

МАГНИТНАЯ И КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИИ КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНЫ ПОДОБНЫХ СОЛНЦУ ЗВЕЗД В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ СВЕТИМОСТИ И ИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Старченко С.В.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва, Россия*

MAGNETIC AND KINETIC ENERGIES OF THE CONVECTIVE ZONE OF SUN-LIKE STARS DEPENDING ON THEIR LUMINOSITY AND KNOWN PARAMETERS

Starchenko S.V.

*Pushkov institute of terrestrial magnetism, ionosphere and radio wave propagation RAS,
Troitsk, Moscow, Russia*

In the convective zone (CZ) of a Sun-like star, a dynamical system for the kinetic and magnetic energies is obtained, which are expressed in terms of the root-mean-square velocity and magnetic field. Depending on the relative luminosity α , the scale H , and the diffusion time T , the stationary points of the system and the velocity estimates from the mixing length theory set the stabilization levels of the energies and the mean sine of the angle S (0.9 in the Sun) between the velocity and magnetic field vectors. To generate a magnetic field, α (8 mW/kg) must exceed a threshold (6 mW/kg). Near the threshold, the dynamo could be weakly nonlinear, as in the Sun's CZ, where the magnetic energy is $4 \cdot 10^{31}$ J, the kinetic energy is $2 \cdot 10^{32}$ J, and the root-mean-square velocity is 90 m/s and the magnetic field is 0.1 T. In such stars S is only slightly less than 1 and the magnetic energy is less than or of the order of the kinetic energy.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-291-294>

В некотором смысле энергия подобна деньгам – поскольку является истинно универсальной ценностью для всевозможных физически обменов и преобразований. В подобной Солнцу звезде изначальная термоядерная энергия переходит в конвективную энергию Архимедовой плавучести, которая порождает кинетическую, а благодаря ней и магнитную энергию КЗ. В этой статье считается, что глобальная энергия плавучести задана удельной светимостью α , как изображено на рис. 1. Вторым, достаточно уверенно определяемым входным параметром решаемого круга проблем, является максимальный или точнее несущий основную энергию масштаб H , который принимается здесь как полутолщина КЗ. И третий параметр – время турбулентной диффузии T , которое оценивается средним временем жизни звездных пятен, которое для Солнца, возможно впервые, определил Юрий Анатольевич Наговицын [1] как примерно две недели, что согласуется и с другими исследованиями, например [2].

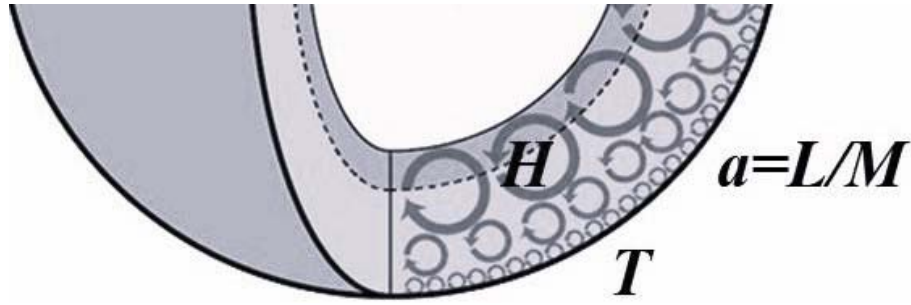


Рис. 1. Схематически изображены – Конвективная Зона (КЗ далее) звезды, конвективные ячейки с максимальным масштабом H , диффузионным временем T и удельной светимостью a (получается делением светимости L на массу КЗ M).

Рассматриваемая далее суммарная или глобальная кинетическая энергия КЗ выражается через среднеквадратичную скорость u , а магнитная энергия – через среднеквадратичное магнитное поле $B = b(\rho\mu)^{1/2}$, где ρ – средняя плотность, μ – фундаментальная постоянная. Из динамической системы, полученной в [3], здесь используется выражение для стационарных значений u и b , которое в наших условиях записывается как

$$u = H/ST, b = (Ta - H^2/S^2T^2)^{1/2}. \quad (1, 2)$$

Возведенные в квадрат u и b дают удвоенную относительную (в Дж/кг) кинетическую и магнитную энергии, а S – это средний по модулю синус угла между вектором магнитного поля и вектором скорости.

