

# Магнитные поля галактик

Е.А.Михайлов

# Галактика – наш большой ДОМ



# Какие магнитные поля существуют в природе?

- Магнитное поле Земли у ее поверхности – порядка 1 Гс (1 Гс= $10^{-4}$  Тл)
- В электротехнике используют магнитные поля порядка 1 кГс.
- Магнитное поле галактики – порядка 1 мкГс ( $10^{-6}$  Гс).

# Как люди узнают о магнитных полях галактик?

- Частицы, из которых состоят космические лучи, должны были бы пролетать через галактику за короткое время.
- Однако, за счет магнитного поля их траектории искривляются и они достаточно долго живут в пределах нашей галактики.
- Для измерения космических магнитных полей существует несколько методов.

# Эффект Зеемана

- Электроны под действием магнитного поля меняют частоту своего вращения.
- В классическом случае круговая частота вращения электрона изменяется на ларморовскую частоту:

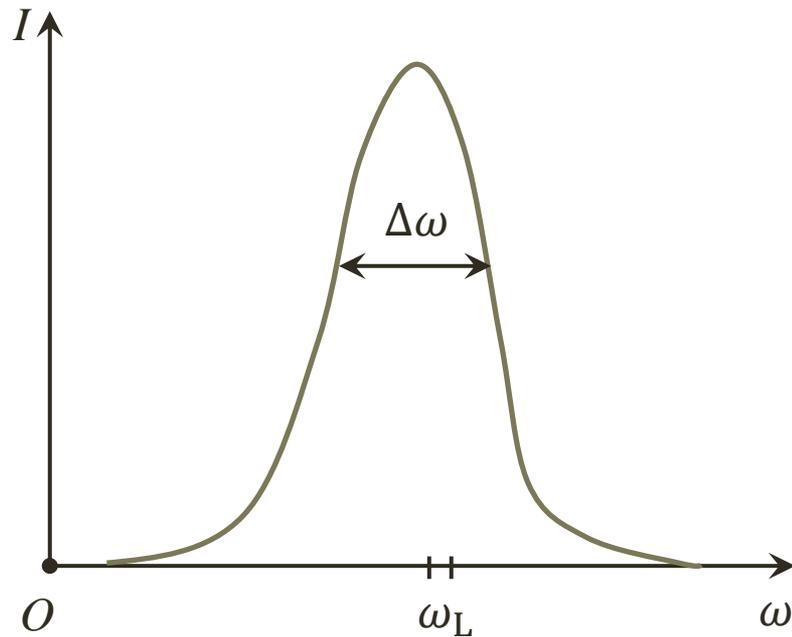
$$\omega_L = \frac{eB}{2m_e c}$$

- Таким образом, электрон будет вращаться с круговой частотой:

$$\omega = \omega_0 \pm \omega_L$$

- Он будет излучать на данных частотах. Казалось бы, измерив спектр приходящего излучения, можно было вычислить магнитное поле...

# Уширение линий



- Оценим  $\omega_L$ . Подставим в нашу формулу значение магнитного поля  $B \sim 10^{-6}$  Гс, заряд и массу электрона и скорость света. В таком случае:  
$$\omega_L \sim 10^2 \text{ с}^{-1}.$$
- Доплеровская ширина линий:  
$$\Delta\omega \sim 10^5 \text{ с}^{-1}.$$
- Эффект Зеемана оказывается неприменим для подавляющего большинства галактик!

# Синхротронное излучение

- Электроны, движущиеся со скоростью, близкой к световой, излучают энергию на более высоких частотах (превышающих  $\omega_L$  на несколько порядков).
- Частота излучения пропорциональна величине поля и энергии электрона:

$$\omega_c \sim BE^2.$$

- Открытие такого излучения из «недр» нашей Галактики стало одним из важнейших доказательств существования ее магнитного поля.

# Фарадеевское вращение-1

- В том случае, если через галактику распространяется поляризованная электромагнитная волна (т.е. такая, у которой вектор  $\mathbf{E}$  совершает колебания в одной плоскости, то электроны начинают колебаться в данной плоскости.
- Со стороны магнитного поля на них действует сила Лоренца:

$$\mathbf{F} = -\frac{e}{c}[\mathbf{v}, \mathbf{B}].$$

- Таким образом, электроны начинают двигаться уже в другом направлении, и плоскость поляризации поворачивается.

