

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ И ЦИКЛЫ АКТИВНОСТИ ЗВЕЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА

Кичатинов Л.Л.^{1,2}

¹*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

²*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

DIFFERENTIAL ROTATION AND ACTIVITY CYCLES OF SOLAR-TYPE STARS

Kitchatinov L.L.^{1,2}

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics, Irkutsk, Russia*

²*Pulkovo Astronomical Observatory, St.-Petersburg, Russia*

Joint model for the solar differential rotation and dynamo is applied to slowly rotating solar-type stars. The model computations show strong dependence on the effective temperature of a star: the activity cycle period shortens and the differential rotation increases with temperature. The computations also show an increase in the marginal rotation rate for onset of the large-scale dynamo with the effective temperature. For equal rotation rates, the dynamo efficiency is therefore higher in cooler stars. The less powerful dynamos in hotter stars can explain their observed slower spindown and termination of the spindown at higher rotation rates. Arguments are given for the presence of cyclic activity only in slowly rotating stars whose rotation rate is close to the marginal rate for onset of dynamos. The observed shortening of the activity cycles for faster rotation can be a consequence of the cycles' dependence on temperature and faster rotation of hotter stars.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-151-156

Введение

Магнитная активность подобных Солнцу звезд по всей вероятности определяется их строением и скоростью вращения. В теории динамо не найдено каких-либо важных для магнитной активности факторов помимо вращения звезд и их строения. Поэтому можно ожидать, что циклы активности и дифференциальное вращение подобных Солнцу звезд контролируются двумя параметрами: эффективной температурой, определяющей строение звезды, и скоростью вращения.

Однако в первых исследованиях [1, 2] предполагалось, что первостепенное значение имеет вращение и для параметризации, как дифференциального вращения, так и звездных циклов, достаточно одного параметра. В качестве такого параметра использовалась либо скорость вращения, либо число Россби – отношение периода вращения звезды к характерному времени звездной конвекции. При таком подходе, была найдена степенная зависимость $\Delta\Omega \sim \Omega^{0.7}$ между угловой скоростью Ω и ее изменчивостью $\Delta\Omega$ на поверхности звезды, т.е. дифференциальным вращением [2]. В последующем, однако, выяснилось [3, 4], что дифференциальное вращение

определяется главным образом температурой звезды, а зависимость от скорости вращения является слабой и немонотонной. Причины, по которым основная зависимость от температуры может проявляться как кажущаяся зависимость от скорости вращения, будут пояснены в следующем разделе.

Первые данные о звездных циклах активности также показывали зависимость от вращения: период цикла, как утверждалось, сокращается с увеличением скорости вращения [1]. В последующем эта зависимость неоднократно пересматривалась и уточнялась, но до сих пор считается, что наблюдения показывают сокращение длительности звездных циклов со скоростью вращения. Объяснение данной тенденции представляет трудности для теории. Модели динамо показывают увеличение периода цикла со скоростью вращения для звезд фиксированной массы [5, 6].

В данной статье показано, что противоречие моделей с наблюдениями является кажущимся. Выборка звезд для определения продолжительностей циклов включает звезды различных спектральных классов. При этом зависимость продолжительности циклов от эффективной температуры может выглядеть как зависимость от скорости вращения, потому что эта скорость также зависит от температуры звезды. Причины этого следуют из данных о вращении звезд.

Вращение и эффективная температура (цвет) звезд

Две особенности вращения звезд являются важнейшими для динамо:

1. Вращение замедляется с возрастом звезды, и это происходит тем быстрее, чем ниже эффективная температура [7].
2. Замедление вращения имеет верхний предел по периоду вращения, и этот максимальный период тем меньше, чем выше температура [8, 9].

Замедление вращения связано с присутствием крупномасштабных магнитных полей [10]. Вращение необходимо для динамо, но обратное влияние генерируемых полей замедляет вращение. В [7] получено эмпирическое соотношение

$$P_{\text{rot}} = at^n(B-V-0.4)^b \text{ суток}, \quad (1)$$

где P_{rot} – период вращения, t – возраст звезды в миллионах лет, $B-V$ – показатель цвета (возрастает с уменьшением эффективной температуры) и $a \approx 0.77$, $n \approx 0.512$, $b \approx 0.6$ – положительные числа. Согласно (1), замедление вращения относительно холодных звезд происходит быстрее. Поэтому в выборке, включающей звезды различных спектральных классов, относительно быстрое вращение представлено более горячими звездами и фактическая зависимость от температуры проявляется в виде кажущейся зависимости от скорости вращения, как получилось в [2].

