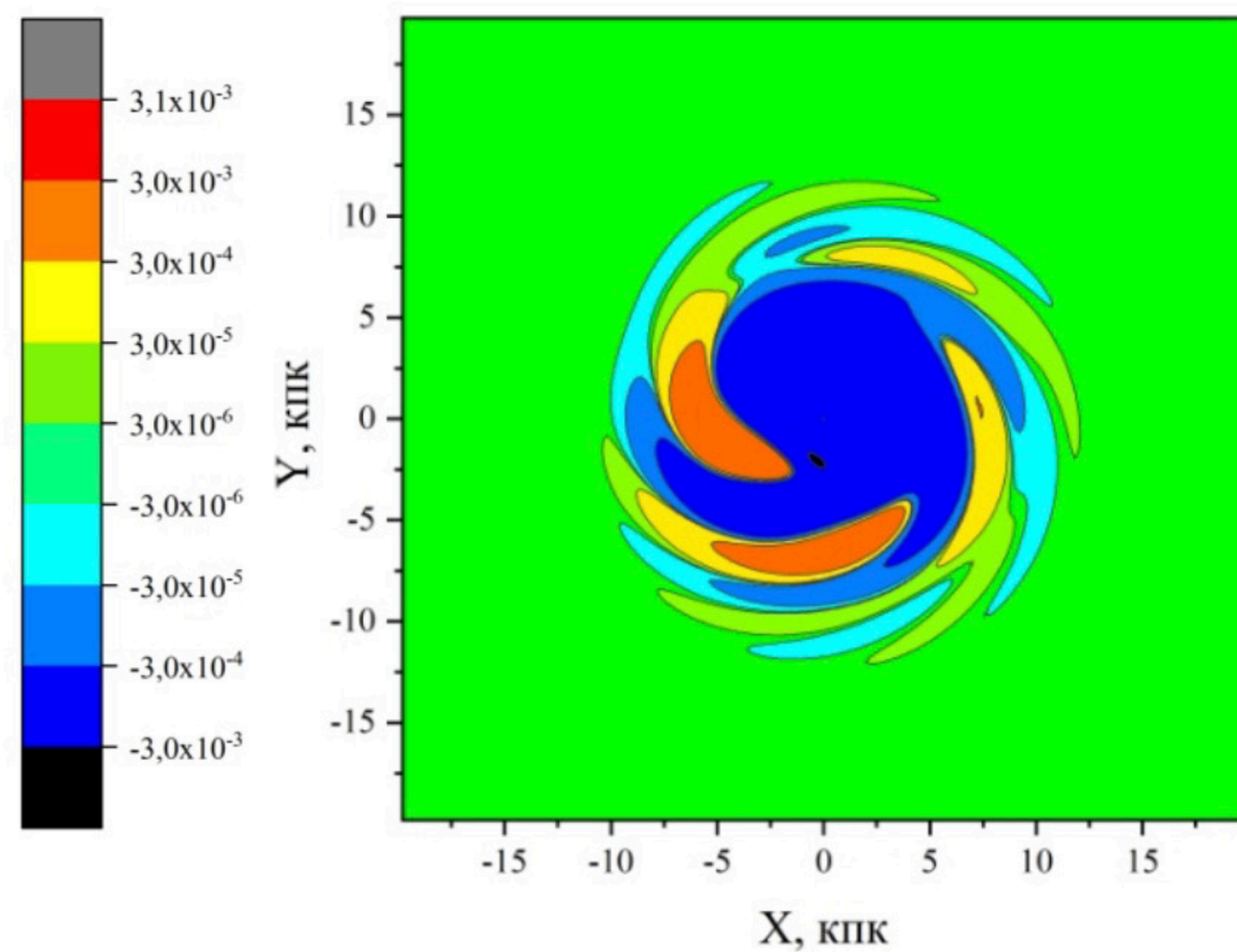
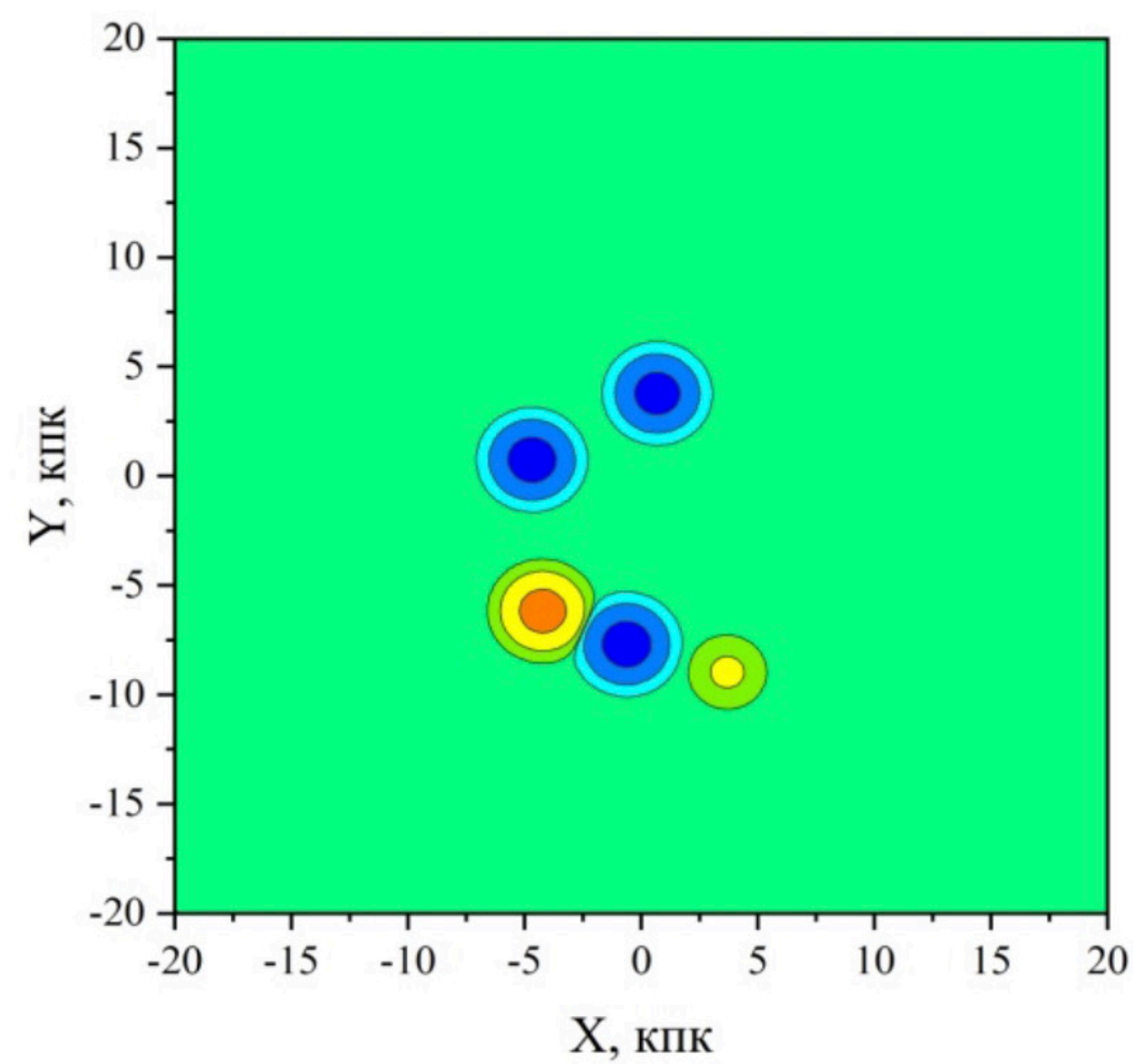
$$\frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\alpha_0}{h \cdot \sqrt{1 + \frac{x^2 + y^2}{r_0^2}}} (yB_x - xB_y) \left(1 - \frac{B^2}{B_0^2}\right) + \frac{\partial \Omega}{\partial x} yB_y + \Omega y \frac{\partial B_y}{\partial x} + \frac{\partial \Omega}{\partial x} xB_x + \Omega B_x +$$
$$\Omega x \frac{\partial B_x}{\partial x} - B_y(x, y, 0) \frac{\pi^2 \eta}{4h^2} + \eta \Delta_{xy} B_y ,$$