# Фарадеевское вращение-2

- Угол поворота плоскости поляризации тем больше, чем больше магнитное поле.
- Кроме того, он зависит от длины волны – поляризация длинных волн меняется быстрее.
- Также угол поворота растет с увеличением плотности среды.
- Таким образом, для поворота плоскости поляризации имеем формулу:

$$\Delta\varphi = 0.81\lambda^2 \int_0^A nB dx$$

# Как можно измерить фарадеевское вращение?



- Существенно фарадеевское вращение лишь для радиоволн – у них самая большая длина.
- Для их измерения создаются радиотелескопы.
- Современный радиотелескоп – это система из большого количества станций, расположенных в тысячах километров друг от друга.

# Разные длины волн

- Получить  $\Delta\varphi$  для одной длины волны нельзя – ведь неизвестно, в каком направлении поляризовано излучение источника.
- Выход – рассмотреть две разных длины волны (а при возможности – и большее число):

$$\Delta\varphi_1 = 0.81\lambda_1^2 \int \dots$$

$$\Delta\varphi_2 = 0.81\lambda_2^2 \int \dots$$

- Сравнив их, можно определить изначальную поляризацию и восстановить значение интеграла.

# Восстановление структуры поля

- Если нам известно значение интеграла:

$$\int n(x)B(x)dx,$$

то для восстановления  $B(x)$  нужно знать концентрацию электронов  $n$ , а также иметь представления о поле.

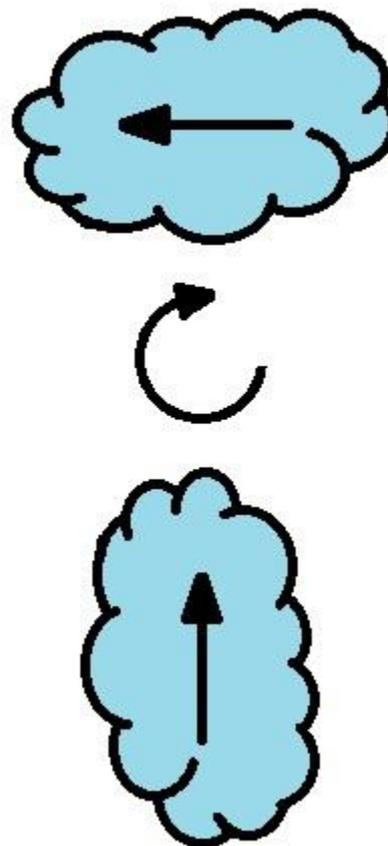
Например, подбирать  $B(x)$  в виде:

$$B(x) = cf(x).$$

- Откуда можно взять «разумную» функцию  $f(x)$ ?
- Для этого нужно иметь теоретические представления о магнитном поле галактики!

# Вмороженность магнитного поля в среду

- Проводимость межзвездной среды очень велика.
- Из-за этого потери энергии э/м полей малы, а магнитное поле вморожено (или «приклеено») в межзвездный газ.