Правило гирохронологии (1) действует приблизительно до середины времени жизни звезды на главной последовательности, после чего замед-

ление вращения практически останавливается [9]. Иными словами, имеется верхняя граница $P_{\max}$ для периода вращения подобных Солнцу звезд. Величина $P_{\max}$ зависит от температуры (цвета) звезды. Согласно [8],

$$P_{\max} = 111.3 (B-V - 0.405) \text{ суток}, \quad (2)$$

а в [9] нашли, что $P_{\max}$ соответствует постоянному числу Россби $P_{\text{rot}}/\tau_c = 2.08$,

$$P_{\max} = 2.08/\tau_c, \quad (3)$$

где τ_c – характерное время конвективных течений (уменьшается с ростом температуры). Как видно из рис. 1, $P_{\max}$ из (1) и (2) различаются мало для $B-V < 0.9$, которыми ограничивается работа [8].

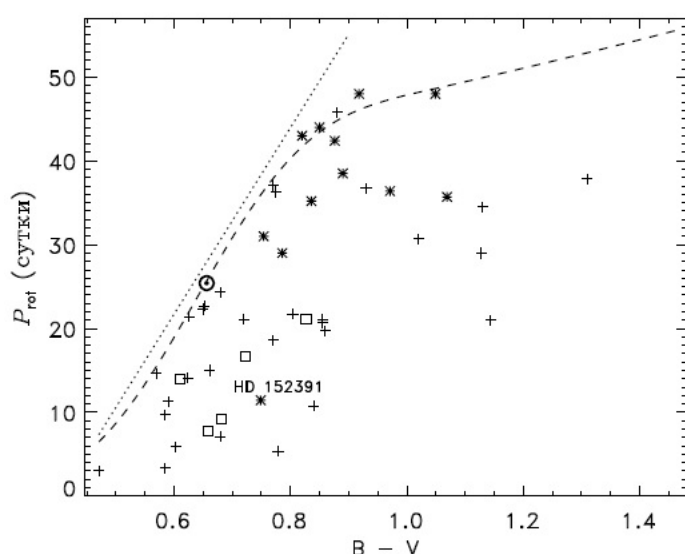


Рис. 1. Верхняя граница периода вращения подобных Солнцу звезд согласно формулам (1) (точечная линия) и (2) (пунктир). Значками показаны положения звезд с циклами активности из каталога [11]. Звездочки – надежно установленные циклы, квадраты – двойные, или множественные циклы, и крестики – неподтвержденные циклы.

Присутствие максимального периода вращения дает важнейшую информацию о звездном динамо. Гидромагнитное динамо в целом и звездное динамо в частности является неустойчивостью течений проводящих жидкостей к магнитным возмущениям. Подобно другим неустойчивостям, динамо появляется, когда соответствующий управляющий параметр превышает определенное критическое значение.

Для звездного динамо таким управляющим параметром является динамо-число, пропорциональное скорости вращения. Максимальный период вращения, по всей вероятности, соответствует минимальной скорости вращения для действия крупномасштабного динамо [12]. На это указывает и низкий уровень магнитной активности вблизи $P_{\max}$ [9, 12]. Таким образом, наблюдаемая величина $P_{\max}$ показывает зависящую от эффективной температуры пороговую скорость вращения для действия звездного динамо.

Звезды с достоверными циклами находятся на рис. 1 вблизи $P_{\max}$. Это возвращает к тому, что динамо является частным случаем неустойчивости: колебания с определенным периодом характерны для слабо закритических

режимов неустойчивостей и сменяются «многопериодной» динамикой и затем турбулентностью с ростом закрученности [13]. Поэтому циклическая активность редко встречается для звезд с периодом вращения существенно меньше $P_{\max}$ [14].

Звездные циклы в модели динамо

В согласованной модели дифференциального вращения и динамо [15] были проведены расчеты для звезд с массой от $0.7M_{\odot}$ до $1.2M_{\odot}$, вращающихся с периодом $P_{\max}$ из уравнения (3). Динамо-число в расчетах было на 10% выше его (зависящей от массы) критической величины.

