

УДК 523.9

## Магическая частота Солнца и звезд типа Дельта Щита

В.А. Котов<sup>1</sup>, С.В. Котов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

<sup>2</sup> Фирма “МАГ”, 125171, ул. Космонавта Волкова, 6а, Москва

Поступила в редакцию 22 февраля 2006 г.

**Аннотация.** Согласно КраО и Стэнфорду, в 1974–1982 гг. Солнце пульсировало с периодом  $P_0 = 160.0101(15)$  мин. В течение же всего 32-летнего интервала доплеровских измерений КраО, с 1974 г. по 2005 г., у Солнца доминировал период  $P_1 = 159.9657(4)$  мин, почти годичный сателлит  $P_0$ . Для выяснения природы этих колебаний рассмотрены 1081 периодов пульсаций 540 звезд типа  $\delta$  Sct и найдено, что их наилучшее общее кратное равно 159(2) мин (достоверность 99.95%). Это значит, что в Галактике действует резонансный, неизвестной природы, механизм, подстраивающий колебания звезд  $\delta$  Sct, а также Солнца, под соизмеримость с “универсальной” частотой  $1/P_0$  ( $1/P_1$ ).

MAGIC FREQUENCY OF THE SUN AND DELTA SCUTI STARS, *by V.A. Kotov, S.V. Kotov.* According to the CrAO and Stanford, in 1974–1982 the Sun pulsated with period  $P_0 = 160.0101(15)$  min. But during the entire 32 yr interval of the Crimean Doppler measurements, from 1974 through 2005, another period,  $P_1 = 159.9657(4)$  min, – a nearly 1 yr sidelobe of the first one, – dominated in the Sun’s oscillations. To answer the question on the nature of these oscillations, we considered the set of 1081 pulsation periods of 540  $\delta$  Sct stars. It is found that the best-commensurate period of these stars is equal to 159(2) min (99.95% C.L.). It means that there is a resonance mechanism, of unknown origin, operating in Galaxy and tuning periods of  $\delta$  Sct stars, also of the Sun, to be the best-commensurable with the “universal” frequency  $1/P_0$  ( $1/P_1$ ).

**Ключевые слова:** Солнце, внутреннее строение, пульсации, звезды типа  $\delta$  Sct

---

### 1 Введение

Солнце – типичная звезда, желтый карлик класса dG2 V, магнитопеременный и с 22-летним циклом активности. Мы постоянно вращаемся вокруг него по земной орбите, но знаем о его свойствах и внутреннем устройстве немногим больше, чем о свойствах и строении далеких звезд. В то же время, например, дискуссия 70-х годов прошлого века о сплюснутости Солнца (Дике, 1974), незатухающие споры о дефиците нейтрино и механизмах возбуждения глобальных колебаний Солнца затронули основы физики и астрофизики и способствовали развитию фундаментальных исследований.

Звезды делятся на одиночные, двойные, пульсирующие и множество других типов. Солнце – одиночная звезда. А как с пульсациями? Можно ли, следует ли отнести Солнце к пульсирующим или стационарным звездам в классическом понимании?

Стандартная модель Солнца – статическая. Она не допускает временных вариаций глубоких недр, кроме медленного эволюционного изменения, вызванного выгоранием водорода. Реальное

же Солнце весьма изменчиво. Кроме 22-летнего магнитного цикла отметим сильные флуктуации скорости вращения фотосферы, природа которых непонятна; некоторые авторы ассоциируют их с торсионными колебаниями конвективной зоны и  $r$ -модами. Обнаружены и вариации потока нейтрино: с периодом вращения около 27 сут (Старрок и Вебер, 2002), а также, возможно, с периодом примерно 2.5 г. (Шираи, 2004).

Чтобы объяснить дефицит нейтрино, Роксбург (1974) предположил, что центральное ядро Солнца вращается с периодом порядка часа. Одним из следствий сверхбыстрого вращения ядра могут быть периодические радиальные смещения фотосферы, относящиеся к ее условному уровню, характеризующему принимаемое оптическое излучение. Такой, неизвестной амплитуды, процесс может существовать наряду с другими низкочастотными колебаниями атмосферы Солнца как целого, например, вместе с т. наз. волнами тяжести, или гравитационными  $g$ -модами, предсказываемыми гелиосейсмологией.