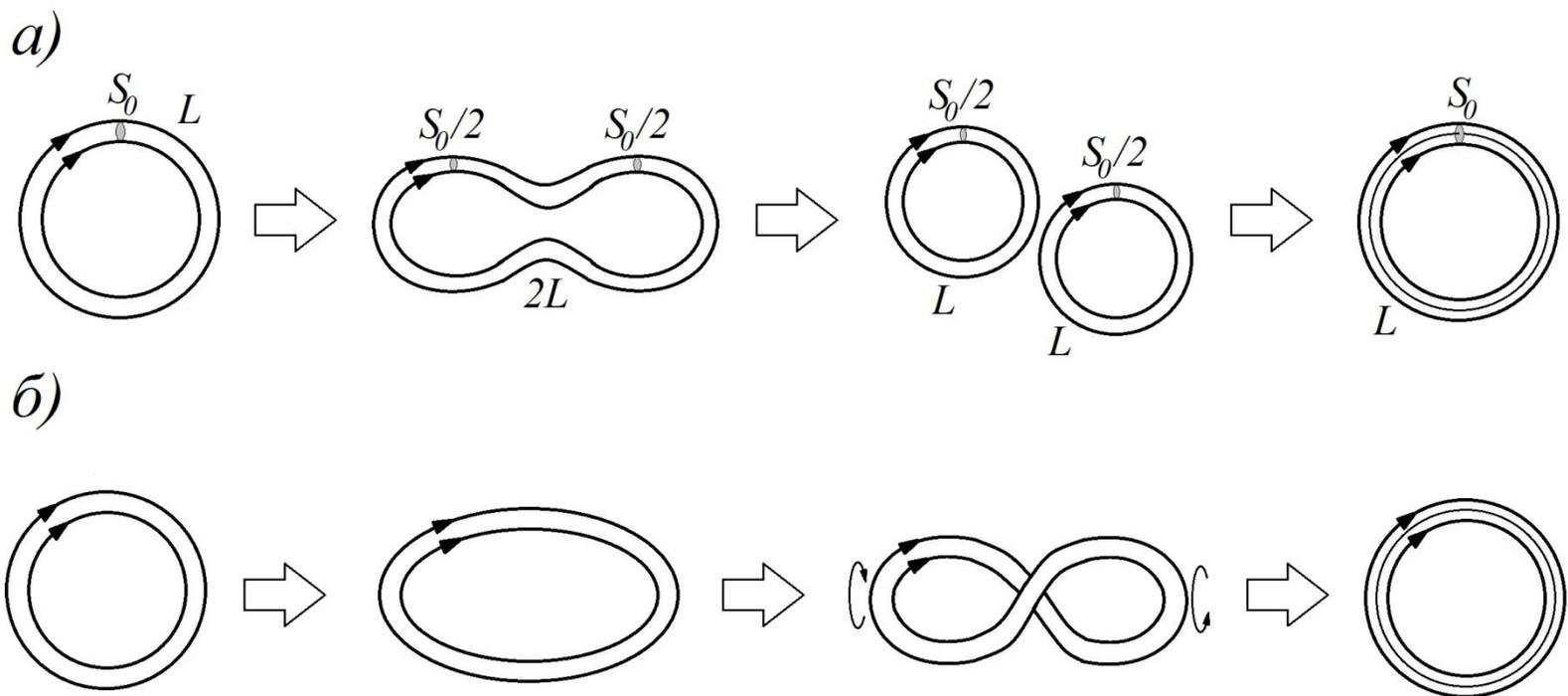
# Мелкомасштабное и крупномасштабное поле

- Поле галактики  $H$  состоит из двух компонент – крупномасштабного «фона»  $V$  и мелкомасштабных случайных полей  $b$ :

$$H = V + b.$$

- Мелкомасштабные поля ориентированы произвольным образом и сконцентрированы в небольших областях размером около 100 пк (1 парсек (пк) – 3.2 световых года).
- Эти поля имеют один порядок величины, поэтому пренебрегать мелкомасштабной компонентой, строго говоря, нельзя!

# Генерация мелкомасштабного поля – турбулентное динамо



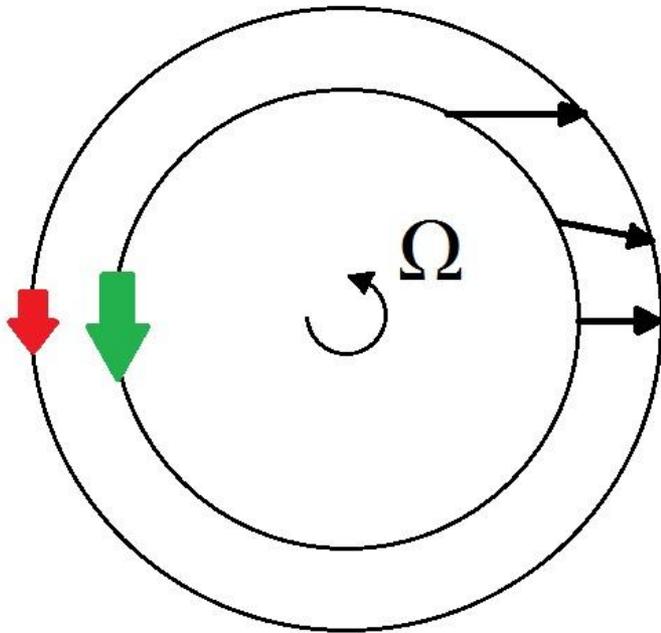
# Два механизма

- Механизм генерации магнитного поля (а), предложенный Альфвенем (1977) оказался неудовлетворительным: поле растёт очень медленно и работает лишь за счет диффузионных процессов.
- Механизм (б), предложенный Зельдовичем (1970-е), предусматривает большую роль турбулентных, «закрученных» движений и работает быстро.