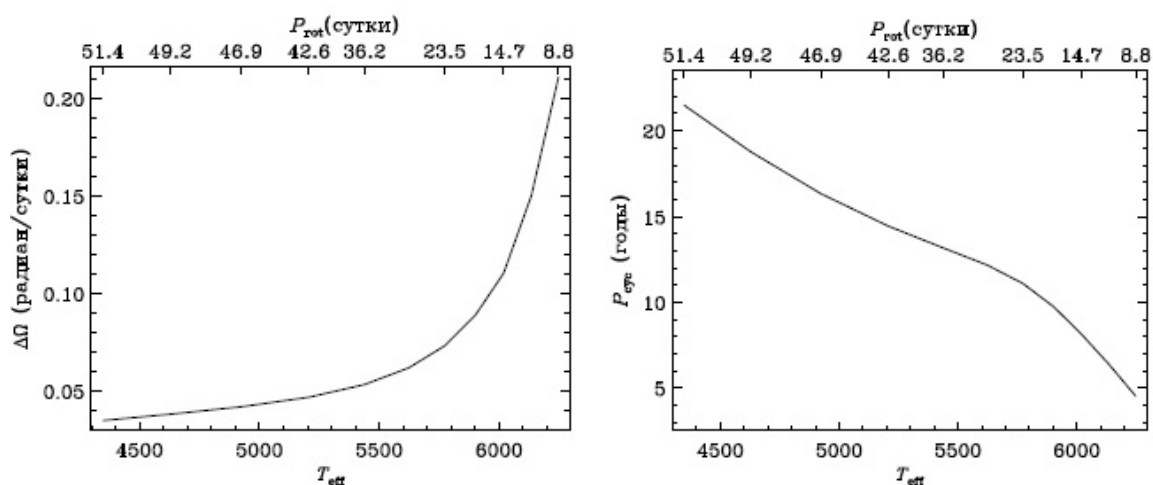


Рис. 2. Различия скоростей вращения между экватором и полюсом (слева) и период цикла (справа) в зависимости от эффективной температуры звезды. На верхней шкале показан период вращения соответствующий пунктирной линии рис. 1 и формуле (3).

На рис. 2 показаны полученные в расчетах зависимости дифференциального вращения и периода магнитных циклов от эффективной температуры. Дифференциальное вращение возрастает, а продолжительность цикла уменьшается с возрастанием температуры. Верхняя шкала показывает максимальный период вращения (3), соответствующий данной температуре. Так как относительно горячие звезды вращаются быстрее, то проведенные расчеты также показывают наблюдаемое возрастание дифференциального вращения [2] и сокращение периода циклов [1] со скоростью вращения. Необходимо, однако, повторить, что «наблюдаемые» зависимости от скорости вращения возникают из-за подмены определяющего влияния строения звезды (эффективной температуры) влиянием вращения в результате присутствия в наблюдаемой выборке звезд различных спектральных классов (см., например, рис. 3 в [2]).

Проведенные расчеты указывают на причину относительно быстрого вращения более горячих звезд. На рис. 3 показана полученная в расчетах зависимость от температуры минимальной величины параметра α для альфа-эффекта теории динамо, при которой происходит генерация магнитного

поля в нашей модели. Альфа-эффект появляется из-за вращения, и параметр α возрастает со скоростью вращения. Молодые звезды в начале жизни на главной последовательности вращаются быстро с периодами порядка суток. При этом величина α превышает критическую величину рисунка 3. Однако для более горячих звезд это превышение меньше, и меньшая эффективность их динамо может быть причиной меньшей скорости замедления вращения по формуле (1) эмпирической гирохронологии [7]. По мере замедления вращения более горячие звезды приближаются к относительно большой пороговой величине α рис. 3, имея относительно большую скорость вращения по сравнению с более холодными звездами, после чего действие динамо и замедление вращения останавливаются. Это может быть причиной малых $P_{\max}$ на рис. 1 для относительно горячих звезд.