С целью обнаружения низкочастотных колебаний Солнца в КрАО в 1974 г. был создан дифференциальный метод измерения эффекта Доплера фотосферы. В результате были обнаружены – практически одновременно с группой из Бирмингэма – пульсации Солнца как звезды с периодом 160 мин (Брукс и др., 1976; Северный и др., 1976). Их природа не установлена.

## 2 О колебаниях фотосферы Солнца

Светимость Солнца в видимой области спектра изменяется на доли процента с синодическим периодом 27 сут и с циклом (примерно на 0.1%), что обусловлено пятнами, факелами, вращением и общей магнитной активностью звезды. Что касается пульсаций, то (а) уверенно обнаруживаются лишь 5-минутные колебания светового потока и лучевой скорости, вызванные акустическими колебаниями конвективной зоны, и (б) пока не получено убедительных свидетельств в пользу существования длиннопериодных колебаний –  $g$ -мод.

Однако в 1974 г., как говорилось выше, были открыты 160-минутные пульсации Солнца. Наиболее точное значение периода по измерениям КрАО за 1974–1982 гг. равно:

$$P_0 = 160.0101(15) \quad (1)$$

(в минутах; в скобках всюду указывается стандартная ошибка для последних значимых цифр). Результат был вскоре подтвержден аналогичными измерениями в Стэнфорде (Шеррер и Уилкоккс, 1983). Период оказался близким к 9-й гармонике среднесолнечных суток, что дало повод оппонентам оспаривать его солнечное происхождение. Детальный анализ погрешностей и всех артефактов, однако, позволил отвергнуть “земное” происхождение периодичности.

Примерно в те же годы  $P_0$ -колебание регистрировалось и в вариациях инфракрасной яркости фотосферы, с относительной амплитудой  $\sim 10^{-6}$  в перерасчете на вариации оптического излучения (Котов и др., 1983). Нашу звезду, таким образом, можно рассматривать как переменную, пульсирующую с периодом примерно 160 мин.

Полный массив доплеровских измерений солнечной фотосферы, выполненных в КрАО за 1974–2005 гг., показал, что после 1982 г. пульсация  $P_0$  исчезла, или “распалась”, уступив место пульсации с периодом (в минутах; Котов и др., 2006)

$$P_1 = 159.9657(4). \quad (2)$$

Последний почти совпал с периодом одного из годовых спутников  $P_0$ , имеющим значение 159.9614(15) мин. Новое колебание  $P_1$  имело заметную амплитуду и неизменную фазу на протяжении практически всего 32-летнего интервала измерений в Крыму. Точно такое же изменение периода – от  $P_0$  к  $P_1$  – показали и наблюдения в Стэнфорде. Важно отметить, что в данных Стэнфорда за 1977–1994 гг. доминировал период 159.9663(7) мин, согласующийся с “крымским” периодом  $P_1$  (Котов и др., 1997).

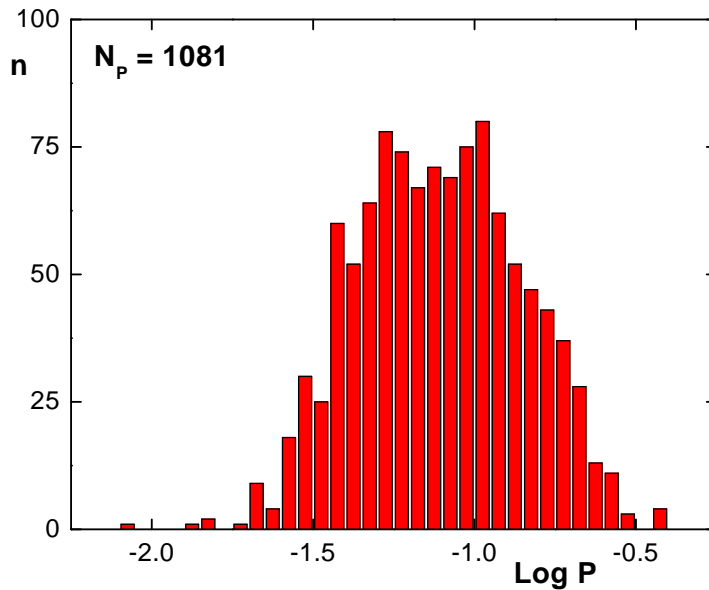


Рис. 1. Распределение 1081 периодов (в сутках) пульсаций 540 звезд  $\delta$  Sct в логарифмическом масштабе