Параллельные вычисления

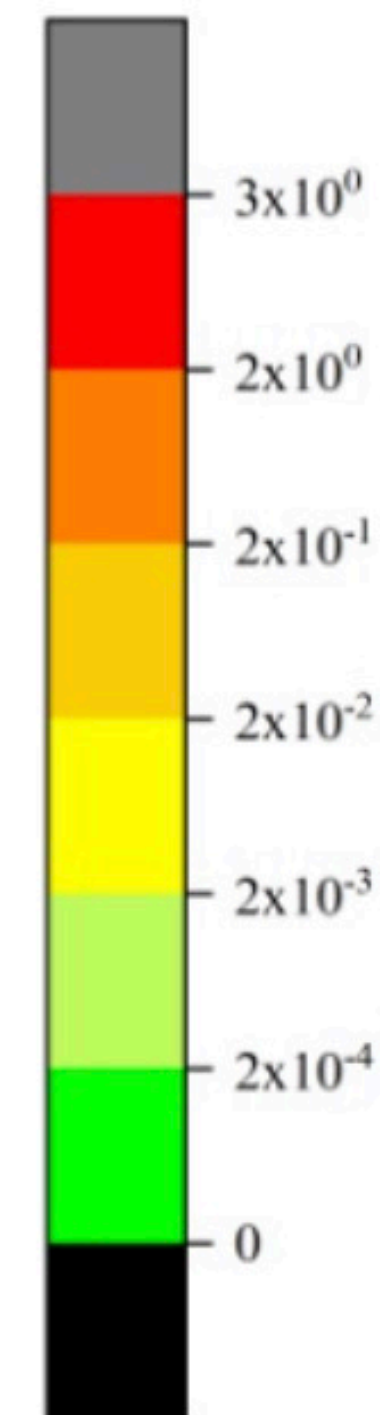
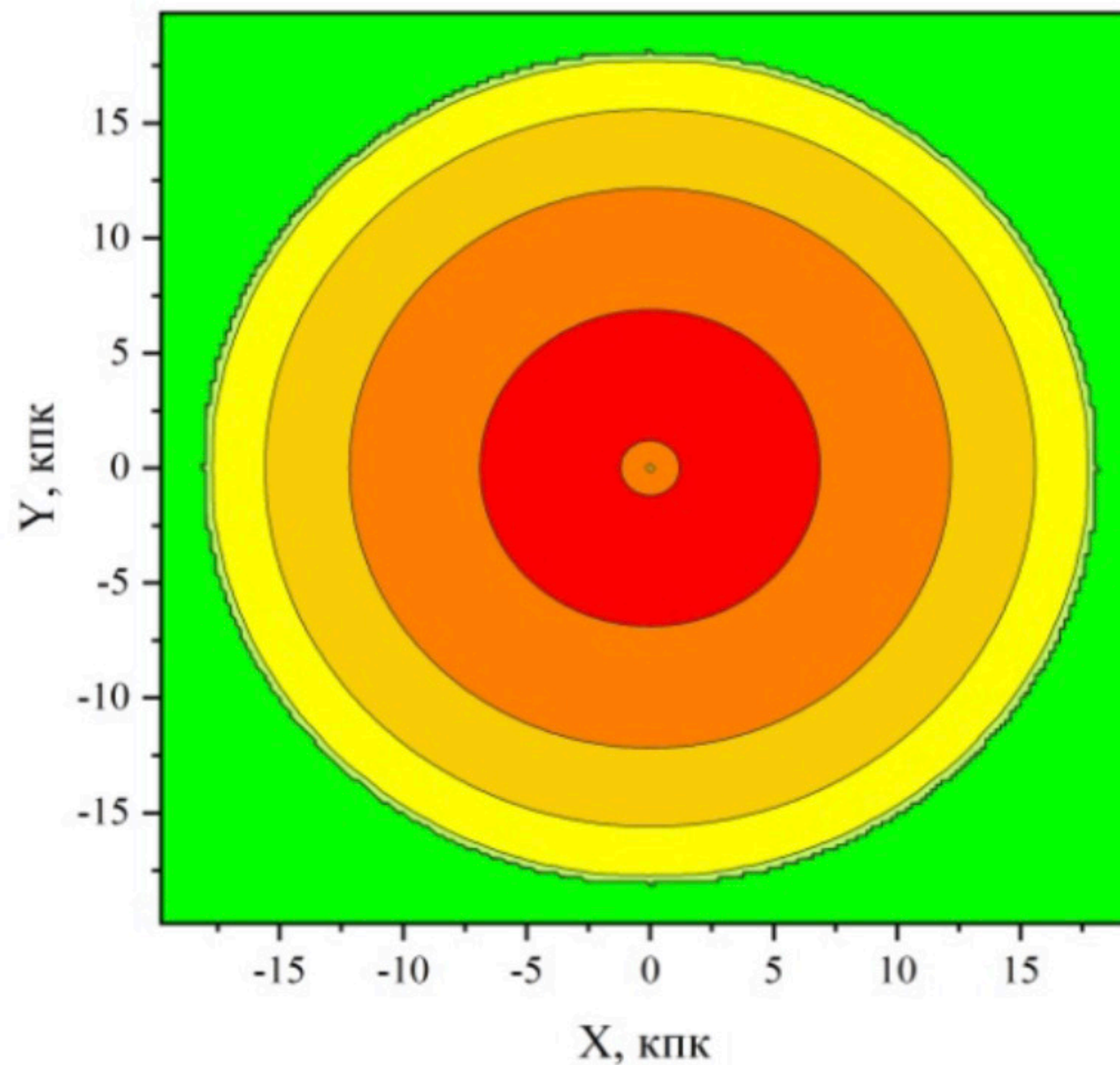
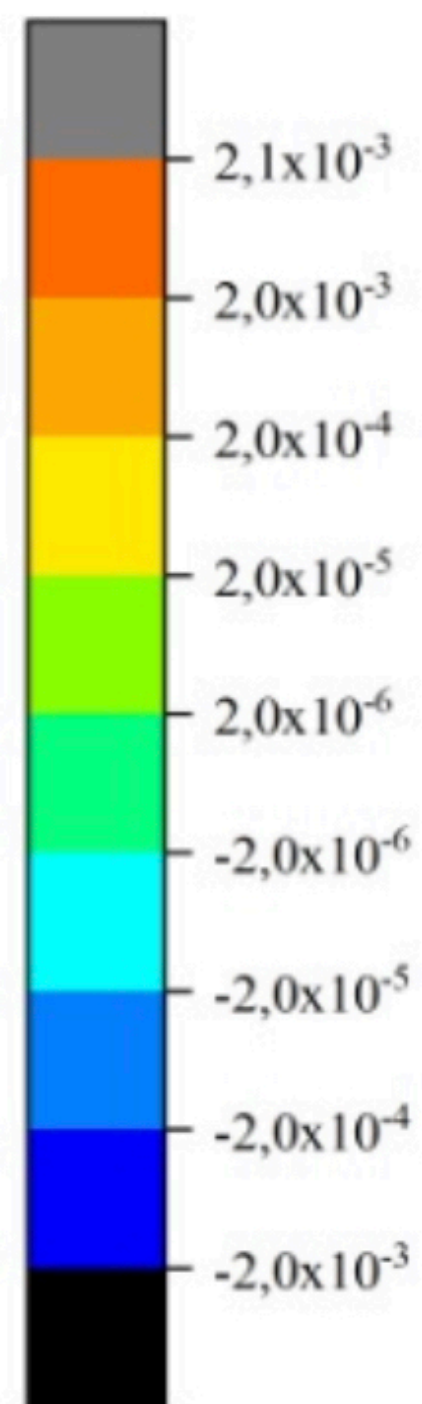
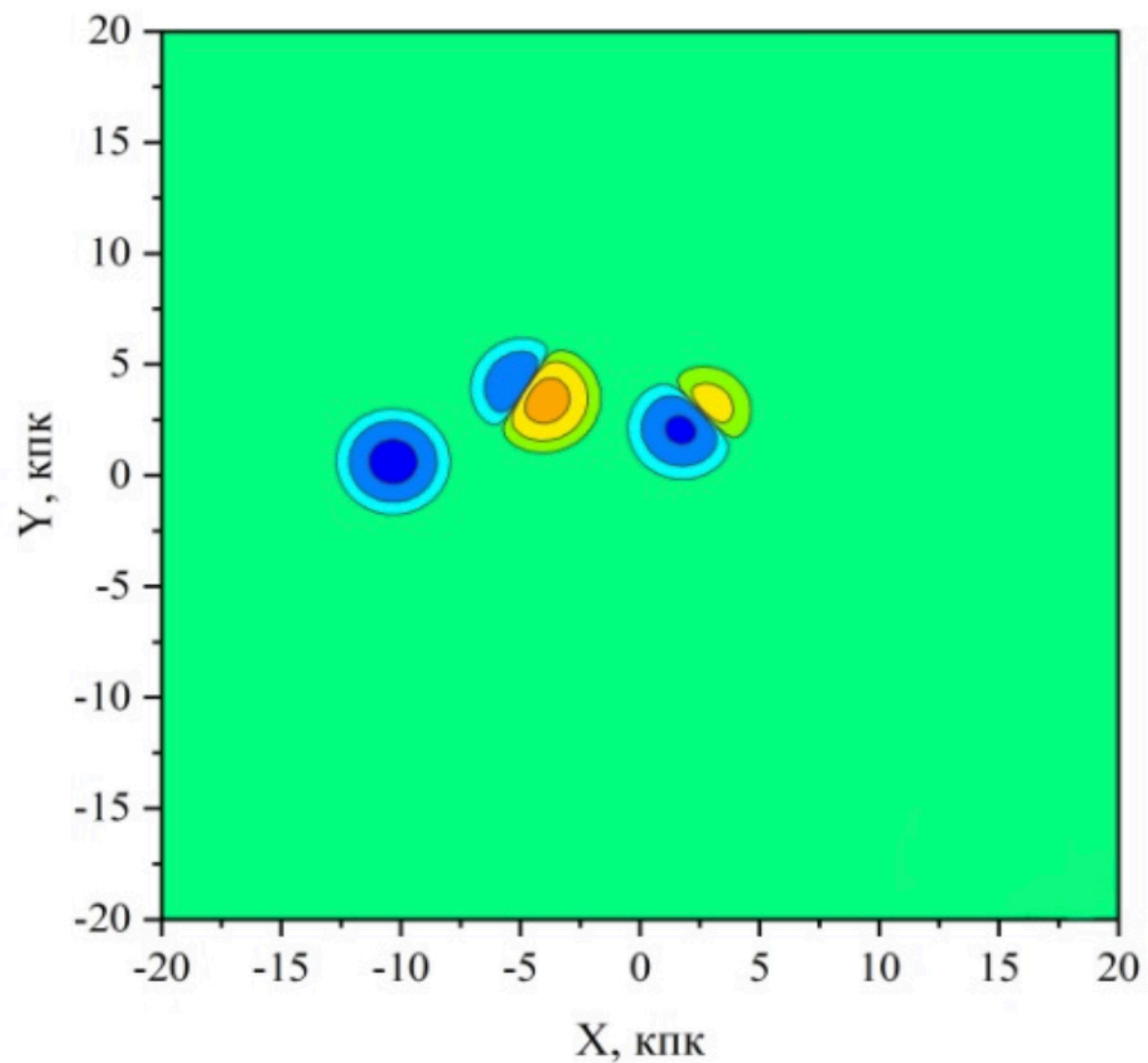
- В случае рассмотрения начальных условий, близких к естественным, возникает необходимость перебора целого ряда решений для получения инверсий
- Также при расширении расчетной области, возникает необходимость увеличения количества узлов сетки
- Проблему можно решить при помощи использования параллельных вычислений на видеокартах (Михайлов Е.А., Хасаева Т.Т., Тепляков И.О., 2021)
- Задача была решена с использованием нескольких различных видеокарт для сравнения их производительности

