РЕЗОНАНСЫ В СФЕРИЧЕСКИХ ДИНАМО И СУПЕРВСПЫШКИ

Калинин А.О.¹, Соколов Д.Д.^{1,2}

¹Физический факультет МГУ, Москва, Россия

²ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия

RESONANCES IN SPHERICAL DYNAMOS AND SUPERFLARES

Kalinin A.O.¹, Sokoloff D.D.^{1,2}

¹Department of Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

²IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

We discuss problem of resonances in spherical dynamos in context of superflares which occurs at solar like stars. Superflares was identified in the Kepler mission observations. Energy of superflares looks sufficient to be dangerous for contemporary electronic devices provided would occur at the Sun. According to contemporary knowledge superflares never happened at the Sun in times accessible for available tracers of flares. A natural idea is to believe that dynamos responsible for magnetic activity in superflaring stars are somehow different from the solar one. Here we consider as a possible dynamo mechanism for superflaring stars a resonance excitation which occurs due to interaction between activity waves in two dynamo active shells in a superflaring star or due to a parametric excitation due to an influence of a satellite on a dynamo active shell. We investigate the problem using a simplest approach to a spherical dynamo which represents magnetic field by Fourier coefficients of few first modes.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-203-206

Анализ наблюдений звездной активности миссией Кеплер привел к выводу о том, что на звездах, подобных Солнцу время от времени случаются супервспышки, т.е. события, подобные вспышкам на Солнце, но превосходящие их на несколько порядков по энергетике. Возникновение таких супервспышек на Солнце было бы опасно, например, для современной электронной техники. С другой стороны, специалисты не находят следов таких супервспышек при анализе известных трассеров вспышек в историческом прошлом. Возникает естественная гипотеза о том, что механизм динамо, поддерживающий магнитную активность звезд с супервспышками, чем-то отличается от механизма солнечного динамо. Одним из таких отличий могло бы быть резонансное взаимодействие между двумя сферическими оболочками, в которых действуют относительно независимые механизмы динамо, либо параметрическое резонансное воздействие спутника на динамо основной звезды.

Поскольку о гидродинамике и динамо в звездах с супервспышками известно очень мало, то естественно рассмотреть задачу в самом грубом приближении. В докладе задача о резонансе в контексте вопроса о супервспышках рассматривается в рамках простой модели динамо в сферическом слое. В этой модели магнитное поле описывается с помощью динамиче-

ской системы. Переменные, входящие в эту систему, представляют амплитуды двух первых мод Фурье соответственно полоидального (a_1 и a_2) и тороидального (b_1 и b_2) магнитного поля

$$\begin{aligned}\dot{a}_1 &= \frac{1}{2}b_1 - a_1 - \frac{3}{8}b_1(b_1^2 - 2b_2^2), \\ \dot{a}_2 &= \frac{1}{2}(b_1 + b_2) - 9a_2 - \frac{3}{8}(b_1 + b_2)(b_1^2 + b_2^2 + b_1b_2), \\ \dot{b}_1 &= \frac{1}{2}D(a_1 - 3a_2) - 4b_1, \\ \dot{b}_2 &= \frac{1}{2}Da_2 - 16b_2.\end{aligned}\tag{1}$$

Параметр D (т.н. динамо-число) характеризует интенсивность работы динамо в оболочке.

Имеющийся опыт использования этой простой модели показывает, что она воспроизводит основные черты солнечного динамо, в силу своей простоты позволяет достаточно просто рассматривать всевозможные модификации этого механизма.

Формулировка понятия резонанса для задачи динамо осложняется тем, что обычно под резонансом понимают усиление амплитуды колебаний некоторой физической системы в результате влияния внешнего поля, наложенного на поле, возбуждаемое самой системой. По смыслу задачи динамо в ней такое внешнее магнитное поле отсутствует. Однако, сохраняя постановку задачи динамо, это магнитное поле можно заменить магнитным полем второй оболочки, которое проникает в первую. Магнитное поле второй оболочки мы тоже описываем с помощью динамической системы, включающей коэффициенты двух первых мод Фурье полоидального (A_1 и A_2) и тороидального (B_1 и B_2) магнитных полей:

$$\begin{aligned}\dot{A}_1 &= \frac{1}{2}B_1 - A_1 - \frac{3}{8}B_1(B_1^2 - 2B_2^2), \\ \dot{A}_2 &= \frac{1}{2}(B_1 + B_2) - 9A_2 - \frac{3}{8}(B_1 + B_2)(B_1^2 + B_2^2 + B_1B_2), \\ \dot{B}_1 &= \frac{1}{2}D_2(A_1 - 3A_2) - 4B_1, \\ \dot{B}_2 &= \frac{1}{2}D_2A_2 - 16B_2.\end{aligned}\tag{2}$$

Здесь D_2 – динамо-число во второй оболочке.