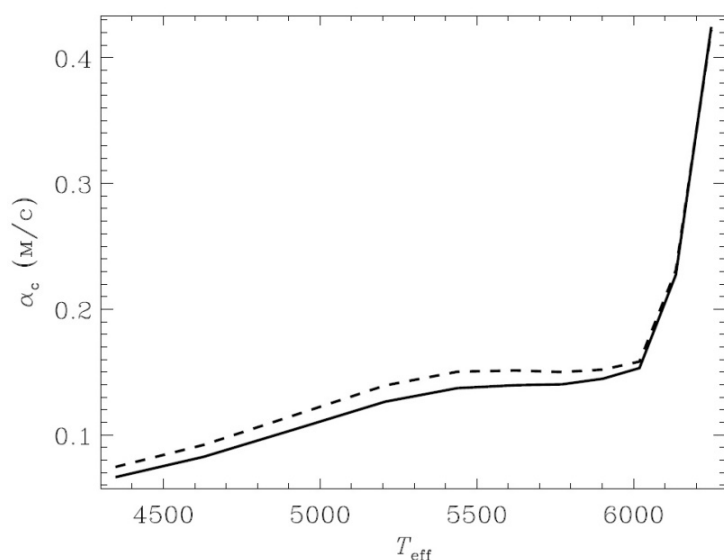


Рис. 3. Пороговая величина параметра α альфа-эффекта для действия динамо как функция эффективной температуры звезды. Сплошная и пунктирные линии показывают минимальную величину α , необходимую для генерации магнитных полей с дипольным и квадрупольным типом экваториальной симметрии, соответственно.

Для малой надкритичности, $\alpha/\alpha_c - 1 \ll 1$, амплитуда B магнитных циклов в проведенных расчетах пропорциональна корню квадратному из величины превышения параметром α его критической величины, $B \sim (\alpha - \alpha_c)^{1/2}$. Для этого случая имеем также

$$B \sim (P_{\max} - P_{\text{rot}})^{1/2}, \quad (4)$$

что является частным случаем общего правила для слабо надкритических неустойчивостей (формула (26,10) в [13]). Становится понятным, почему подобные Солнцу звезды могут существенно отличаться по уровню магнитной активности при близких скоростях вращения [16]: этот уровень определяется не скоростью вращения, но ее превышением критической величины для действия динамо.

Выводы

Согласованная модель дифференциального вращения и динамо [15] показывает сильную зависимость от эффективной температуры (строения)

звезды: период цикла активности уменьшается, а неоднородность вращения возрастает с ростом температуры. Модельные расчеты также показывают, что минимальная скорость вращения для действия крупномасштабного динамо возрастает с эффективной температурой. Поэтому при равных скоростях вращения эффективность динамо выше в относительно холодных звездах, что может служить объяснением относительно быстрого замедления вращения и прекращения такого замедления при меньших скоростях вращения в относительно холодных звездах.

Циклы активности характерны для звезд с периодом вращения вблизи $P_{\max}$ рис. 1. Продолжительность циклов и величина $P_{\max}$ уменьшаются с эффективной температурой, что объясняет «наблюдаемое» [1] сокращение периода звездных циклов со скоростью вращения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Литература

1. Noyes R.W., N.O. Weiss, A.H. Vaughan. // *ApJ*, 1984, **287**, 769
2. Donahue R.A., S.H. Saar, S.L. Baliunas. // *ApJ*, 1996, **466**, 384
3. Barnes J.R. et al. // *MNRAS*, 2005, **357**, L1
4. Kitchatinov L.L., S.V. Olemskoy. // *MNRAS*, 2012, **423**, 3344
5. Jouve L., B.P. Brown, A.S. Brun. // *A&A*, 2010, **509**, A32
6. Karak B.B., L.L. Kitchatinov, A.R. Choudhuri. // *ApJ*, 2014, **791**, 59
7. Barnes S.A. // *ApJ*, 2007, **669**, 1167
8. Rengarajan T.N. // *ApJ*, 1984, **283**, L63
9. van Saders J.L., M.H. Pinsonneault, M. Barbieri. // *ApJ*, 2019, **872**, 128
10. Skumanich A. // *ApJ*, 1972, **171**, 565
11. Boro Saikia S. et al. // *A&A*, 2018, **616**, A108
12. Metcalfe T.S., R. Egeland. // *ApJ*, 2019, **871**, 39
13. Ландау Л.Д., Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика. Т. VI. Гидромеханика. – М.: Наука, 1988, Гл. III.
14. Baliunas S.L. et al. // *ApJ*, 1995, **438**, 269
15. Кичатинов Л.Л., А.А. Непомнящих. // *Письма в АЖ*, 2017, **43**, 370
16. Reinhold T. et al. // *Science*, 2020, **368**, 518