Тип процессора	CPU Intel	GPU GTX	GPU Titan
	i7-	660	Black
Время расчета (сетка 200x200), с	8362	293	104
Время расчета (сетка 400x400), с	31981	899	178

Основные результаты



Основные результаты



Выводы

- Согласно полученным результатам, было установлено, что инверсии могут сформироваться в периферийных областях галактики
- Также было показано, что существует ряд начальных условий, при которых инверсии не формируются, причём таких большинство
- Параллельные вычисления на видеокартах дают нам существенное преимущество во времени счета
- В дальнейшем вопрос о генерации магнитного поля в периферийных областях планируется также изучить с позиции магнеторотационной неустойчивости

Список литературы

- Mikhailov, E., Khasaeva, T. Evolution of the magnetic field reversals in galaxies // Bulgarian Astronomical Journal. 2019. Vol.31. P. 39 – 50.
- Михайлов Е.А., Хасаева Т.Т., Тепляков И.О. «Возникновение контрастных структур для галактического магнитного поля: теоретические оценки и моделирование на видеокартах». Труды Института системного программирования РАН. 2021;33(6):253-264.
- Mikhailov, E., Kasparova, A., Moss, D. et al. Magnetic fields near the peripheries of galactic discs // Astronomy and Astrophysics. 2014. Vol.568: A66.
- Нефедов Н. Н., Божевольнов Ю. В., Пыркин В. А., «Асимптотика движения контрастной структуры типа всплеска в уравнении реакция-диффузия» // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2011. №5.
- А. А Рузмайкин, Д. Д. Соколов, А.М. Шукуров, Магнитные поля галактик (М.: Наука, 1988).