### 3 Аналогия с пульсирующими звездами

Еще 30 лет назад Брукс и др. (1976), Северный и др. (1976) обратили внимание на общность проблемы колебаний Солнца и проблемы пульсирующих звезд, в частности, цефеид. Для этих звезд имеет место соотношение:

$$P (\rho/\rho_{\odot})^{1/2} = Q, \quad (3)$$

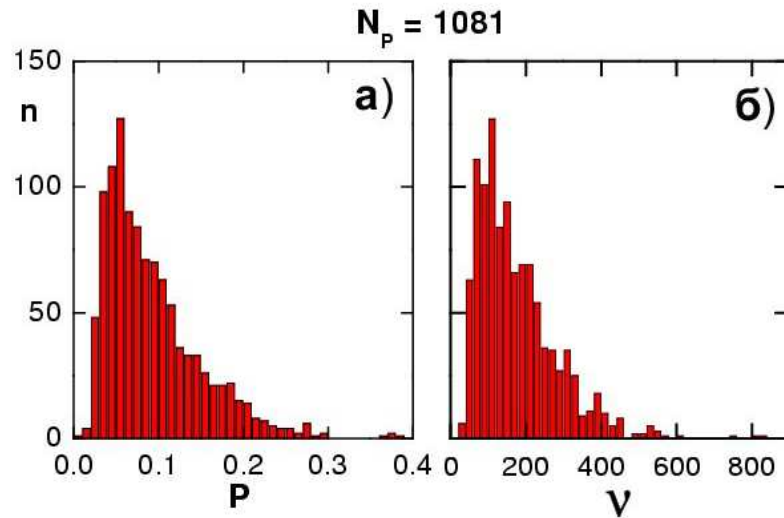
где  $P$  – период,  $\rho$  и  $\rho_{\odot}$  – средние плотности звезды и Солнца соответственно,  $Q$  – т. наз. “пульсационная константа”. Для радиальной моды и отношения удельных теплоемкостей  $\gamma = 5/3$  теория дает, в сутках (Росселанд, 1952):

$$0.03 \lesssim Q \lesssim 0.12, \quad (4)$$

что согласуется с наблюдениями пульсирующих звезд, включая Солнце с его периодами  $P_0$  и  $P_1$ ; их среднее значение  $P_{\odot} \approx 0.111$  сут. Какое же место среди наблюдаемых периодов пульсирующих звезд занимает солнечный период  $P_{\odot}$ ?

Наиболее интересны переменные типа  $\delta$  Sct, в основном имеющие периоды  $\approx 0.02$ – $0.30$  сут и амплитуды от 0.003 до 0.9 зв. вел. (Фролов, 1970). Считается, что эти звезды эволюционируют от главной последовательности и имеют характерные массы  $\approx 2 \times M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  – масса Солнца). Согласно Стэллингверфу (1979) период типичной звезды типа  $\delta$  Sct равен 0.112 сут.

А есть ли у этих звезд наиболее предпочтительные периоды пульсаций? Для ответа почти 20 лет тому назад Котовым (1987) были подвергнуты специальному статистическому анализу 237 периодов, принадлежащих 217 звездам  $\delta$  Sct. И было найдено, что наилучший соизмеримый период для них, 162(3) мин, совпадает в пределах ошибки с периодом Солнца  $P_{\odot}$ . Но с тех пор список звезд типа  $\delta$  Sct значительно вырос; сохранился ли “звездный”  $P_{\odot}$ -резонанс?



**Рис. 2.** То же, что на рис. 1, но для периодов (а) и частот (б) в линейном масштабе (периоды  $P$  – в сутках, частоты  $\nu$  – в мкГц); число звезд  $N_s = 540$ , число периодов  $N_p = 1081$

#### 4 Распределение звезд $\delta$ Sct

На основе каталога Холопова и др. (1985–1987) и текущей литературы составлен список 1081 периодов, зарегистрированных у 540 звезд  $\delta$  Sct. В этот список мы внесли также периоды переменных типа RR<sub>S</sub> (сейчас их принято объединять со звездами  $\delta$  Sct), а также короткопериодических переменных типа SX Phe. Далее обозначим:  $N_s$  и  $N_p$  – числа звезд и всех их периодов  $P_i$  соответственно, причем каждому периоду приписываем одинаковый статистический вес; индекс  $i = 1, 2, \dots, N_p$ . По сравнению с ранней работой Котова (1987) число периодов увеличено в 4.6 раза, число звезд – почти в 2.5 раза.