Выразим искомые величины u , S и b через определенные выше три параметра. Во-первых, выразим скорость (90 м/с в Солнце) исходя из общеизвестной (например – [4]) теории длины перемешивания:

$$u = (aH)^{1/3}. \quad (3)$$

Для синуса же S и магнитного поля b , выраженного в м/с, получим

$$1 \leq S = (H^2/a)^{1/3}/T, b = [Ta - (aH)^{2/3}]^{1/2}. \quad (4, 5)$$

Для Солнца $S = 0.9$, величина магнитного поля $B = b(\rho\mu)^{1/2} = 0.1$ Тл и $b = 40$ м/с. Соответственно удельная магнитная энергия $b^2/2 = 750$ Дж/кг, что значительно меньше удельной кинетической энергии $u^2/2 = 4050$ Дж/кг. Соответственно полная (удельная умноженная на массу КЗ) магнитная энергия $4 \cdot 10^{31}$ Дж и кинетическая – $2 \cdot 10^{32}$ Дж. При этом отношение энергий для звезды

$$b^2/u^2 = 1/S - 1. \quad (6)$$

Отсюда видно, что S весьма мало при существенном превышении энергии магнитного поля над кинетической энергией, что соответствует практически параллельности магнитного поля и скорости динамо-течений. Такое соотношение почти не требует большого изменения течения для достижения равновесия – достаточно полю даже большой величины подстроится под течение с относительно небольшой кинетической энергией. Напротив,

в современном Солнце и ему подобных звездах, где S близко к единице, кинетическая энергия превосходит или порядка магнитной энергии. Все эти соображения могут быть использованы при интерпретации наблюдений, когда угол между магнитным полем и скоростью будет увязан с отношением соответствующих энергий.

Уравнение (5) свидетельствует о пороговом характере процесса динамо-генерации. Произведение удельной светимости и диффузионного времени Ta (9600 Дж/кг в Солнце) должно превысить порог $u^2 = (aH)^{2/3} = (8100 \text{ Дж/кг})$, чтобы генерировать магнитное поле. Для Солнца это превышение весьма невелико около 19% и соответственно солнечное динамо, по-видимому, слабо нелинейно, что является физической причиной успеха линейных или почти линейных (слабо нелинейных) моделей динамо для Солнца. Возможно, более наглядно пороговый характер генерации магнитного поля эквивалентно выражается через удельную светимость a (8 мВт/кг в Солнце), которая для успешной генерации должна превысить соответствующее пороговое значение (6 мВт/кг).

Итоги

Использована интегральная динамическая система для кинетической и магнитной энергий выведенная в [3]. В зависимости от относительной светимости a , масштаба H и времени диффузии T стационарные точки этой системы и оценки скорости из теории длины перемешивания задают уровни стабилизации энергий и среднего синуса угла S (0.9 в Солнце) между векторами скорости и магнитного поля.

Для генерации магнитного поля a (8 мВт/кг) должно превысить порог (6 мВт/кг). Вблизи порога, по-видимому, слабо нелинейное динамо, как в КЗ Солнца, где магнитная энергия $4 \cdot 10^{31}$ Дж, кинетическая $2 \cdot 10^{32}$ Дж, а средне-квадратичные скорость 90 м/с и магнитное поле 0.1 Тл. В подобных звездах S лишь немногим меньше 1 и магнитная энергия меньше или порядка кинетической энергии. Все эти значения хорошо согласуются с современным моделированием течений и магнитных полей в КЗ Солнца [5, 6].

Напротив, малое S соответствует превышению магнитной энергии над кинетической энергией из-за практически параллельности магнитного поля и скорости динамо-течений, а поле даже большой величины подстраивается под течение с относительно небольшой кинетической энергией.

Литература

1. Наговицын А.Ю. Персональное сообщение о 14-ти дневном среднем времени жизни Солнечных пятен. 10 октября 2024 г.
2. Tlatov A. G. Lifetime of Sunspots and Pores // Sol. Phys. 2023. V. 298. No 93. <https://doi.org/10.1007/s11207-023-02186-7>
3. Starchenko S. V. Levels of stabilization of velocity and magnetic induction in the convective zone of the Sun // Proceedings IAU Symposium No. 365. A. V. Getling & L. L. Kitchatinov, eds. P. 364-367. 2024. <https://doi.org/10.1017/S1743921323005252>

4. *Starchenko S.V.* Analytic scaling laws in planetary dynamo models // *Geoph. Astroph. Fluid Dyn.* 2019. V. 113. No 1-2. P. 71-79. <https://doi.org/10.1080/03091929.2018.1551531>
5. *Fan, Y.* Magnetic fields in the solar convection zone // *Living Rev Sol Phys.* 2021. V. 18. No 5. <https://doi.org/10.1007/s41116-021-00031-2>
6. *Hotta, H., Bekki, Y., Gizon, L. et al.* Dynamics of Large-Scale Solar Flows // *Space Sci Rev.* 2023. V. 219. No 77. <https://doi.org/10.1007/s11214-023-01021-6>