# Генерация крупномасштабного поля – «mean-field dynamo»

- Крупномасштабное поле практически полностью сосредоточено в плоскости диска галактики и параллельно ему – у него есть лишь 2 компоненты:  $B_r$  и  $B_\varphi$ .
- Оно генерируется за счет двух эффектов – дифференциального вращения и альфа-эффекта.
- Каждый из этих эффектов по отдельности может вызвать только убывание магнитного поля (по правилу Ленца), но вместе они дают положительную обратную связь и поле начинает расти.

# Дифференциальное вращение



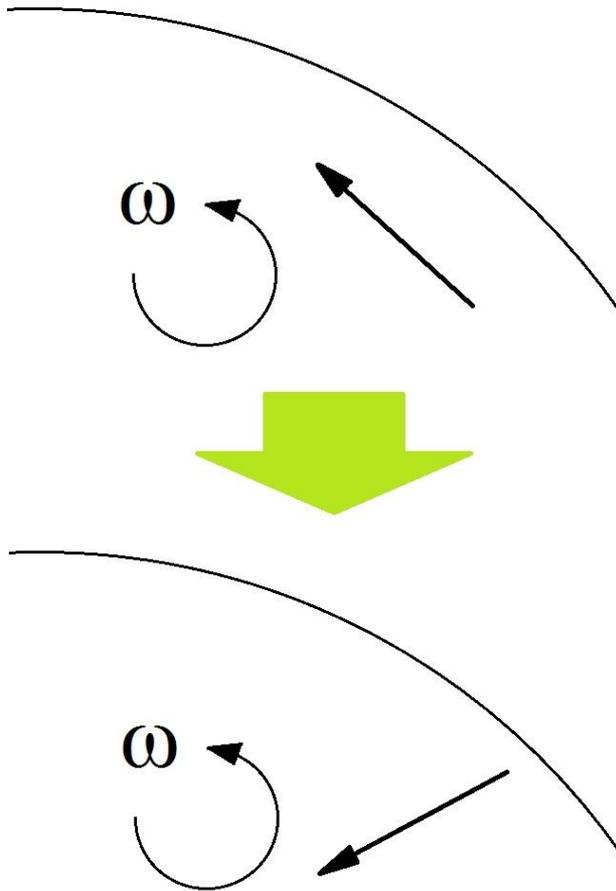
- Галактики вращаются не как твердые тела – внутренние части вращаются быстро, внешние - медленно. Угловая скорость  $\Omega$  падает с ростом расстояния до центра галактики:

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

- Разная угловая скорость преобразует радиальную компоненту поля  $B_r$  в угловую  $B_\varphi$  - но с обратным знаком.
- Математически этот процесс описывается так:

$$\frac{dB_\varphi}{dt} = -\Omega B_r$$

# Альфа-эффект



- Альфа-эффект связан с турбулентными движениями среды и их «закрученностью».
- Он перерабатывает угловую компоненту  $B_\varphi$  в радиальную  $B_r$  - но вновь с обратным знаком:

$$\frac{dB_r}{dt} = -\alpha B_\varphi$$

# Эволюция поля

- Для определения магнитного поля мы имеем два уравнения:

$$\begin{aligned}\frac{dB_r}{dt} &= -\alpha B_\varphi; \\ \frac{dB_\varphi}{dt} &= -\Omega B_r.\end{aligned}$$

- Его решение:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \exp(t\sqrt{\alpha\Omega})$$

# Рост магнитного поля

- Получается, что скорость экспоненциального роста магнитного поля увеличивается с ростом произведения угловой скорости и альфа-эффекта.
- Однако, хотя проводимость межзвездной среды и велика, совсем пренебречь ей нельзя.
- В ряде галактик диссипативные процессы оказываются сильнее, чем механизм динамо.