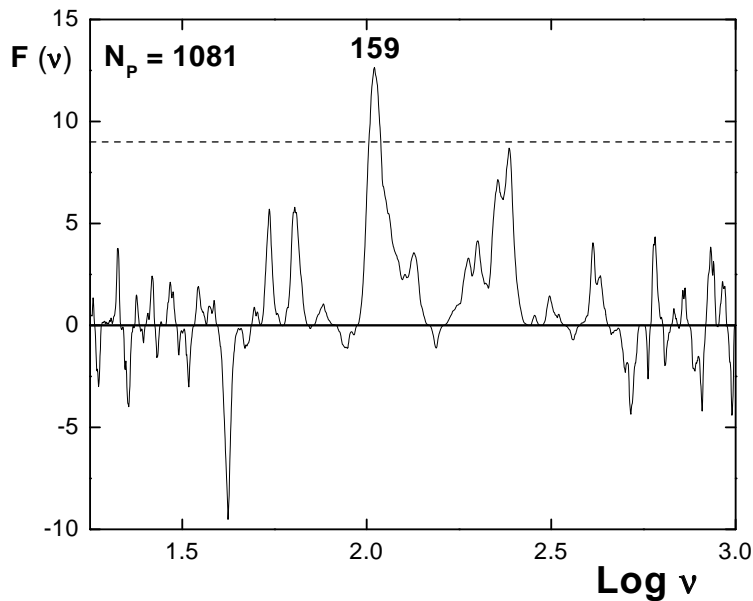
В логарифмическом масштабе распределение  $P_i$  показано на рис. 1. Оно имеет вид, близкий к нормальному, отдельные же максимумы отвечают периодам  $P \approx 0.105, 0.055, 0.038, 0.028$  и  $0.022$  сут, т. е. почти-соизмеримостям 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 и 1:5 с  $P_\odot$ .

В линейном масштабе распределение  $P_i$  показывает один отчетливый максимум  $P \approx 0.055$  сут, отвечающий соизмеримости 1:2 с  $P_\odot$ , см. рис. 2а. Распределение же по частотам  $\nu_i = 1/P_i$  – тоже в линейном масштабе – обладает максимумами с периодами примерно 0.107, 0.056, 0.037 и 0.022 сут, отвечающими  $P_\odot$ -соизмеримостям 1:1, 1:2, 1:3 и 1:5 (см. рис. 2б). Но надо отметить и присутствие пика 0.077 сут, близкого к целочисленной несоизмеримости с  $P_\odot$ .

#### 5 Резонанс-спектр

Приведенные примеры почти-соизмеримости весьма субъективны и служат лишь наглядным указанием на возможный “ $P_\odot$ -резонанс”. Для строгого анализа, не зависящего ни от масштаба (линейный или логарифмический), ни от выбора “частота или период”, а также с целью объективного определения наилучшего общего кратного, вычислим т. наз. “резонанс-спектр”, или просто спектр,  $F(\nu)$ . Максимум  $F(\nu)$  соответствует частоте  $\nu'$ , которая наилучшим образом, по методу наименьших квадратов, находится в целочисленной кратности со всеми частотами  $\nu_i$  (Котов, 1987).

Спектр  $F(\nu)$ , вычисленный для всех звезд  $\delta$  Sct в диапазоне пробных частот 18–1000 мкГц, приведен на рис. 3, где видим только один значимый пик (достоверность  $\approx 3.5\sigma$ , или 99.95%),



**Рис. 3.** Спектр  $F(\nu)$  для 1081 частот, зарегистрированных у 540 звезд  $\delta$  Sct. Частота  $\nu$  – в мкГц, пунктирная линия соответствует уровню априорной значимости  $3\sigma$ ; главный пик отвечает периоду 159(2) мин

отвечающий периоду  $P_s = 159(2)$  мин. Последний, следовательно, – наиболее резонансный период для всех 540 звезд. Аналогичный спектр для случайного набора “звездных” периодов не показал ни одной значимой частоты.

Принимая во внимание результаты п. 4, делаем вывод, что звезды  $\delta$  Sct стремятся пульсировать с частотами

$$\nu \approx \nu_{\odot} \times Z, \quad (5)$$

где  $Z$  – положительное малое целое число, а “универсальная” частота  $\nu_{\odot} \approx 104.2$  мкГц (период примерно 160 мин).