Для того чтобы поддерживать частоту колебаний, возникающих во второй оболочке, постоянной, мы пренебрегаем проникновением магнитного поля из первой оболочки во вторую. Поскольку тороидальное магнитное поле плохо проникает в проводящую среду, а полоидальное маг-

нитное поле проникает хорошо, мы учитываем только проникновение по-лоидального магнитного поля, что дает

$$\begin{aligned}\dot{a}_1 &= \frac{1}{2}b_1 - a_1 - \frac{3}{8}b_1(b_1^2 - 2b_2^2) + \varepsilon A_1, \\ \dot{a}_2 &= \frac{1}{2}(b_1 + b_2) - 9a_2 - \frac{3}{8}(b_1 + b_2)(b_1^2 + b_2^2 + b_1b_2) + \varepsilon A_2, \\ \dot{b}_1 &= \frac{1}{2}D_1(a_1 - 3a_2) - 4b_1, \\ \dot{b}_2 &= \frac{1}{2}D_1a_2 - 16b_2.\end{aligned}\tag{3}$$

D_1 теперь – динамо-число в первой оболочке, которое, конечно, не обязано совпадать с D_2 , а ε – параметр, характеризующий степень проникновения магнитного поля из одной оболочки в другую.

Полученная динамическая система для первой оболочки имеет вид тех систем, для которых обычно формулируется задача о резонансе. В самом деле, решение системы (2) в определенном интервале динамо-чисел имеет вид почти гармонических колебаний, частота которых определяется динамо-числом. В заметном диапазоне динамо-чисел это колебательное решение быстро устанавливается из любого малого начального условия. Поэтому динамическая система (3) содержит осциллирующие функции $A_1(t)$ $A_2(t)$, которые можно рассматривать как вынуждающую силу, действующую на динамическую систему.

Конечно, динамическую систему (1) можно использовать и для моделирования параметрического возбуждения динамо в одной оболочке внешней механической силой. Для этого нужно предположить, что динамо-число модулировано гармонической функцией, описывающей это внешнее механическое воздействие на систему.

Пожалуй, наиболее неожиданный результат нашего моделирования состоит в том, что зависимость коэффициента усиления от динамо-числа действительно обнаруживает локализованные пики. Их можно интерпретировать как резонансы, однако эти пики возникают не при совпадении частот колебаний в двух оболочках (для задачи о вынужденных колебаниях), либо при отличии их вдвое (для задачи параметрическом возбуждении), а при более сложных соотношениях между частотами. В силу необычности этих соотношений выяснение их физического смысла явно выходит за рамки данной работы.

Проведенное нами моделирование [1] подтверждает, что резонансные эффекты могут приводить к усилению энергии магнитного поля на 1–2 порядка при условии, что амплитуда модуляции внешней силы в системе (3) или динамо-числа в системе (1) достаточно велика. По смыслу задачи о внешнем воздействии на динамо эта модуляция не может превосходить единицу. Отмеченное заметное усиление генерируемой магнитной энергии

достигается при примерно модуляции амплитудой около 10 процентов. Если амплитуда модуляции понижается на порядок, то усиление становится незначительным и неинтересным. В силу того, что наша модель является, конечно, очень грубой и не передает многих деталей динамо, более точная квантификация явления резонанса с ее помощью не представляется полезной.

Обсудим теперь, насколько перспективными выглядят исследования явлений резонанса в сферических динамо.

Во-первых, представляется, что полученные результаты поддерживают представление о том, что природа цикла магнитной активности Солнца не может быть связана с резонансным влиянием Юпитера, несмотря на то, что период обращения Юпитера близок к длительности солнечного цикла. Кроме обычных аргументов о малости воздействия Юпитера на Солнце оказывается, что и само совпадение периодов обращения и цикла не является убедительным.

Во-вторых, звездные системы достаточно разнообразны для того, чтобы можно было ожидать в некоторых из них возникновения резонанса между двумя оболочками, либо параметрического резонанса.

Наконец, представляется, что сама задача о резонансном взаимодействии двух систем с самовозбуждением и его нелинейной стабилизацией имеет общезначимый смысл и заслуживает исследования независимо от того, насколько важной оказывается она в исходной задаче динамо.

Работа поддержана проектами РФФИ 18-02-00085 и 17-02-00300 и проектом 18-1-1-77-1 фонда поддержки теоретической и математической физики БАЗИС.

Литература

1. Калинин А.О., Д.Д. Соколов. Резонансы в сферических динамо и супервспышки // Астрон. ж., 2018, т. 95, с. 10.