# Динамо-число

- Совокупное действие альфа-эффекта и дифференциального вращения характеризуют безразмерным динамо-числом:

$$D = 9 \left( \frac{h\Omega}{v} \right)^2 .$$

- $h$  - полутолщина галактического диска (например, для Млечного Пути это около 400 пк),  $v$  – скорость турбулентных движений.
- Рост магнитного поля возможен только при больших динамо-числах:  
$$D \gtrsim 7.$$
- В противном случае роль диссипации оказывается более существенной...

# Чем ограничен рост магнитного поля?

- Рост магнитных полей за счет динамо – это перекачка энергии турбулентных движений газа в энергию поля.
- Поэтому плотность энергии поля не может превысить плотность энергии движений среды:

$$\frac{B^2}{8\pi} < \frac{\rho v^2}{2}$$

- Максимально возможное магнитное поле:

$$B^* = 2v\sqrt{\pi\rho}.$$

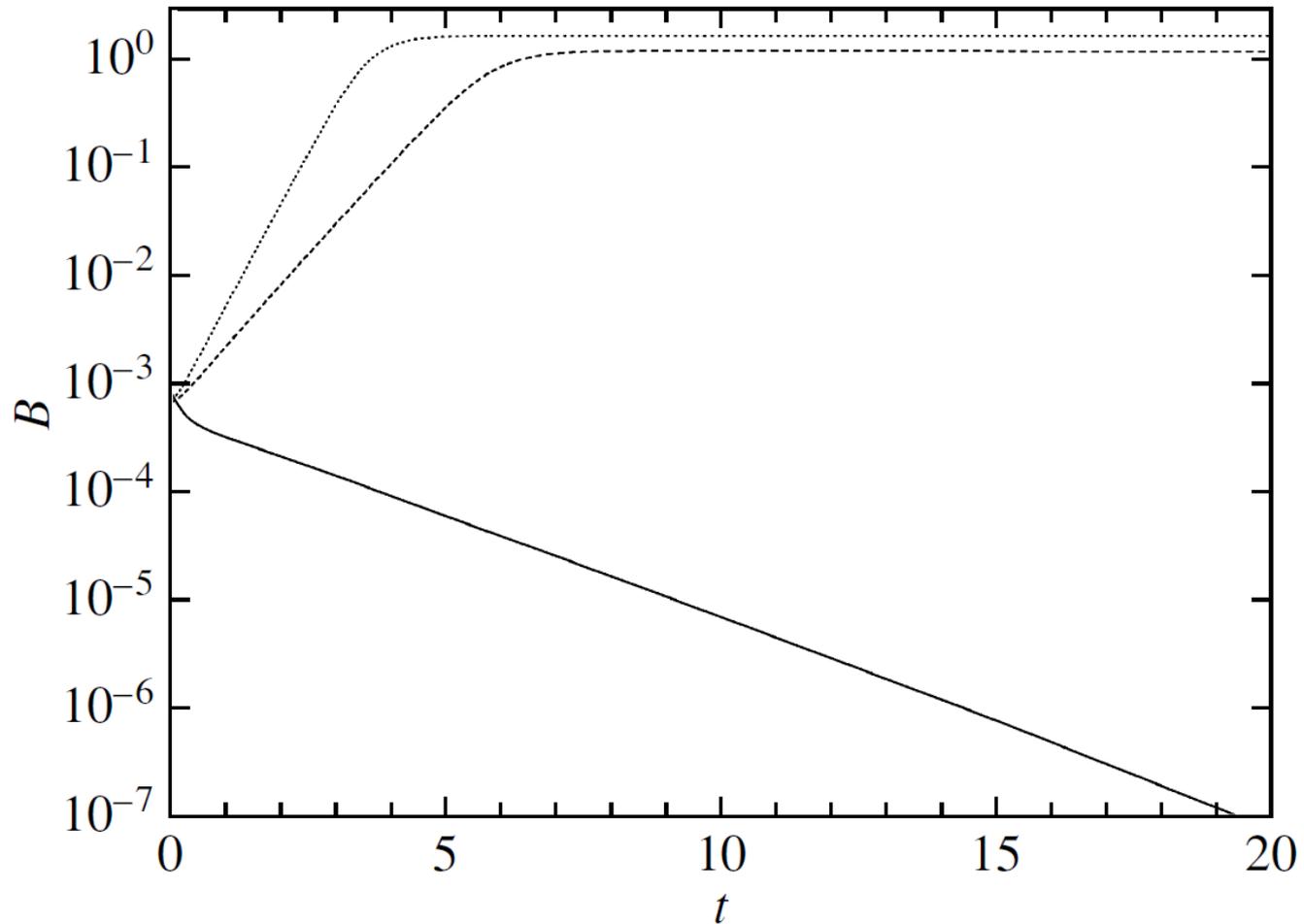
# Как учесть это в уравнениях?