Условие (5) может быть результатом действия резонансного механизма, изученного теоретически Вандакуровым (1981) и Джембовским (1982). Но возникает вопрос: какой физический механизм возбуждает *одну и ту же частоту* (или ее гармоники) у звезд, включая Солнце, имеющих *разные* массы и химический состав?

Периодичность  $P_0$  обнаружена и в вариациях блеска активных ядер галактик (Котов и Лютый, 2003), что говорит о ее *космологической* природе. Тогда заслуживают внимания две гипотезы: (а)  $P_s(P_{\odot})$ -резонанс звезд  $\delta$  Sct обусловлен подстройкой, в среднем, их механических колебаний под резонанс с “универсальным” колебанием  $P_0$ , или (б) он связан со сверхбыстрым вращением их центральных компактных ядер, эволюционно стремящихся также к резонансу с  $P_0$ -осцилляцией.

## 6 Заключение

Период  $P_1$  Солнца мы связываем с динамикой его глубоких недр: период отражает, по-видимому, сверхбыстрое вращение центрального, компактного, ядра с периодом, близким к  $P_0(P_1)$ . То же относится, наверное, и к звездам  $\delta$  Sct: преимущественная подстройка вращения их компактных ядер к периодам, кратным  $P_s(P_0, P_1)$ ?

Примечательна и аналогия соотношения (5) с формулой Бора для квантования углового момента  $p$ -электрона, движущегося по орбите вокруг атомного ядра:

$$p = \hbar \times z, \quad (6)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка, деленная на  $2\pi$ ,  $z = 1, 2, 3, \dots$ . Типичная, или “среднестатистическая”, звезда  $\delta$  Sct, таким образом, представляет собой некоторый резонатор, подстроенный под резонанс с “солнечным” периодом  $P_{\odot}$ ...

Явление “звездного” резонанса может открыть новый путь к пониманию механизма пульсаций и внутреннего строения звезд типа  $\delta$  Sct и Солнца. Интересно, что у многих пульсирующих звезд, по неясным пока причинам, с годами тоже происходит – как у Солнца – изменение доминирующего периода. Уместно поэтому напомнить, что, по мнению многих исследователей переменных, в основе пульсаций звезд некоторых типов лежит один и тот же физический механизм.

## Литература

- Брукс и др. (Brookes J.R., Isaak G.R., van der Raay H.B.) // Nature. 1976. V. 259. P. 92.  
 Вандакуров Ю.В. // Письма в Астрон. журн. 1981. Т. 7. С. 231.  
 Джембовский (Dziembowski W.) // Acta Astron. 1982. V. 32. P. 147.  
 Дике (Dicke R.H.) // Science. 1974. V. 184. P. 419.  
 Котов В.А. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1987. Т. 76. С. 10.  
 Котов В.А., Лютый В.М. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2003. Т. 99. С. 65.  
 Котов В.А., Ханейчук В.И., Цап Т.Т. // Кинематика и физика небес. тел. 2006 (в печати).  
 Котов и др. (Kotov V.A., Haneychuk V.I., Tsap T.T., Hoeksema J.T.) // Solar Phys. 1997. V. 176. P. 45.  
 Котов и др. (Kotov V.A., Koutchmy S., Koutchmy O.) // Solar Phys. 1983. V. 82. P. 21.  
 Роксбург (Roxburgh I.W.) // Nature. 1974. V. 248. P. 209.  
 Росселанд С. // Теория пульсаций переменных звезд. М.: ИЛ. 1952.  
 Северный и др. (Severny A.B., Kotov V.A., Tsap T.T.) // Nature. 1976. V. 259. P. 87.  
 Старрок и Вебер (Sturrock P.A., Weber M.A.) // Astrophys. J. 2002. V. 565. P. 1366.  
 Стэллингверф (Stellingwerf R.F.) // Astrophys. J. 1979. V. 227. P. 935.  
 Фролов М.С. // Переменные звезды типа  $\delta$  Щита. В кн. “Пульсирующие звезды” (под ред. Б.В. Кукаркина). М.: Наука. 1970. С. 240.  
 Холопов П.Н., Самусь Н.Н., Горанский В.П. и др. // Общий каталог переменных звезд. Т. 1–3. М.: Наука. 1985–1987.  
 Шеррер и Уилкоккс (Scherrer P.H., Wilcox J.M.) // Solar Phys. 1983. V. 82. P. 37.  
 Шираи (Shirai T.) // Solar Phys. 2004. V. 222. P. 199.