- С ростом магнитного поля интенсивность турбулентных движений уменьшается. Поэтому уменьшается и коэффициент, ответственный за альфа-эффект:

$$\alpha = \alpha_0 \left( 1 - \frac{B^2}{B^{*2}} \right).$$

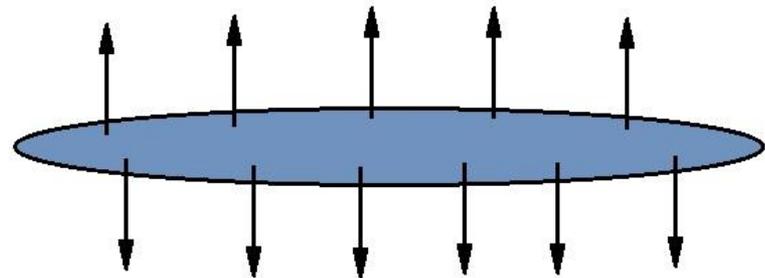
- Тогда система уравнений становится нелинейной.
- Это выражается в том, что при приближении  $B$  к  $B^*$  рост магнитного поля замедляется.

# Решения нелинейной задачи



# Что еще может помешать росту магнитного поля?

- Разогретый газ, содержащийся в межзвездной среде, постепенно вытекает из плоскости диска в вертикальном направлении.
- Вместе с собой эти потоки вещества уносят спиральность магнитного поля.



# Магнитная спиральность

- Магнитная спиральность – это скалярное произведение магнитного поля на его векторный потенциал:

$$\chi = (\mathbf{A}, \mathbf{H}).$$

- Полная магнитная спиральность в хорошо проводящей среде сохраняется – как энергия, импульс и т.п.
- Если часть спиральности «вытекает», то это тоже способствует затуханию магнитного поля.

# Как магнитные поля соотносятся с другими галактическими процессами?

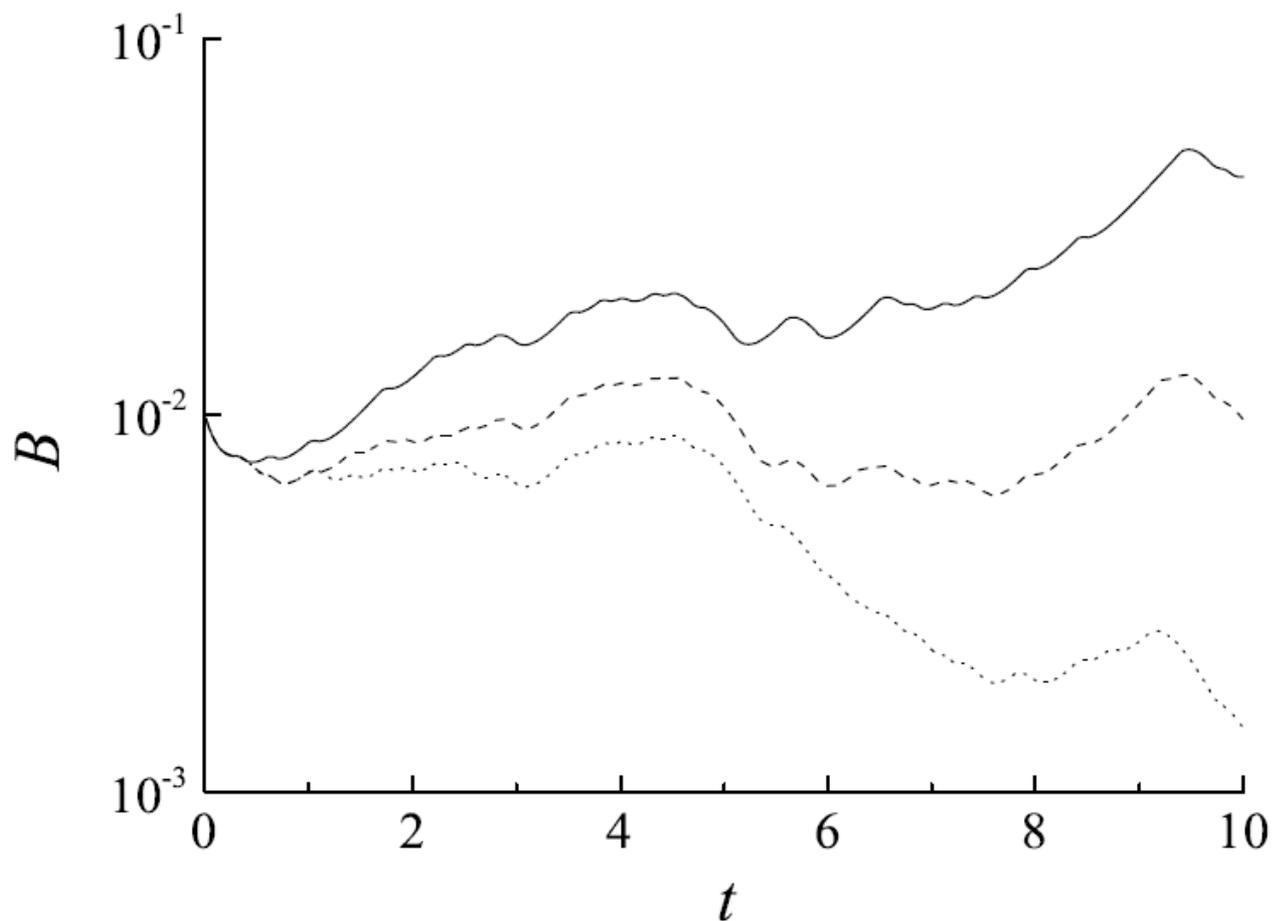
- Большинство описанных выше моделей составлены для «спокойных» галактик. В них нет активного звездообразования, взрывов сверхновых и других явлений, которые делают межзвездную среду сильно неоднородной.
- Если это происходит, то приходится усложнять модель.
- Например, можно ввести параметризацию, связывающую параметры задачи с интенсивностью звездообразования.

# Уравнения динамо со случайными коэффициентами

- Если в галактике часто происходят короткие вспышки звездообразования в разных частях, то описать их каким-то детерминированным способом нельзя.
- Можно рассмотреть альфа-эффект, который описывается случайным законом:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_1 & \text{с вероятностью } p; \\ \alpha_0 & \text{с вероятностью } (1 - p). \end{cases}$$

# Решения уравнений со случайными коэффициентами



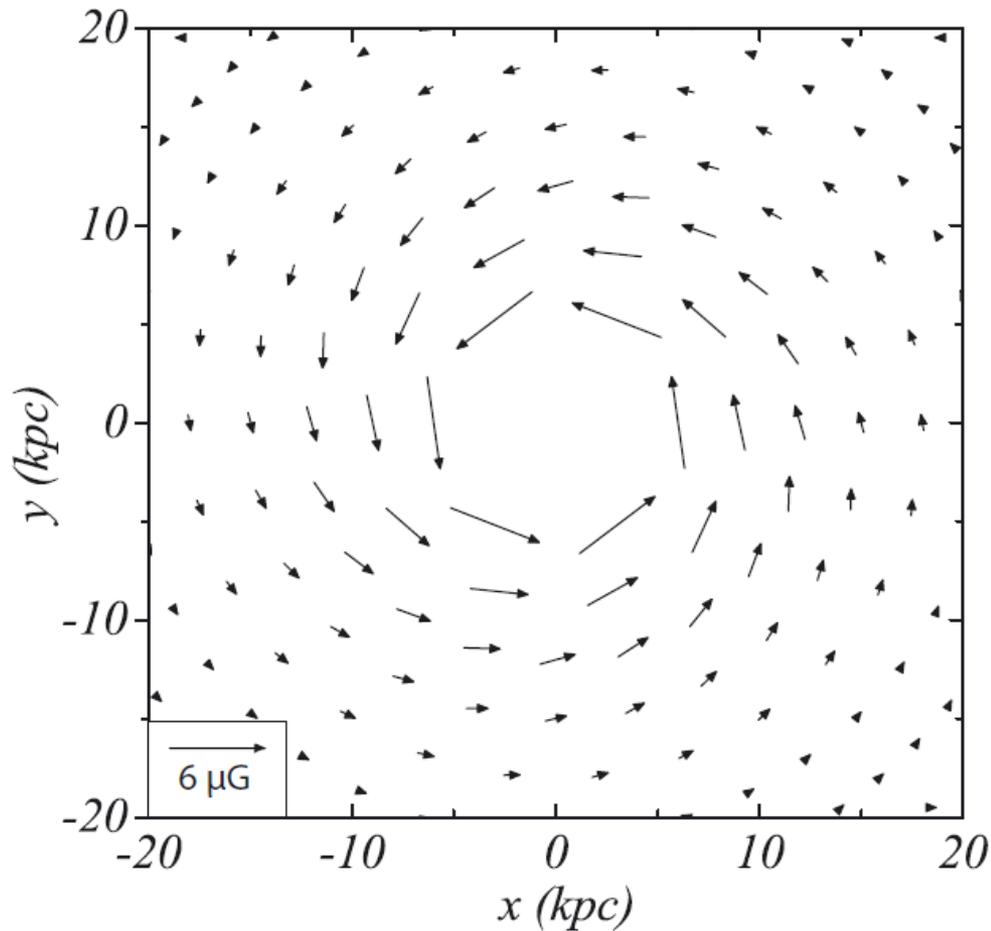
# Некоторые результаты

- Интенсивное звездообразование может разрушать магнитное поле – хотя, на первый взгляд, оно «впрыскивает» в межзвездную среду дополнительную энергию.
- Существует порог интенсивности звездообразования – при значениях ниже этого порога его влияние на поле малозаметно.
- Есть много других интересных задач, которые ждут своего решения.

# Проникают ли магнитные поля на большие расстояния от центра галактики?

- Галактика – это не комната, строго ограниченная стенками. Плотность межзвездного газа спадает по мере удаления от ее центра достаточно плавно.
- Как далеко проникает магнитное поле?

# Магнитные поля на больших расстояниях



# За счет чего магнитное поле может проникнуть на большие расстояния от центра галактики?

- Механизм динамо на больших расстояниях работает очень слабо.
- Поле распространяется за счет волны, идущей из центральных областей.
- Наличие таких волн – фундаментальное свойство ряда нелинейных уравнений. Этот эффект носит название эффекта Колмогорова – Петровского – Пискунова.

# Механизм динамо в центре Земли

- Когда говорят о магнитном поле Земли, связанном с ее жидким железным ядром, часто спрашивают: «кто его намагнитил?» и «почему оно не размагничивается со временем?»
- Действительно, если бы Землю однократно «намагнитили», то поле бы ушло за время порядка  $10^4$  лет.
- Поле не разрушается потому, что в центре Земли работает такой же механизм динамо, как и в галактиках.

# Солнечное динамо

- Магнитные поля на Солнце обнаруживают себя по количеству солнечных пятен (пятна – это места выхода магнитных трубок).
- Рост солнечного магнитного поля тоже обусловлен механизмом динамо.
- Особенности солнечного динамо обуславливают 22-летние циклы солнечной активности.

# Можно ли воспроизвести работу динамо в лаборатории?

- В космических масштабах расстояния и скорости очень велики, поэтому механизм динамо там работает.
- Кроме того, надо найти такую жидкость, которая бы обладала хорошей проводимостью. Наилучший кандидат – жидкий натрий, но работа с ним требует особой осторожности.
- Экспериментальная установка имеет размеры жилого дома, и потребляет электроэнергию как небольшой завод.

# Динамо-эксперименты

- IPUL, Рига, Латвия.
- Установка в Карлсруэ, Германия.
- ИМСС, Пермь, Россия.
- Исследовательский центр ядерной энергетики, Кадараш, Франция.
- Технологический институт в Лос-Аламосе, США.

# Результаты экспериментов

- В 1999 году в Риге удалось получить растущие решения для магнитного поля. Это потребовало многолетней работы (впервые запущена установка была в 1987 году).
- В 2000-е годы были получены некоторые новые результаты, позволившие лучше понять механизм динамо.